

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM ENGENHARIA CIVIL***

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ALVENARIA ESTRUTURAL  
COM JUNTAS FINAS DE COMPOSTO POLIMÉRICO**

**Gustavo Sipp**

São Carlos  
2023

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM ENGENHARIA CIVIL***

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ALVENARIA ESTRUTURAL  
COM JUNTAS FINAS DE COMPOSTO POLIMÉRICO**

**Gustavo Sipp**

Projeto de Pesquisa apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos.

**Área de Concentração:** Construção Civil

**Orientador:** Guilherme Aris Parsekian

**Coorientadora:** Ana Paula Margarido

São Carlos  
2023



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

---

### Folha de Aprovação

---

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Gustavo Sipp, realizada em 16/11/2023.

#### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian (UFSCar)

Prof. Dr. Humberto Ramos Roman (UFSC)

Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto (UFRN)

Prof. Dr. Roberto Márcio da Silva (UFMG)

Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian (UNISINOS)

## *DEDICATÓRIA*

---

Dedico este trabalho a todos que me ajudaram, de qualquer forma.



## *AGRADECIMENTOS*

---

Agradeço a Deus, pela ajuda nos momentos de dificuldade.

Agradeço aos meus Pais, Hari e Evani, e à minha irmã Gabriela pela confiança e apoio durante toda minha vida.

Agradeço ao meu orientador Guilherme Aris Parsekian, pela paciência e ensinamentos passados durante toda essa jornada.

Agradeço a minha coorientadora Ana Paula Margarido, pelo apoio e ensinamentos compartilhados.

Agradeço ao Centro Cerâmico do Brasil (CCB) pela possibilidade de utilizar suas instalações, equipamentos e funcionários para realização dos ensaios.

Agradeço ao Vinícius e Adriano por auxiliar na construção dos corpos de prova e na realização dos ensaios.

Agradeço ao Murilo pelo auxílio no desenvolvimento do equipamento do ensaio de flexão pelo método de alavanca.

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro à pesquisa através do processo nº 2020/13044-0.

Agradeço a todos os colaboradores da UFSCar e demais colegas de PPGECiv pelo apoio e suporte prestados.

## RESUMO

SIPP, Gustavo. **Estudo do comportamento de alvenaria estrutural com juntas finas de composto polimérico**. 2023. Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023.

Esta pesquisa teve a intenção de avaliar o comportamento da alvenaria estrutural de blocos de concreto construída com juntas de assentamento finas de composto polimérico. A construção de alvenaria estrutural com junta fina já é empregada há alguns anos na Europa, sendo que alguns países já possuem normas de projeto considerando sua aplicação. Entretanto, ainda não existem normas destinadas ao projeto de alvenaria estrutural com juntas finas de compostos poliméricos. Esta pesquisa foi desenvolvida para avaliar o comportamento da alvenaria na compressão através de ensaios realizados em prismas, pequenas paredes e paredes. Também foi desenvolvida uma etapa para avaliar a influência do preenchimento da junta vertical no comportamento ao cisalhamento da alvenaria. O comportamento na flexão da alvenaria foi avaliado através de ensaios de resistência à tração na flexão, realizados em prismas conforme procedimento descrito na ABNT NBR 16868-3 (2020) e, também, pelo método da alavanca, previsto na norma australiana AS 3700 (2017). Foram empregados três tipos de blocos de concreto de dimensão nominal de 140x190x290 mm, com diferentes valores de resistência à compressão, além de dois compostos poliméricos provenientes de diferentes fabricantes. Foram propostos procedimentos para a realização de ensaios de caracterização das propriedades mecânicas dos compostos poliméricos, principalmente na realização do ensaio de resistência à compressão foi possível perceber diferenças entre os compostos dos dois fabricantes. Essa diferença não seria percebida apenas com a realização dos ensaios de caracterização previstos na NBR 16590-2 (ABNT, 2017), portanto, podem ser empregados para diferenciar as propriedades de diferentes compostos poliméricos com maior precisão. A utilização de cunhas plásticas pode auxiliar no processo de assentamento, para garantir o alinhamento das fiadas. A NBR 16590-1 (ABNT, 2017), aponta como opcional o preenchimento da junta vertical, entretanto, os ensaios de resistência ao cisalhamento apontam que existe uma diminuição de cerca de 60% na resistência ao cisalhamento para amostras construídas sem o preenchimento da junta vertical, indicando a necessidade de seu preenchimento. Os ensaios mostram que as equações e expressões utilizadas para a alvenaria convencional não conseguem descrever o comportamento da alvenaria de junta fina assentada com compostos poliméricos de maneira adequada. Para a alvenaria convencional existe um aumento considerável do módulo de elasticidade da alvenaria conforme se aumenta a resistência à compressão do bloco utilizado. No entanto, para o caso da alvenaria de junta fina esse comportamento não foi observado, sendo que a avaliação do módulo não resultou em muita variação com o uso de bloco de diferentes valores de resistência. Uma equação foi proposta para prever o módulo da alvenaria com base nas características dos blocos e dos compostos poliméricos, possibilitando uma maior precisão na estimativa do módulo desse tipo de alvenaria. Os ensaios de desempenho das edificações foram realizados em amostras de paredes sem revestimento de argamassa ou qualquer outro. Os resultados mostraram comportamento satisfatório para os ensaios de carga suspensa e impacto de corpo duro. No ensaio de choque térmico foi observada a passagem de umidade para o lado oposto da parede durante a aspersão de água, indicando a necessidade de aplicação de revestimento para que esse tipo de alvenaria seja capaz de garantir a estanqueidade.

*Palavras-chave:* Bloco de concreto; Alvenaria; Composto polimérico; Junta de assentamento; Junta fina.

## ABSTRACT

SIPP, GUSTAVO. **Study of the behavior of structural masonry with thin joints of polymeric compound.** 2023. Doutorado (Doutorado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023.

*This research aimed to evaluate the behavior of concrete block structural masonry built with thin polymer composite mortar. The construction of structural masonry with thin joints has been used for some years in Europe, and some countries already have design standards considering its application. However, there are still no standards for the design of structural masonry with thin joints made of polymeric compounds, due to the lack of knowledge about the behavior of masonry laid with this type of material. This research was developed to evaluate the behavior of masonry in compression through tests carried out on prisms, small walls and walls. A step was also developed to evaluate the influence of filling the vertical joint on the shear behavior of the masonry. The flexural behavior of the masonry was also evaluated through bending resistance tests carried out on prisms according to the procedure described in ABNT NBR 16868-3 (2020) and also using the lever method provided for in the Australian standard AS 3700 (2017). Three types of concrete blocks with a nominal size of 140x190x290 mm were used, with different values of compressive strength and also two polymeric compounds from different producers. Procedures were proposed for performing tests to characterize the mechanical properties of polymeric compounds. When performing compressive strength tests, it was possible to notice differences between the compounds from the two producers. This difference would not be perceived just by carrying out the characterization tests specified in NBR 16590-2 (ABNT, 2017); therefore, they can be used to differentiate the properties of different polymeric compounds with greater precision. The use of plastic wedges can assist in the laying process, to ensure the alignment of the rows. NBR 16590-1 (ABNT, 2017), points out filling the vertical joint as optional, however, shear resistance tests indicate that there is a decrease of around 60% in shear resistance for samples built without filling the joint vertically, indicating the need to fill it out. The tests show that the equations and expressions used for conventional masonry cannot describe the behavior of thin-joint masonry laid with polymeric compounds. For conventional masonry there is a considerable increase in the modulus of elasticity of the masonry as the compressive strength of the block used increases, however, in the case of thin joint masonry this behavior was not observed, and the modulus did not vary much with the use of blocks of different resistance levels. An equation was proposed to predict the modulus of the masonry based on the characteristics of the blocks and polymeric compounds, enabling greater precision in estimating the modulus of this type of masonry. Performance tests were carried out on wall specimens without the presence of rendering mortar or any other surface coating. The results showed satisfactory behavior for the suspended load and hard body impact tests. For the thermal shock test, moisture was observed passing to the opposite side of the wall during water spraying, indicating the need to apply a coating so that this type of masonry is capable of guaranteeing watertightness.*

*Key-words: Concrete block; Masonry; Polymeric mortar; Bed joint; Thin joint.*

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1 - Dificuldades no assentamento.....	23
Figura 2 – Soluções adotadas no assentamento de alvenaria de vedação.....	23
Figura 3 – Dificuldades assentamento alvenaria estrutural.....	24
Figura 4 - Execução da última fiada com argamassa cimentícia.....	25
Figura 5 - Problemas com compatibilização da alvenaria de junta fina.....	26
Figura 6 - Distribuição de tensões durante a compressão de prismas.....	27
Figura 7 – Forma de ruptura observada em paredes de blocos cerâmicos.....	31
Figura 8 - Espectro característico de resina acrílica.....	33
Figura 9 – Evidências de retração em composto polimérico.....	35
Figura 10 - Resistência à compressão e índice de consistência de compostos poliméricos.....	36
Figura 11 - Corpos de prova utilizados no ensaio de tração.....	37
Figura 12 - Exemplo de comportamento de polímero no ensaio de tração.....	38
Figura 13 - Designações usadas nos ensaios de tração.....	39
Figura 14 - Esquema de ensaio de compressão.....	40
Figura 15 - Esquema de ensaio de flexão.....	41
Figura 16 - Curvas típicas do ensaio de flexão.....	43
Figura 17 - Ensaio de aderência por cisalhamento (tripletas).....	44
Figura 18 - Ensaio de flexão e de cisalhamento (tripletas).....	46
Figura 19 - Esquema dos ensaios de flexão normal e paralelo à fiada.....	49
Figura 20 - Diferenças entre comportamento de alvenaria tradicional e de junta fina.....	51
Figura 21 - Ensaios de flexão normal à fiada em alvenaria.....	52
Figura 22 - Equipamento empregado e forma de ruptura do CP no ensaio de alavanca.....	53
Figura 23 - Ensaio de compressão diagonal.....	54
Figura 24 - Pontos escolhidos para análise DIC e exemplo de resultados obtidos (curva tensão-deformação).....	55
Figura 25 - Exemplo de medições realizadas no ensaio de análise dimensional.....	62
Figura 26 - Imagens do ensaio de absorção e área líquida.....	64
Figura 27 – Corpo de prova e equipamentos utilizados nos ensaios.....	65
Figura 28 - Posicionamento do corpo de prova antes do ensaio.....	66
Figura 29 - Corpos de prova durante a realização do ensaio.....	67
Figura 30 - Carregamento para determinação do módulo de elasticidade.....	69
Figura 31 - Aplicação do compound adesivo.....	70
Figura 32 - Mesa para determinação do índice de consistência.....	73
Figura 33 - Ensaio de densidade de massa no estado fresco.....	74
Figura 34 - Moldes do ensaio de deformação transversal (dimensões em milímetros).....	78
Figura 35 - Moldagem dos corpos de prova.....	81
Figura 36 - Imagem da remoção das formas.....	82
Figura 37 - Problemas observados nas amostras.....	83
Figura 38 - Corte dos corpos de prova.....	85
Figura 39 - Gabaritos utilizados.....	86
Figura 40 - Processo de lixamento.....	87
Figura 41 - Locais onde foram feitas as medidas.....	88
Figura 42 - Ensaio de compressão em composto polimérico.....	89
Figura 43 - Determinação da massa dos compostos.....	90
Figura 44 - Chapas de acrílico usadas para moldar corpos de prova de tração e flexão.....	91
Figura 45 - Manchas de óleo observadas nos corpos de prova de tração.....	92
Figura 46 - Moldagem dos corpos de prova de flexão e tração.....	93
Figura 47 - Redução da massa para corpos de prova de flexão e tração.....	94
Figura 48 - Equipamento utilizado no ensaio de flexão e tração.....	95
Figura 49 - Aplicação de dois cordões de composto polimérico.....	96
Figura 50 - Dificuldades de aplicação.....	98
Figura 51 – Aplicação CPA-01.....	98

Figura 52 – Aplicação CPA-02.....	99
Figura 53 – Assentamento sem uso de cunha .....	100
Figura 54 – Assentamento com uso de cunha .....	101
Figura 55 – Cuidados no assentamento.....	102
Figura 56 - Esquema do ensaio de flexão paralela .....	105
Figura 57 - Esquema do ensaio de cisalhamento .....	106
Figura 58 - Serra policorte e secagem em estufa.....	107
Figura 59 - Assentamento dos corpos de prova.....	107
Figura 60 - Adaptação feita para ensaio .....	108
Figura 61 – Medição da espessura das juntas.....	109
Figura 62 - Corpos de prova antes do ensaio de cisalhamento.....	110
Figura 63 - Construção dos prismas .....	113
Figura 64 - Esquema de instrumentação utilizado e locais para medir espessura da junta	115
Figura 65 - Corpo de prova antes e após o ensaio .....	116
Figura 66 – Construção das pequenas paredes.....	117
Figura 67 - Esquema de instrumentação utilizado e locais para medir espessura da junta	118
Figura 68 – Pequenas paredes utilizadas nos ensaios .....	118
Figura 69 - Imagens da construção das paredes .....	120
Figura 70 - Esquema da instrumentação e medidas das juntas (B4 e B10) .....	121
Figura 71 - Esquema da instrumentação e medidas das juntas (B20) .....	122
Figura 72 - Imagem de um corpo de prova e da movimentação .....	123
Figura 73 - Construção dos prismas para ensaio de flexão.....	124
Figura 74 - Esquema do ensaio de tração na flexão (norma brasileira) .....	125
Figura 75 - Corpo de prova utilizado no ensaio de tração na flexão (norma brasileira) .....	126
Figura 76 - Transporte e pesagem dos corpos de prova.....	126
Figura 77 - Corpos de prova no ensaio de flexão da alavanca.....	128
Figura 78 - Fixação do bloco inferior.....	129
Figura 79 - Construção dos corpos de prova .....	132
Figura 80 - Pesagem dos corpos de prova .....	133
Figura 81 - Esquema utilizado no ensaio .....	133
Figura 82 – Esquema de fixação .....	136
Figura 83 – Ensaio de choque térmico.....	138
Figura 84 - Detalhes da fixação da mão francesa .....	139
Figura 85 - Locais de medição na mão francesa.....	140
Figura 86 - Ensaio de peças suspensas .....	141
Figura 87 - Esquema de ensaio de impacto de corpo duro .....	142
Figura 88 - Equipamentos utilizados para medir profundidade das mossas.....	143
Figura 89 - Esquema de ensaio e estrutura para impactos .....	144
Figura 90 - Exemplos da forma de ruptura.....	147
Figura 91 - Forma de ruptura observada no ensaio de tração indireta .....	156
Figura 92 - Índice de consistência dos compostos.....	159
Figura 93 - Espectro de transmissão no infravermelho de CPA-01 .....	160
Figura 94 – Espectros de transmissão no infravermelho (endurecido) .....	162
Figura 95 - Curva Termogravimétrica - CPA-01 .....	163
Figura 96 - Curva Termogravimétrica - CPA-02a.....	163
Figura 97 - Curva termogravimétrica - CPA-01 .....	165
Figura 98 - Curva termogravimétrica - CPA-02a .....	166
Figura 99 - Curva DSC da amostra CPA-01 .....	167
Figura 100 - Curva DSC da amostra CPA-02a.....	168
Figura 101 - Curva DSC da amostra CPA-01 .....	169
Figura 102 - Curva DSC da amostra CPA-02a.....	170
Figura 103 – Exemplo de ruptura dos compostos .....	174
Figura 104 - Exemplos de fissura vertical .....	175
Figura 105 - Evolução da resistência à compressão.....	175
Figura 106 - Evolução do módulo estimado .....	176

Figura 107 – Ruptura do ensaio de cisalhamento com composto CPA-01.....	182
Figura 108 - Ruptura do ensaio de cisalhamento com composto CPA-02b.....	183
Figura 109 - Curvas tensão-deformação no cisalhamento (CPA-01 - CJV).....	186
Figura 110 - Curvas tensão-deformação no cisalhamento (CPA-01 - SJV).....	188
Figura 111 - Curvas tensão-deformação no cisalhamento (CPA-02b - CJV).....	190
Figura 112 - Curvas tensão-deformação no cisalhamento (CPA-02b - SJV).....	191
Figura 113 – Curva tensão-deformação – Prisma (B4 – CPA-01).....	195
Figura 114 – Curva tensão-deformação – Prisma (B4 – CPA-02a).....	195
Figura 115 - Exemplo de ruptura observado para os prismas construídos com bloco B4 ..	196
Figura 116 - Curva tensão-deformação - prismas construídos com bloco B10.....	198
Figura 117 - Exemplos de ruptura de prismas construídos com bloco B10.....	198
Figura 118 - Curva tensão-deformação - prismas construídos com bloco B20.....	200
Figura 119 - Exemplo de ruptura observada para os prismas construídos com bloco B20	200
Figura 120 - Relação entre resistência à compressão de prismas e blocos.....	203
Figura 121 - Exemplo de ruptura de pequenas paredes construídas com o bloco tipo B4 .	206
Figura 122 - Curvas tensão-deformação - Pequena Parede (B4 - CPA-01).....	207
Figura 123 - Curvas tensão-deformação - Pequena Parede (B4 - CPA-02a).....	208
Figura 124 - Exemplos de ruptura de pequenas paredes construídas com bloco B10 .....	209
Figura 125 - Curvas tensão-deformação - Pequena Parede (B10).....	210
Figura 126 - Exemplos de ruptura de pequenas paredes construídas com bloco B20 .....	211
Figura 127 - Curvas tensão-deformação - Pequena Parede (B20).....	212
Figura 128 - Relação entre a resistência à compressão média das pequenas paredes e dos prismas .....	213
Figura 129 - Exemplo de ruptura de paredes construídas com bloco B4 .....	215
Figura 130 - Curvas tensão-deformação de paredes (B4 – CPA-01) .....	216
Figura 131 - Curvas tensão-deformação de paredes (B4 - CPA-02a).....	216
Figura 132 - Exemplo de ruptura de paredes construídas com bloco B10 .....	218
Figura 133 - Curva tensão-deformação - Parede (B10) .....	219
Figura 134 - Exemplos de ruptura de paredes construídas com bloco B20.....	220
Figura 135 - Curvas tensão-deformação - Paredes (B20).....	221
Figura 136 – Curvas relacionando a resistência média à compressão das paredes e dos prismas .....	224
Figura 137 - Curvas relacionando a resistência média à compressão das paredes e das pequenas paredes .....	225
Figura 138 - Curvas relacionando a resistência média à compressão das paredes e dos blocos de concreto.....	226
Figura 139 - Ruptura de corpos de prova na flexão .....	234
Figura 140 - Detalhes da ruptura com bloco B4.....	236
Figura 141 - Detalhes da ruptura com bloco B10.....	237
Figura 142 - Detalhes da ruptura com bloco B20.....	239
Figura 143 - Resistência à tração na flexão obtidas para diferentes amostras.....	240
Figura 144 – Curvas força-deslocamento do ensaio da alavanca (B4 - CPA-01).....	244
Figura 145 - Curvas força-deslocamento do ensaio da alavanca (B4 - CPA-02b).....	245
Figura 146 - Rupturas observadas (bloco B4).....	245
Figura 147 - Curvas força-deslocamento do ensaio da alavanca (B10 - CPA-01).....	247
Figura 148 - Curvas força-deslocamento do ensaio da alavanca (B10 - CPA-02b).....	247
Figura 149 - Rupturas observadas (bloco B10).....	248
Figura 150 - Curvas força-deslocamento do ensaio da alavanca (B20 - CPA-01).....	251
Figura 151 - Curvas força-deslocamento do ensaio da alavanca (B20 - CPA-02b).....	251
Figura 152 - Rupturas observadas (bloco B20).....	252
Figura 153 - Resistência à tração na flexão obtidas para diferentes amostras.....	253
Figura 154 - Exemplos de rupturas observadas.....	258
Figura 155 - Corpos de prova após ensaio de choque térmico (B20 - CPA-01) .....	262
Figura 156 - carga e deslocamento observados no ensaio .....	265
Figura 157 - Exemplos de danos após impacto .....	266

Figura 158 - Corpos de prova após ensaios .....	271
Figura 159 - Curva tensão-deformação sob flexão - CPA-01 .....	288
Figura 160 - Curva tensão-deformação sob flexão - CPA-02a .....	289
Figura 161 - Curva tensão-deformação sob flexão - CPA-02b .....	289
Figura 162 - Curva tensão-deformação sob tração - CPA-01.....	290
Figura 163 - Curva tensão-deformação sob tração - CPA-02a.....	291
Figura 164 - Curva tensão-deformação sob tração - CPA-02b.....	291
Figura 165 - Imagens dos ensaios feitos em argamassas cimentícias .....	293

## LISTA DE QUADROS

---

Quadro 1 - Custo para assentamento de bloco estrutural com diferentes argamassas.....	14
Quadro 2 - Vantagens e desvantagens da utilização do composto polimérico.....	15
Quadro 3 - Variação da resistência à compressão de prismas de tijolos com o aumento da espessura da junta de argamassa modificada por polímero.....	28
Quadro 4 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade de paredes.....	29
Quadro 5 - Resultado do ensaio de aderência ao cisalhamento.....	45
Quadro 6 - Resultados dos ensaios de aderência no cisalhamento e na flexão.....	47
Quadro 7 - Resultados dos ensaios de flexão.....	49
Quadro 8 - Resistência característica de tração na flexão, conforme norma brasileira.....	50
Quadro 9 - Resultados dos ensaios de compressão diagonal.....	54
Quadro 10 - Coeficiente de resistência ortogonal de blocos vazados de concreto.....	57
Quadro 11 - Ensaio de caracterização dos compostos poliméricos.....	72
Quadro 12 - Variação da resistência flexão com a idade.....	104
Quadro 13 - Energias utilizadas no ensaio de impacto de corpo duro.....	141
Quadro 14 - Resistência à compressão dos blocos tipo B4.....	146
Quadro 15 - Resistência à compressão dos blocos tipo B10.....	146
Quadro 16 - Resistência à compressão dos blocos tipo B20.....	147
Quadro 17 - Dimensões dos blocos tipo B4.....	148
Quadro 18 - Dimensões dos blocos tipo B10.....	148
Quadro 19 - Dimensões dos blocos do tipo B20.....	149
Quadro 20 – Espessura mínima das paredes dos blocos tipo B4.....	149
Quadro 21 – Espessura mínima das paredes dos blocos tipo B10.....	150
Quadro 22 – Espessura mínima das paredes dos blocos tipo B20.....	150
Quadro 23 – Dimensões dos furos dos blocos tipo B4.....	151
Quadro 24 – Dimensões dos furos dos blocos tipo B10.....	151
Quadro 25 – Dimensões dos furos dos blocos tipo B20.....	152
Quadro 26 – Massa seca e absorção de B4.....	152
Quadro 27 – Massa seca e Absorção de B10.....	153
Quadro 28 – Massa seca e absorção de B20.....	153
Quadro 29 – Relação entre a área líquida e área bruta de B4.....	154
Quadro 30 – Relação entre área líquida e área bruta de B10.....	154
Quadro 31 – Relação entre área líquida e área bruta de B20.....	154
Quadro 32 – Tração indireta do bloco B4.....	155
Quadro 33 – Tração indireta do bloco B10.....	155
Quadro 34 – Tração indireta do bloco B20.....	156
Quadro 35 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade.....	157
Quadro 36 – Resultados dos ensaios de índice, de consistência e densidade de massa ..	158
Quadro 37 - Comparação da perda de massa com valores normativos.....	164
Quadro 38 - Comparação da perda de massa com valores normativos.....	166
Quadro 39 – Resultados de DSC dos compostos.....	168
Quadro 40 – Resultados de DSC dos compostos.....	170
Quadro 41 - Resistência à compressão – 14 dias.....	171
Quadro 42 - Resistência à compressão – 28 dias.....	172
Quadro 43 - Resistência à compressão – 56 dias.....	173
Quadro 44 - Resistência à compressão – 84 dias.....	173
Quadro 45 - Resistência à compressão – 112 dias.....	174
Quadro 46 - Perda de massa.....	177
Quadro 47 - Densidade relativa em diferentes idades.....	177
Quadro 48 - Propriedades mecânicas em flexão.....	178
Quadro 49 - Propriedades mecânicas em tração.....	179
Quadro 50 – Resistência ao cisalhamento (CPA-01).....	181
Quadro 51 – Resistência ao cisalhamento (CPA-02b).....	182



Quadro 52 - Resultados cisalhamento (CPA-01 - CJV).....	187
Quadro 53 - Resultados cisalhamento (CPA-01 - SJV).....	188
Quadro 54 - Resultados cisalhamento (CPA-02b - CJV).....	190
Quadro 55 - Resultados cisalhamento (CPA-02b - SJV).....	192
Quadro 56 - Resistência à compressão de prismas construídos com bloco tipo B4.....	194
Quadro 57 - Resistência à compressão de prismas construídos com bloco tipo B10.....	197
Quadro 58 - Resistência à compressão de prismas construídos com bloco tipo B20.....	199
Quadro 59 - Grupamento de letras - diferença de médias (Tukey).....	201
Quadro 60 - Grupamento de letras - diferença de médias (Tukey).....	202
Quadro 61 - Relação da resistência de prismas e blocos .....	203
Quadro 62 - Resistência à compressão de pequena parede construídos com bloco B4....	205
Quadro 63 - Resistência à compressão de pequena parede construídos com bloco B10..	208
Quadro 64 - Resistência à compressão de pequena parede construídos com bloco B20..	210
Quadro 65 - Resistência à compressão de paredes construídas com bloco B4 .....	214
Quadro 66 - Resistência à compressão de paredes construídas com blocos B10 .....	217
Quadro 67 - Resistência à compressão de parede construída com bloco B20.....	219
Quadro 68 - Relação da resistência à compressão.....	222
Quadro 69 - Relação da resistência à compressão.....	223
Quadro 70 - Estimativa da resistência característica à compressão da parede.....	228
Quadro 71 - Relação entre módulo da alvenaria e $f_{pk}$ .....	229
Quadro 72 - Módulo estimado dos prismas construídos com bloco B4 .....	231
Quadro 73 - Módulo estimado dos prismas construídos com bloco B10 .....	232
Quadro 74 - Módulo estimado dos prismas construídos com bloco B20 .....	233
Quadro 75 - Resistência à tração na flexão perpendicular - Bloco B4.....	235
Quadro 76 - Resistência à tração na flexão - Bloco B10 .....	236
Quadro 77 - Resistência à tração na flexão - Bloco B20 .....	238
Quadro 78 - Grupamento de letras - diferença de médias (Tukey).....	241
Quadro 79 - Valores característicos de flexão perpendicular .....	242
Quadro 80 - Resistência à tração na flexão obtida no ensaio de alavanca com bloco B4 ..	243
Quadro 81 - Resistência à tração na flexão obtida no ensaio de alavanca com bloco B10	246
Quadro 82 - Resistência à tração na flexão obtida no ensaio de alavanca com bloco B20	249
Quadro 83 - Coeficiente angular .....	254
Quadro 84 - Grupamento de letras - diferença de médias (Tukey).....	255
Quadro 85 - Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão paralela.....	256
Quadro 86 - Coeficiente de resistência ortogonal .....	259
Quadro 87 - Deslocamentos horizontais observados durante ensaio.....	261
Quadro 88 - Deslocamentos observados no ensaio.....	263
Quadro 89 - Diâmetro das mossa e deslocamento horizontal .....	267
Quadro 90 - Profundidade das mossa.....	268
Quadro 91 - Critérios para impacto de corpo duro (vedações verticais externas) .....	269
Quadro 92 - Resultados impacto de corpo mole .....	270
Quadro 93 - Dimensões corpos de prova flexão .....	290
Quadro 94 - Dimensões dos corpos de prova tração .....	292
Quadro 95 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas cimentícias.....	294
Quadro 96 - Coeficiente de forma .....	295
Quadro 97 - Módulo estimado das pequenas paredes construídas com bloco B4 .....	296
Quadro 98 - Módulo estimado das pequenas paredes construídas com bloco B10 .....	297
Quadro 99 - Módulo estimado das pequenas paredes construídas com bloco B20 .....	297

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Principais Características do Sistema Construtivo de Alvenaria de Junta Fina .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Justificativa .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Objetivo Geral .....</b>	<b>19</b>
1.3.1 Objetivos Específicos .....	19
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Aspectos Construtivos de Alvenaria de Junta Fina Com Compostos Poliméricos .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Juntas de Assentamento Com Espessura Reduzida .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3 Caracterização das Propriedades Mecânicas das Argamassas Utilizadas em Alvenaria de Junta Fina.....</b>	<b>31</b>
2.3.1 Ensaio de Caracterização de Compostos Poliméricos Previstos na NBR 16590-1 .....	32
2.3.2 Caracterização das Propriedades Mecânicas de Compostos Poliméricos.....	34
<b>2.4 Comportamento da Interface Bloco/Argamassa em Alvenaria de Junta Fina.....</b>	<b>43</b>
<b>2.5 Comportamento à Flexão de Alvenaria de Junta Fina .....</b>	<b>48</b>
<b>2.6 Comportamento da Alvenaria – Cisalhamento e Isotropia .....</b>	<b>53</b>
<b>2.7 Estanqueidade e Resistência a Intempéries dos Elementos em Alvenaria.....</b>	<b>58</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>60</b>
<b>3.1 Primeira Etapa – Caracterização dos Materiais .....</b>	<b>60</b>
3.1.1 Caracterização dos Blocos de Concreto .....	61
3.1.2 Caracterização dos Compostos Poliméricos.....	71
<b>3.2 Segunda Etapa – Estudo do Assentamento .....</b>	<b>95</b>
3.2.1 Considerações Iniciais Sobre o Assentamento .....	96
3.2.2 Avaliação da Influência da Junta Vertical .....	104
<b>3.3 Terceira Etapa - Estudo do Comportamento à Compressão .....</b>	<b>112</b>
3.3.1 Compressão dos Prismas .....	113
3.3.2 Compressão das Pequenas Paredes .....	116
3.3.3 Compressão das Paredes.....	119
<b>3.4 Quarta Etapa – Estudo da resistência à Tração na Flexão Perpendicular à Junta de Assentamento Horizontal.....</b>	<b>123</b>
3.4.1 Ensaio da Norma Brasileira – ABNT NBR 16868-3 .....	124
3.4.2 Ensaio da Norma Australiana – AS 3700 (2017) .....	127
<b>3.5 Quinta Etapa – Avaliação da Resistência à Tração na Flexão Paralela e da Isotropia.....</b>	<b>131</b>
<b>3.6 Sexta Etapa – Estudo do Desempenho.....</b>	<b>135</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>145</b>
<b>4.1 Resultados da Primeira Etapa – Caracterização dos Materiais .....</b>	<b>145</b>

4.1.1	Blocos de Concreto.....	145
4.1.1	Compostos Poliméricos .....	157
<b>4.2</b>	<b>Resultados da Segunda Etapa – Estudo Preliminar do Assentamento e Análise do Cisalhamento .....</b>	<b>180</b>
4.2.1	Análise da Influência do Preenchimento da Junta Vertical .....	180
4.2.2	Análise das Deformações Obtidas no Ensaio de Cisalhamento .....	185
<b>4.3</b>	<b>Resultados da Terceira Etapa – Estudo Compressão .....</b>	<b>193</b>
4.3.1	Resultados dos Ensaios de Compressão em Prismas .....	193
4.3.2	Resultados dos Ensaios de Compressão em Pequenas Paredes.....	205
4.3.3	Resultados dos Ensaios de Compressão em Paredes.....	213
<b>4.4</b>	<b>Resultados da Quarta Etapa – Estudo do Comportamento à Flexão.....</b>	<b>234</b>
4.4.1	Resultados do Ensaio de Resistência à Tração na Flexão da NBR 16868-3 .....	234
4.4.2	Resultados do Ensaio de Flexão Pelo Método da Alavanca (Bond Wrench).....	243
<b>4.5</b>	<b>Resultados da Quinta Etapa – Avaliação da Resistência à Tração na Flexão Paralela e da Isotropia .....</b>	<b>256</b>
<b>4.6</b>	<b>Resultados da Sexta Etapa – Estudo do Desempenho.....</b>	<b>261</b>
4.6.1	Resultados – Ensaio de Choque Térmico .....	261
4.6.2	Resultados – Ensaio de Solicitações de Peças Suspensas .....	262
4.6.3	Resultados – Ensaio de Impacto de Corpo Duro .....	265
4.6.4	Resultados – Ensaio de Impacto de Corpo Mole.....	269
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>273</b>
5.1	Sugestões Para Estudos Futuros .....	279
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>281</b>

# 1. INTRODUÇÃO

O emprego de estruturas de alvenaria em nossa sociedade já é consolidado. Entretanto, isso não significa que esse tipo de estrutura não possua espaço para desenvolver e aperfeiçoar as técnicas e procedimentos empregados em seus diversos processos construtivos. Pelo contrário, cada vez mais surgem novas técnicas e materiais que podem ser empregados visando promover redução de custo, agilidade na execução e aprimoramento das propriedades dos elementos de alvenaria.

Nesse contexto de inovação e aprimoramentos das estruturas de alvenaria, pode ser inserida a alvenaria de junta fina, que tem a capacidade de promover incrementos nas propriedades mecânicas da alvenaria, além de proporcionar a redução na quantidade de argamassa utilizada nas juntas de assentamento e maior agilidade no processo construtivo.

De acordo com Thamboo, Dhanasekar e Yan (2011), a tecnologia de construção de alvenaria com junta fina surgiu na Europa há mais de 27 anos, com o objetivo de aumentar a produtividade e qualidade das construções, transformando e ampliando a aplicação da alvenaria, juntamente com outras técnicas desenvolvidas.

Walliman, Baiche e Ogden (2008) definem que a tecnologia da alvenaria de junta fina surgiu há mais de 25 anos, na Holanda, sendo que esta técnica estava baseada na utilização de uma argamassa colante com grande proporção de cimento, adições minerais finas e polímeros. Segundo os autores, essa argamassa modificada por polímeros é mais resistente, cura e atinge resistências iniciais de forma mais rápida do que a argamassa tradicional, o que proporciona aumento de velocidade e produtividade para essa tecnologia construtiva. Além disso, os autores apontaram aumento na resistência à flexão e à tração para esse tipo de alvenaria, quando comparada com a tradicional.

Argamassas cimentícias com adições poliméricas costumam ser utilizadas para assentamento de alvenaria, por possuírem incrementos nas propriedades mecânicas e na capacidade de aderência com as unidades. Entretanto, com o desenvolvimento de novas tecnologias, estão sendo utilizados compostos poliméricos (não cimentícios), no processo de execução de alvenaria de junta fina. Como esse tipo de material é fabricado em indústria e pode ser vendido em embalagens prontas para uso, esse possui capacidade de promover incrementos ainda maiores na agilidade das construções de alvenaria de junta fina e redução de desperdícios.

A denominação adotada pela NBR 16590-1 (ABNT, 2017) para esse tipo de material de assentamento é “composto polimérico não cimentício”. Segundo a norma, esse material consiste em uma mistura homogênea e industrializada de agregados miúdos, cargas minerais, água e uma blenda de resinas poliméricas. Portanto, apesar de existirem algumas publicações empregando o termo “argamassa polimérica” para se referir a esse material, neste trabalho será utilizado como referência a definição da norma e o material será tratado como composto polimérico de assentamento (CPA).

Embora a construção de alvenaria de juntas finas possa promover melhorias no processo construtivo, a utilização dessa técnica ainda precisa ser investigada, para se poder afirmar que as melhorias no processo construtivo também se refletem em desempenho estrutural adequado quando comparado à alvenaria tradicional. Esse pensamento é válido, principalmente para o caso da utilização de compostos poliméricos no assentamento, que é mais recente.

Neste contexto insere-se a presente pesquisa, visando descrever o comportamento mecânico apresentado por elementos de alvenaria estrutural construídos com diferentes resistências de blocos de concreto, assentados com juntas finas de argamassas poliméricas. Também pretendeu-se verificar se o desempenho apresentado por esses elementos pode ser considerado satisfatório para emprego como sistema de vedação vertical com função estrutural.

No próximo subitem são apresentadas as principais características do sistema construtivo de alvenaria de junta fina, considerando, principalmente, a utilização de compostos poliméricos não cimentícios no assentamento.

## **1.1 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA CONSTRUTIVO DE ALVENARIA DE JUNTA FINA**

Segundo Reis (2018), quando comparada à alvenaria tradicional, os gastos com materiais utilizados na alvenaria de junta fina costumam ser maiores em cerca de 41%. Isso se deve ao fato de os compostos poliméricos possuírem um custo mais elevado e, também, ao fato desse sistema construtivo apresentar um maior consumo de blocos, em relação à alvenaria tradicional. No entanto, a autora aponta que, embora exista o aumento dos gastos com material, a redução proporcionada com a mão de obra, devido à aceleração do processo construtivo, compensa esse aumento. De acordo com a mesma, o consumo de compostos poliméricos empregados no assentamento da alvenaria estrutural foi superior ao indicado pelos fabricantes, com cerca de 3,38 kg de composto por metro quadrado de alvenaria executada. Com respeito à redução do desperdício de materiais, ela aponta que existe a

redução de perdas no preparo e transporte da argamassa, mas, devem ser contabilizadas as perdas geradas com quebras de blocos e na geração de entulhos, que ocorrem com maior frequência na alvenaria de junta fina, dentre outros motivos, devido à falta de apropriada modulação da alvenaria.

O aumento da quantidade de blocos é esperado para a construção de alvenaria de junta fina, pois com a redução da espessura das juntas de assentamento, uma maior quantidade de blocos será necessária para preencher uma mesma área de parede.

Rocha (2012) ressalta que a atividade de assentamento executada com composto polimérico, para alvenaria estrutural ou de vedação, é em média, 25% mais econômica para cada metro quadrado produzido, em comparação com as argamassas cimentícias industrializadas e preparadas na obra. Os custos com a mão de obra e com material, considerando a execução de alvenaria com bloco estrutural, para as 3 argamassas avaliadas pela autora, podem ser visualizados no Quadro 1.

**Quadro 1 - Custo para assentamento de bloco estrutural com diferentes argamassas**

<b>Tipo de argamassa</b>	<b>Mão de obra (R\$/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Material (R\$/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Total (R\$/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Total (%)</b>
<b>Preparada em obra (traço 1:5, em volume)</b>	23,98	27,02	51,00	100
<b>Composto polimérico</b>	5,24	27,82	33,06	64
<b>Argamassa industrializada</b>	9,15	33,86	43,01	84

Fonte: Adaptado de Rocha (2012).

Como pode ser observado no Quadro 1, os gastos com a mão de obra no caso da argamassa preparada em obra, são bem maiores do que para a argamassa cimentícia industrializada e para o composto polimérico. Em contraponto, os gastos com material tendem a ser menores para a argamassa preparada na obra. No geral, comparando os gastos com mão de obra e material, pode ser observado que existe uma redução de 64% e 84%, no metro quadrado assentado de alvenaria, quando se comparam, respectivamente, o composto polimérico e a argamassa cimentícia industrializada com a argamassa preparada em obra.

Moreira, Vermelho e Zani (2017) realizaram entrevistas com profissionais da construção civil da região da grande Vitória/ES, que trabalharam com compostos poliméricos no assentamento de alvenaria de vedação e identificaram as principais vantagens e desvantagens para sua utilização apontadas no Quadro 2.

**Quadro 2 - Vantagens e desvantagens da utilização do composto polimérico**

<b>VANTAGENS</b>	<b>DESVANTAGEM</b>
Redução de mão de obra	Maior consumo de blocos
Aumento de produtividade	Treinamento da mão de obra
Redução na quantidade de insumos e equipamentos	Resistência por parte da mão de obra
Diminuição na quantidade de resíduo	Exigência de blocos de maior qualidade
Simplificação da logística no canteiro de obras	Uso da argamassa convencional na primeira fiada
Redução nos custos referentes a alvenaria	Não é recomendada para alvenaria estrutural

Fonte: Moreira, Vermelho e Zani (2017), p. 24.

Dentre as vantagens apontadas no Quadro 2 para utilização do composto polimérico, deve-se destacar o aumento na produtividade da alvenaria, a redução dos custos na execução e, também, a diminuição na geração de resíduos. Como desvantagens identificadas, pode-se destacar a necessidade apontada de ainda ser necessário o uso de argamassa convencional na primeira fiada, para permitir o seu nivelamento, haja visto que com a redução na espessura da junta de assentamento com a utilização de compostos poliméricos, existe muita dificuldade no processo de nivelamento e regularização das imperfeições encontradas na superfície que dará início ao assentamento.

Outro fator apontado como desvantagem para a utilização da alvenaria de junta fina foi a qualidade dos blocos, que pode ser interpretada como a necessidade de se trabalhar com unidades de alvenaria que apresentam menor variação dimensional, pois, os ajustes das imperfeições e diferenças entre as dimensões dos blocos que eram feitas no assentamento de cada fiada, agora não possuem mais tanto espaço, devido à redução da espessura da junta de assentamento. De acordo com Reis (2018), o nivelamento das fiadas é um detalhe construtivo muito importante na produção da alvenaria de junta fina, sendo que os blocos dessa alvenaria ficam muito próximos de se apoiarem uns aos outros, o que faz com que a precisão dimensional dos blocos seja um fator importante. A autora também salienta que muitos problemas são encontrados na correção do nivelamento da última fiada dos elementos construtivos de alvenaria, na região do encunhamento.

Branco (2015) analisou o processo de uma construtora em Santarém-PA que havia adotado a utilização de compostos poliméricos para assentamento da alvenaria de vedação e, apesar de terem sido encontrados obstáculos iniciais, os benefícios gerados na produtividade e com relação à redução dos custos com o serviço de assentamento, se sobressaíram às dificuldades. Alguns aspectos positivos destacados pelo autor, em virtude

da adoção dos compostos poliméricos foram: o menor espaço necessário para estoque de materiais; o maior tempo de validade dos materiais, que permite estocar maior quantidade; a eliminação do processo de mistura da argamassa, que proporciona redução de desperdícios e elimina o risco de erros no traço utilizado; o menor tempo de pega, que reduz o tempo necessário para executar as demais fiadas; a maior resistência mecânica da alvenaria; a maior sustentabilidade da construção da alvenaria, por não serem utilizados cimento e areia na argamassa; o menor custo final da alvenaria; além do aumento da produtividade; dentre outros.

Os aspectos negativos encontrados pelo autor supracitado foram: o maior custo do material; a necessidade de comprar maior quantidade de materiais devido ao aumento da produção; a dificuldade no ajuste do nível das fiadas pela espessura pequena da junta, que prejudica a capacidade de compensar a diferença entre os blocos; a dificuldade de acertar a altura das esquadrias e do encunhamento, por não haver a possibilidade de ajustes na espessura das juntas; pela maior rigidez da alvenaria, que pode fazer com que surjam fissuras devido a movimentação do edifício; a maior permeabilidade, devido às juntas verticais não estarem sendo preenchidas, para proporcionar maior agilidade no assentamento; dentre outros.

Embora a construção de alvenaria de juntas finas possa promover melhorias no processo construtivo, a utilização dessa técnica ainda precisa ser investigada, para ser possível afirmar que as melhorias identificadas no processo construtivo também se refletem em desempenho estrutural adequado, quando comparado às diversas características já conhecidas da alvenaria tradicional. A inexistência de normativas nacionais destinadas ao projeto estrutural desse tipo de alvenaria, ainda mais com a utilização de compostos poliméricos no assentamento, fazem com que o desenvolvimento de estudos sobre o tema seja primordial para o desenvolvimento da construção civil.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

A argamassa de assentamento tem como função unir os blocos utilizados na confecção das paredes, garantindo aderência suficiente para transmitir tensões e deformações que são necessárias para proporcionar um desempenho adequado ao conjunto, tornando-o capaz de resistir aos esforços atuantes e, às ações ambientais.

O comportamento das estruturas usuais já é conhecido, entretanto, o desempenho da alvenaria com juntas finas precisa ser investigado, ainda mais com a utilização de compostos poliméricos, que apresentam comportamento diferente das argamassas tradicionais de areia, cal e cimento. Dessa forma, devem ser realizados estudos destinados a criar um acervo de



dados considerável, capaz de embasar a criação de normativas destinadas ao projeto desse tipo de estruturas, que irão permitir a disseminação dessa tecnologia no mercado da construção civil brasileira.

Uma das desvantagens apresentadas no Quadro 2 para a utilização de compostos poliméricos seria o fato de ele não ser recomendado para utilização em alvenaria estrutural. Esse fato se deve em parte, à inexistência de norma técnica nacional voltada para alvenaria estrutural, considerando emprego de junta fina com a utilização de composto polimérico, todavia, para a alvenaria de vedação o país já possuía norma técnica.

Segundo Moreira, Vermelho e Zani (2017), um dos principais motivos apontados por alguns profissionais da construção civil para não utilizarem ou especificarem o uso de compostos poliméricos, foi a falta estudos técnicos que comprovem o desempenho do produto a médio e longo prazo.

Esses fatores fazem com que o desenvolvimento de pesquisas sobre a alvenaria estrutural de junta fina seja fundamental, para dar embasamento ao setor da construção sobre o comportamento desse tipo de estrutura, assim como, providenciar o desenvolvimento de normas que regulem o emprego desse método construtivo cada vez mais atuante no mercado nacional.

Segundo Raymundo, Parsekian e Raymundo (2017), a utilização de composto polimérico contribui para uma construção mais enxuta, pois ele já vem pronto para uso, eliminando a necessidade de gastos com o armazenamento das matérias primas, mistura dos componentes e alocação de operários nesse processo. Sendo que isso tudo contribui para o aumento da organização do processo, produtividade e aumento do controle da qualidade do material de assentamento, que agora passa a ser industrializado.

Reis (2018) considera a utilização de composto polimérico na execução de alvenaria eficiente, pois tem a capacidade de industrializar parte do processo construtivo (preparo da argamassa), aumentando a produtividade e reduzindo custos e desperdício.

Outra questão que favorece a utilização de composto polimérico em substituição à argamassa cimentícia tradicional é o fato de a produção de cimento estar associada a uma grande quantidade de emissão de gases do efeito estufa como o CO<sub>2</sub>, decorrentes, principalmente, do processo de produção do cimento. Segundo a SNIC (2019), a quantidade de cimento produzida no ano de 2019 no Brasil foi, de aproximadamente, 57 milhões de toneladas. Considerando que, de acordo com SNIC (2020), a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida por tonelada de cimento produzido é pouco inferior a 600 kg/ton, pode-se estimar uma quantidade emitida de CO<sub>2</sub> equivalente a, aproximadamente, 34,2 milhões de toneladas no ano de 2019.

Portanto, com a substituição de parte do cimento utilizado nas argamassas pode-se contribuir para redução da emissão de gases do efeito estufa.

Como a Europa já utiliza essa técnica construtiva há mais tempo, a utilização de juntas finas de assentamento está prevista na norma de projetos de alvenaria estrutural Eurocode 6 (CEN, 2021), que define a espessura desse tipo de junta como sendo situada entre 0,5 e 3 mm. Além da norma europeia, a norma australiana AS 3700 (2017), também contempla a utilização de argamassa de junta fina para blocos celulares autoclavados, definindo a espessura dessa junta como sendo não inferior a 2 mm e, não maior que 4 mm.

Embora já existam normas em outros países destinadas ao projeto de estruturas de alvenaria de junta fina, essas, podem não ser adequadas para o emprego dos materiais usualmente utilizados nas obras do Brasil, que possuem características diferentes dos empregados mundo afora, fazendo com que o desenvolvimento de normativa nacional seja primordial para a disseminação desse tipo de estrutura de alvenaria no mercado da construção civil nacional.

Outro incentivo para o desenvolvimento de estudos nacionais sobre o assunto é o fato de ainda não estar sendo englobado, nem mesmo nas normas de projeto de estruturas de alvenaria internacional a utilização de compostos poliméricos para a execução desse tipo de alvenaria. Tradicionalmente, a argamassa utilizada para esse tipo de edificação é cimentícia, dotada de algumas adições poliméricas. O desenvolvimento de estudos nacionais com a utilização de compostos poliméricos para assentamento pode ser interessante, devido ao caráter de avanço científico que pode colocar o país a frente nos estudos desenvolvidos com esse material, visando a aplicação em estruturas de alvenaria.

Dessa forma, fica clara a necessidade de desenvolver estudos destinados a embasar o desenvolvimento e aplicação dessa tecnologia construtiva, demonstrando suas vantagens e limitações para o emprego na construção civil.

No Brasil, foram desenvolvidas as normas NBR 16590-1 (ABNT, 2017) e NBR 16590-2 (ABNT, 2017), que estabelecem as características para o uso de compostos polimérico para o assentamento de alvenaria de vedação, prevendo a utilização de juntas com espessura de 1 a 6 mm. Entretanto, ainda não existe norma para projeto ou execução de alvenaria com função estrutural que contemple a utilização de assentamento com juntas finas, seja com a utilização de compostos poliméricos, ou, com a utilização de argamassas modificadas por polímeros.

Outros países já preveem a utilização de alvenaria de juntas finas nas normas de projeto de alvenaria estrutural. Para o Brasil, é importante que se desenvolva estudos para

embasar eventuais futuras normas que contemplem e adaptem essas e outras inovações, permitindo, o desenvolvimento e aplicação da tecnologia em território nacional.

### **1.3 OBJETIVO GERAL**

O objetivo deste trabalho é descrever o comportamento mecânico de alvenaria estrutural de blocos de concreto assentados com juntas finas de compostos poliméricos e o desempenho estrutural desses elementos. Para tanto objetivou-se entender o comportamento dos materiais empregados na construção dos elementos de alvenaria, em especial o composto polimérico, e propor procedimentos para sua caracterização. Compreender as práticas construtivas que proporcionam maior desempenho também fizeram parte destes objetivos.

#### **1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para alcançar o objetivo geral dessa pesquisa, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Propor a realização de ensaios específicos para caracterização dos compostos poliméricos de assentamento;
- Avaliar a resistência ao cisalhamento de amostras de alvenaria de blocos de concreto assentados com juntas finas de compostos poliméricos. Avaliar a influência do preenchimento da junta vertical na resistência ao cisalhamento da alvenaria de junta fina.
- Verificar se algumas das equações previstas na NBR 16868-1 (ABNT, 2020) ou no Eurocode 6 (CEN, 2021), para estimar e descrever o comportamento de estruturas de alvenaria, podem ser empregadas para a alvenaria de junta fina utilizada neste estudo;
- Comparar os resultados obtidos para caracterização das propriedades à flexão da alvenaria através dos métodos previstos na norma brasileira NBR 16868-3 (ABNT, 2020) e australiana AS 3700 (2017), para verificar qual é mais eficiente na previsão dessa propriedade;
- Através da obtenção do coeficiente de ortogonalidade, identificar se os elementos de alvenaria de junta fina apresentam comportamento isotrópico, como descrito por alguns pesquisadores;

- Verificar se a alvenaria estrutural de blocos de concreto assentada com juntas finas de compostos poliméricos possui potencial de atender aos critérios da norma de desempenho das edificações para sistemas de vedações verticais com função estrutural.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Existem algumas diferenças entre o comportamento apresentado pelas estruturas de alvenaria tradicionais e pelas estruturas de alvenaria com juntas finas. Algumas dessas diferenças serão apresentadas nos subitens demonstrados a seguir.

### 2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE ALVENARIA DE JUNTA FINA COM COMPOSTOS POLIMÉRICOS

A construção de elementos de alvenaria com juntas de espessura reduzida e com a utilização de compostos poliméricos no assentamento possui algumas características diferentes da alvenaria convencional, sendo necessária a adoção de outros cuidados e técnicas no processo construtivo, visando garantir sua qualidade.

Uma das principais diferenças que impactam no processo construtivo é referente à espessura reduzida da junta de assentamento.

Para o caso da alvenaria estrutural convencional, com blocos, a NBR 16868-2 (ABNT, 2020) determina que a espessura das juntas horizontais e verticais de argamassa devem ter espessura de 10 mm e a variação máxima permitida para essa espessura é de  $\pm 3$  mm. Ou seja, para alvenaria convencional com blocos a variação máxima permitida para a espessura da junta é de 30% para mais ou para menos.

Para o caso da alvenaria sem função estrutural de junta fina de composto polimérico a variação permitida é de 1 a 6 mm, conforme a NBR 16590-1 (ABNT, 2017). Caso fosse adotado o valor intermediário de 3 mm como referência para essa espessura de junta e aplicar o mesmo valor percentual de variação utilizado para alvenaria convencional (30%), seria obtido o valor de 0,9 mm de variação. Esse limite de variação seria muito baixo e impraticável, considerando os limites impostos pelas normativas atuais nas dimensões dos blocos estruturais e de vedação fabricados.

De acordo com a NBR 15270-1 (ABNT, 2017) a tolerância individual nas dimensões de blocos cerâmicos e tijolos de vedação (altura, largura e comprimento) é de  $\pm 5$  mm e na média de  $\pm 3$  mm. Para o caso de blocos cerâmicos e tijolos estruturais a tolerância individual é de  $\pm 3$  mm com relação às dimensões nominais. Para o caso de blocos de concreto a norma NBR 6136 (ABNT, 2016) estabelece que a tolerância máxima permitida é de  $\pm 2$  mm para largura e de  $\pm 3$  mm para o comprimento e altura.

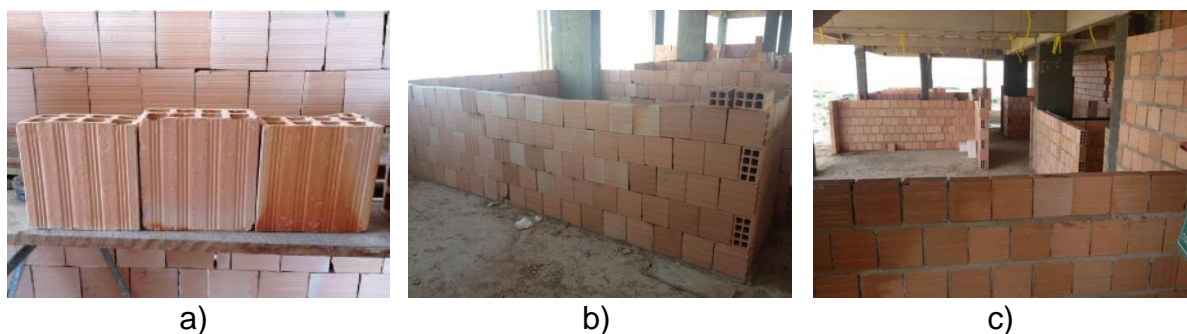
O fato de as dimensões nominais para blocos estruturais serem menores, permite a redução dos efeitos da variação dimensional no assentamento. Entretanto, ao se comparar essa tolerância com a variação para uma espessura de junta fina com, aproximadamente, 3 mm de espessura, essa ainda pode ser considerada grande.

No Eurocode 6 (CEN, 2021) é considerada uma espessura de junta de 0,5 a 3 mm para alvenaria de junta fina, sendo que a planicidade e paralelismo das faces de assentamento devem ser adequados quando utilizada alvenaria de junta fina. Essa variação na espessura da junta é menor do que a prevista na norma brasileira e, conseqüentemente, é esperado que as tolerâncias dimensionais das unidades utilizadas no assentamento desse tipo de alvenaria sejam mais restritas. Um exemplo disso pode ser observado na norma BS EN 771-4 (BSI, 2015) que prevê as tolerâncias dimensionais de blocos de concreto celular autoclavado. São previstas variações para alvenaria de junta fina para dois tipos de argamassa TLMA e TLMB. A tolerância para argamassa tipo TLMA é de  $\pm 3$  mm para comprimento e  $\pm 2$  mm para altura e largura. A tolerância para argamassa tipo TLMB é de  $\pm 1,5$  mm para comprimento,  $\pm 1$  mm para altura e  $\pm 1,5$  mm para largura. Além das tolerâncias dimensionais, para a argamassa tipo TLMB também existe tolerância para planicidade e paralelismo das faces de assentamento, sendo estes valores considerados adequados quando inferiores ou iguais a 1,0 mm.

Essa redução da espessura da junta de assentamento pode fazer com que variações nas dimensões dos blocos utilizados em sua execução, que são consideradas pequenas, ou pouco relevantes para a alvenaria convencional, apresentem dificuldades significativas na execução do assentamento das unidades de alvenaria de junta fina, prejudicando a qualidade de tarefas como alinhamento e prumo das fiadas de blocos. Como resultado dessa dificuldade presente no assentamento, pode surgir um gasto maior de tempo para assentamento dos blocos e, até mesmo, retrabalho, quando necessário repetir o processo de assentamento que não ficaram de maneira adequada. Podem existir casos em que seja necessário escolher blocos mais adequados para o assentamento, dentre os disponíveis, para que sua altura (maior ou menor) facilite o nivelamento da fiada em um trecho mais irregular.

Branco (2015) apresenta algumas dificuldades observadas ao comparar o assentamento de alvenaria de vedação com argamassa cimentícia convencional e com a utilização de juntas finas de compostos poliméricos. Como pode ser observado na Figura 1-a existe uma variação considerável nas dimensões dos blocos cerâmicos utilizados, o que provoca uma maior dificuldade no nivelamento das fiadas assentadas com composto polimérico (Figura 1-b), enquanto para o caso do assentamento com argamassa convencional e espessura maior na junta, é possível perceber mais facilidade no nivelamento (Figura 1-c).

**Figura 1 - Dificuldades no assentamento**



Fonte: Branco (2015), p. 54-56.

Para facilitar o processo de assentamento da alvenaria de junta fina e aumentar a qualidade da execução, Branco (2015) aponta algumas alternativas, como a utilização de lascas de blocos para auxiliar no nivelamento das fiadas (Figura 2-a) e o emprego de juntas de assentamento intermediárias com argamassa cimentícia para garantir o nivelamento das fiadas (Figura 2-b).

**Figura 2 – Soluções adotadas no assentamento de alvenaria de vedação**



Fonte: Branco (2015), p. 56-57.

Blocos cerâmicos utilizados em alvenaria de vedação exibem uma tolerância dimensional maior, o que pode intensificar os problemas no assentamento da alvenaria de junta fina, como mostrado acima. Para o caso da alvenaria estrutural a variação dimensional permitida para os blocos é menor, entretanto, ainda pode ser suficiente para ocasionar dificuldades no processo de assentamento da alvenaria de junta fina.

Reis (2018) observou em uma obra com utilização de blocos cerâmicos estruturais assentados com juntas finas de compostos poliméricos que os blocos utilizados no geral eram uniformes, produzindo fiadas regulares (Figura 3-a), no entanto, ainda foram observados trechos em que a variação dimensional dos blocos provocava ondulações nas fiadas, como pode ser observado na (Figura 3-b) e (Figura 3-c). A autora também observou a adoção de lascas de blocos para auxiliar no nivelamento de algumas fiadas (Figura 3-d).

**Figura 3 – Dificuldades assentamento alvenaria estrutural**



a)



b)



c)



d)

Fonte: Reis (2018), p. 83-84

Para garantir que a altura final da parede prevista de 2,65 metros fosse atingida, a solução adotada foi realização do assentamento da última fiada com argamassa cimentícia, permitindo maior flexibilidade para ajustar o nível em diferentes pontos das paredes. Essa última fiada era composta por blocos canaleta com forma "U" e "J". Imagem do assentamento da última fiada pode ser observada na Figura 4.



**Figura 4 - Execução da última fiada com argamassa cimentícia**

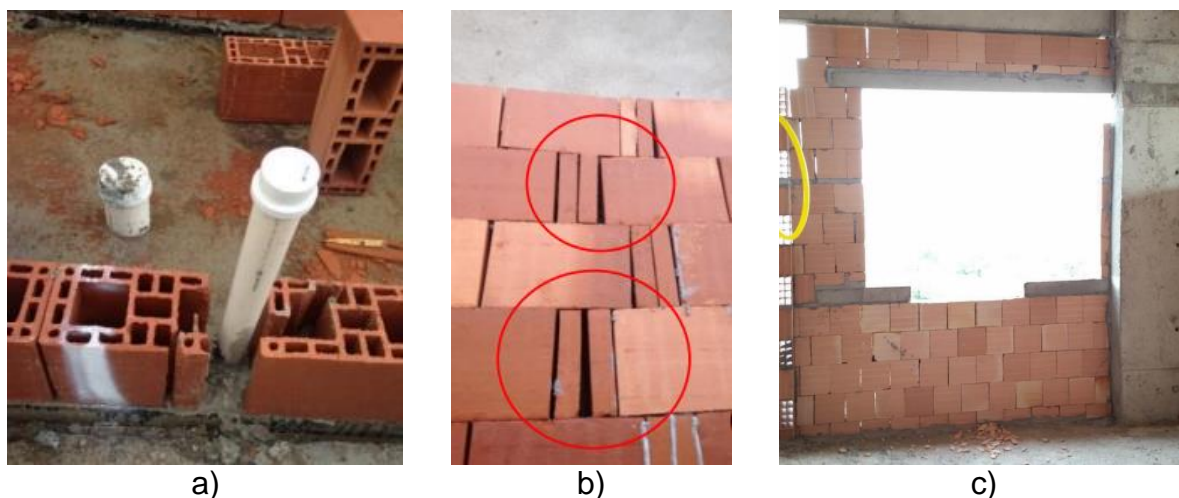


Fonte: Reis (2018), p. 86.

Como na alvenaria de junta fina existe a redução da espessura das juntas de assentamento, é necessário fazer uma compatibilização modular da alvenaria considerando essas novas dimensões de blocos e espessura de junta. Reis (2018) identificou que a falta de compatibilização modular foi responsável pelo surgimento de lacunas entre os blocos nas fiadas horizontais (Figura 5-b). A falta de compatibilização da alvenaria com as instalações hidráulicas provocaram a necessidade de cortes em blocos, gerando maior quantidade de entulho (Figura 5-a).

Na direção vertical das paredes também é necessário refletir sobre a compatibilização, considerando as novas espessuras das juntas. Isso significa em repensar a altura total das paredes considerando essas novas condições e, também, a altura das vergas e contravergas utilizadas para instalação de esquadrias. Para o caso da alvenaria de vedação essa preocupação pode ser menor do que no caso da alvenaria estrutural. Um exemplo disso foi a solução observada por Branco (2015), em que foram realizados cortes para reduzir a altura de alguns blocos cerâmicos de vedação para resolver os problemas com a altura da parede e com a altura das vergas e contravergas utilizadas (Figura 5-c).

**Figura 5 - Problemas com compatibilização da alvenaria de junta fina**



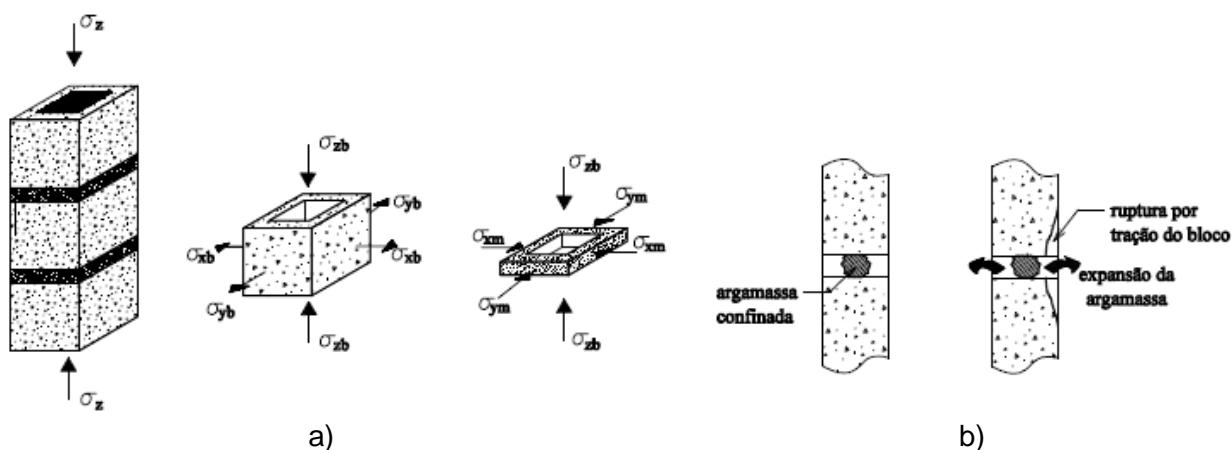
Fonte: Reis (2018), p. 86.

Outras questões construtivas merecem ser avaliadas para esse tipo de alvenaria de junta fina com a utilização de compostos poliméricos, como por exemplo, se existem restrições referentes às condições climáticas em que as obras são executadas, em climas muito quentes ou frios, ou em condições de umidade muito baixa ou elevada. Se a execução das atividades de grauteamento pode ser realizada da mesma maneira que a alvenaria convencional, ou existem algumas preocupações extras referentes a essa etapa. A execução do revestimento para esse tipo de alvenaria pode ser executada logo na sequência após o término de sua execução, ou deve ser aguardado um período mínimo de tempo.

## 2.2 JUNTAS DE ASSENTAMENTO COM ESPESSURA REDUZIDA

De acordo com Gomes (2001), a distribuição de tensões em um prisma submetido a esforços de compressão não é uniforme, pois o prisma está submetido a um estado triaxial de tensões que são oriundas das diferenças entre as propriedades elásticas dos materiais, que faz com que surjam tensões em diferentes sentidos em cada um dos materiais que compõem o prisma, conforme mostrado na Figura 6-a. Segundo o autor, a diferença entre o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do bloco e da argamassa faz com que a argamassa provoque tensões de tração nas paredes do bloco. Na região central da junta de assentamento, no centro das paredes do bloco, a argamassa se encontra confinada, entretanto, a argamassa que se encontra nas extremidades das paredes dos blocos tende a expandir, porém, essa expansão é restringida pelo atrito com as paredes do bloco, fazendo com que surjam esforços de tração na interface entre os materiais. Esse comportamento pode ser compreendido na Figura 6-b.

**Figura 6 - Distribuição de tensões durante a compressão de prismas**



Fonte: Gomes (2001), p. 24 e 27. Legenda: a) Estado de tensões do prisma; b) Expansão da argamassa e tração na parede do bloco.

Dessa forma, caso a espessura da junta de assentamento seja alterada, ocorre uma mudança no efeito de confinamento proporcionado na argamassa. Devido a isso, muitos pesquisadores identificaram que existe uma tendência de redução na resistência à compressão dos elementos de alvenaria quando se aumenta a espessura da junta de assentamento, pois, dentre outros motivos, o efeito de confinamento da argamassa é reduzido.

De acordo Hendry, Sinha e Davies (2004), o aumento da espessura da junta tende a reduzir a resistência da alvenaria, pois gera tensões de tração maiores do que na alvenaria de junta fina. Segundo os autores, juntas de assentamento com espessuras de 16 a 19 mm resultam em redução na resistência à compressão de até 30%, em comparação com juntas de 10 mm.

Mohamad (1998) identificou que a resistência à compressão de prismas construídos com juntas de argamassa de 7 mm aumentou cerca de 32 % comparado à resistência de prismas ensaiados com os mesmos materiais e junta de assentamento de 10 mm. Da mesma forma, a relação prisma/bloco demonstrou aumento de 0,56 para 0,75, indicando um aumento de 34% com a utilização da junta mais fina. Segundo o autor, existem vários trabalhos que apontam a redução da resistência da alvenaria com o aumento da espessura da junta.

Portanto, com a redução da espessura da junta de assentamento, existe uma tendência de que a resistência à compressão dos prismas se aproxime da resistência à compressão dos blocos. Dessa forma, a relação prisma/bloco tenderá a ser mais próximo de 1 para as alvenarias com juntas mais finas.

Essa mesma tendência de comportamento foi observada por Walliman, Baiche e Ogden (2008) nos ensaios de compressão em prismas de tijolos de junta fina, feitos com

argamassa cimentícia modificada com polímero, obtendo os resultados expostos no Quadro 3. Como pode ser observado, os valores médios de resistência à compressão passaram de 14,3 para 17,5 MPa, quando comparados prismas executados com juntas de 10 e 3 mm de espessura, respectivamente. Esses resultados representam um aumento de cerca de 22% na resistência a compressão para a menor espessura da junta.

**Quadro 3 - Variação da resistência à compressão de prismas de tijolos com o aumento da espessura da junta de argamassa modificada por polímero**

Espessura da argamassa (mm)	Resistência média (MPa)
10	14,3
5	15,4
3	17,5

Fonte: Walliman, Baiche e Ogden (2008), p. 1084.

Portanto, a utilização de juntas de assentamento com espessura reduzida tende a provocar incrementos na resistência à compressão dos elementos de alvenaria. Nesse sentido, as equações disponibilizadas para o cálculo da resistência característica da alvenaria convencional do Eurocode 6 (CEN, 2021) consideram o efeito da resistência do bloco e da argamassa na sua composição (equação 1). Entretanto, para o caso da equação para o cálculo da resistência característica à compressão da alvenaria de junta fina, apenas a resistência do bloco é levada em consideração, indicando que o efeito da resistência da argamassa passa a ser menos importante, justamente pelo aumento do efeito de confinamento provocado pelos blocos na argamassa. As equações 2 e 3, são demonstradas abaixo, sendo a segunda indicada para o caso de utilização de blocos cerâmicos e a terceira para blocos de concreto, em alvenaria de junta fina.

$$f_k = k \times f_b^{0,7} \times f_m^{0,3} \quad (\text{Equação 1})$$

$$f_k = k \times f_b^{0,85} \quad (\text{Equação 2})$$

$$f_k = k \times f_b^{0,7} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde,

$f_b$  é a resistência do bloco; e

$f_m$  é a resistência da argamassa;

$k$  = é um valor tabelado dependente do tipo de bloco e argamassa de assentamento utilizada.

De maneira semelhante ao que foi observado na norma europeia, algumas expressões utilizadas na norma brasileira para descrever o comportamento da alvenaria tradicional podem não ser adequadas para a alvenaria de junta fina. Um exemplo disso é o fato de ser possível

estimar o valor da resistência característica da alvenaria, como sendo 70% do valor encontrado para resistência característica do prisma, ou 85% da pequena parede, conforme determinado pela NBR 16868-1 (ABNT, 2020). Esses valores percentuais não são adequados para o caso da alvenaria de junta fina, devendo ser criadas expressões a partir de resultados experimentais para estimar esse comportamento. O mesmo pode ser dito com relação ao valor do módulo de deformação longitudinal da alvenaria de blocos de concreto, que pode ser estimado como sendo de 800 vezes o valor da resistência característica à compressão do prisma, ou o valor adotado para retração e fluência da alvenaria, além de outros, que também deveriam ser revistos para o caso da alvenaria de junta fina.

O fato de serem empregados compostos poliméricos no assentamento de alvenaria de junta fina pode fazer com que o comportamento observado seja diferente da alvenaria de junta fina assentada com material cimentício. Exemplo disso pode ser observado no trabalho de Andrade (2019), que realizou ensaios de resistência à compressão em 3 amostras de paredes com blocos cerâmicos vazados ( $f_{bk} = 8,5$  MPa). Uma amostra foi assentada com argamassa cimentícia na junta vertical e horizontal, outra com 2 filetes de composto polimérico somente na junta horizontal, e outra com 4 filetes de composto polimérico, aplicados somente nas juntas horizontais. A espessura da junta empregada para a amostra de argamassa cimentícia foi convencional (10 mm), enquanto para as amostras assentada com composto polimérico foi empregada junta fina de 2 a 4 mm, com aplicação dos compostos somente na junta horizontal (sem preenchimento da junta vertical). Os valores médios de resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos podem ser observados no Quadro 4.

**Quadro 4 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade de paredes**

<b>Material usado no assentamento</b>	<b>Resistência média à compressão (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidade médio (MPa)</b>
Argamassa cimentícia	1,50	5008,44
2 cordões de composto polimérico	0,99	1433,74
4 cordões de composto polimérico	1,33	1376,76

Fonte: Adaptado de Andrade (2019).

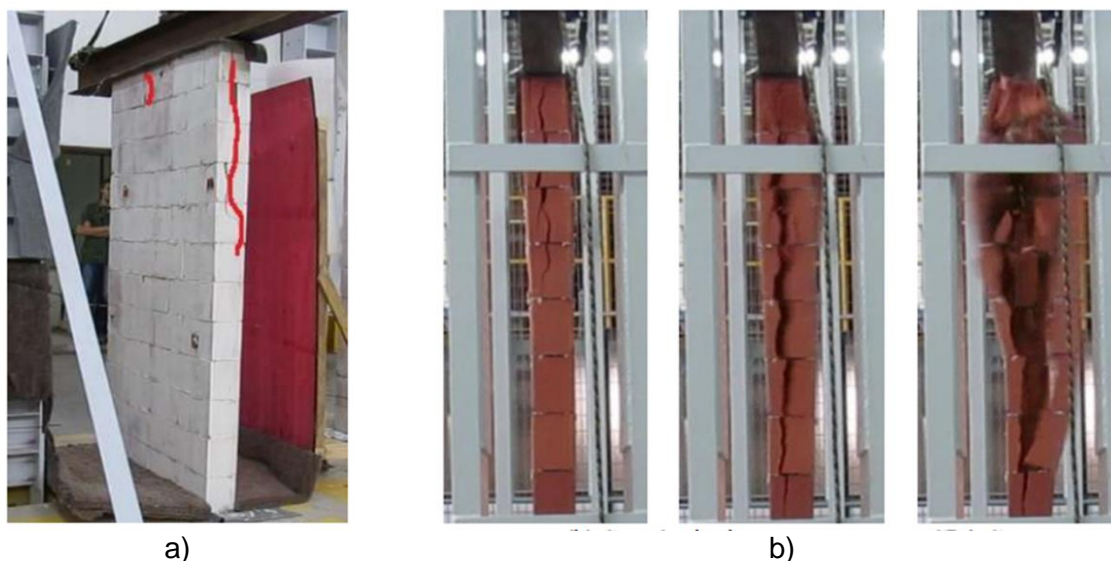
Andrade (2019) aponta que o módulo de elasticidade obtido com a argamassa cimentícia foi cerca de 70% superior aos obtidos com o composto polimérico e que a diferença entre o valor do módulo obtido entre as amostras de compostos poliméricos foi de cerca de 4%, ou seja, semelhante. A autora aponta que as paredes assentadas com argamassa cimentícia só começaram a apresentar deformação mais significativa após 40% da carga de ruptura ter sido aplicada, enquanto para as amostras assentadas com compostos poliméricos

apresentaram deformação proporcional a aplicação de carga. Os valores da resistência média à compressão obtidos com a amostra assentada com argamassa cimentícia foram superiores aos obtidos com os compostos poliméricos. A resistência à compressão obtida com o composto polimérico aplicado em 4 filetes ficou mais próximo do valor obtido pela amostra assentada com argamassa cimentícia do que o resultado obtido pela amostra assentada com 2 filetes de composto.

Nesse caso foi observada a redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade com a utilização de juntas finas de compostos poliméricos com relação à alvenaria convencional assentada com argamassa cimentícia. Esse comportamento não é esperado para alvenaria de junta fina, podendo indicar que a utilização dos compostos poliméricos no assentamento faz com que surjam diferenças do comportamento esperado para alvenaria construída com juntas finas de material cimentício.

A principal forma de ruptura identificada por Andrade (2019) foi a formação de fissuras verticais nos blocos, sendo que para o caso das amostras construídas com 4 filetes de composto polimérico foi observada a formação de fissura vertical na lateral das paredes, como pode ser observado na Figura 7-a. Esse tipo de fissura também foi observado no trabalho de Donadello et al. (2023) para a amostra de parede construída com blocos cerâmicos de paredes vazadas assentados com 4 filetes de composto polimérico. Segundo o autor, para as amostras de paredes assentadas com 2 filetes de composto polimérico foi observado o esmagamento da junta de assentamento, provocando o atrito entre os blocos e sua ruptura. Para o caso da amostra assentada com 4 cordões de composto polimérico foi observada a formação de tracionamento de ambas as faces dos blocos, produzindo as fissuras na lateral da parede que podem ser observadas na Figura 7-b. Nesse caso, os compostos poliméricos não foram aplicados nas juntas verticais, somente nas juntas horizontais, na direção do comprimento dos blocos.

**Figura 7 – Forma de ruptura observada em paredes de blocos cerâmicos**



Fonte: ANDRADE (2019), p. 66, e DONADELLO et al. (2023), p. 10.

O comportamento da alvenaria assentada com juntas finas de compostos poliméricos é diferente do esperado para a alvenaria convencional assentada com argamassa cimentícia e, também, diferente do comportamento observado para a alvenaria de junta fina assentada com argamassas cimentícias modificadas por polímeros.

### **2.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS UTILIZADAS EM ALVENARIA DE JUNTA FINA**

Tradicionalmente argamassas cimentícias modificadas com polímeros são utilizadas na construção de alvenaria de juntas finas.

Colville, Amde e Miltenberg (1999) esclarecem que a modificação da argamassa cimentícia com adição de polímeros é de natureza mecânica, sendo que o polímero ocupa os espaços dos poros do material cimentício e, conforme a água vai saindo dos poros, os polímeros vão se deformando e preenchendo ainda mais esses espaços antes ocupados pela água. Dessa forma, uma rede ou filme de polímeros é formada interconectando esses espaços e aderindo aos produtos de hidratação que estão se formando.

Segundo os autores, as taxas de adição de polímeros em argamassas de cimento modificadas com polímeros variam, normalmente, entre 10 e 15% da massa de cimento. Pode-se destacar como benefícios dessa adição o aumento na resistência à tração e na aderência, a redução da permeabilidade e o aumento da retenção de água.

Para o caso das argamassas cimentícias modificadas por polímeros, os ensaios utilizados para caracterização das propriedades físicas e mecânicas do material costumam

ser os mesmos empregados para as argamassas de cimento, cal e areia da alvenaria tradicional, como os indicados na NBR 13281-2 (ABNT, 2023). Embora ainda não exista norma específica para caracterização de argamassas cimentícia modificada por polímeros, aparentemente, os ensaios utilizados para as argamassas tradicionais parecem ser adequados para caracterização de suas propriedades mecânicas, uma vez que vem sendo empregados em pesquisas no país e no exterior.

Para o caso das argamassas poliméricas, a utilização dos mesmos procedimentos de ensaio e tipos de corpos de prova previstos para caracterização das argamassas cimentícias tradicionais podem não ser adequadas. Dessa forma, a adaptação de algumas normas internacionais, específicas para caracterização de materiais poliméricos, pode ser mais indicada.

### **2.3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE COMPOSTOS POLIMÉRICOS PREVISTOS NA NBR 16590-1**

Os ensaios previstos na NBR 16590-2 (ABNT, 2017) para caracterização dos compostos poliméricos são os ensaios para determinação do índice de consistência, espectroscopia por absorção no infravermelho (FT-IR) e análise termogravimétrica (TGA). Dentre esses ensaios, apenas o índice de consistência, realizado conforme a NBR 13276 possui caráter informativo.

Canevarolo (2006) destaca que a espectroscopia por absorção no infravermelho é uma das ferramentas de caracterização de materiais poliméricos mais utilizadas.

Para Stuart (2002) os resultados fornecidos pelo equipamento de ensaio são denominados de espectro, sendo este normalmente, representado por um gráfico que no eixo das abscissas contém o comprimento de onda inversa ( $\text{cm}^{-1}$ ) e nas ordenadas mostra a intensidade de onda, que corresponde a um valor percentual de absorbância, ou transmitância. No caso, absorbância representa o percentual absorvido pela amostra, e transmitância o valor transmitido pela amostra. Canevarolo (2006) salienta que esse ensaio está baseado na observação da frequência e intensidade de radiação infravermelha absorvida por uma amostra quando um feixe de radiação a atravessa, sendo que a frequência fornece informações quantitativas relacionadas à concentração de determinada ligação química na amostra e, a intensidade proporciona informações qualitativas sobre o tipo de ligação química presente na amostra.

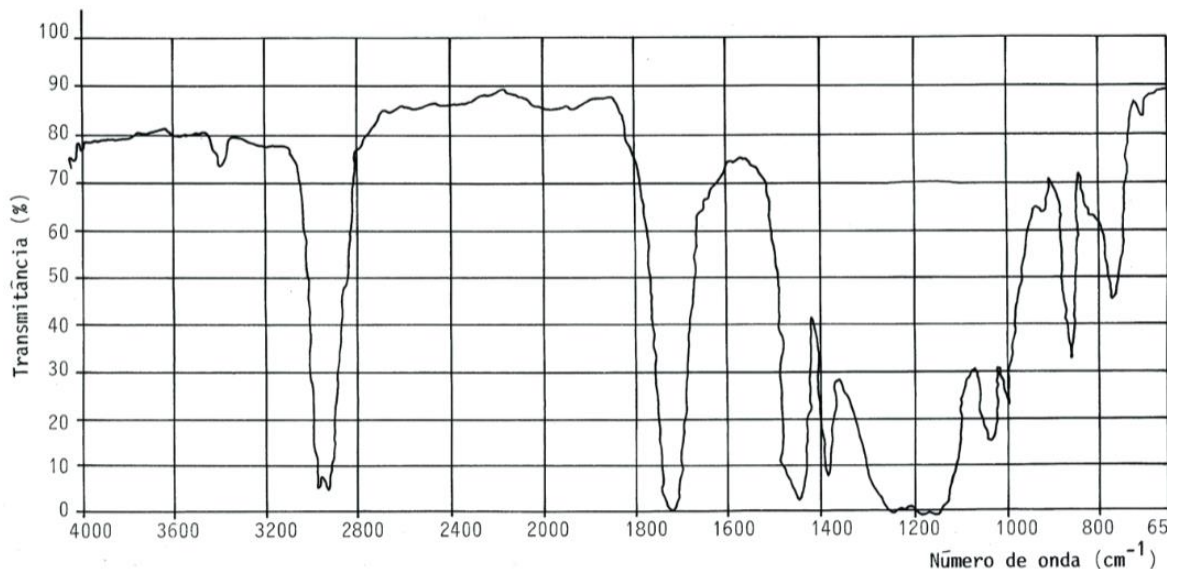
A NBR 16590-2 (ABNT, 2017) recomenda que o ensaio de espectroscopia seja realizado conforme a norma ASTM E 1252, sendo que o padrão espectroscópico identificado do material deve ser compatível com uma resina acrílica estirenada. Essa determinação



permite que mais de um tipo de resina acrílica estirenada seja aplicada para a função de composto polimérico de assentamento e, também, teoricamente, não impede a presença de outros polímeros adicionados à resina, em menores quantidades. Ou seja, existe certa flexibilidade no enquadramento dos materiais utilizados com a função de assentamento.

Existem outras normas, como é o caso da NBR 10998 (ABNT, 1987), que tratam das condições exigíveis para fornecimento e recebimento de tinta de acabamento acrílica, que também utilizam ensaios de espectroscopia para identificação de materiais. Entretanto, o critério utilizado para identificação dos materiais parece ser mais restrito do que o utilizado pela NBR 16590-2 (ABNT, 2017), pois a norma apresenta um padrão espectroscópico para ser utilizado como referência na identificação do material. Esse padrão é apresentado na Figura 8, mas apenas de caráter informativo, não está sendo sugerida a adoção desse padrão para os compostos poliméricos de assentamento, pois o material não possui estireno em sua composição.

**Figura 8 - Espectro característico de resina acrílica**



Fonte: NBR 10998 (ABNT, 1987), p. 4.

A adoção de um padrão espectroscópico de referência é interessante do ponto de vista de conseguir menor variação nos produtos fabricados por diferentes fabricantes, garantindo maior homogeneidade nos produtos disponíveis no mercado. Entretanto, a adoção de certa liberdade na definição dos materiais empregados para determinada função, pode permitir a adoção de componentes que venham a garantir desempenho ainda superior ao atingido por uma composição fixa. São variáveis que devem ser ponderadas em cada situação. Talvez possa ser permitido para o caso da alvenaria de vedação o uso de compostos poliméricos com um pouco mais de liberdade na sua composição, todavia, para o caso da alvenaria estrutural, seria mais prudente definir um padrão mais restrito para os componentes a serem

empregados no assentamento, ou, até mesmo, definir outros parâmetros que possam complementar a análise dos resultados apresentado pelo material no ensaio de espectroscopia. Estudos específicos devem ser desenvolvidos para essa finalidade.

Outro ensaio previsto na NBR 16590-2 (ABNT, 2017) para caracterização dos compostos poliméricos é o ensaio de análise termogravimétrica, a ser realizado conforme a norma ASTM D6370.

Segundo Almeida e Souza (2015) o principal uso da análise termogravimétrica nos polímeros é para estudo de sua estabilidade e decomposição térmica.

A análise termogravimétrica (TGA) é uma técnica na qual a variação de massa de uma amostra é determinada em função do tempo e/ou temperatura, enquanto a amostra é submetida a uma programação controlada de variação de temperatura. Essa técnica permite conhecer as alterações que o aquecimento provoca na massa da amostra, permitindo estabelecer a faixa de temperatura em ela adquire determinada composição química, a temperatura em que começa a se decompor, acompanhar o andamento de reações de desidratação, oxidação, entre outras (MATOS e MACHADO *in* CANEVAROLO, 2017).

Os critérios previstos na NBR 16590-2 (ABNT, 2017) para esse ensaio é que o composto polimérico apresente perda de massa máxima de 18% na faixa de temperatura de 25 a 120°C e, que o percentual máximo de resíduos obtidos na temperatura de 850°C seja de 52%.

### **2.3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPOSTOS POLIMÉRICOS**

Embora as estruturas de alvenaria de junta fina sejam tradicionalmente executadas com argamassas cimentícias modificadas com polímeros, atualmente, com o desenvolvimento de novas tecnologias, talvez seja possível empregar compostos poliméricos para essa mesma função, como já é previsto no Brasil para a alvenaria de vedação, através da NBR 16590-1 (ABNT, 2017).

Segundo a NBR 16590-1 (2017) os compostos poliméricos não cimentícios podem ser definidos como uma mistura homogênea e industrializada composta por agregados miúdos, carga mineral, água e uma mistura de resinas poliméricas.

Segundo Almeida e Souza (2015) a adição de cargas à matriz polimérica dá origem aos chamados compósitos poliméricos, sendo que eles são caracterizados pela presença de duas fases distintas. Uma fase contínua formada pelo polímero, que é chamada de matriz, e outra fase dispersa que é formada pelas cargas. Portanto, como existe a presença de cargas

minerais e agregadas nos compostos poliméricos, eles podem ser considerados um material compósito.

Uma das principais diferenças entre o composto polimérico e a argamassa cimentícia modificada por polímeros, é que o composto polimérico é fornecido em embalagens prontas para uso, sem haver a necessidade do processo de mistura ou adição de algum material antes de sua utilização. Nesse caso, o ganho de resistência do material e seu endurecimento começam a ocorrer a partir do momento da aplicação, ao entrar em contato com o ar. Já para o caso das argamassas modificadas por polímeros, normalmente, as misturas de argamassa são fornecidas semiprontas, sendo necessária ainda, a realização em obra da adição de água e, às vezes, até mesmo de polímeros, para realização do processo de mistura antes de sua utilização.

Como os compostos poliméricos não possuem cimento em sua composição, os mesmos ensaios empregados para as argamassas cimentícias não são adequados para determinação de suas propriedades mecânicas. Um exemplo disso pode ser observado no trabalho de Rocha (2012) que encontrou problemas com a retração e fissuração do composto polimérico, ao tentar moldar corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, iguais aos utilizados para alguns ensaios da argamassa cimentícia tradicional. Os danos identificados impossibilitaram a realização dos ensaios para determinação das propriedades do composto polimérico em questão. Essas evidências de retração podem ser observadas na Figura 9. Com base nesse problema a autora sugeriu que outros métodos de ensaio mais adequados devam ser avaliados para realizar os ensaios de caracterização desse material.

**Figura 9 – Evidências de retração em composto polimérico**



Paul Filho (2016) também encontrou problemas semelhantes para moldagem de compostos poliméricos. No caso, o autor pretendia moldar corpos de prova prismáticos (40x40x160 mm) de composto polimérico, para realizar os ensaios de flexão e compressão, conforme o procedimento prescrito na NBR 13279 (ABNT, 2005), para argamassa cimentícia convencional. Contudo, foi observado pelo autor que os compostos secavam superficialmente, mas não em seu interior, o que impediu o processo de desmoldagem. Mesmo com a redução das dimensões dos moldes de flexão para 20x20x160 mmxmmxmm, o autor não conseguiu desmoldar o material após o período de 7 dias no interior das formas. Por fim, o autor optou por realizar somente o ensaio de resistência à compressão aos 28 dias de idade, moldando corpos de prova cúbicos com dimensões de 20x20x20 mm. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e do índice de consistência realizados pelo autor com 3 compostos poliméricos diferentes podem ser observados no Quadro 10.

**Figura 10 - Resistência à compressão e índice de consistência de compostos poliméricos**

Propriedades avaliadas		Composto polimérico		
		01	02	03
Resistência à compressão	Média (MPa)	10,26	10,88	7,13
	Desvio Padrão (MPa)	1,26	2,79	0,62
	C. V. (%)	25,64	8,70	8,70
Índice de consistência (mm)		231	186	181

Fonte: Adaptado de Paul Filho (2016).

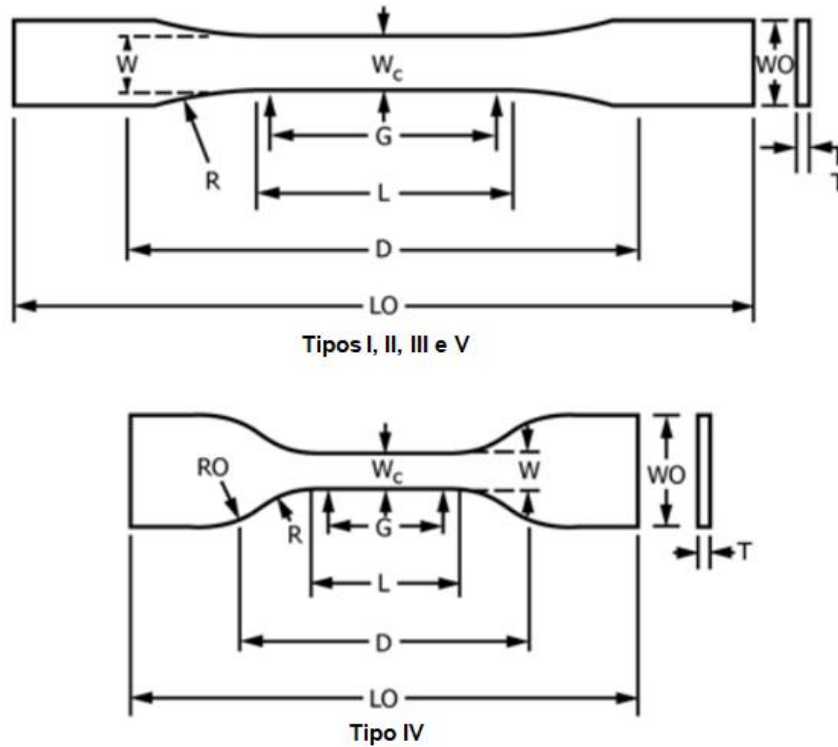
Não existem muitas normas nacionais destinadas a caracterizar o comportamento mecânico de compostos poliméricos. Dessa forma, algumas normas de outros países podem ser utilizadas para caracterizar o comportamento desse tipo de material.

Dentre os ensaios mais empregados para caracterização das propriedades mecânicas de polímeros podem ser citados o de tração, compressão e flexão, prescritos, respectivamente, pelas normas ASTM D 638 (2022), ASTM D 695 (2015) e ASTM D 790 (2017). Os corpos de provas utilizados em cada um desses ensaios podem ser obtidos de amostras moldadas no formato mais indicado para os ensaios, ou serem cortados a partir de amostras maiores.

No caso do ensaio de resistência à tração descrito pela ASTM D 638 (2014), existem diferentes formatos de corpos de prova que podem ser utilizados para os ensaios, tais como tubos rígidos, hastes rígidas, placas e plásticos moldados. Alguns formatos de corpos de prova indicados para o ensaio de placas e de plásticos moldados podem ser observados na Figura 11. Para o caso de plásticos rígidos ou semirrígidos o formato de corpo de prova preferido é do tipo I, que deve ser utilizado onde material suficiente com espessura de 7 mm

ou menos estiver disponível. A velocidade de ensaio utilizada para esse tipo de corpo de prova deve ser de aproximadamente 5 mm/min. Como resultado do ensaio pode ser obtida a tensão máxima de ruptura à tração e o percentual de alongamento do material, assim como, as curvas que relacionam a tensão e deformação do material.

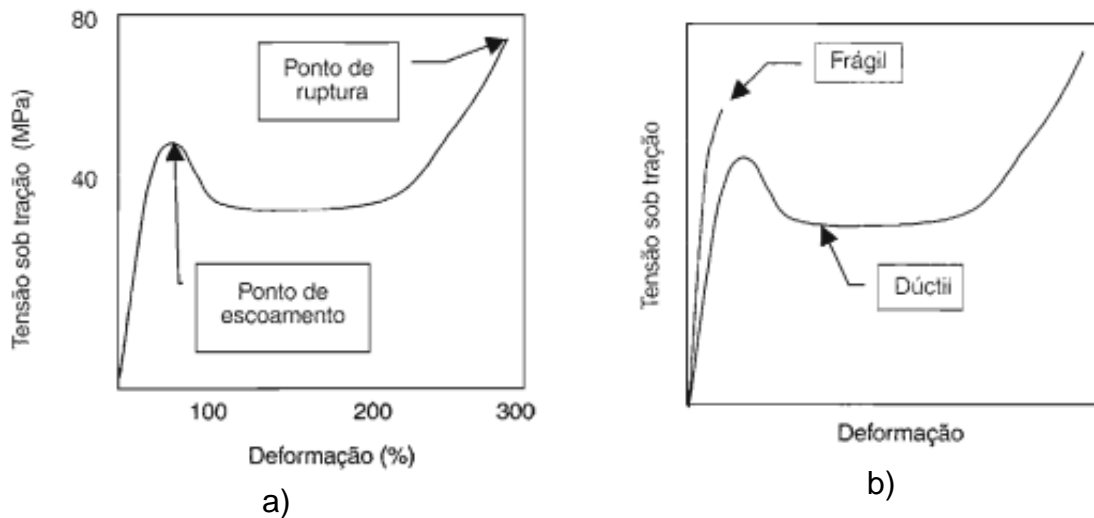
**Figura 11 - Corpos de prova utilizados no ensaio de tração**



Fonte: Adaptado de ASTM D 638 (2014).

De acordo com Canevarolo (2006) dentre os ensaios possíveis para solicitar um polímero de forma estática (tração, flexão, compressão, cisalhamento), os de tração são os mais populares. Algumas das informações a serem extraídas em uma curva típica de tensão vs. deformação, no ensaio de tração podem ser observados na Figura 12-a, como o ponto de escoamento e o ponto de ruptura.

**Figura 12 - Exemplo de comportamento de polímero no ensaio de tração**



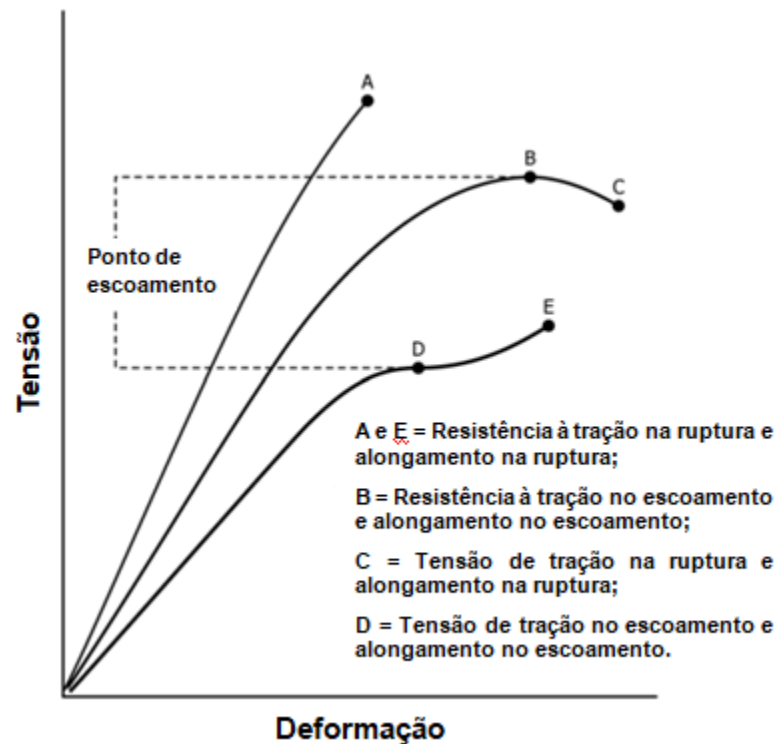
Fonte: CANEVAROLO (2006), p. 204 e 205.

Segundo Canevarolo (2006) a deformação no escoamento e na ruptura durante o ensaio de tração definem o poder de escoamento das moléculas poliméricas, sendo possível identificar polímeros com comportamento dúctil e comportamento frágil, como demonstrado na Figura 12-b.

Algumas definições do comportamento à tração provenientes da norma ASTM D638 (ASTM, 2022) podem ser observadas na Figura 13. Segundo essa norma, o ponto de escoamento pode ser definido como o ponto na curva tensão-deformação em que ocorre um aumento na deformação sem que ocorra o aumento da tensão. Portanto, os pontos “B” e “D” na Figura 13 podem ser considerados pontos de escoamento, pois existe aumento de deformação sem o aumento da tensão. Nesses dois pontos são extraídas as tensões e deformações de escoamento do material. No caso dos pontos “A”, “C” e “E” apresentados na Figura 13, eles caracterizam a região de ruptura do material de onde podem ser obtidas as tensões e o alongamento na ruptura dos materiais.

Como pode ser observado na Figura 13 são apresentadas três curvas tensão-deformação com comportamento distinto. A curva que contém o ponto “A” não possui ponto de escoamento, apenas de ruptura. A curva que contém os pontos “B” e “C” apresenta tensão de ruptura inferior à tensão de escoamento do material. A curva que contém os pontos “D” e “E” apresenta tensão de ruptura superior à tensão de escoamento do material.

**Figura 13 - Designações usadas nos ensaios de tração**



Fonte: Adaptado de ASTM D 638 (2022).

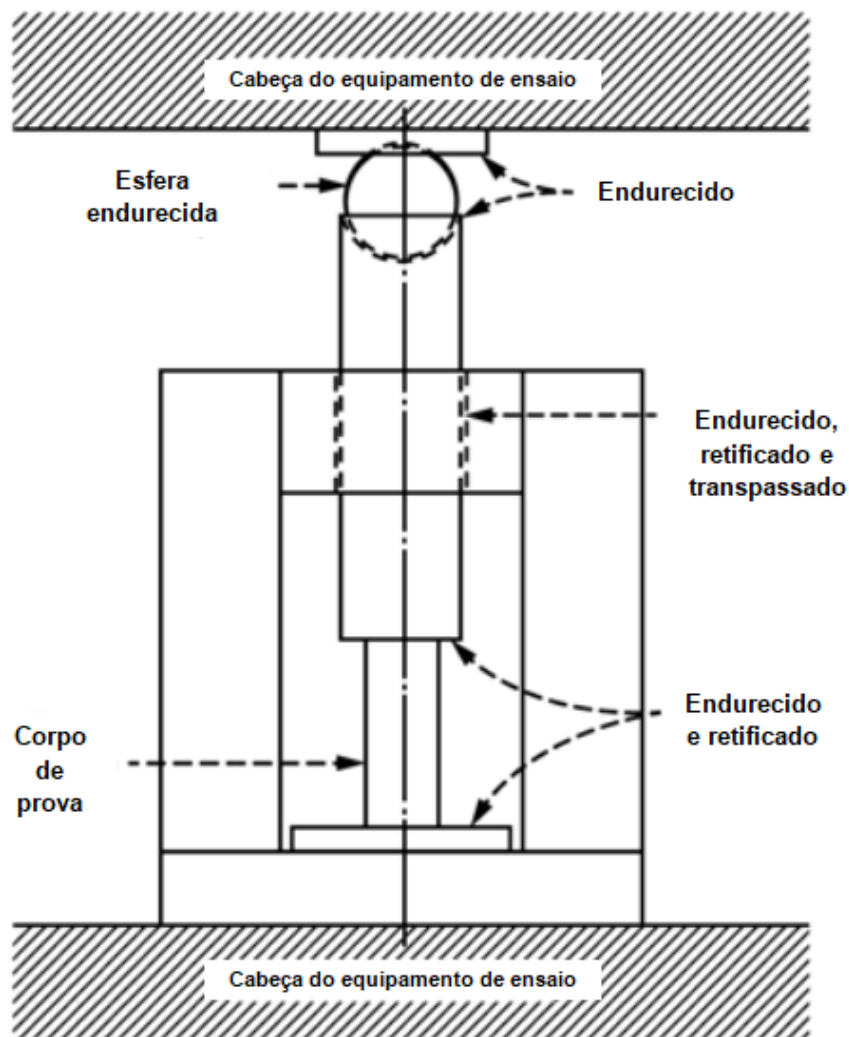
De acordo com Xavier in Utracki (2002) durante o alongamento no ensaio de tração a área transversal dos corpos de prova diminui, ainda assim, por questões de conveniência as tensões de tração costumam ser relacionadas a área transversal original dos corpos de prova. Segundo o autor, do ponto de vista de comportamento mecânico quatro tipos de materiais foram identificados, que são melhor discutidos em termos de tensão e deformação:

- a) Rígido: apresenta proporcionalidade entre tensão e deformação até a ruptura (módulo é constante e não depende da deformação);
- b) Semi-dúctil: Apresenta proporção decrescente entre tensão e deformação até a ruptura (módulo decresce com a deformação);
- c) Dúctil: no início o comportamento é semelhante ao semi-dúctil. No entanto, eles deformam ainda mais passando por um valor máximo (escoamento), onde a ruptura ocorre com uma tensão inferior à tensão de escoamento;
- d) Dúctil com escoamento: Esse material apresenta ainda mais deformação do que o material dúctil. Inicialmente a dependência entre tensão e deformação relembra uma resina dúctil, contudo, antes da ruptura existe uma zona de deformação onde a tensão permanece aproximadamente constante. Nessa zona existe um fluxo de material que normalmente leva a um alinhamento molecular e/ou a mudanças na estrutura cristalina.

As curvas tensão-deformação podem ser diferentes umas das outras para esforços de compressão, flexão ou tração. Falhas e fissuras microscópicas influenciam significativamente materiais poliméricos rígidos, ainda assim elas não representam um papel tão importante na compressão pois a tensão tende a fechar as fissuras enquanto na tração ela tende a abrir as fissuras (Xavier in Utracki, 2002).

O procedimento descrito na ASTM D 695 (2015) para determinação da resistência à compressão das amostras poliméricas prevê a utilização de corpos de prova com diferentes formatos e dimensões, contudo os corpos de prova mais utilizados costumam possuir formato cilíndrico ou prismático, com largura ou diâmetro de 12,7 mm e comprimento da ordem de 25,4 mm. Ou seja, o comprimento do corpo de prova costuma ser duas vezes maior do que a largura do corpo de prova. A velocidade empregada nos ensaios costuma ser de, aproximadamente, 1,3 mm/min. Um dos esquemas para ensaio de compressão previstos na normativa pode ser visualizado na Figura 14.

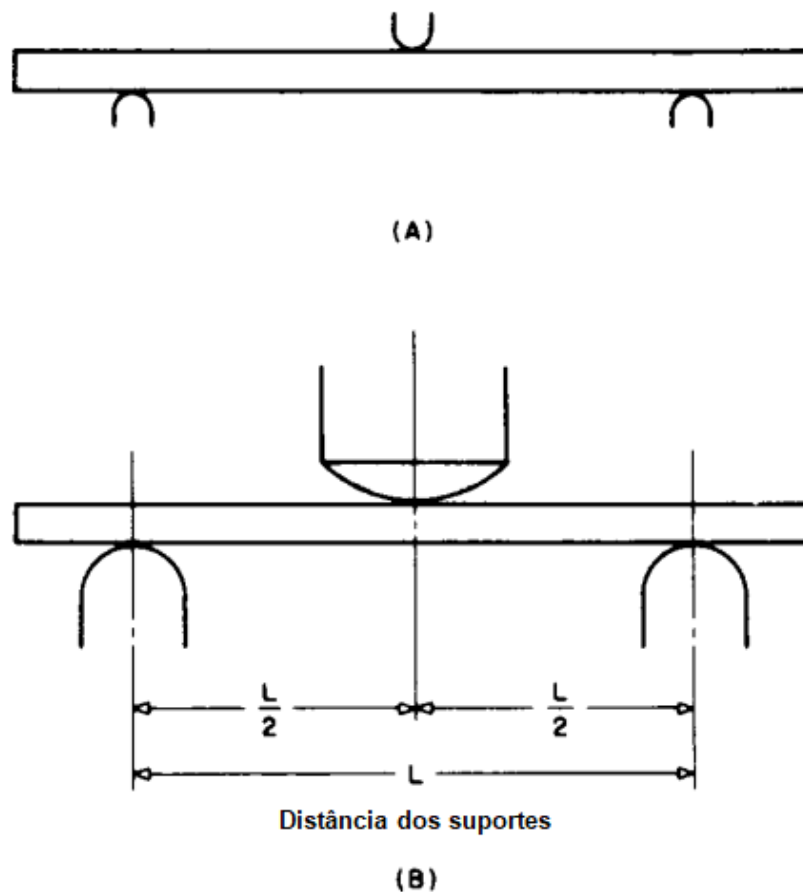
**Figura 14 - Esquema de ensaio de compressão**





Um dos ensaios utilizados para determinação da resistência à flexão de plásticos é demonstrado na norma ASTM D790 (2017). Essa norma determina que uma amostra de seção transversal retangular seja utilizada no ensaio de flexão de 3 pontos, sendo permitido o uso de corpos de prova com diferentes dimensões. Os corpos de prova são flexionados até atingirem a ruptura ou o limite de deformação de 5%. A distância entre os apoios costuma ser de 16 vezes a espessura do corpo de prova. O procedimento de ensaio A dessa norma é destinado a materiais que rompem com esforços de flexão relativamente baixos (relacionados a deformação limite de 5,0%). A velocidade do ensaio utilizada no procedimento A é com controle de deformação de 0,01 mm/mm/min. O esquema de ensaio pode ser visualizado na Figura 15.

**Figura 15 - Esquema de ensaio de flexão**



Fonte: Adaptado de ASTM D790 (2003).

Para obtenção da tensão de flexão a normativa recomenda que seja utilizada a equação 4.

$$\sigma_f = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times d^2} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde,

$\sigma_f$  é a tensão, expressa em MPa;

P é a carga aplicada, expressa em N;

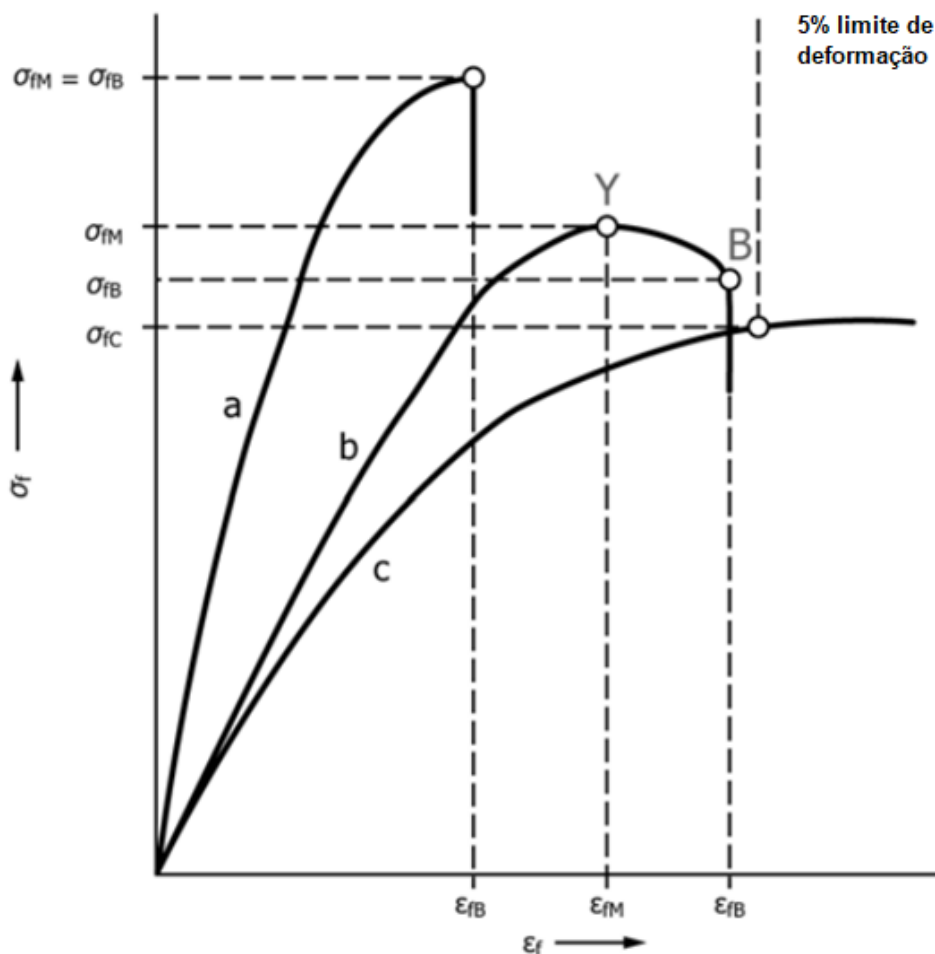
L é a distância dos apoios, expressa em mm;

b é a largura, expressa em mm;

d é a altura, expressa em mm.

A ASTM D790 (2017) apresenta alguns exemplos típicos de curvas tensão-deformação obtidas no ensaio de flexão, conforme pode ser observado na Figura 16. Como pode ser verificado na curva “a” a tensão aumenta até um valor máximo em que ocorre a ruptura. Nesse caso a tensão máxima obtida nessa curva é igual a tensão de ruptura e não apresentou ponto de escoamento. Para o caso da curva “b” ocorre o aumento da tensão até um valor máximo obtido no ponto “Y”, no qual ocorre o aumento da deformação sem o aumento da tensão, caracterizando um ponto de escoamento. Após atingir o ponto “Y” a tensão começa a reduzir até atingir a tensão de ruptura no ponto “B”. Portanto, no caso da curva “b” a tensão máxima de flexão será igual a tensão de escoamento e a tensão de ruptura será inferior.

Figura 16 - Curvas típicas do ensaio de flexão



Fonte: Adaptado de ASTM D 790 (2017).

## 2.4 COMPORTAMENTO DA INTERFACE BLOCO/ARGAMASSA EM ALVENARIA DE JUNTA FINA

Como a argamassa usualmente empregada em alvenaria de junta fina é cimentícia com adição de polímeros, a maior parte das pesquisas desenvolvidas para avaliar a interface unidade/argamassa está baseada no uso desse material.

De acordo com Thamboo e Dhanasekar (2016), estudos desenvolvidos por alguns pesquisadores relatam que o uso de argamassa de cimento modificadas por polímeros, podem proporcionar melhorias na aderência quando em comparação com as argamassas convencionais, particularmente, na resistência à flexão e ao cisalhamento, que praticamente dobraram.

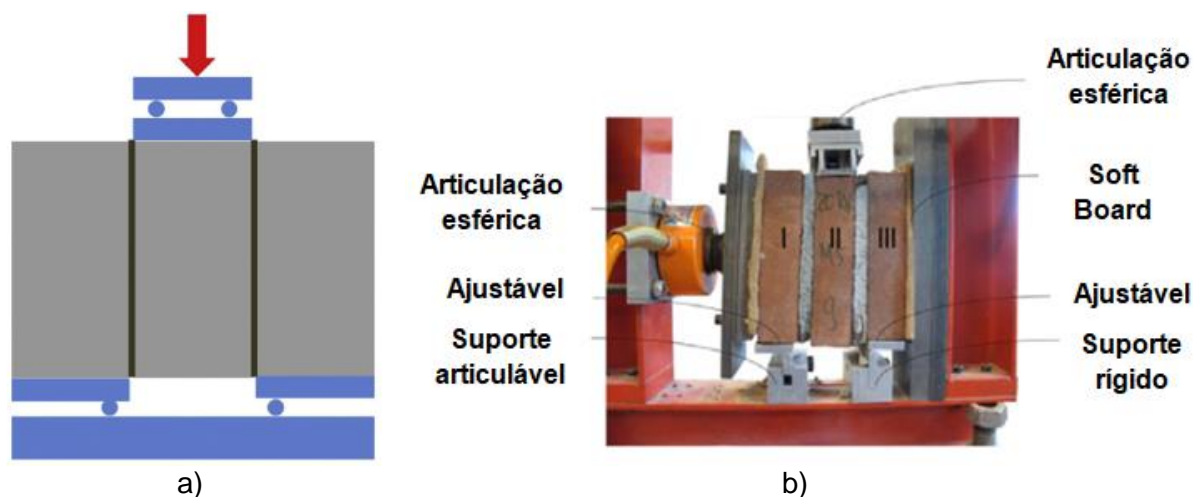
Segundo Maranhão et al. (2015), as argamassas modificadas com polímeros são menos rígidas (mais flexíveis) e produzem maior tensão de aderência do que as argamassas convencionais.

Um dos ensaios mais utilizados para avaliar o comportamento da interface de ligação entre unidades e argamassa é o ensaio de aderência por cisalhamento previsto na norma EN1052-3 (2002).

Santos (2016) define que o ensaio de aderência por cisalhamento da ligação bloco-argamassa permite descrever o comportamento da interface entre os materiais, fornecendo dados como resistência ao cisalhamento, energia de fratura, coesão e rigidez tangencial, que são essenciais para o desenvolvimento de um modelo numérico em micromodelagem.

O ensaio de cisalhamento regido pela EN1052-3 (2002) também é conhecido como ensaio de tripletas, pois considera a utilização de três unidades de alvenaria reunidas com argamassa. O ensaio consiste em apoiar os dois blocos laterais e aplicar uma força para mover o bloco central, causando assim, esforços de cisalhamento nas duas juntas de argamassa que ligam o bloco central aos laterais. O esquema do ensaio pode ser compreendido com maior clareza através da Figura 17. Esse ensaio pode ser realizado com, ou sem, a aplicação de esforços de compressão lateral nos blocos. Com o aumento das tensões de compressão aplicadas, a tendência é que ocorra o aumento dos esforços de cisalhamento.

**Figura 17 - Ensaio de aderência por cisalhamento (tripletas)**



Fonte: NAZIR E DHANASEKAR (2014), p. 30 e VERMELTFOORT (2012), p. 6. Legenda: a) Esquema do ensaio de tripletas; b) Exemplo de ensaio de tripletas com aplicação de carga de pré-compressão.

Esse ensaio foi realizado na pesquisa de Thamboo (2020), destinada a comparar o desempenho da aderência em alvenaria de tijolos com junta fina, utilizando argamassa tradicional e argamassa modificada por polímeros. O ensaio de tripletas foi utilizado para dois tipos de tijolos e com a aplicação de diferentes níveis de tensão de pré-compressão durante o ensaio. O coeficiente de atrito dos materiais foi obtido pela regressão linear dos resultados obtidos no gráfico que relaciona a pré-compressão aplicada e tensão máxima de cisalhamento

alcançada. Outra informação obtida pela análise dos resultados foi a rigidez da aderência ao cisalhamento ( $k_s$ ), que é calculada através da tangente desenhada no gráfico tensão de cisalhamento-deslizamento, no ponto localizado a um terço da tensão de pico e sua respectiva deformação.

Segundo o autor, a relação entre a tensão de cisalhamento e de compressão aplicada pode ser descrita usando o critério de falha de Mohr-Coulomb. Os resultados obtidos nos ensaios de tripletas são mostrados no Quadro 5.

**Quadro 5 - Resultado do ensaio de aderência ao cisalhamento**

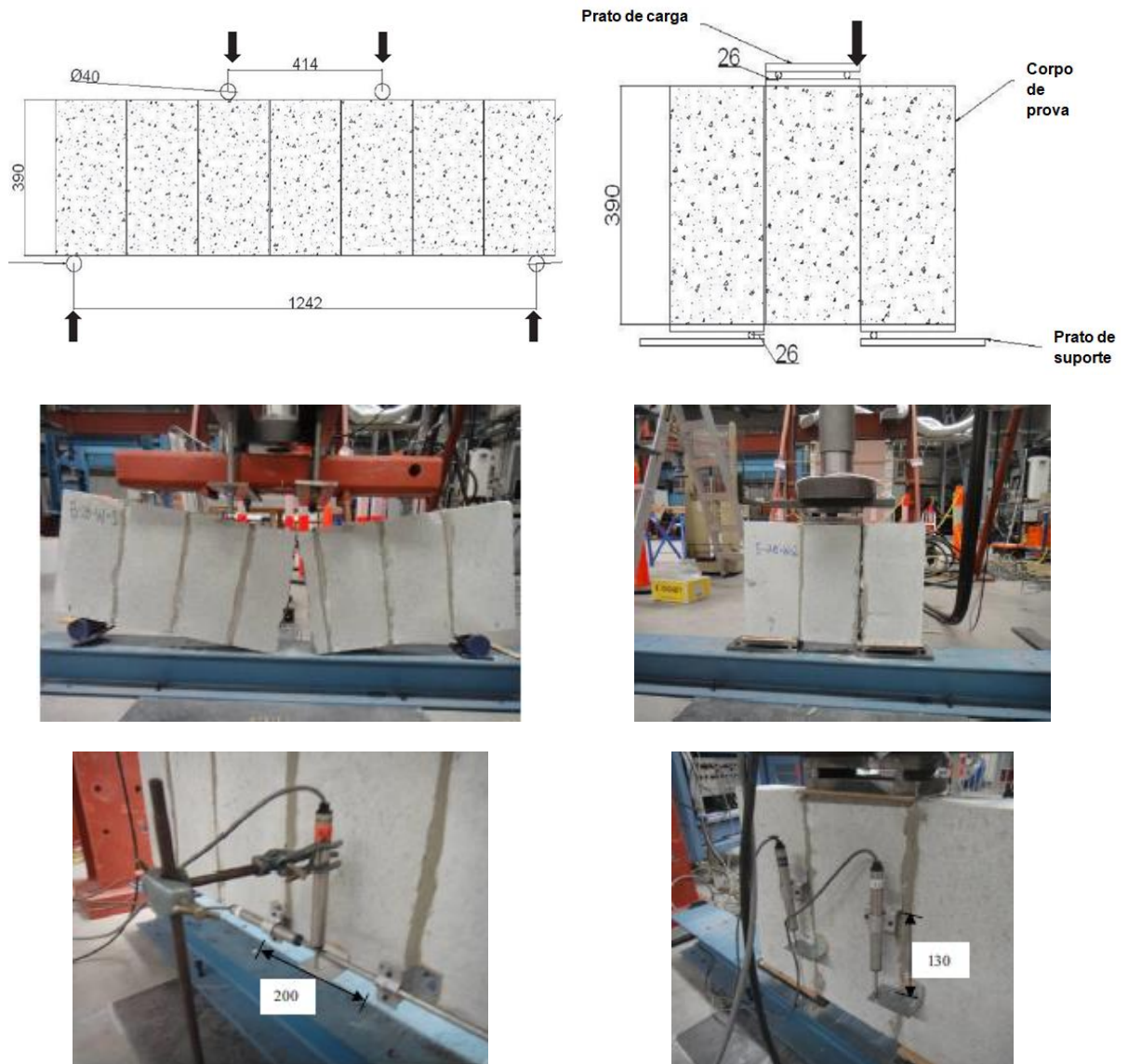
Tijolo (MPa)	Argamassa	Resistência ao cisalhamento (MPa)				Coeficiente de atrito	Rigidez de aderência (N/mm <sup>3</sup> )
		Nível de pré-compressão (MPa)					
		0	0,1	0,25	0,4		
5,4	Modificada	0,63	0,76	0,83	0,88	0,58	11 - 19
	Tradicional	0,26	0,40	0,49	0,54	0,66	6 - 9
15,8	Modificada	0,78	0,93	1,05	1,12	0,80	22 - 27
	Tradicional	0,31	0,44	0,53	0,66	0,84	12 - 14

Fonte: Adaptado de THAMBOO (2020).

Como pode ser observado no Quadro 5, a resistência ao cisalhamento obtida com a argamassa tradicional foi por volta de duas vezes inferior à obtida pela argamassa modificada por polímeros, para uma mesma tensão de pré-compressão. Os valores obtidos para a rigidez da aderência ao cisalhamento também foram significativamente maiores com o uso da argamassa modificada. Os valores de cisalhamento foram maiores para o bloco que possui maior resistência à compressão (15,8 MPa), o que sugere que, a resistência à compressão da unidade pode ter influência nos resultados obtidos.

Thamboo e Dhanasekar (2015) realizaram um estudo para avaliar a resistência da ligação entre blocos e argamassas em alvenaria de blocos de concreto com junta fina de argamassa modificada com polímeros. Para isso foram realizados ensaios de tripletas para avaliar a resistência ao cisalhamento da ligação argamassa/bloco, de acordo com a norma EN 1052-3 e, ensaio de flexão em viga de alvenaria, conforme as recomendações das normas ASTM E518 e AS3700. As imagens dos corpos de prova demonstrados na Figura 18 permitem compreender com maior clareza o procedimento de ensaio, assim como o posicionamento dos LVDTs utilizados para medir as deformações apresentadas pelas amostras.

**Figura 18 - Ensaio de flexão e de cisalhamento (tripletas)**



Fonte: Adaptado de THAMBOO E DHANASEKAR (2015).

Os autores realizaram os ensaios considerando dois procedimentos de cura distintos (seco e úmido), sendo que o seco consistiu em deixar os corpos de prova curarem em ambiente de laboratório e o úmido consistiu em deixar os corpos de prova cobertos com plástico até a data do ensaio. As propriedades de flexão e cisalhamento da ligação foram avaliadas para os dois tipos de cura, considerando as idades de 14, 28 e 56 dias. Os resultados podem ser observados no Quadro 6.

**Quadro 6 - Resultados dos ensaios de aderência no cisalhamento e na flexão**

Idade (dias)	Cura	Resistência de aderência ao cisalhamento		Resistência de aderência na flexão	
		Tensão (MPa)	Forma de ruptura	Tensão (MPa)	Forma de ruptura
14	Úmida	0,82	Na ligação	0,77	Na ligação
	Seca	0,89	Na ligação	0,87	Na ligação
28	Úmida	0,85	Na ligação	0,81	Na ligação
	Seca	1,22	Na ligação	0,95	Ligação e bloco
56	Úmida	0,93	Na ligação	0,91	Ligação e bloco
	Seca	1,29	Na ligação	0,98	Ligação e bloco

Fonte: Adaptado de THAMBOO E DHANASEKAR (2015).

Como pode ser observado no Quadro 6, os resultados obtidos com cura seca foram superiores aos obtidos com cura úmida nos dois ensaios realizados. Segundo os autores, os ganhos de resistência de 14 para 28 dias foram expressivos, no entanto, de 28 para 56 dias a diferença não é tão significativa. Segundo os autores, os valores obtidos para essa alvenaria tendem a ser cerca de 100% maior do que a tradicional.

Thamboo e Dhanasekar (2015) identificaram que existe uma relação linear entre a resistência de aderência na flexão e no cisalhamento para alvenaria com baixa aderência, como a alvenaria tradicional, na qual o tipo de falha ocorre pela delaminação das ligações da alvenaria, todavia, para os casos em que a aderência é maior, causando ruptura por flexão nas unidades, a relação entre as resistência de aderência à flexão e ao cisalhamento da alvenaria parece passar a ter uma relação exponencial.

Colville e Amde (1995) realizaram um estudo para verificar o aumento da aderência de argamassas de assentamento, através da adição de polímeros, com tijolos cerâmicos. Ensaios de flexão foram realizados em prismas de tijolos para avaliar o comportamento da aderência em relação a uma argamassa convencional. Os resultados mostraram que vários polímeros avaliados permitiram valores altos de aderência. Alguns foram capazes de aumentar a aderência ao nível de mudar a forma de ruptura dos corpos de prova, que passou a ocorrer na argamassa e não na interface argamassa/tijolo, indicando que a aderência na interface foi maior do que a resistência a tração da argamassa. Segundo os autores, a adição de látex nas misturas de argamassa quase triplica o valor de resistência de aderência na flexão para ensaios na condição saturada e quadruplicaram para os ensaios na condição seca.

## 2.5 COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE ALVENARIA DE JUNTA FINA

As argamassas tradicionalmente empregadas em alvenaria de junta fina possuem propriedades distintas da argamassa tradicional, provocando significativo aumento na aderência da interface bloco/argamassa, que proporciona incrementos significativos na resistência à flexão da alvenaria, principalmente, na flexão normal à fiada. Esse fato contribui para que a capacidade de resistir a esforços laterais da alvenaria de junta fina seja maior.

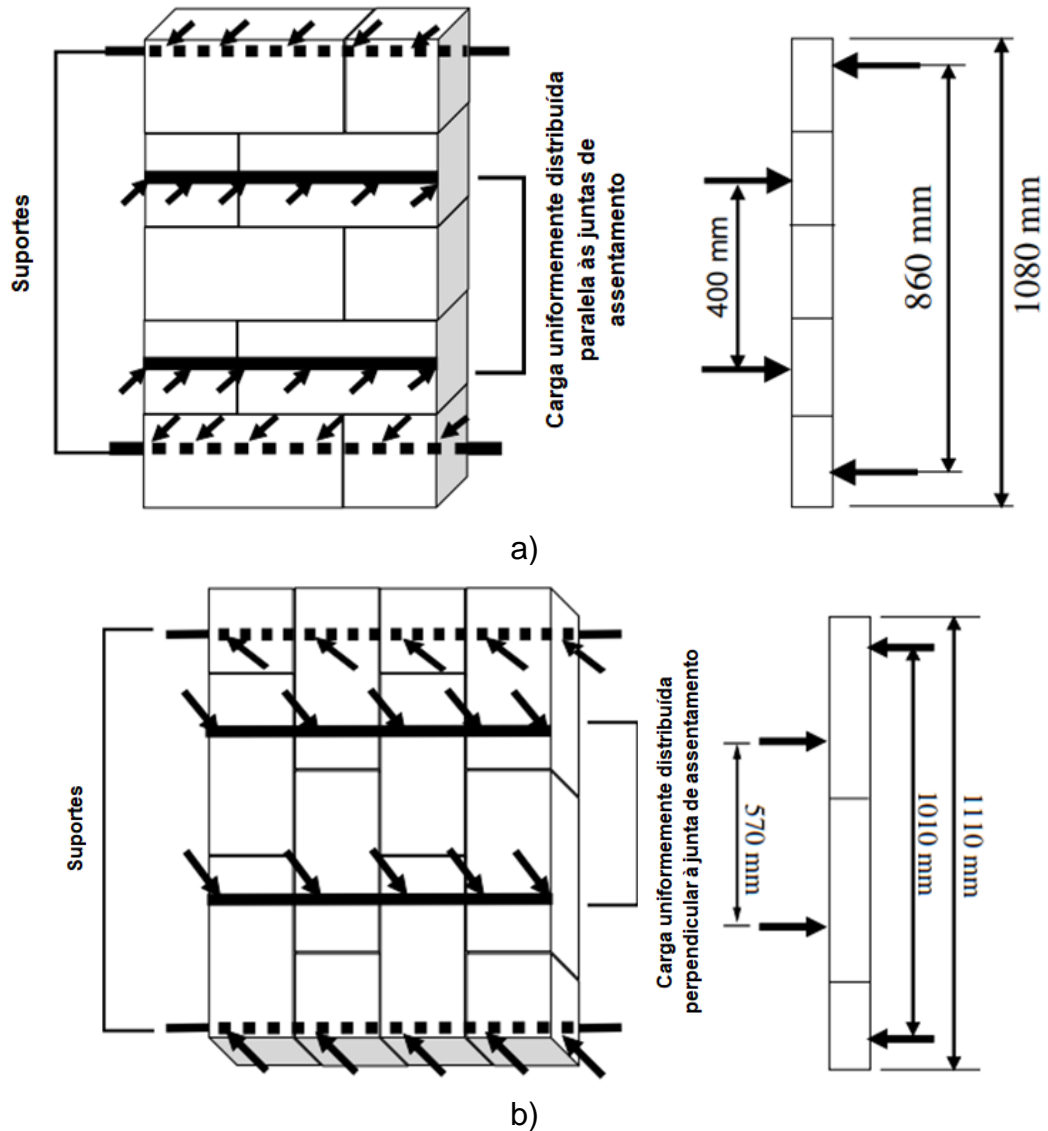
Thamboo, Dhanasekar e Yan (2011) apontam que estruturalmente a utilização de alvenaria de junta fina pode trazer benefícios como o aumento da resistência à compressão causado pela redução da espessura da junta de argamassa e, também, aumentos na capacidade de suportar ações laterais com a utilização de argamassas modificadas por polímeros, quando comparadas a alvenaria convencional. Deve ser salientado que os procedimentos construtivos utilizados na Europa são baseados na utilização de blocos com geometrias diferenciadas e na construção de edifícios com alturas mais baixas do que as aplicadas no Brasil. Para edificações maiores esse comportamento pode ser limitado.

De acordo com Marrocchino et al. (2009), a capacidade de carga transversal lateral da alvenaria construída com blocos de concreto e argamassa de junta fina é até quatro vezes maior do que a alvenaria construída usando argamassa tradicional. Tanto as propriedades dos materiais constituintes dos blocos quanto das argamassas, alteram a resistência de aderência da ligação provocando aumentos na capacidade à flexão fora do plano da parede. Essa observação é especialmente válida para construções de pouco número de andares.

Marrocchino et al. (2009) realizaram ensaios de flexão na direção paralela e normal à junta de assentamento em pequenas paredes construídas com blocos de concreto e argamassa de junta fina. Foram utilizados dois tipos de blocos com resistência à compressão de 14 e 20 MPa para a construção das paredes e, uma mesma argamassa modificada com polímeros. Para cada um dos ensaios e tipos de bloco empregados, 6 corpos de prova foram utilizados. O esquema de ensaio empregado pelos autores pode ser observado na Figura 19.



Figura 19 - Esquema dos ensaios de flexão normal e paralelo à fiada



Fonte: Adaptado de MARROCHINO et al. (2009), p. 584. Legenda: a) Flexão paralela à fiada; b) Flexão perpendicular à fiada.

O resumo dos resultados obtidos pelos autores pode ser observado no Quadro 7.

Quadro 7 - Resultados dos ensaios de flexão

Tipo de bloco	Flexão normal à fiada		Flexão paralela à fiada	
	Carga de ruptura (kN)	Tensão de ruptura (MPa)	Carga de ruptura (kN)	Tensão de ruptura (MPa)
14 MPa	6,96	0,76	12,2	1,19
20 MPa	12,18	1,31	15,69	1,78

Fonte: Adaptado de MARROCHINO et al. (2009).

Como pode ser observado no Quadro 7, os valores de flexão normal à fiada foram inferiores aos paralelos à fiada, o que já era esperado, pois o primeiro traciona de maneira

mais direta a junta de assentamento que está em linha reta, enquanto no segundo caso existe a transposição dos blocos alterando a direção da junta de assentamento, o que dificulta a ruptura da ligação.

Quanto a forma de ruptura identificada pelos autores, a única diferença ocorreu na direção normal à fiada, em que parte dos blocos de menor resistência apresentaram ruptura nos blocos durante o ensaio, enquanto a ruptura dos blocos de maior resistência ocorreu, praticamente, na junta de assentamento.

Quando comparados os resultados de flexão obtidos pelos dois tipos de blocos verifica-se que os maiores valores foram atingidos pelos blocos de maior resistência à compressão. Isso significa que a resistência dos blocos passa a ter um papel preponderante na consideração dos valores obtidos para essa propriedade. Esse comportamento não é esperado para a alvenaria tradicional, que considera basicamente a resistência à compressão da argamassa utilizada para definir os valores de tração na flexão característicos da alvenaria, sem levar em conta a contribuição dos blocos. No Quadro 8 são apresentados os valores característicos de resistência à tração na flexão da alvenaria tradicional, de acordo com as normas brasileiras, considerando a resistência da argamassa utilizada no assentamento.

**Quadro 8 - Resistência característica de tração na flexão, conforme norma brasileira**

Direção da tração	Resistência média de compressão da argamassa (MPa)		
	1,5 a 3,4	3,5 a 7,0	Acima de 7,0
Normal à fiada	0,10	0,20	0,25
Paralela à fiada	0,20	0,40	0,50

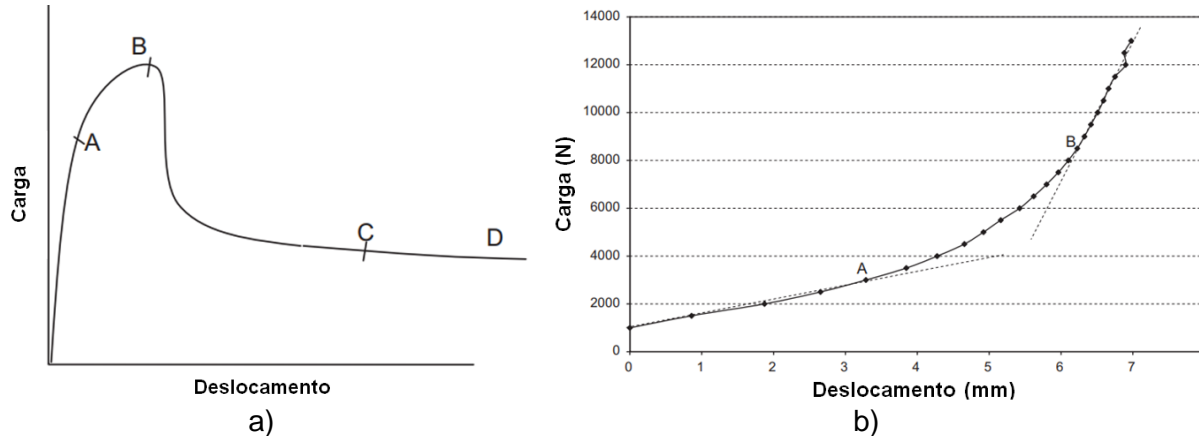
Fonte: Adaptado de PARSEKIAN, HAMID e DRYSDALE (2014), p. 286.

Como pode ser observado os valores de tensão obtidos por Marrocchino et al. (2009), foram bem superiores aos valores indicados no Quadro 8, indicando que o comportamento da alvenaria de junta fina é diferente da alvenaria tradicional e que aparentemente, possui maior resistência à tração na flexão. Além disso, o fato de a norma brasileira considerar apenas a resistência da argamassa para definir a resistência à tração na flexão característica da parede pode não ser adequada para o caso da alvenaria de junta fina com utilização de argamassas poliméricas ou modificadas por polímeros, pois, como pode ser visto nos resultados apresentados por Marrocchino et al. (2009), a resistência à compressão dos blocos utilizados tem influência nesses resultados. Dessa forma, torna-se preponderante desenvolver equações que considerem tanto as propriedades da argamassa quanto as dos blocos, para descrever esse comportamento adequadamente.

Kanyeto e Fried (2011) observaram a existência de diferenças entre o comportamento apresentado pela alvenaria tradicional e pela alvenaria com junta fina, como pode ser visto na Figura 20. A Figura 20-a demonstra como seria uma resposta de tensão-deslocamento típica

para uma alvenaria tradicional. A Figura 20-b mostra o comportamento de ruptura de um dos corpos de prova de flexão paralelo à fiada, com junta fina.

**Figura 20 - Diferenças entre comportamento de alvenaria tradicional e de junta fina**



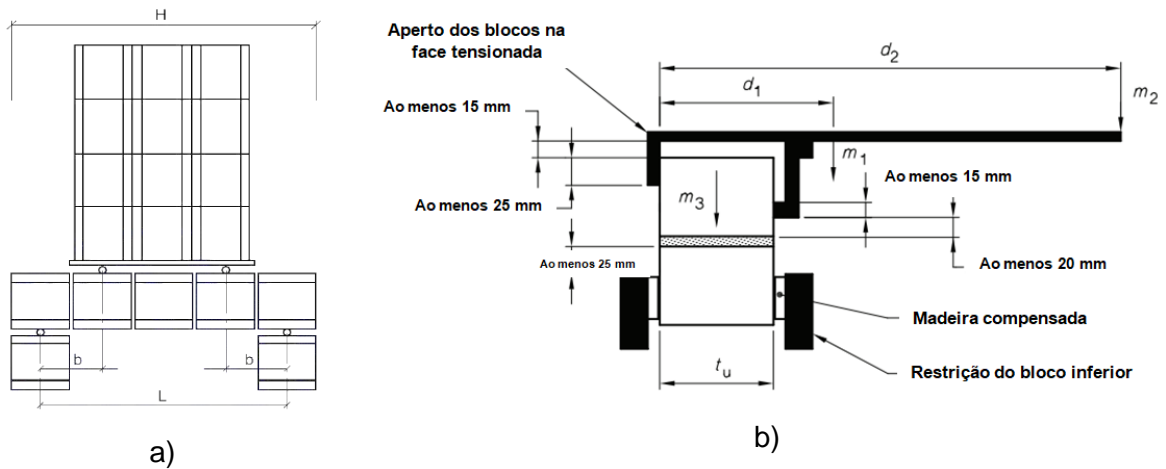
Fonte: Adaptado de KANYETO e FRIED (2011). Legenda: a) Esquema do comportamento típico de alvenaria tradicional; b) Curva força-deslocamento de corpo de prova na flexão paralela à fiada, de alvenaria de junta fina.

Segundo os autores, a alvenaria tradicional, para cargas baixas, apresenta um comportamento linear elástico inicial que pode ser associado a não formação de fissura, ou sua pouca influência nas propriedades mecânicas da alvenaria. Com o aumento das cargas, microfissuras vão se formando na interface bloco/argamassa levando a uma não linearidade e redução da rigidez na região AB da Figura 20-a.

Na Figura 20-b (junta fina), pode ser observada a formação de um trecho inicial de aparência linear, sendo seguido pela formação de um trecho não linear (trecho AB), onde a rigidez tende a aumentar, e, por fim, forma-se um novo trecho linear na parte final do gráfico até sua ruptura. Os autores acreditam que para as cargas iniciais poucas fissuras devem ser formadas, resultando no comportamento próximo ao linear. Posteriormente, a curva atinge um comportamento não-linear, apresentando aumento da rigidez, que pode ser explicado pela falha progressiva da ligação bloco/argamassa em alguns trechos mais fracos, ocorrendo uma acomodação, que é seguida pela atuação dos trechos mais fortes de ligação que começam a agir, provocando o aumento da rigidez identificado no trecho linear final da curva que vai até a ruptura.

Dentre os ensaios mais utilizados para avaliar o comportamento à flexão normal à fiada da alvenaria, destacam-se o ensaio à flexão em prismas, que já é contemplado na norma NBR 16868-3 (ABNT, 2020) e, o ensaio de flexão de alavanca (Bond Wrench) previsto na norma australiana AS 3700 (2017). Os esquemas dos ensaios podem ser observados na Figura 21.

**Figura 21 - Ensaio de flexão normal à fiada em alvenaria**



Fonte: Adaptado de NBR 16868-3 (2020) e AS 3700 (2017). Legenda: a) Esquema do ensaio da norma brasileira; b) Esquema do ensaio da norma australiana.

Esses dois tipos de ensaio podem ser realizados em prensas para obtenção de resultados mais precisos, o que costuma ser feito em muitas pesquisas realizadas. O procedimento da norma brasileira considera a realização do ensaio de flexão de quatro pontos em prismas compostos por cinco blocos. Nesse caso, os dois blocos das extremidades são apoiados em barras metálicas, enquanto os blocos centrais são carregados, conforme apresentado na Figura 21-a. O ensaio da norma australiana consiste em aplicar esforços de flexão no bloco superior de um prisma, através de uma alavanca, enquanto o bloco imediatamente abaixo deste, se encontra fixado por barras laterais. Esse conjunto submete a junta de assentamento localizada abaixo do bloco superior a esforços de flexão, que estão ligados diretamente à capacidade de aderência entre bloco e argamassa.

O procedimento de ensaio da norma australiana pode ser melhor compreendido através da Figura 22, que demonstra um dispositivo de alavanca e corpo de prova utilizados no trabalho de Pasquantonio et al. (2020). O ensaio de alavanca foi realizado em blocos de concreto com resistência média de 18,4 MPa e argamassa convencional, com resistência média de 20,8 MPa. A resistência à tração na flexão encontrada pelos autores foi de 0,08 MPa e o modo de ruptura dos corpos de prova se caracterizou pelo descolamento da argamassa e do bloco (ruptura na interface). A forma de ruptura e corpo de prova utilizado nos ensaios pode ser vista na Figura 22-b. A aplicação de carga no ensaio foi feita colocando-se areia no recipiente localizado na extremidade da alavanca, circulada em vermelho na Figura 22-a.

**Figura 22 - Equipamento empregado e forma de ruptura do CP no ensaio de alavanca**



a)



b)

Fonte: Adaptado de Pasquantonio et al. (2020). Legenda: a) Equipamento de ensaio; b) forma de ruptura do corpo de prova.

Como os resultados encontrados no trabalho de Pasquantonio et al. (2020) indicaram a ocorrência do descolamento da interface entre argamassa convencional e dos blocos de concreto, é possível que ao ser empregado um composto polimérico com capacidade maior de aderência, a forma de ruptura seja alterada, assim como a tensão obtida nos ensaios de alavanca.

## **2.6 COMPORTAMENTO DA ALVENARIA – CISALHAMENTO E ISOTROPIA**

Thamboo e Dhanasekar (2016) realizaram uma série de ensaios de compressão diagonal para avaliar a resistência ao cisalhamento em alvenaria de blocos de concreto utilizando juntas finas de argamassa modificada com polímeros. Nos ensaios foi variada a inclinação das juntas de assentamento perante a direção de aplicação das cargas de compressão. Os ensaios foram realizados através do corte de corpos de prova inclinados com o ângulo da junta de assentamento desejado. As imagens de alguns corpos de prova podem ser observadas na Figura 23.

A construção de corpos de prova com inclinação das juntas em diversos ângulos para esse ensaio, também conhecido como ensaio de compressão diagonal, permite verificar a combinação dos esforços normal e paralelo à junta (PARSEKIAN, HAMID, DRYSDALE, 2014).

**Figura 23 - Ensaio de compressão diagonal**

Fonte: THAMBOO E DHANASEKAR (2016) p. 43 e p. 45. Legenda: a) Marcação do corte a ser realizado para obtenção do corpo de prova; b) Compressão da parede cortada no ângulo desejado.

Como resultado Thamboo e Dhanasekar (2016) encontraram que os maiores valores de resistência à compressão foram obtidos para a amostra ensaiada na posição original, com assentamento perpendicular à direção de aplicação da carga, que não provoca a atuação de esforços de cisalhamento na junta de argamassa, apenas compressão. Para as demais amostras, com o aumento da inclinação das juntas, mais foi reduzindo a carga e, conseqüentemente, maior a parcela de atuação do cisalhamento na junta de assentamento. Parte dos resultados obtidos pelos autores pode ser observado no Quadro 9.

**Quadro 9 - Resultados dos ensaios de compressão diagonal**

<b>Inclinação da junta de assentamento</b>	<b>Compressão uniaxial média (MPa)</b>	<b>Resistência normal à junta (MPa)</b>	<b>Resistência paralela à junta (MPa)</b>	<b>Resistência ao cisalhamento na junta (MPa)</b>
<b>0°</b>	10,45	10,45	0	0
<b>22,5°</b>	9,38	8,00	1,37	3,32
<b>45°</b>	7,68	3,84	3,84	3,84
<b>67,5°</b>	7,51	1,10	6,41	2,65
<b>90°</b>	8,28	0	8,28	0

Fonte: Adaptado de THAMBOO E DHANASEKAR (2016).

Os autores consideraram que o comportamento apresentado pela alvenaria ensaiada com junta fina é semelhante ao apresentado pela alvenaria grauteada, pois a sua resistência é relativamente menos afetada pela posição da junta de assentamento em relação à direção do carregamento aplicado. O motivo para esse comportamento que tem tendências isotrópicas é o aumento da aderência e redução da espessura da junta de assentamento.

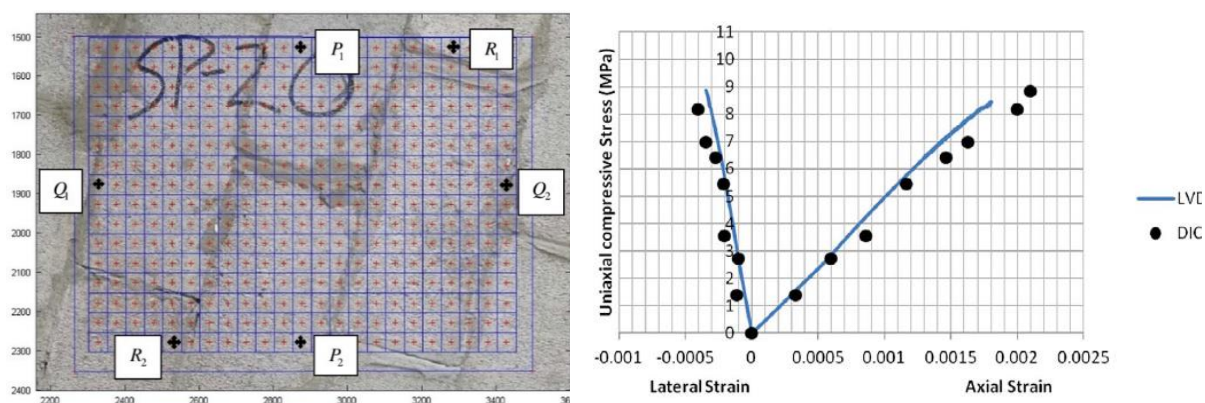
De acordo com Thamboo e Dhanasekar (2016), os elementos de alvenaria de concreto com junta fina apresentaram tendências de comportamento isotrópico, quando comparados ao comportamento da alvenaria convencional, que é claramente ortotrópico.



Para medir as deformações apresentadas por cada corpo de prova, os autores utilizaram transdutores de deslocamento (LVDTs) em uma das faces das paredes e, também, uma técnica de correlação de imagem digital (DIC), na outra face das paredes. Para a pesquisa em questão, os autores escolheram medir as deformações no sentido vertical (pontos P1 e P2), horizontal (pontos Q1 e Q2) e com inclinação de 45° (pontos R1 e R2).

A boa correlação encontrada pelos autores entre as deformações obtidas com a técnica DIC em relação às obtidas com os LVDTs (veja a Figura 24-b), mostra o potencial de sua utilização para medir as deformações apresentadas pelos corpos de prova, nas diferentes direções desejadas.

**Figura 24 - Pontos escolhidos para análise DIC e exemplo de resultados obtidos (curva tensão-deformação)**



Fonte: Adaptado de THAMBOO E DHANASEKAR (2016), p. 47 e 48. Legenda: a) Pontos utilizados para fazer a análise DIC; b) Correlação entre deformação obtida pelos LVDTs e pelo DIC.

Segundo os autores, no comportamento combinado de esforços de compressão e cisalhamento na alvenaria tradicional, as juntas agem como planos de fraqueza que modificam o comportamento da alvenaria sobre diferentes orientações das juntas em relação à direção de aplicação da carga, ampliando o efeito ortotrópico da alvenaria. A redução nos valores de compressão de painéis em que a direção de assentamento não é normal à aplicação da carga pode chegar a valores de 87%, para alvenaria tradicional. Para alvenaria de blocos de concreto totalmente grauteados essa redução costuma ser menor chegando a valores de até 43%, sendo estes valores bem próximos ao apresentado pela alvenaria de junta fina, mostrando a tendência de isotropia desse material.

Segundo Kanyeto e Fried (2011) e Marrocchino et al. (2009), o comportamento apresentado pela alvenaria de junta fina se parece muito mais com o comportamento de uma placa de concreto do que com uma alvenaria convencional.

Essa afirmação também é corroborada por Thamboo, Danasekar e Yan (2011), que complementam, afirmando que a mecânica do contínuo, que não pode ser aplicada para

descrever o comportamento da alvenaria tradicional, talvez possa ser aplicada para análise e projeto de alvenaria de junta fina. Os autores comentam que o comportamento na flexão da alvenaria tradicional é de um material quase cerâmico, pois a amostra apresenta falha repentina, enquanto a alvenaria de junta fina apresenta maior ductilidade, pois não falha de forma repentina, tendo apresentado apenas fissuras na interface após a carga de pico ser atingida.

Outra forma de avaliar essa mudança de comportamento da alvenaria de junta fina, de ortotrópico para isotrópico, pode ser através do coeficiente de resistência ortogonal, formado pela razão entre a resistência à tração na flexão da alvenaria na direção paralela e na direção normal à junta de assentamento. Esse valor costuma ser próximo a 2,0 na maioria das normas internacionais, mas no caso de a alvenaria ser grauteada, esse valor torna-se mais próximo de 1,0 (PARSEKIAN, HAMID e DRYSDALE, 2014).

Como no trabalho do Thamboo e Dhanasekar (2016), foi identificado que o comportamento da alvenaria de junta fina no cisalhamento é semelhante ao da alvenaria completamente grauteada, é possível que, no estudo de seu coeficiente de ortogonalidade a tendência de comportamento se repetia, devendo esta hipótese ser comprovada através de ensaios.

Hamid and Drysdale (1988) observaram ao realizar ensaios para determinação da resistência à tração na flexão em alvenaria convencional de blocos vazados de concreto que a resistência à tração na flexão paralela à junta de assentamento é de 2 a 4 vezes maior do que a resistência à tração na flexão perpendicular à junta de assentamento. Segundo os autores esses resultados confirmam a natureza ortotópica desse tipo de alvenaria. Os autores também observaram que a resistência à tração na flexão perpendicular à junta aumenta consideravelmente com o grauteamento dos blocos, fazendo com que essa razão entre os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão paralela e perpendicular fique entre 1 e 1,5.

No Quadro 10 podem ser observados alguns dos resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão no sentido normal e paralelo à fiada obtidos por Hamid e Drysdale (1988) para blocos vazados de concreto. Também é demonstrado o coeficiente de resistência ortogonal.



**Quadro 10 - Coeficiente de resistência ortogonal de blocos vazados de concreto**

<b>Tipo de bloco</b>	<b>Graute</b>	<b>Flexão normal</b>	<b>Flexão paralela</b>	<b>Coeficiente de resistência ortogonal</b>
Vazado 190x190x390 mm – (25,1 MPa) NB	Não	0,21 (32,5%) argamassa diferente 5,67 MPa (o resto é argamassa de 17 MPa).	0,83	4,0
	Não	0,43 (37,8)	1,00 (18,4%)	2,3
	GN (21,1 MPa)	1,40 (16,8%)	1,71 (11,2%)	1,2
Vazado 190x190x390 mm - (20,2 MPa) LB	Não	0,28 (30,4%)	1,16 (22,3%)	4,1
	GN	1,33 (9,5%)	1,76 (2,3%)	1,3
Vazado 190x190x390 mm – (17,1 MPa) WB	Não	0,25 (22,6%)	1,17 (7,8%)	4,7
	GN	1,57 (7,2%)	1,88 (7,7%)	1,2
Vazado 140x190x390 mm (23,6 MPa)	Não	0,33 (36,1%)	1,21 (3,9%)	3,7
	GN	1,58 (9,6%)	-	-
Vazado 240x190x390 mm 23,4 (MPa)	Não	0,45 (37,9%)	0,90 (14,3%)	2,0
	GN	1,38 (15,0%)	-	-

Fonte: Adaptado de Hamid and Drysdale (1988).

Portanto, para ser possível comprovar essa mudança de comportamento da alvenaria de junta fina assentada com composto polimérico em relação à alvenaria tradicional, devem ser realizados os ensaios de flexão na direção paralela e normal à fiada, para que seja possível obter o coeficiente de ortogonalidade da alvenaria.

Se forem observados os resultados dos ensaios de flexão na direção normal e paralela à fiada realizados por Marrocchino et al. (2009), que já foram apresentados no Quadro 7, pode ser percebido que o coeficiente de ortogonalidade obtido com o bloco de 14 MPa foi de 1,57 e para o bloco de 20 MPa, foi de 1,17. Como pode ser comprovado, o coeficiente de ortogonalidade foi menor para o bloco de maior resistência, indicando que a resistência à compressão dos blocos pode ter um papel preponderante nos resultados de flexão da alvenaria de junta fina. No mesmo sentido, também pode ser constatado por esse resultado que a tendência de comportamento ortotópico seja mais evidente para a utilização dos blocos de maior resistência à compressão. Esse tipo de comportamento não é esperado para a alvenaria tradicional, que considera basicamente as propriedades da argamassa na estimativa dessa propriedade. Dessa forma, torna-se preponderante desenvolver equações que

descrevam, de forma adequada, o comportamento da alvenaria de junta fina na flexão nas duas direções.

## **2.7 ESTANQUEIDADE E RESISTÊNCIA A INTEMPÉRIES DOS ELEMENTOS EM ALVENARIA**

De acordo com Colville and Amde (1995) a formação de fissuras nas juntas de alvenaria é a principal causa do início do processo de deterioração das estruturas de alvenaria, pois permite a entrada da umidade através das fissuras que causa danos progressivos. Segundo os autores, em muitos casos, a junta de argamassa deteriora primeiro, sendo necessário, portanto, aumentar a durabilidade das juntas de argamassa através da minimização das fissuras, que pode ser conseguida aumentando-se a resistência de aderência da argamassa com o bloco.

Como o aumento da aderência entre a argamassa e os blocos é esperado com a utilização de argamassas poliméricas, ou modificadas com polímeros, faz sentido esperar que a sua utilização amplie a durabilidade e estanqueidade das estruturas de alvenaria. Entretanto, existem poucos estudos desenvolvidos com o objetivo de investigar o desempenho da alvenaria de junta fina assentada com compostos poliméricos perante a ação de intempéries. Para o caso da argamassa modificada por polímeros, existem alguns pesquisadores que identificaram certa sensibilidade, principalmente nas propriedades de aderência, quando amostras do material foram expostas à umidade.

Colville, Amde e Miltenberg (1999) identificaram que argamassas modificadas com polímeros curadas em água aparentam valores de aderência inferiores do que as argamassas curadas em ambiente seco, podendo isso significar que a umidade possa prejudicar o ganho de resistência desse tipo de argamassa.

Maranhão et al. (2015) observaram uma influência negativa proveniente do aumento da umidade, no desempenho de argamassas modificadas com polímeros, utilizadas no assentamento de placas cerâmicas de revestimento. Esses pesquisadores identificaram que a resistência de aderência de diferentes tipos de argamassas modificadas com polímeros utilizadas no assentamento de placas cerâmicas tende a reduzir drasticamente com o aumento do teor de umidade. Os autores identificaram que para níveis de absorções de umidade de 10% ou superior resultam em redução de 75% ou mais na resistência de aderência.

Dessa forma, como a alvenaria tem, além da função estrutural, a função de garantir a estanqueidade das construções, é necessário que essa apresente desempenho adequado quanto à ação da umidade e das variações da temperatura que ocorrem na parte externa e

interna da edificação. Portanto, é de extrema importância compreender se as paredes submetidas aos ensaios de estanqueidade e de choque térmico previstos na norma de desempenho das edificações NBR 15575-4 (ABNT, 2021), conseguem fornecer resultados compatíveis com sua utilização, garantindo estanqueidade e comportamento mecânico adequado, perante a ação de intemperismo simulada nesses ensaios.

# 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa possui a intenção de estudar o comportamento da alvenaria de junta fina formada pelo assentamento de blocos de concreto com compostos poliméricos que atendem aos requisitos das NBR 16590-1 (ABNT, 2017) e NBR 16590-2 (ABNT, 2017).

Para atingir os objetivos propostos nesta pesquisa foram empregados blocos vazados de concreto com três resistências diferentes, com dimensões nominais de 140×190×290 mm, respectivamente, largura, altura e comprimento. Os blocos são provenientes de mesmo fabricante. O fato de os blocos serem provenientes do mesmo fabricante pode contribuir para uma redução no número de variáveis existentes entre as amostras, lincadas ao seu processo de fabricação, cuja influência não são alvos de interesse nesse estudo.

Foram escolhidos dois compostos poliméricos de assentamento para emprego nesta pesquisa, provenientes de diferentes fabricantes. Os fabricantes foram escolhidos pois possuem produtos que já estão sendo empregados na construção civil para alvenaria sem função estrutural. O procedimento de aplicação dos compostos poliméricos foi definido com base nas recomendações dos fabricantes e da norma NBR 16590-1 (ABNT, 2017).

O programa experimental dessa pesquisa foi organizado em diferentes etapas, conforme demonstrado a seguir:

- Primeira etapa - Caracterização dos materiais;
- Segunda etapa - Estudo preliminar do assentamento;
- Terceira etapa – Estudo do comportamento à compressão;
- Quarta etapa – Estudo do comportamento à flexão perpendicular à fiada;
- Quinta etapa – Estudo da flexão paralela e da isotropia;
- Sexta etapa – Estudo do desempenho.

As diferentes etapas definidas para essa pesquisa serão discutidas com maiores detalhes nos subitens apresentados na sequência.

## 3.1 PRIMEIRA ETAPA – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta etapa serão descritos os ensaios realizados para caracterização dos diferentes tipos de blocos de concreto e compostos poliméricos utilizados.

### **3.1.1 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO**

Os três diferentes tipos de blocos utilizados nessa pesquisa são diferenciados com base no valor aproximado de sua resistência característica à compressão. Portanto, as amostras receberam a nomenclatura de B4, B10 e B20. A letra “B” é proveniente da palavra bloco e o valor numérico em sequência é o valor aproximado da resistência característica à compressão da amostra.

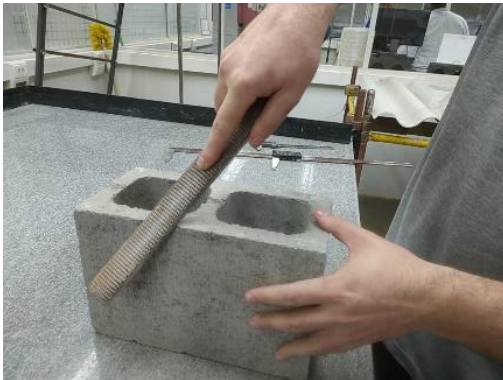
Os principais ensaios empregados na caracterização dos blocos de concreto foram: análise dimensional, absorção de água, área líquida e resistência à compressão, baseados na norma NBR 12118 (ABNT, 2013). Além desses ensaios, também foi realizado o ensaio de tração indireta baseado na norma ASTM C 1006-19 (2019) e um ensaio para determinação do módulo de elasticidade dos blocos baseado na norma NBR 8522-1 (ABNT, 2021).

As principais propriedades determinadas para cada tipo de bloco foram comparadas aos requisitos definidos pela NBR 6136 (ABNT, 2016). Mais detalhes sobre os ensaios realizados são apresentados na sequência.

#### **3.1.1.1 Análise dimensional**

Para realização do ensaio de análise dimensional foram utilizados 6 blocos íntegros de cada tipo, seguindo os procedimentos previstos no item 4 da NBR 12118 (ABNT, 2013). Os valores medidos em cada bloco nesse ensaio foram a largura, a altura, o comprimento, a espessura mínima das paredes e, as dimensões dos furos. Com exceção da determinação da espessura mínima das paredes dos blocos, as demais medidas foram tomadas na face do bloco dotada de paredes mais grossas. Os principais equipamentos utilizados no ensaio foram um paquímetro com capacidade de 600 mm e resolução de 0,01 mm para determinação do comprimento dos blocos e, um paquímetro com capacidade de 200 mm e resolução de 0,01 mm para determinar as demais medidas. Para reduzir possíveis interferências na realização das medições, pequenos sobressaltos e partículas soltas foram removidos das arestas dos blocos com a utilização de uma grossa (Figura 25-a). Na Figura 25 são encontrados alguns exemplos das medições realizadas para determinação do comprimento (Figura 25-b), largura (Figura 25-c), dimensão dos furos (Figura 25-d) e, espessura mínima das paredes (Figura 25-e).

**Figura 25 - Exemplo de medições realizadas no ensaio de análise dimensional**



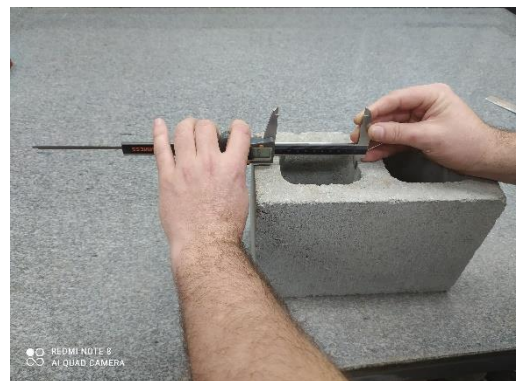
a)



b)



c)



d)



e)

Fonte: Autor (2023). Legenda: a) grossa; b) comprimento; c) largura; d) dimensão dos furos; e) espessura mínima das paredes.

### **3.1.1.2 Determinação da absorção de água e área líquida**

Neste item são apresentadas as principais etapas realizadas para determinação da absorção de água e área líquida das três amostras de blocos. Nesses ensaios foram utilizados três corpos de prova para cada tipo de bloco.

Para determinação da absorção de água, os blocos foram colocados em estufa ventilada por um período de 24 horas na temperatura de, aproximadamente, 110°C (Figura

26-a). Passado esse tempo, os blocos foram retirados da estufa e sua massa foi determinada em balança com resolução de 0,1 g, ainda quentes (Figura 26-b). Logo em seguida, os blocos foram devolvidos para a estufa, onde permaneceram por mais 2 horas na temperatura de 110°C. Depois desse intervalo, a massa foi novamente anotada, ainda quente. Esse procedimento de pesagem realizado a cada duas horas de estufa foi mantido até que a variação de massa fosse inferior a 0,5%. Atendida essa condição, a última massa registrada foi considerada a massa seca do corpo de prova. Em seguida, os corpos de prova foram resfriados ao ar e então submetidos ao processo de saturação que consiste na imersão em água por 24 horas (Figura 26-c). Após esse intervalo de tempo foi determinada a massa saturada dos blocos, deixando-os escorrer por 60 segundos e removendo o excesso de água com o pano úmido.

Para determinar o valor da absorção de água apresentada pelos blocos foi utilizada a equação 5.

$$Abs = \left( \frac{m_s - m_1}{m_1} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde,

*Abs* é a absorção, expressa em %;

*m<sub>s</sub>* a massa saturada, expressa em g;

*m<sub>1</sub>* a massa seca, expressa em g.

Para determinação da área líquida dos blocos, após a determinação de sua massa saturada conforme procedimento descrito acima, eles foram colocados na balança hidrostática para determinação de sua massa aparente (Figura 26-d). Para determinar o valor da área líquida dos blocos foi utilizada a equação 6.

$$A_L = \left( \frac{m_s - m_a}{(h \times \gamma)} \right) \times 1000 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde,

*A<sub>L</sub>* é a área líquida, expressa em mm<sup>2</sup>;

*m<sub>s</sub>* a massa saturada, expressa em g;

*m<sub>A</sub>* a massa aparente, expressa em g;

*h<sub>s</sub>* é a altura do bloco, expressa em mm;

$\gamma$  é a massa específica da água, tomada como  $1,0 \text{ g/cm}^3$ .

Algumas imagens do ensaio podem ser observadas na Figura 26.

**Figura 26 - Imagens do ensaio de absorção e área líquida**



a)



b)



c)



d)

Fonte: Autor (2023). Legenda: a) estufa; b) massa seca; c) imersão em água; d) massa aparente.

### 3.1.1.3 Determinação da resistência à compressão

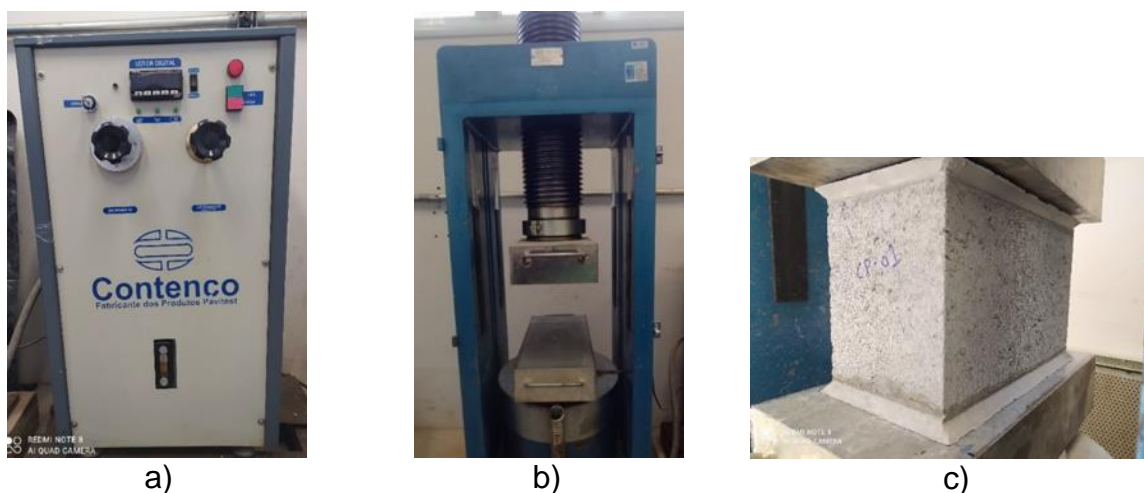
Para realização do ensaio de resistência à compressão dos blocos de concreto a área bruta foi determinada com a utilização de paquímetros digitais. Para medir o comprimento dos blocos foi utilizado paquímetro com capacidade de 600 mm e resolução de 0,01 mm. Para medir a largura dos blocos foi utilizado um paquímetro com capacidade de 200 mm e resolução de 0,01 mm. Para cada bloco foram realizadas seis medições de largura e seis medições do comprimento, sendo três na face em que as paredes do bloco são mais finas e três na face em que as paredes do bloco são mais grossas. A área bruta de cada bloco foi considerada como sendo a área resultante da multiplicação do valor médio da largura pelo valor médio do comprimento.



Para regularização da superfície dos blocos que entra em contato com os pratos da prensa foi utilizada a técnica de capeamento com pasta de cimento (Figura 27-c). O capeamento foi realizado sobre uma mesa nivelada. Um molde acrílico com espessura de 3 mm foi utilizado para garantir que a espessura do capeamento ficasse com espessura igual ou inferior a esse valor. Na parte externa dos blocos o capeamento foi finalizado com a passagem de uma espátula metálica com, aproximadamente, 45° de inclinação, para prevenir a queda do capeamento quando os blocos foram removidos da mesa de capeamento. Ensaios para determinação da resistência à compressão do material utilizado no capeamento foram realizados utilizando corpos de prova cilíndricos (50X100 mm), conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019), para garantir que a resistência à compressão da pasta de cimento fosse, no mínimo, igual à resistência à compressão dos blocos a serem ensaiados.

O ensaio de compressão dos blocos de concreto foi realizado em prensa do tipo servo hidráulica da marca Contenco, com capacidade de 200 tf e resolução de 0,01 tf. O controle de aplicação de carga foi manual, buscando manter uma taxa de carregamento conforme previsto na NBR 12118 (ABNT, 2013). Para o caso dos blocos tipo B10 e B20, que possuem resistência à compressão superior a 8 MPa, a velocidade utilizada foi de, aproximadamente, 0,15 MPa/s. Para o caso dos blocos do tipo B4 que possuem resistência à compressão inferior a 8 MPa, a velocidade utilizada foi de, aproximadamente, 0,05 MPa/s. Fotos do equipamento utilizado no ensaio podem ser observadas na Figura 27-a e Figura 27-b.

**Figura 27 – Corpo de prova e equipamentos utilizados nos ensaios**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) e b) equipamento utilizado no ensaio de compressão; c) imagem de corpo de prova capeado.

#### **3.1.1.4 Determinação da resistência à tração indireta**

O ensaio de tração indireta consiste em posicionar uma barra de aço cilíndrica lisa sobre um bloco de concreto e outra, na parte inferior do bloco alinhada com a de cima. Após

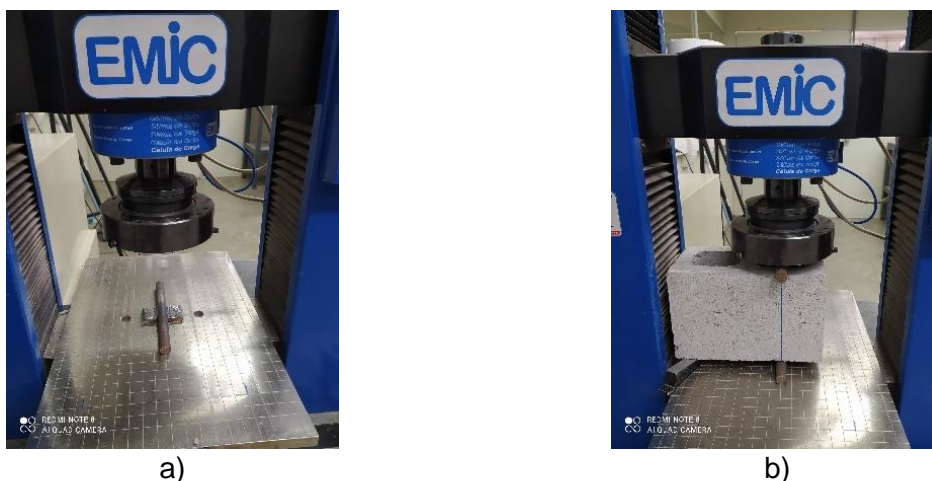
esse posicionamento, o conjunto é submetido a esforços de compressão, que geram esforços de tração no bloco, nas regiões em que as barras estão em contato com o bloco, provocando sua ruptura.

Os ensaios foram realizados em 6 corpos de prova de cada amostra e o local escolhido para posicionamento dos cilindros foi, aproximadamente, na região central de um dos vazados do bloco, de maneira semelhante aos ensaios realizados por Izquierdo (2015). Segundo a autora, ao se posicionar o cilindro na região central do bloco foram observados sinais de ruptura por esmagamento e não por tração indireta. Por esse motivo, nessa pesquisa, também foi adotada a região do vazado para fazer o ensaio.

O diâmetro das barras de aço cilíndricas utilizadas nessa pesquisa foi de 20 mm, atendendo aos valores indicados pela norma ASTM C1006-19 (2019) que ficam limitados a um diâmetro situado entre 1/8 e 1/12 da altura do bloco utilizado. A normativa também estabelece que a carga do ensaio deve ser aplicada sem impactos em uma velocidade inferior a 8900 N/min. A velocidade utilizada nos ensaios dessa pesquisa foi de 50 N/s, que corresponde a um valor de 3000 N/min, ou seja, inferior ao valor máximo estabelecido.

Para realização dos ensaios as barras foram posicionadas diretamente sobre os blocos. Visando deixar mais estável a posição das barras de aço durante o ensaio, evitando sua movimentação e desalinhamento, foram soldadas duas abas metálicas na região central de cada barra, permitindo maior contato com as chapas da prensa e estabilidade. Para posicionar o bloco na hora do ensaio uma cunha metálica foi utilizada com o motivo de mantê-lo nivelado. Em seguida, os pratos da prensa foram aproximados até entrar em contato com o corpo de prova, permitindo que o conjunto fique estável e a cunha possa ser removida para dar início ao ensaio. Na Figura 28-a e Figura 28-b podem ser observadas, respectivamente, a barra cilíndrica e a cunha usada para deixar o bloco nivelado antes de iniciar o ensaio.

**Figura 28 - Posicionamento do corpo de prova antes do ensaio**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) barra cilíndrica; b) cunha metálica para nivelamento.

Após o nivelamento do bloco e fixação do corpo de prova entre os pratos da prensa a cunha era removida e o ensaio era iniciado incrementando-se a carga até a ruptura. Na Figura 29-a pode ser observado um exemplo do conjunto utilizado nos ensaios do bloco tipo B10 e B20, utilizando a célula de carga de 20 tf. Para o caso do bloco tipo B4, que apresentou cargas de ruptura mais baixas nesse ensaio, foi utilizada uma célula de carga com capacidade de 1 tf, resultando no conjunto usado no ensaio mostrado na Figura 29-b.

**Figura 29 - Corpos de prova durante a realização do ensaio**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) montagem do ensaio utilizando célula de 20tf; b) montagem do ensaio utilizando célula de 1 tf.

A carga máxima registrada nos ensaios foi empregada na equação 7 para determinação da tensão de tração indireta máxima de cada corpo de prova.

$$A_L = \left( \frac{2 \times P}{\pi \times L \times H} \right) \times 1000 \quad (\text{Equação 7})$$

Onde,

$f_t$  é a resistência à tração por compressão diametral (tração indireta), em MPa;

$P$  é a carga máxima aplicada, em N;

$L$  é o comprimento do plano de separação do bloco (largura), em mm;

$H$  é a distância entre as duas barras cilíndricas usadas no ensaio (altura), em mm.

Os resultados da resistência à tração indireta foram apresentados com valores referentes à área bruta do bloco e, também, na área líquida. Os resultados referentes à área bruta são obtidos considerando a largura média do bloco medida no local de realização do ensaio. Os resultados da área líquida são referentes à largura média do bloco desconsiderando a espessura média dos vazados presentes na região do ensaio.

### **3.1.1.5 Determinação do módulo de elasticidade**

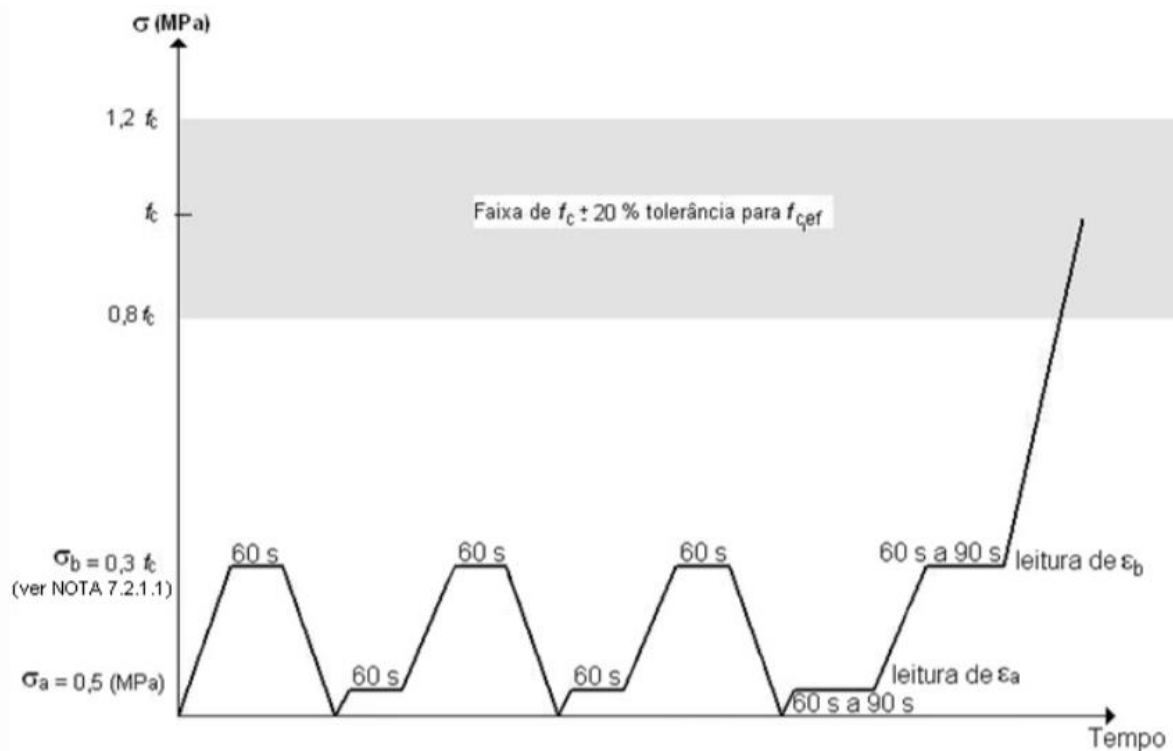
O módulo de elasticidade à compressão das amostras de blocos de concreto utilizados nessa pesquisa foi determinado com a utilização de um equipamento de ensaio capaz de aplicar ciclos de carga e descarga nos blocos de concreto, enquanto as informações de deformação resultantes foram captadas com a utilização de extensômetros elétricos.

Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). O equipamento empregado nos ensaios é composto por um sistema hidráulico que permite a aplicação de cargas de até 200 tf, acoplado a uma máquina universal de ensaios da marca EMIC modelo DL60000.

Para determinação das deformações nos blocos foram empregados extensômetros elétricos (strain gauges) da marca Excel com resistência de 120  $\Omega$  e comprimento de leitura de 40 mm. As deformações dos extensômetros foram registradas com auxílio de um equipamento de aquisição de dados da marca HBM, modelo PMX-455.

Para determinar a curva de tensão e deformação nos blocos quando submetidos a esforços de compressão foi desenvolvido um procedimento de ensaio adaptando o procedimento previsto na norma NBR 8522-1 (ABNT, 2021) destinada a determinação do módulo de elasticidade em corpos de prova cilíndricos de concreto endurecido. O ensaio previsto na NBR 8522-1 (ABNT, 2021) prevê a realização de ciclos de carregamento para determinação da deformação dos corpos de prova, conforme mostrado na Figura 30.

**Figura 30 - Carregamento para determinação do módulo de elasticidade**



Fonte: NBR 8522-1 (ABNT, 2023). P. 10.

Quatro ciclos de carregamento foram aplicados até 30% da tensão estimada de ruptura de cada bloco. O valor estimado de ruptura foi obtido através da média do ensaio de compressão realizado em dois blocos de concreto. Após atingir a tensão mencionada, ela foi mantida por, aproximadamente, 60 segundos e, então, o carregamento foi reduzido até a tensão de 0,5 MPa, permanecendo este também aplicado por 60 segundos. Em seguida novo ciclo de carregamento foi realizado. Após a aplicação do patamar do quarto carregamento na tensão definida o bloco era então levado a ruptura. A velocidade de aplicação de carga utilizada foi de 0,45 MPa/s, conforme previsto pela NBR 8522-1 (ABNT, 2021).

A leitura da deformação vertical de cada bloco foi determinada com colagem de dois extensômetros posicionados na metade da altura do bloco em paredes opostas. Com a utilização destes dados é possível utilizar a equação 8 para estimar o módulo de elasticidade na compressão dos blocos.

$$E_b = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \times 10^{-3} = \frac{\sigma_f - \sigma_i}{\varepsilon_f - \varepsilon_i} \times 10^{-3} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde,

$E_b$  é o módulo de elasticidade estimado do bloco, em GPa;

$\sigma_f$  é a tensão de compressão final do trecho considerado, em MPa;

$\sigma_i$  é a tensão de compressão inicial do trecho considerado, em MPa;

$\varepsilon_f$  é a deformação específica sob a tensão de compressão final do trecho considerado;

$\varepsilon_i$  é a deformação específica sob a tensão de compressão inicial do trecho considerado.

Como foi considerado interessante obter informações sobre as deformações laterais dos blocos durante o carregamento, mais dois extensômetros foram colados nas mesmas paredes dos anteriores, porém em posição horizontal, 35 mm abaixo dos extensômetros verticais.

O módulo de elasticidade foi determinado com base na relação de tensão e deformação obtidas entre os valores de tensão de 20 e 25% da tensão de ruptura. Como para os ensaios de compressão dos elementos de alvenaria o módulo de elasticidade foi determinado sem que a carga esteja estática, para os blocos também foi considerado esse trecho intermediário em que a carga está sendo aplicada e não estática.

Como a superfície dos blocos de concreto é muito irregular e apresenta alguns orifícios, a colagem direta dos extensômetros pode produzir variação nas leituras de deformação. Nesse sentido, antes de colar os extensômetros foi aplicada uma camada de compound adesivo de alta fluidez da marca Vedacit, visando preencher os orifícios da superfície do concreto e formar uma camada uniforme para colagem dos extensômetros elétricos. A aplicação do produto para regularizar a superfície foi feita nas duas paredes dos blocos em que os extensômetros foram colados. A aplicação do compound adesivo e os extensômetros colados podem ser observados na Figura 31.

**Figura 31 - Aplicação do compound adesivo**



Fonte: Autor (2023).

Antes da colagem dos extensômetros o local de aplicação teve o composto lixado até que a superfície de concreto ficasse aparente, com exceção de alguns orifícios que ficaram preenchidos com o composto adesivo tornando a superfície lisa. Duas granulometrias diferentes de lixas foram utilizadas. A lixa com granulometria n° 80 foi usada inicialmente para retirar com maior facilidade o excesso de composto adesivo. Posteriormente, uma lixa de granulometria 320 foi utilizada para deixar a superfície com um acabamento mais liso, possibilitando uma superfície de colagem mais regular para o extensômetro. Por fim, o local

de colagem dos extensômetros foi limpo com a utilização de acetona e, posteriormente, os extensômetros foram colados com a utilização de adesivo a base de cianoacrilato (cola superbonder).

### **3.1.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPOSTOS POLIMÉRICOS**

Foram utilizados nesta pesquisa dois compostos poliméricos para assentamento de alvenaria provenientes de dois fabricantes diferentes. Esses dois fabricantes foram escolhidos por possuírem produtos que estão sendo comercializados há alguns anos no mercado da construção civil, para assentamento de alvenaria de vedação.

A nomenclatura adotada para diferenciar os dois compostos poliméricos é CPA-01 e CPA-02. A sigla “CPA” significa Composto Polimérico de Assentamento, enquanto o número na sequência, é utilizado para diferenciar os dois fabricantes entre 01 e 02.

O material proveniente do fabricante CPA-02 veio de dois lotes de fabricação distintos. Para diferenciar os dois lotes de fabricação foi empregada uma letra minúscula “a” ou “b”, logo após a numeração, formando a nomenclatura CPA-02a e CPA-02b. O composto CPA-02a foi utilizado no assentamento da alvenaria empregada nos ensaios de caracterização da resistência à compressão da alvenaria, enquanto o composto CPA-02b foi empregado nos corpos de prova utilizados nas demais etapas da pesquisa.

Para o caso do composto CPA-01 e CPA-02a foram realizados todos os ensaios de caracterização previstos nesse subitem. Para o caso do composto CPA-02b foi dada preferência, somente, à realização dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas do composto.

Os principais ensaios utilizados para caracterização dos compostos poliméricos podem ser observados no Quadro 11.



**Quadro 11 - Ensaio de caracterização dos compostos poliméricos**

<b>Ensaio</b>	<b>Norma ou procedimento</b>	<b>Nº de CP por ensaio</b>	<b>Total de CP</b>
<b>Índice de consistência</b>	NBR 13276 (ABNT, 2016)	1	2
<b>Densidade de massa</b>	NBR 13278 (ABNT, 2016)	1	1
<b>Resistência à tração</b>	ASTM D 638	5	10
<b>Resistência à compressão</b>	ASTM D 695	5	10
<b>Resistência à flexão</b>	ASTM D 790	5	10
<b>Análise termogravimétrica</b>	ASTM D 6370	1	2
<b>Espectroscopia por absorção no infravermelho</b>	ASTM E 1252	1	2
<b>Calorimetria exploratória diferencial (DSC)</b>	ASTM D 3418	1	2

Fonte: Autor (2023).

Dentre os ensaios apresentados no Quadro 11, pode-se dizer que os ensaios para determinação da densidade de massa e índice de consistência tem a função de descrever o comportamento do material em estado fresco. Os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e resistência à flexão têm a função de descrever as propriedades mecânicas dos compostos poliméricos. Os ensaios de análise termogravimétrica (Tg), espectroscopia por absorção no infravermelho (FT-IR) e calorimetria exploratória diferencial (DSC) são utilizados para descrever as propriedades térmicas e químicas dos compostos poliméricos.

Nos próximos subitens são apresentadas mais informações sobre os ensaios utilizados para caracterização dos compostos poliméricos.

### **3.1.2.1 Caracterização do material em estado fresco**

Para avaliar as propriedades dos compostos poliméricos em estado fresco foram realizados os ensaios para determinação de seu índice de consistência e de sua densidade de massa. Essas propriedades podem influenciar as características empregadas no manuseio e aplicação dos compostos poliméricos durante o assentamento da alvenaria. O ensaio para determinação do índice de consistência já é previsto na norma NBR 16590-2 (ABNT, 2017), para caracterização de compostos poliméricos destinados à alvenaria de vedação.

Para realização do ensaio de determinação do índice de consistência dos compostos poliméricos foi empregado um procedimento com base na norma NBR 13276 (ABNT, 2016). O equipamento utilizado no ensaio é denominado mesa para índice de consistência, que possui as características previstas na NBR 7215 (ABNT, 2019).



Antes do início do ensaio, uma fina camada de óleo mineral foi aplicada sobre a superfície da mesa e no interior do molde utilizado, para evitar sua adesão com os compostos utilizados. Esse ensaio consiste em preencher um molde troncocônico com 3 camadas sucessivas de argamassa com aproximadamente a mesma altura. Em cada camada foram aplicados impactos com soquete metálico para adensamento do material. Foram aplicados quinze, dez e cinco golpes, respectivamente, na primeira, segunda e terceira camadas. Após a realização do adensamento dos compostos eles foram rasados dentro do molde com auxílio de uma espátula metálica, fazendo movimentos de vaivém. Em seguida, o molde foi removido na vertical e 30 quedas em 30 segundos foram aplicadas no material. Após aplicação das quedas foram determinadas três medidas do diâmetro resultante do espalhamento do composto polimérico com uso de paquímetro com capacidade de 600 mm e resolução de 0,01 mm. A média dessas três medidas foi considerada como sendo o índice de consistência dos compostos poliméricos. A imagem dos equipamentos utilizados no ensaio pode ser visualizada na Figura 32.

**Figura 32 - Mesa para determinação do índice de consistência**



Fonte: Autor (2023).

Outro ensaio realizado para avaliar as características em estado fresco dos compostos poliméricos foi o ensaio para determinação da densidade de massa em estado fresco, realizado conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005). Esse ensaio consistiu em adensar o composto polimérico em um recipiente cilíndrico de volume conhecido para determinar a sua densidade no estado fresco. O cilindro foi preenchido em 3 camadas de altura aproximadamente iguais. Em cada camada foram aplicados 20 golpes no perímetro do composto polimérico, sendo que cada golpe corresponde à entrada e à saída da espátula na posição vertical. Após a execução dos golpes em cada camada três quedas com altura de aproximadamente 3 cm foram aplicadas no recipiente cilíndrico contendo o composto. Por fim, após o adensamento das três camadas o excesso de material foi removido com o auxílio de

espátula realizando-se duas passadas ortogonais entre si, fazendo-se movimentos de vaivém com inclinação de, aproximadamente, 45° em relação à superfície. Após finalizado o rasamento, a massa do recipiente cilíndrico (com tara conhecida) mais a massa do composto polimérico foi determinada. O valor da densidade de massa é calculado pela razão entre a massa de composto polimérico adicionada ao cilindro metálico dividido pelo volume interno do recipiente. Na Figura 33-a e Figura 33-b pode ser observado, respectivamente, o recipiente cilíndrico preenchido com o composto CPA-01 e CPA-02a.

**Figura 33 - Ensaio de densidade de massa no estado fresco**



a)



b)

Fonte: Autor (2023)

### **3.1.2.2 Ensaios para caracterização das propriedades térmicas e químicas**

Os ensaios realizados para caracterização das propriedades térmicas e químicas dos compostos poliméricos são a análise termogravimétrica (TGA), a calorimetria exploratória diferencial (DSC) e a espectroscopia por absorção no infravermelho (FT-IR).

Todos esses ensaios foram realizados pelo Centro de Caracterização e Desenvolvimento do Materiais (CCDM) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

A ideia inicial seria caracterizar os compostos poliméricos através desses três ensaios apenas na condição em estado fresco, logo após serem removidos da embalagem. Entretanto, foi considerado relevante compreender a diferença nas suas propriedades após seu endurecimento, sendo empregados, posteriormente, corpos de prova endurecidos nos ensaios, remanescentes dos ensaios de compressão.

### **3.1.2.2.1 Espectroscopia por absorção no infravermelho (FT-IR)**

O ensaio de espectroscopia por absorção no infravermelho (FT-IR) é previsto na norma NBR 16590-2 (ABNT, 2017) para caracterização de compostos poliméricos empregados em alvenaria de vedação.

De acordo com as informações descritas na norma, o ensaio é realizado para identificar se o padrão espectroscópico dos materiais que constituem o composto polimérico é compatível com uma resina acrílica estirenada.

Como os compostos poliméricos são formados por uma mistura homogênea e industrializada de agregados miúdos, carga mineral, água e blenda de resinas poliméricas (NBR 16590-1, 2017), é possível que esses diferentes componentes possam contribuir para apresentar variações nos padrões espectroscópicos obtidos no ensaio. Portanto, talvez seja interessante a norma padronizar algum procedimento de beneficiamento desse material para empregar no ensaio de espectroscopia.

De acordo com as informações provenientes do relatório de ensaio CCDM (2023a) as amostras de compostos poliméricos provenientes da embalagem, em estado fresco, foram submetidas a uma filtragem assistida por solvente (acetona) para remoção do excesso de carga mineral, antes da realização dos ensaios de espectroscopia.

De acordo com as informações passadas no referido relatório, os ensaios de espectroscopia foram realizados de acordo com ASTM E1252 (2021) em um espectrofotômetro Nicolet 4700 FTIR da Thermo Nicolet. O espectro foi obtido com 32 repetições, com leitura de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ , e resolução igual a 4  $\text{cm}^{-1}$ . Para a análise FT-IR as amostras foram preparadas com a incorporação de brometo de potássio.

### **3.1.2.2.2 Análise termogravimétrica (TG)**

O ensaio de análise termogravimétrica foi realizado nas duas amostras de composto polimérico com o objetivo de identificar se os critérios de perda de massa previstos na NBR 16590-2 (ABNT, 2017) são atendidos.

No total foram realizados dois ensaios para cada composto polimérico. Um para a amostra proveniente diretamente da embalagem, em estado fresco, e um segundo, em amostra em estado endurecido.

De acordo com as informações fornecidas pelo CCDM (2023a), o ensaio foi realizado seguindo as diretrizes da norma ASTM D6370 (ASTM, 2019) e o equipamento utilizado no ensaio foi um analisador térmico Q500 da TA instruments.

### 3.1.2.2.3 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

Os ensaios de calorimetria exploratório diferencial foram realizados pelo CCDM da UFSCar. Objetivo de realização desse ensaio é obter as temperaturas de transição térmica dos polímeros, principalmente, a transição vítrea ( $T_g$ ). A temperatura de transição vítrea pode ser considerada a temperatura na qual se inicia o movimento de segmentos da cadeia polimérica, fazendo com que o material passe de um estado mais ordenado (vítreo) para um estado menos ordenado e mais flexível (borracha), sendo este identificado na curva DSC como uma mudança na linha de base (MACHADO E MATOS IN CANEVAROLO, 2017).

Em termos práticos, podem ser citadas as observações feitas por Huang e Gong (2021) ao realizar ensaios de tração em diferentes misturas de emulsões acrílicas estirenadas (Não é composto polimérico de assentamento). Segundo os autores, ao realizar ensaios de tração em temperaturas abaixo da  $T_g$  dos materiais, foi possível perceber que quanto maior a temperatura de transição vítrea de cada material, maior foi a resistência à tração observada e menor o valor de alongamento observado na ruptura.

Outra informação obtida no ensaio DSC é o ponto de fusão que corresponde ao máximo pico de fusão observado na curva DSC e pode ser considerado como a temperatura na qual desaparece totalmente a cristalinidade do polímero (MACHADO E MATOS in CANEVAROLO, 2017).

Segundo informações fornecidas em CCDM (2023-d), nas amostras extraídas da embalagem, em estado fresco, os ensaios foram feitos conforme a norma ASTM D3418 (2021). Essas amostras foram aquecidas de 23 a 450°C, a uma razão de aquecimento de 20°C/min. O equipamento utilizado no ensaio é um DSC modelo DSC 214 Polyma da Netzsch.

Esse ensaio também foi realizado em amostras no estado endurecido, empregando o mesmo equipamento. Sendo que, para esse caso, foram realizados dois ciclos de aquecimento até 120°C a uma taxa de 20°C/min, conforme sugerido pelo laboratório. De acordo com CCDM (2023b), o primeiro aquecimento mostra a influência do processo de fabricação sobre o polímero e o segundo reflete os fatores intrínsecos ao polímero, sendo mais adequado para identificação de um material.

### 3.1.2.1 Caracterização das propriedades mecânicas

Os ensaios realizados para caracterização das propriedades mecânicas dos compostos poliméricos foram os de resistência à compressão, resistência à flexão e resistência à tração, realizados, respectivamente, conforme as normas ASTM D695, ASTM D790 e ASTM D638.

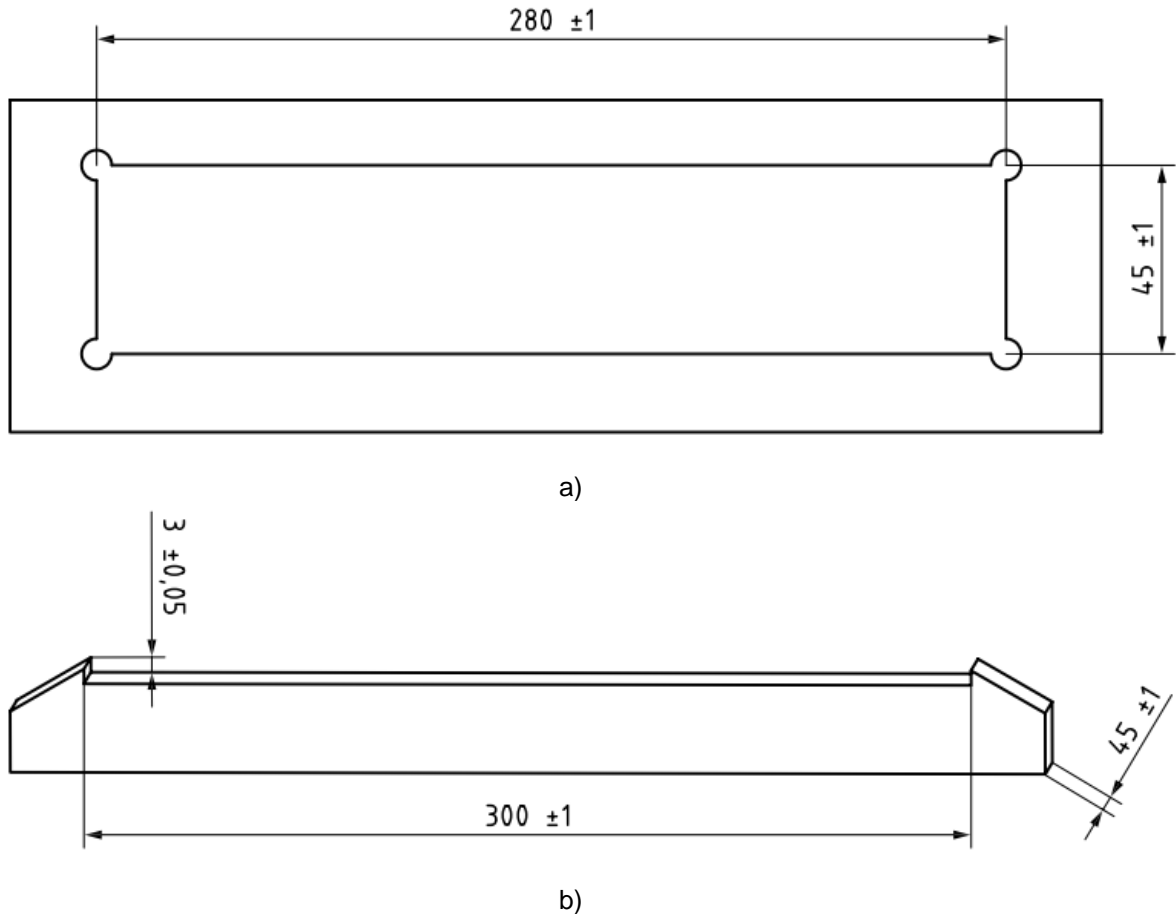
### **3.1.2.1.1 Abordagem inicial da moldagem dos compostos**

Para realização dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas dos compostos poliméricos, foi dada preferência para utilização de normas internacionais utilizadas na caracterização de plásticos e polímeros, ao invés dos ensaios utilizados para argamassa cimentícia convencional para assentamento. Essa decisão foi tomada devido aos problemas com retração e fissuração relatados nos trabalhos de Rocha (2012) e Paul Filho (2016), já mencionados no capítulo anterior, ao tentar moldar corpos de prova de composto polimérico nas dimensões normalmente empregadas para argamassa cimentícia convencional.

Embora existam essas normas internacionais para ensaios de polímeros e plásticos, elas não definem um único procedimento para fabricação e preparação dos corpos de prova. De acordo com essas normas os corpos de provas utilizados podem ser obtidos de amostras extrudadas ou moldadas no formato mais indicado para os ensaios, ou, serem cortados a partir de amostras maiores.

Com o objetivo de adotar um procedimento de moldagem que seja adequado para esse tipo de material, uma das primeiras ideias aventadas foi realizar a moldagem dos corpos de prova de forma semelhante ao procedimento descrito na norma ISO 13007-2 (International Standard, 2019). Essa norma estabelece um procedimento empregado para realização de moldagem de corpos de prova para o ensaio de determinação da deformação transversal de argamassas colantes. O procedimento consiste em preencher e adensar uma camada de argamassa de 5 mm no molde da Figura 34-a em uma mesa de adensamento por quedas. Em seguida esse molde é removido permanecendo somente a argamassa. Em seguida o molde da Figura 34-b com espessura de 3 mm e aberto nas laterais é posicionado sobre a camada de argamassa e, sobre ele, um peso de 10 kg é aplicado durante 1 hora. Após 48 horas os moldes são removidos formando os corpos de prova.

**Figura 34 - Moldes do ensaio de deformação transversal (dimensões em milímetros)**



Fonte: ISO 13007-2 (INTERNATIONAL STANDARD, 2019), p. 22. Legenda: a) Template A – molde que contém a argamassa; b) Template B – molde posicionado sobre a argamassa.

Como pode ser observado na Figura 34, esse processo de moldagem iria produzir corpos de prova finos e compridos que poderiam, após seu endurecimento, serem recortados em dimensões adequadas para os ensaios de tração e flexão previstos em normas internacionais. Entretanto, após algumas observações preliminares do comportamento dos compostos poliméricos esse procedimento de moldagem foi descartado.

Como o composto polimérico existente nas laterais das formas, ficaria exposto ao ambiente, essa seria a parte que endureceria primeiro devido a saída da água. No entanto, a parte interior da amostra sem contato com o ar, provavelmente, ainda estaria mole devido a presença de água. Portanto, durante a remoção do molde parte do material da região central poderia ser removido junto com o molde. Além disso, após a remoção do molde, como a região central do corpo de prova ainda estaria mole por possuir maior quantidade de água, a tendência seria que essa parte apresentasse movimentação conforme a água vai sendo

liberada para o ambiente. Essa movimentação na região central das amostras poderia ser resistida pelo material polimérico que já está endurecido nas bordas, podendo provocar tensões internas durante esse processo e, possivelmente, fissuras. Por esse motivo, essa ideia foi descartada.

Como as amostras de composto polimérico apresentaram índice de consistência inferior (menor espalhamento) ao valor recomendado para argamassa cimentícia de assentamento na NBR 16541 (ABNT, 2016), imaginou-se que pode ser adequado desenvolver um procedimento de moldagem semelhante ao utilizado para o material de rejuntamento cimentício, uma vez que, ele costuma apresentar menor trabalhabilidade durante o manuseio do que a argamassa de assentamento convencional.

Dessa forma, para realização das moldagens dos compostos utilizados nos ensaios dessa pesquisa foram escolhidas formas de formato prismáticos com dimensões de 25x25 mm de largura e aproximadamente 300 mm de comprimento. A dimensão das formas utilizadas é semelhante às empregadas para realização de alguns dos ensaios de argamassa de rejuntamento previstas na NBR 14992 (ABNT, 2003) e, portanto, devem ser facilmente encontradas em laboratórios de caracterização de materiais de construção. Como suas dimensões são menores na largura e altura do que as utilizadas nos ensaios de argamassa de assentamento e revestimento previstas na NBR 13279 (ABNT, 2005), parte dos efeitos da retração observados por outros pesquisadores pode ser reduzido, ou evitado.

Nesse momento o objetivo era utilizar um mesmo procedimento de moldagem para todos os ensaios mecânicos de caracterização dos compostos poliméricos. Após seu endurecimento os compostos seriam, então, enviados para o Centro de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (CCDM) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) para que fossem cortados nos formatos mais indicados para cada ensaio (tração, flexão e compressão).

O procedimento adotado para realização da moldagem dos corpos de prova dos compostos poliméricos utilizados nessa pesquisa foi semelhante, em parte, aos procedimentos descritos nos anexos C e E da NBR 14992 (ABNT, 2003).

Inicialmente, o processo de moldagem do material consistiu em aplicar uma fina camada de óleo mineral na parte interna das formas para impedir a aderência do composto polimérico. Em seguida, o composto polimérico foi colocado e distribuído no interior da forma com o auxílio de uma espátula em duas camadas. Na primeira camada o material foi adicionado à forma (Figura 35-a) e acomodado com a espátula de modo a formar uma camada regular e nivelada de material até metade da altura da forma (Figura 35-b). Então, 30 golpes foram aplicados na camada para remover qualquer presença de ar no material. Cada golpe

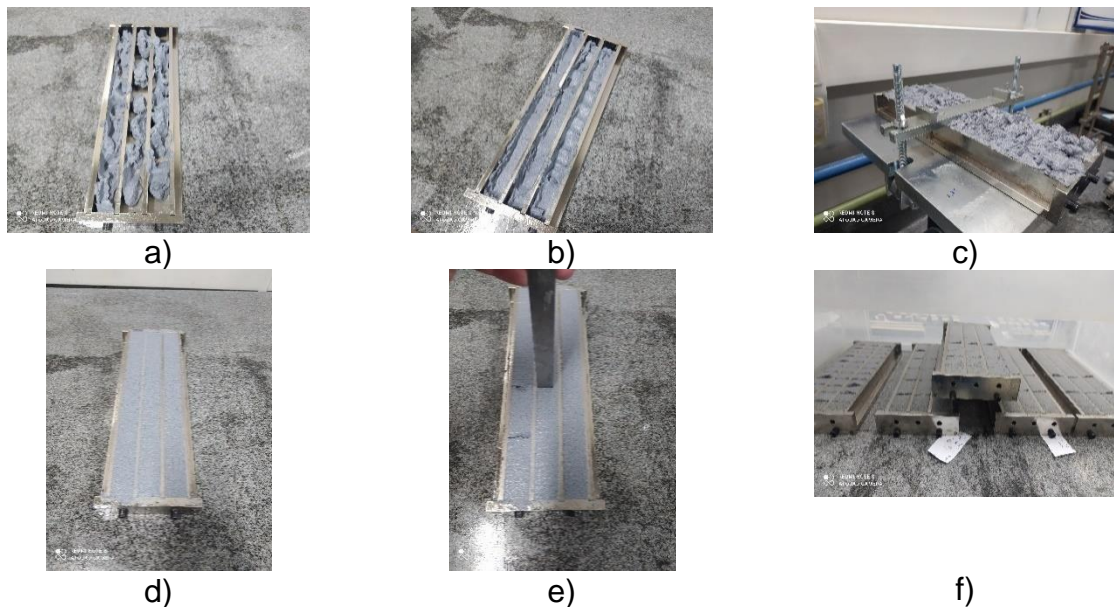
corresponde a entrada e saída da espátula na camada, na posição vertical. Em seguida mais material foi adicionado na forma em excesso, sobressaindo seu topo. Posteriormente, o mesmo procedimento de adensamento mencionado anteriormente foi aplicado nessa nova camada. Por fim, o material, ainda em excesso na forma foi posicionado na mesa de adensamento, onde foram aplicadas 30 quedas (Figura 35-c). Optou-se pelo adensamento por quedas nesse equipamento ao invés de quedas manuais sobre a mesa, para limitar a influência do operador nessa etapa. Após a finalização do adensamento o excesso de material foi removido com a utilização da espátula com inclinação de, aproximadamente, 30° em relação ao topo da forma. A espátula foi passada duas vezes sobre a forma, em sentidos opostos, na direção de seu comprimento. Durante sua passagem realizou-se curtos movimentos horizontais de um lado para o outro (vaivém), para facilitar a remoção do excesso de material.

Como o comprimento dos corpos de prova utilizados em cada um dos ensaios serão diferentes, optou-se por realizar, cortes no material ainda em estado fresco com a espátula, logo após o término de sua moldagem, para que seu comprimento fique próximo ao utilizado em cada ensaio, Figura 35-e. Esse procedimento tem a função de facilitar o processo de corte e beneficiamento dos corpos de prova e, também, reduzir os possíveis efeitos da retração, pois o comprimento das amostras foi reduzido. Dessa forma, a ideia seria obter amostras com comprimento próximo ao indicado para cada ensaio e enviar as mesmas para o Centro de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (CCDM) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) para que os corpos de prova pudessem ser cortados e beneficiados no formato indicado para cada um dos ensaios.

Os corpos de prova que seriam utilizados nos ensaios de tração foram cortados com comprimento de 170 mm, os corpos de prova do ensaio de flexão foram cortados com comprimento de 65 mm, os corpos de prova do ensaio de compressão foram cortados com 50 mm e, o dos corpos de prova do ensaio de absorção foram cortados com comprimento de 25 mm.

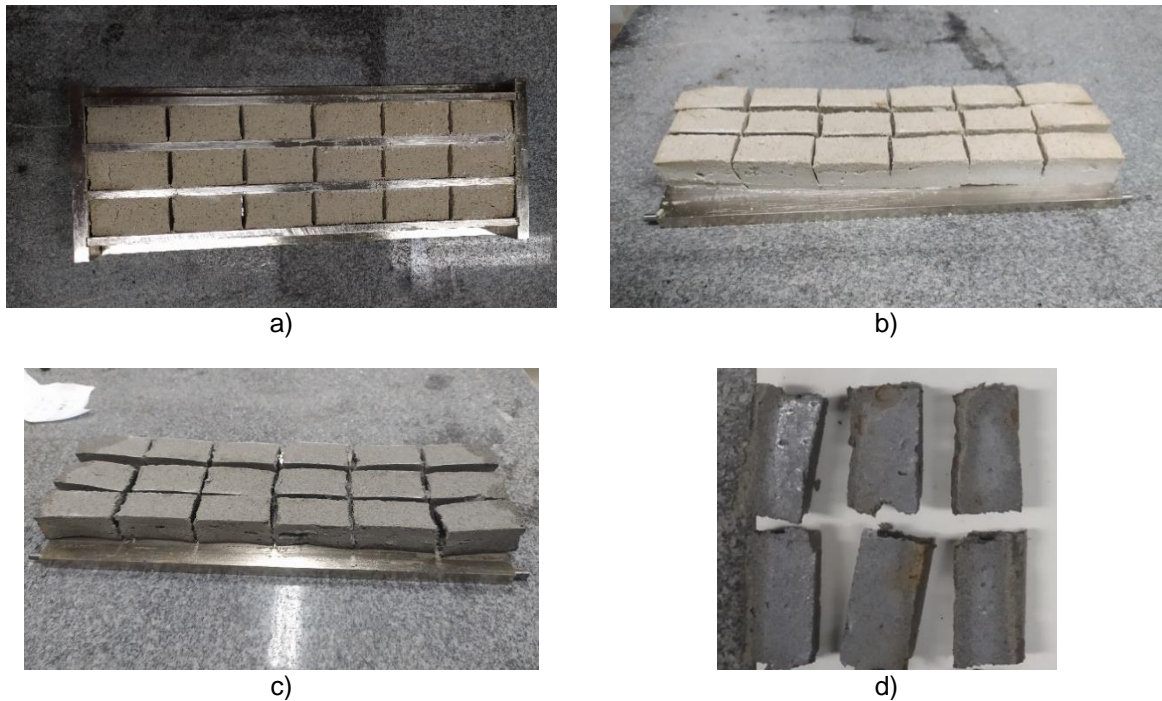
Por fim, após a realização dos cortes em estado fresco, as formas foram posicionadas sobre uma mesa e cobertas com uma caixa plástica com abertura em apenas uma de suas laterais, para limitar a circulação de ar incidente sobre as amostras durante as primeiras 24 horas (Figura 35-f), visando reduzir a velocidade inicial de perda de água.



**Figura 35 - Moldagem dos corpos de prova**

Fonte: Autor (2023).

No início a intenção era deixar o composto polimérico apenas 24 horas nas formas, mas foi observado que ao remover a forma em 24 horas a parte superior do material que ficou exposta ao ar apresentou mudança em sua coloração e significativo endurecimento. Entretanto, ao remover a forma foi possível observar que a parte inferior dos compostos ainda estava com coloração mais próxima da original, indicando menor nível de endurecimento e secagem, em relação ao material da superfície exposta. Na Figura 36-b e Figura 36-d pode ser observada a mudança da coloração apresentada, respectivamente, para os compostos CPA-01 e CPA-02. Na parte superior as amostras apresentaram uma mudança de tonalidade indicando maior secagem do que na parte inferior, que possui coloração semelhante à do material em estado fresco, indicando maior presença de umidade e menor nível de endurecimento.

**Figura 36 - Imagem da remoção das formas**

Fonte: Autor (2023).

Principalmente no caso do composto polimérico 02 foi possível observar a formação de deformação lateral nos corpos de prova e redução na sua altura após a desforma. Por esse motivo, além das 24 horas sob a caixa plástica os dois compostos também foram deixados mais 24 horas em ambiente de laboratório, sem a proteção da caixa, para permitir maior endurecimento na hora da desforma. Não foi considerado deixar o material por mais tempo dentro da forma, devido ao fato de que a parte superior tende a formar uma camada mais endurecida que o restante do material. Quando o restante do corpo de prova, que está mais úmido é removido da forma, ocorrem deformações durante a secagem e endurecimento que provocam um pequeno arqueamento na parte que já havia endurecido nas idades mais avançadas. A partir dessa observação determinou-se que os corpos de prova fossem deixados apenas dois dias nas formas até serem desmoldados.

Após alguns dias da desmoldagem dos compostos, eles foram levados para o CCDM da UFSCar para realização do corte e beneficiamento dos corpos de prova. Infelizmente, os funcionários do CCDM informaram que não foi possível realizar o corte e beneficiamento dos corpos de prova, devido a presença de poros e de material abrasivo na amostra. Uma alternativa apontada pelos funcionários do CCDM havia sido realizar o corte das amostras com utilização de jatos de água. Todavia, não foi adotado esse procedimento, pois não havia certeza sobre a influência desse processo de corte e da utilização da água no comportamento das amostras.

Após essas tentativas iniciais frustradas de moldagem dos corpos de prova para caracterização das propriedades mecânicas dos compostos poliméricos, uma nova abordagem foi adotada. O processo de moldagem de cada um dos ensaios realizados pode ser observado nos próximos subitens.

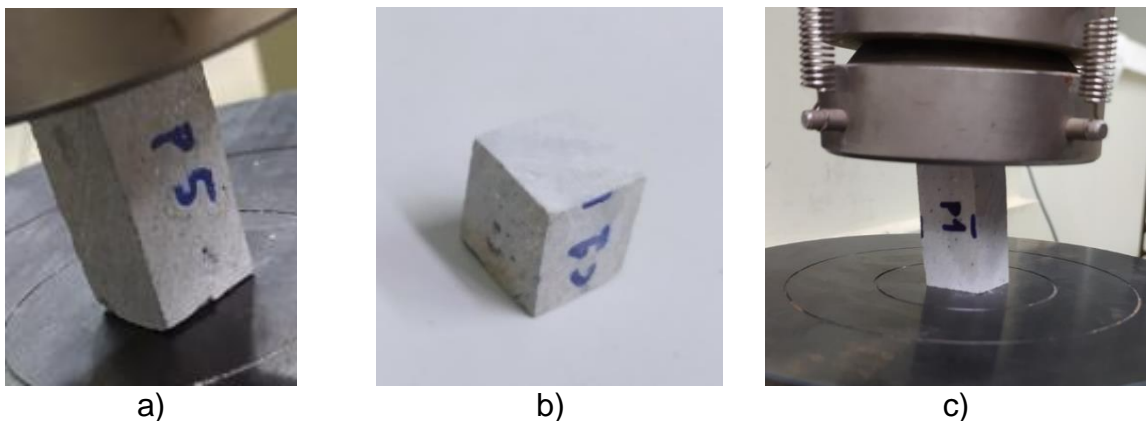
### 3.1.2.1.1

### Ensaio de compressão

Para realização dos ensaios de compressão optou-se por realizar procedimento semelhante ao demonstrado na Figura 35, no entanto, algumas mudanças foram feitas, pois ensaios preliminares de compressão haviam demonstrado a presença de vazios no interior de algumas amostras moldadas dessa forma. Esses vazios foram notados quando os corpos de prova estavam sendo cortados em serra policorte para obtenção das dimensões desejadas para o ensaio. Exemplo dos vazios observados nas amostras são demonstrados na Figura 37-a e Figura 37-b. A presença desses vazios em alguns corpos de prova pode fazer com que não seja possível prever adequadamente a resistência à compressão do material, devido a área real dos corpos de prova em alguns trechos que possuem esses defeitos ser menor do que a área considerada nos ensaios.

Outro problema identificado após o corte das amostras em serra policorte foi que as superfícies dos corpos de prova não estavam ficando completamente retas. Além disso, as faces dos corpos de prova nem sempre apresentavam ortogonalidade entre si (Figura 37-c). Esse tipo de problema pode contribuir para que os esforços de compressão não sejam realizados de forma centralizada ao eixo vertical dos corpos de prova, provocando o surgimento de outros esforços durante o ensaio.

**Figura 37 - Problemas observados nas amostras**

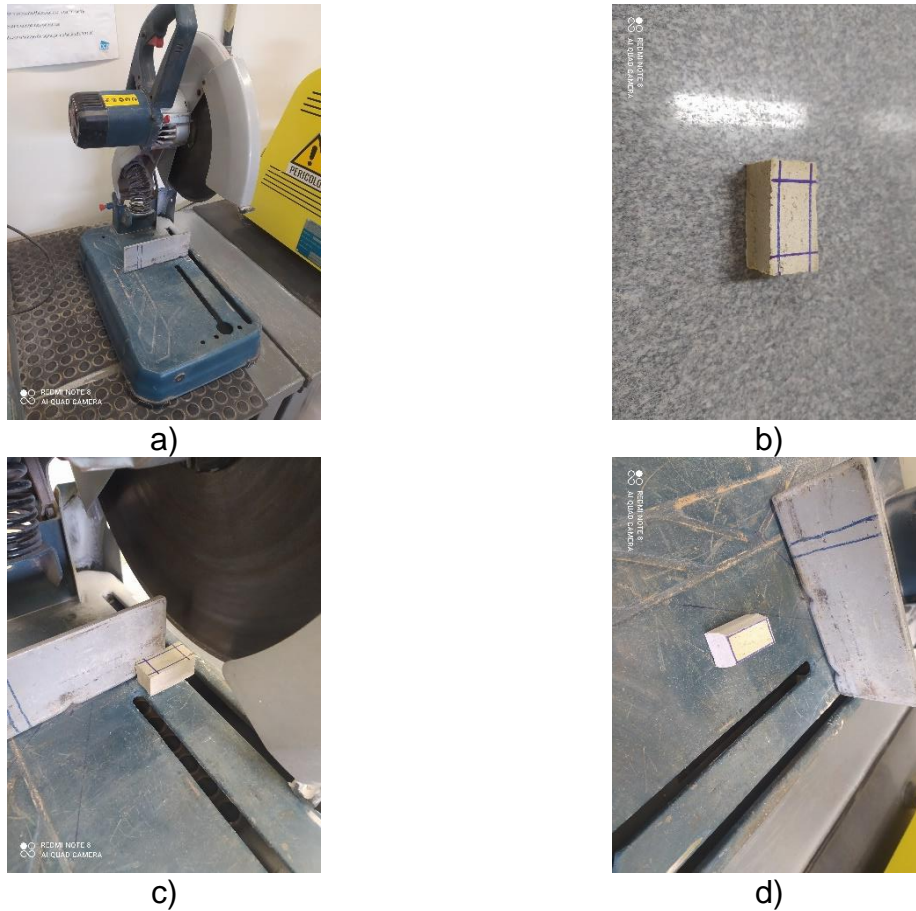


Fonte: Autor (2023).

Uma das possibilidades de origem desses vazios no interior dos corpos de prova foi atribuída ao processo de adensamento com a espátula. Portanto, essa etapa foi retirada do processo de adensamento. Dessa forma, o processo de adensamento dos corpos de prova

utilizados no ensaio de compressão foi realizado aplicando-se uma camada fina de óleo nas formas metálicas antes do início da moldagem. Posteriormente, os compostos foram introduzidos e espalhados no interior das formas com o auxílio de espátula, formando uma camada nivelada e uniforme com, aproximadamente, metade da altura da forma. Em seguida, o molde contendo material polimérico foi colocado na mesa de adensamento para aplicação de 30 quedas em 30 segundos. Posteriormente, o restante da forma foi preenchido com composto polimérico formando uma camada nivelada que excede, em até 5 mm a altura da forma. Então, mais 30 quedas foram aplicadas na mesa de adensamento. Por fim, o material foi rasado com a duas passadas de espátula no sentido do comprimento do molde. Cada passada de espátula foi realizada em sentido oposto ao anterior. A inclinação da espátula durante o procedimento foi de, aproximadamente, 30° em relação à superfície da forma, realizando movimentos de vaivém. Finalizado o rasamento dos compostos nas formas, cortes verticais com a espátula foram aplicados a cada de 50 mm de comprimento. Esses cortes formaram segmentos prismáticos de composto polimérico no interior das formas com dimensões de 25x25x50 mm. Após a realização dos cortes, os corpos de prova permaneceram por 48 horas dentro dos moldes. Nas primeiras 24 horas os moldes permaneceram embaixo de uma caixa plástica, visando reduzir a velocidade inicial de perda de água. Após terem sido desmoldados os corpos de prova foram colocados sobre placas cerâmicas com sua parte superior (que estava em contato com o ar) virada para baixo e permaneceram em ambiente de laboratório até a realização dos ensaios de compressão.

Nas datas selecionadas para realização dos ensaios de compressão seis corpos de prova com 50 mm de comprimento foram marcados e cortados em serra policorte até atingirem dimensões um pouco maiores ao formato prismático desejado de 15 mm de largura, 15 mm de espessura e 30 mm de comprimento. Na Figura 38-a pode ser observada a serra policorte utilizada, na Figura 38-b pode ser observada a marcação realizada para os cortes, na Figura 38-c pode ser observado o processo de corte e na Figura 38-d pode ser observada a aparência de um corpo de prova após o corte.

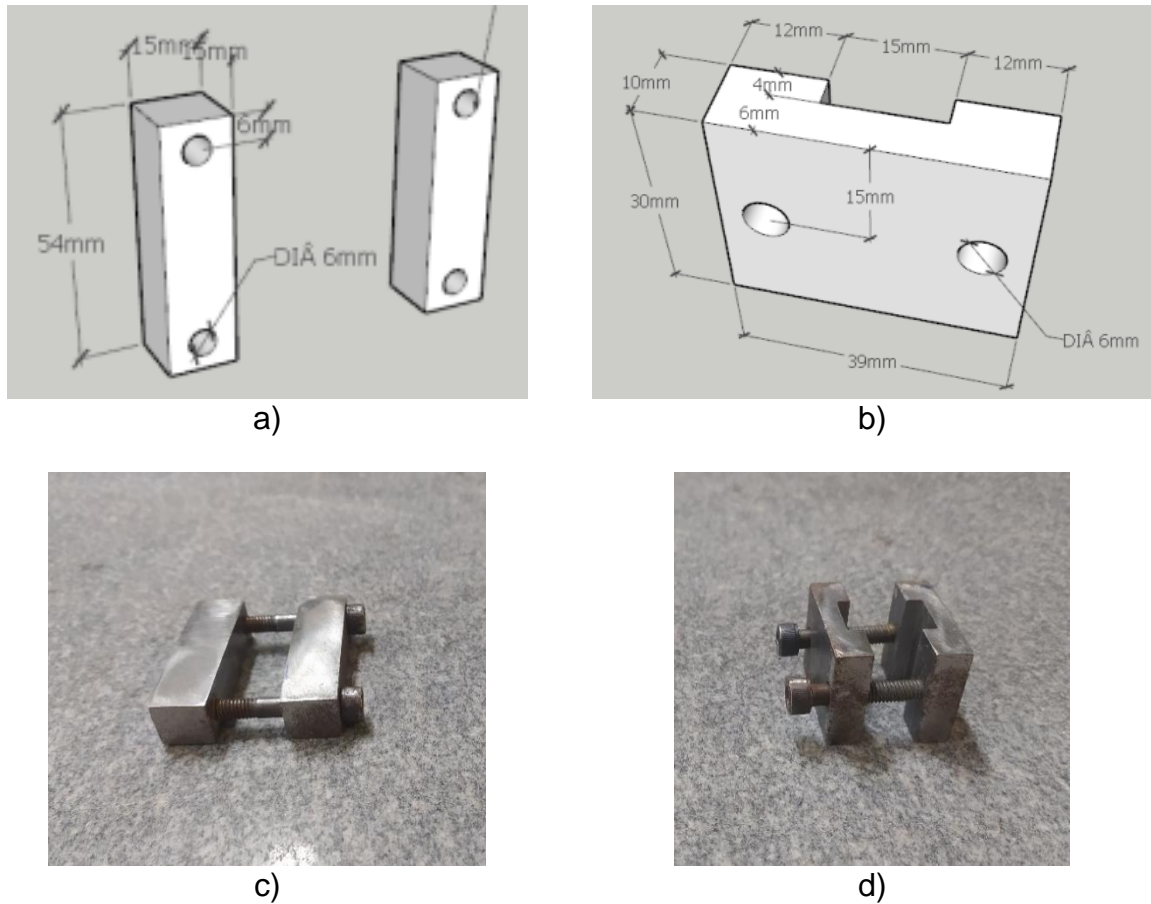
**Figura 38 - Corte dos corpos de prova**

Fonte: Autor (2023).

Foi difícil conseguir garantir o alinhamento das faces e controlar as dimensões dos corpos de prova durante o corte. Por isso, após o processo de corte, os corpos de prova foram colocados nos gabaritos da Figura 39 para receberem acabamento com utilização de uma politriz e lixa d'água de granulação 120. O objetivo do acabamento em politriz é garantir alinhamento e ortogonalidade entre as faces dos corpos de prova e, dimensões dentro da variação desejada de  $15 \pm 1$  mm de largura e comprimento de  $30 \pm 1$  mm.



**Figura 39 - Gabaritos utilizados**



Fonte: Autor (2023).

Inicialmente, após passarem pelo processo de corte, os corpos de prova foram posicionados no gabarito demonstrado na Figura 39-a e Figura 39-c, para que a sua largura e espessura ficassem com as dimensões iguais a do gabarito após serem lixados na poltriz. No processo de lixamento, o gabarito contendo a amostra era segurado firme entre os dedos, sendo o conjunto pressionado suavemente contra a lixa giratória por intervalos curtos de 1 a 2 segundos de duração. Posteriormente, os corpos de prova foram encaixados nos entalhes disponíveis entre as chapas do gabarito demonstrado na Figura 39-b e Figura 39-d, para terem seu comprimento ajustado ao valor desejado. A intenção é que os corpos de prova possuam ao final do processo  $15 \pm 1$  mm de largura,  $15 \pm 1$  mm de espessura e  $30 \pm 1$  mm de comprimento.

A poltriz utilizada pode ser observada na Figura 40-a. A aparência de um corpo de prova após passar por esse processo de lixamento pode ser observado na Figura 40-b. O gabarito utilizado para regularizar a largura e espessura do corpo de prova pode ser visualizado na Figura 40-c e Figura 40-d. O gabarito utilizado para regularizar o comprimento do corpo de prova pode ser observado na Figura 40-e e Figura 40-f.

**Figura 40 - Processo de lixamento**

a)



b)



c)



d)



e)



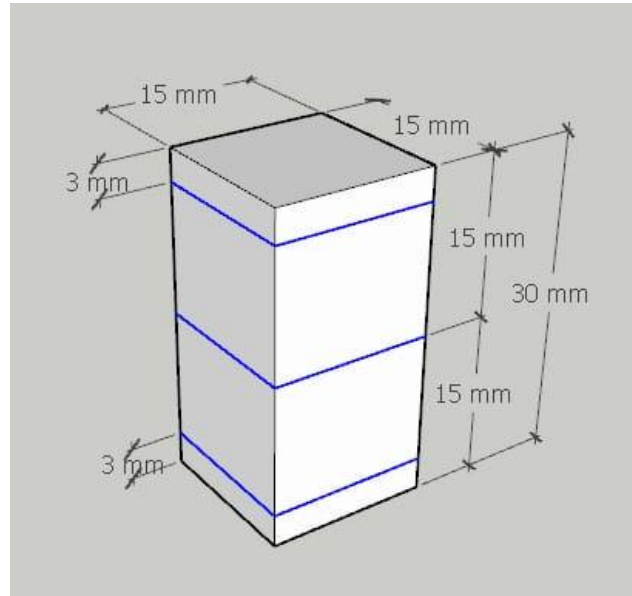
f)

Fonte: Autor (2023).

Após serem atingidas as dimensões desejadas cada corpo de prova teve sua largura e espessura medidas em três locais distintos com a utilização de um paquímetro com resolução de 0,01 mm. Os locais aproximados onde foram realizadas essas medidas podem

ser observados nas linhas azuis da Figura 41. A altura dos corpos de prova também foi determinada com paquímetro em dois locais ortogonais entre si.

**Figura 41 - Locais onde foram feitas as medidas**



Fonte: Autor (2023).

A resistência à compressão dos corpos de prova foi obtida pela divisão da carga máxima resistida pelo corpo de prova pela área transversal média do mesmo, conforme a equação 9.

$$R_c = \frac{C_{max}}{A} = \frac{C_{max}}{(L \times E)} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde,

$R_c$  é a resistência à compressão, em MPa;

$C_{max}$  é a carga máxima aplicada, em N;

$A$  é a área transversal média do corpo de prova, em mm<sup>2</sup>;

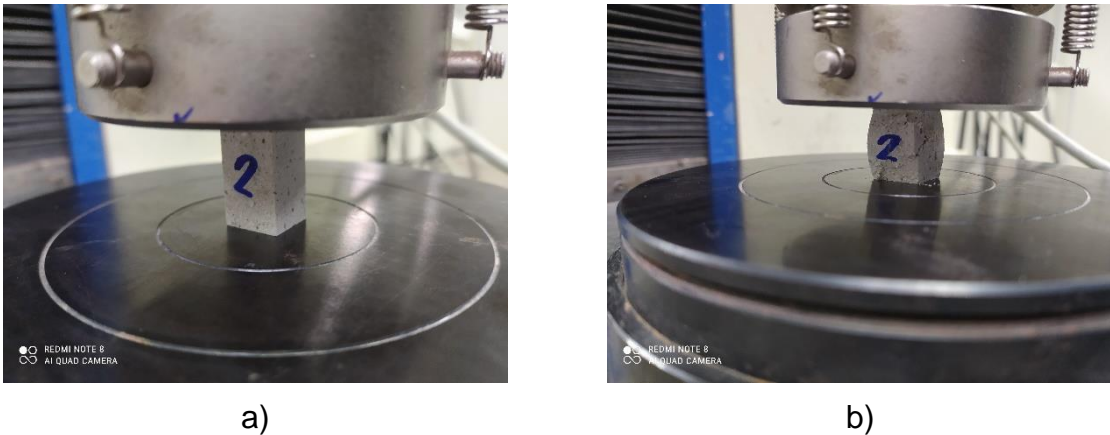
$L$  é a largura média do corpo de prova, em mm;

$E$  é a espessura média do corpo de prova, em mm.

O ensaio de compressão foi realizado no Centro Cerâmico do Brasil (CCB) em uma prensa EMIC modelo DL200 e célula de carga com capacidade de 10 kN. Ensaio foi realizado com controle de deslocamento a uma velocidade de 1,3 mm/min. Imagem de um corpo de prova antes e durante o ensaio pode ser vista na Figura 42.



**Figura 42 - Ensaio de compressão em composto polimérico**



Fonte: Autor (2023).

O ensaio de compressão foi realizado nas idades de 14, 28, 56, 84 e 112 dias após a desmoldagem dos corpos de prova. Não foram realizados ensaios com 7 dias de idade pois em ensaios preliminares já havia sido observado que a resistência à compressão nessa idade era bem inferior.

Como a altura dos corpos de prova era bem pequena (30 mm) não havia equipamentos no laboratório com dimensões apropriadas para medir a deformação durante o ensaio, possibilitando, o cálculo do módulo de elasticidade. Por esse motivo, foi utilizado o deslocamento da EMIC em relação à altura total do corpo de prova para calcular um módulo de elasticidade estimado usando a equação 10.

$$M_{est} = \frac{R_{30} - R_{20}}{\left(\frac{dl_{30} - dl_{20}}{h}\right)} \times 10^{-3} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde,

$M_{est}$  é o módulo de elasticidade estimado do composto, em GPa;

$R_{30}$  é a tensão de compressão a 30% do valor máximo, em MPa;

$R_{20}$  é a tensão de compressão a 20% do valor máximo, em MPa;

$dl_{30}$  é o deslocamento registrado correspondente a  $R_{30}$ , em mm;

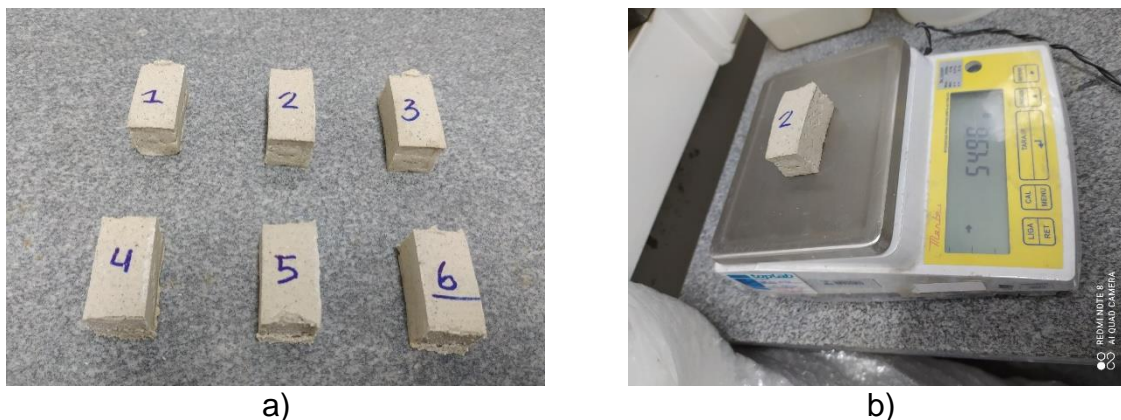
$dl_{20}$  é o deslocamento registrado correspondente a  $R_{20}$ , em mm;

$h$  é a altura média do corpo de prova, em mm.

Como a saída de água das amostras pode ter influência na resistência à compressão, 6 corpos de prova moldados da mesma maneira foram selecionados para determinar a variação de massa com o passar do tempo em uma balança com resolução de 0,01 g. Esse processo de pesagem permite observar se existe alguma ligação entre a variação da massa

dos corpos de prova oriunda da saída da água de seu interior com a variação da resistência à compressão apresentada pelas amostras com o passar do tempo. Na Figura 43-a podem ser observados os corpos de prova utilizados na pesagem e na Figura 43-b pode ser visualizada a balança utilizada.

**Figura 43 - Determinação da massa dos compostos**



Fonte: Autor (2023).

Além de avaliar a variação de massa dos corpos de prova em diferentes idades, também foi avaliada a variação na densidade específica apresentada pelos corpos de prova, com base no procedimento previsto na norma ASTM D792 (2020). Para isso, nas mesmas idades em que a resistência à compressão foi determinada para os compósitos, três corpos de prova foram pesados na condição de temperatura ambiente e, também, na condição de imersos em água deionizada (balança hidrostática). Para que a absorção de água do corpo de prova não interfira nos resultados, buscou-se realizar a pesagem imersa dentro de um intervalo de 30 segundos a partir do momento que o corpo de prova entrou em contato com a água. Com base nas massas obtidas foi empregada a equação 11 para determinar a densidade específica.

$$D = \frac{a}{(a+w-b)} \quad \text{(Equação 11)}$$

Onde,

D é a densidade específica, valor adimensional;

a é a massa do corpo de prova ao ar, em g;

b é a massa do espécime e equipamento imersos, em g;

w é a massa do equipamento imerso, em g.

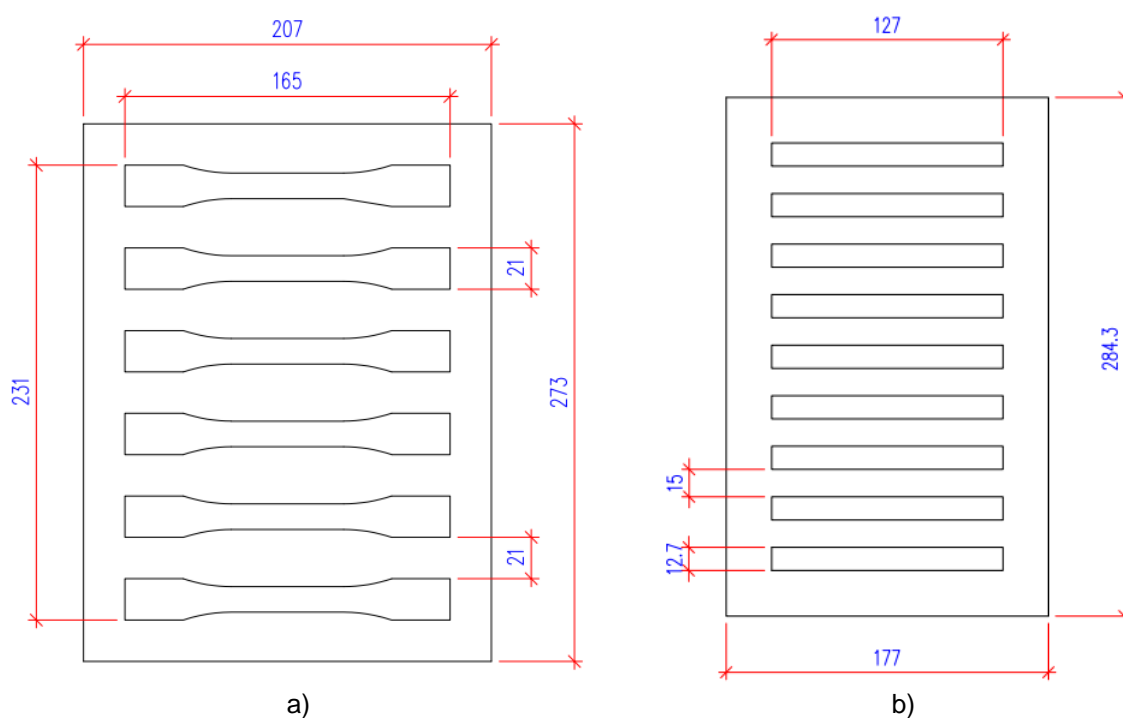
### 3.1.2.1.2 Ensaios de flexão e tração

Para possibilitar a realização dos ensaios de tração e de flexão dos compostos poliméricos optou-se por encomendar o corte a laser de formas acrílicas destinadas a moldagem do material, evitando a necessidade de cortar as amostras para os ensaios.

As dimensões utilizadas para fazer os moldes são semelhantes aos valores previstos na ASTM D 790 (2017) para o ensaio de flexão e aos valores indicados na ASTM D 638 (2017) para o ensaio de tração do corpo de prova tipo I. Para o caso do corpo de prova de tração as dimensões das abas foram aumentadas para 21 mm, superando o valor mínimo de 19 mm indicado na normativa, para evitar a ocorrência de ruptura na região das garras da prensa.

O objetivo inicial seria utilizar acrílico com espessura de 3,2 mm para fazer as formas, entretanto, foi adotado acrílico com espessura de 3,0 mm, pois era a mais próxima disponível no fornecedor local. Os moldes utilizados nos ensaios de tração e de flexão podem ser observados, respectivamente, na Figura 44-a e Figura 44-b.

**Figura 44 - Chapas de acrílico usadas para moldar corpos de prova de tração e flexão**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) Molde para os ensaios de tração; b) Molde para ensaios de flexão.

Para que seja possível realizar a moldagem, as formas de acrílicos foram colocadas sobre outra chapa maciça de acrílico com espessura de 6 mm, para impedir o vazamento do material polimérico durante a moldagem. Em um primeiro momento optou-se por aplicar uma camada de óleo mineral nas laterais do molde e na chapa acrílica inferior para evitar a aderência entre os compostos poliméricos e o material usado em sua moldagem. Entretanto, foi identificado, principalmente, na amostra de composto polimérico 02 a presença de

manchas de óleo, após a realização das moldagens. Uma imagem das manchas de óleo pode ser verificada na Figura 45-a.

Como a influência dessa mancha de óleo observada é desconhecida, optou-se por não aplicar óleo no molde e na chapa acrílica maciça inferior. Para evitar a aderência dos compostos poliméricos com a chapa de acrílico inferior uma camada de filme plástico “stretch” foi aplicada sobre ela. Como resultado foi observado que não ocorreu a aderência entre o composto polimérico e a parte inferior, porém, foi observada a aderência entre o composto e as laterais do molde que estavam sem óleo. Essa aderência com as paredes do molde provocou a formação de fissuras no material conforme sua secagem. Por esse motivo, optou-se por manter a utilização de filme plástico na parte inferior e aplicar óleo mineral, somente nas partes laterais da forma. Dessa maneira, a influência do óleo nas amostras foi reduzida, formando apenas algumas manchas em pontos localizados nas laterais dos corpos de prova. A imagem de corpos de prova moldados dessa maneira podem ser observadas na Figura 45-b.

**Figura 45 - Manchas de óleo observadas nos corpos de prova de tração**



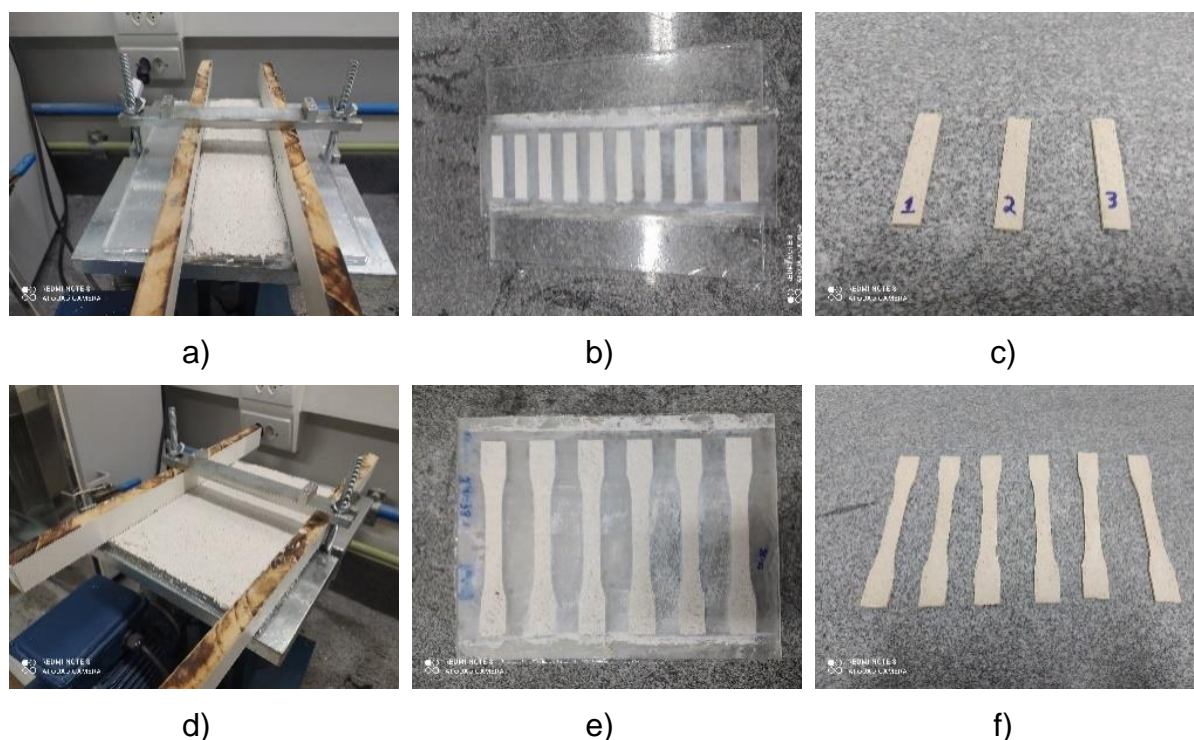
Fonte: Autor (2023). Legenda: a) Corpos de prova de tração do CPA-02 com manchas de óleo; b) Corpos de prova de tração do CPA-02 com menor quantidade de manchas.

Considerando as observações realizadas, o procedimento final de moldagem dos corpos de prova de tração e flexão foi realizado com a aplicação de filme plástico sobre a chapa inferior e a aplicação de óleo somente nas laterais do molde. Em seguida, o material polimérico era colocado nos moldes em excesso com a utilização de espátula, de forma a preencher completamente os espaços e formar uma camada uniforme sobre o molde com até 5 mm de espessura. Posteriormente, o conjunto foi fixado sobre a mesa de adensamento descrita na NBR 13279 (ABNT, 2005) e compactado através de 30 quedas (Figura 46-a e Figura 46-d). Então, o material foi removido da mesa de adensamento e colocado sobre uma bancada onde foi rasado. Para isso, foi utilizado o lado liso de uma desempenadeira metálica



(limpa com pano umedecido) com comprimento suficiente para alcançar todos os corpos de prova de uma única vez. O rasamento ocorreu com duas passadas da desempenadeira na direção do comprimento dos corpos de prova, cada uma no sentido oposto da outra. Em cada passada a inclinação da desempenadeira era de aproximadamente,  $30^\circ$  e pequenos movimentos horizontais de vaivém foram realizados. Por fim, o material permaneceu nos moldes por 48 horas e, então, foi desmoldado com cuidado para não quebrar (Figura 46-c e Figura 46-f).

**Figura 46 - Moldagem dos corpos de prova de flexão e tração**



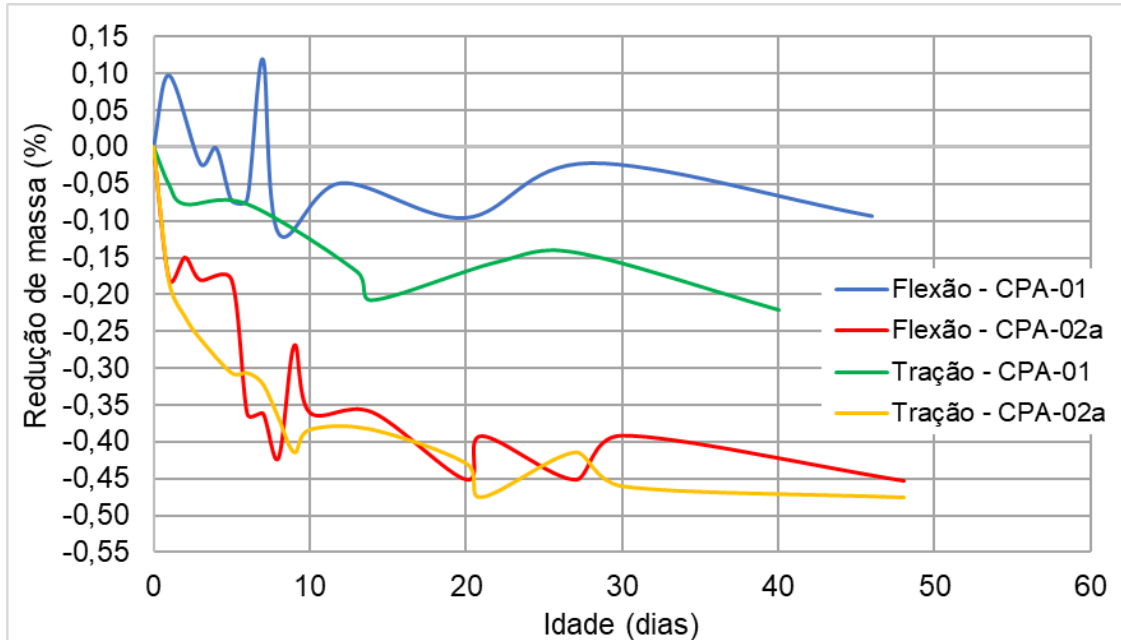
Fonte: Autor (2023).

Após serem desmoldados os corpos de prova permaneceram em ambiente de laboratório com temperatura de aproximadamente,  $23^\circ\text{C}$  e umidade relativa de aproximadamente 60% por um período mínimo de 40 dias. Após esse período os corpos de prova foram encaminhados para o laboratório do CCDM da UFSCar para realização dos ensaios de flexão e de tração. Os ensaios foram realizados com idade superior a 77 dias de sua desmoldagem.

O ideal seria realizar uma série de ensaios de tração e flexão em diferentes idades, de maneira semelhante ao que foi realizado para o ensaio de compressão dos compostos poliméricos para avaliar o desenvolvimento das propriedades dos compostos conforme a sua massa vai reduzindo com a saída da água de seu interior. Entretanto, aparentemente, um período de 40 dias de permanência em ambiente de laboratório parece ter sido suficiente para que a redução da massa dos corpos de prova estabilize, reduzindo a variação nos resultados

provocada pela saída da água. A Figura 47 apresenta a variação média de massa observada para algumas amostras de compostos poliméricos.

**Figura 47 - Redução da massa para corpos de prova de flexão e tração**



Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 47, as amostras de tração e flexão do composto CPA-02a apresentaram valores maiores de perda de massa do que as amostras do composto CPA-01. Todavia, a redução média de massa observada para as duas amostras estabiliza no período entre 20 e 40 dias, apresentando redução da massa inferior a 0,1%.

O ensaio de flexão em três pontos foi realizado conforme o procedimento A na norma ASTM D790 (2017), que é realizado a uma taxa de deformação de 0,01 mm/mm/m. O ensaio de tração foi realizado conforme a ASTM D638 (2014) a uma velocidade de 5 mm/min. O equipamento empregado na realização dos ensaios pode ser observado na Figura 48.

**Figura 48 - Equipamento utilizado no ensaio de flexão e tração**



Fonte: Autor (2023).

### **3.2 SEGUNDA ETAPA – ESTUDO DO ASSENTAMENTO**

A construção de elementos de alvenaria de blocos de concreto com utilização de juntas finas de composto polimérico apresenta algumas características diferentes da alvenaria convencional. Dessa forma, no primeiro subitem dessa etapa são apresentadas algumas considerações sobre o processo de aplicação e assentamento empregados na execução dos corpos de prova de alvenaria utilizados nessa pesquisa.

O comportamento da alvenaria de blocos de concreto assentados com juntas finas de compostos poliméricos ainda não é bem conhecido. A norma NBR 16590-1 (ABNT, 2017) que estabelece os requisitos para assentamento de alvenaria de vedação com utilização de compostos poliméricos, por exemplo, considera como opcional o preenchimento da junta vertical durante a execução. Embora existam expectativas de que a utilização de compostos poliméricos no assentamento dos blocos possa proporcionar propriedades mecânicas adequadas para a alvenaria, o preenchimento da junta vertical pode aumentar o desempenho mecânico, além do isolamento acústico e do tempo de resistência ao fogo.

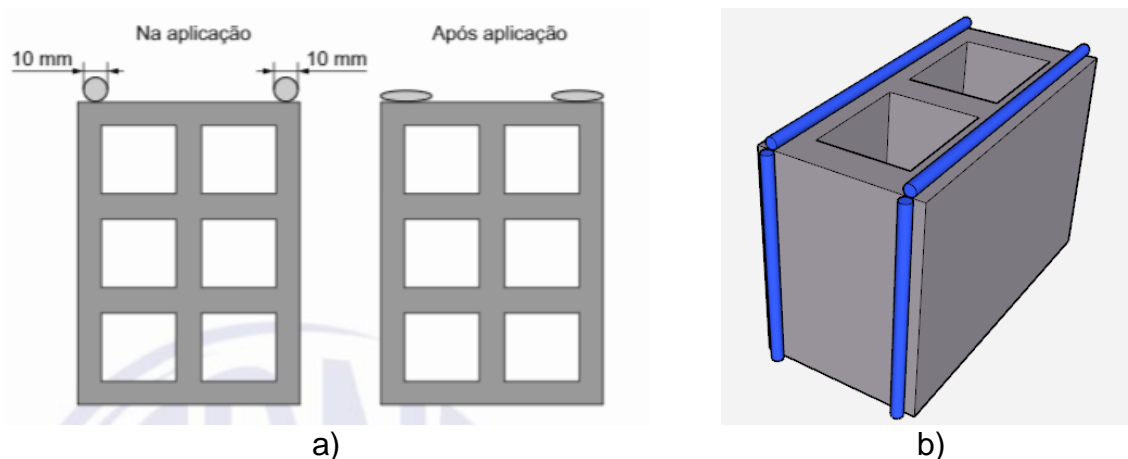
Por esse motivo, no segundo subitem apresentado nessa etapa, serão demonstrados os ensaios realizados para avaliar a influência do preenchimento da junta vertical no comportamento mecânico da alvenaria de blocos de concreto assentados com juntas finas de composto polimérico. Esses ensaios foram utilizados para definir se os corpos de prova de alvenaria utilizados nas demais etapas da pesquisa seriam, ou não, construídos com o preenchimento da junta vertical.

### 3.2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE O ASSENTAMENTO

Nesse subitem serão discutidas algumas questões referentes a aplicação e assentamento da alvenaria com compostos poliméricos. São apresentados alguns dos procedimentos adotados para construção dos corpos de prova de alvenaria utilizados nessa pesquisa.

A norma ABNT NBR 16590-1 (2017) define alguns requisitos para a utilização de compostos poliméricos no assentamento da alvenaria de vedação, que foram utilizados como base para o assentamento utilizado nessa pesquisa. Para o caso do preenchimento da junta horizontal a normativa estabelece que, pelo menos, dois cordões de composto polimérico devem ser utilizados, conforme pode ser observado na Figura 49-a.

**Figura 49 - Aplicação de dois cordões de composto polimérico**



Fonte: ABNT NBR 16590-1 (2017), p. 3.

Para o assentamento utilizado em todos os corpos de prova de alvenaria desta pesquisa, tanto das juntas verticais quanto das horizontais, a forma de assentamento utilizada foi com a disposição de dois cordões de composto polimérico. Dessa forma, o assentamento da junta horizontal foi feito de maneira parcial, pois o composto polimérico foi aplicado, apenas, nas paredes longitudinais dos blocos e não sobre as paredes transversais. Para o caso das juntas verticais, a necessidade de preenchimento foi definida com base nos resultados dos ensaios de cisalhamento que são apresentados no próximo subitem. O preenchimento da junta vertical também foi feito em dois cordões localizados próximos das duas extremidades dos blocos, seguindo alinhamento semelhante ao das juntas horizontais, como demonstrado na Figura 49-b e, não, de maneira centralizada no bloco.

A ABNT NBR 16590-1 (2017) estabelece que, após o assentamento, a espessura da junta horizontal deve estar situada entre 1 e 6 mm, enquanto a junta vertical pode, ou não, ser preenchida, sendo permitido um espaçamento de até 10 mm para esta. A norma australiana AS 3700 (2021) estabelece espessuras de 2 a 4 mm para alvenaria de juntas finas, enquanto,



o Eurocode 6 (CEN, 2021), estabelece espessuras de 0,5 a 3 mm. Para o caso dos corpos de prova de alvenaria utilizados nessa pesquisa, buscou-se manter a espessura média das juntas verticais e horizontais situada entre 0,5 e 4 mm, e, valor máximo de 6 mm. Mesmo para os casos em que a junta vertical não foi preenchida, buscou-se manter essa espessura, para reduzir os efeitos que a variação do afastamento entre os blocos na junta vertical pode causar no comportamento da alvenaria durante os ensaios realizados.

Para o caso do assentamento da primeira fiada da alvenaria de juntas finas com compostos poliméricos a NBR 16590-1 (ABNT, 2017) recomenda a utilização de argamassa convencional (cimentícia), visando minimizar as irregularidades do sistema de piso. Como a espessura das juntas é reduzida, sobra pouco espaço para acomodar irregularidades, sendo interessante iniciar o processo de assentamento de maneira nivelada para evitar que os defeitos observados no sistema de piso sejam espalhados para as fiadas da alvenaria, provocando seu desalinhamento ou desaprumo. Por esse motivo, a utilização de argamassa convencional também foi utilizada nesta pesquisa, para as etapas de construção das paredes e pequenas paredes utilizadas nos ensaios de compressão. Para os casos de corpos de prova em que a presença dessa fiada pode interferir diretamente nos resultados dos ensaios, como é o caso do ensaio de cisalhamento, foi empregada uma camada de areia compactada manualmente para o assentamento da primeira fiada.

Com o objetivo de padronizar o processo de aplicação dos compostos poliméricos, buscou-se, inicialmente, utilizar a ferramenta de aplicação fornecido pelo fabricante do composto CPA-02 para os dois compostos empregados na pesquisa. Entretanto, não foi possível realizar a aplicação do composto CPA-01 utilizando essa ferramenta de aplicação, devido ao fato da consistência do material em estado fresco ser maior do que a do composto CPA-02. Portanto, muito esforço era necessário para extrair o composto CPA-01 utilizando esse aplicador, provocando a formação de cordões não uniformes, separados em pequenos filetes (Figura 50-a), e provocando danos ao próprio equipamento utilizado na aplicação (Figura 50-b).

**Figura 50 - Dificuldades de aplicação**

Fonte: Autor (2023).

Como não foi possível utilizar o mesmo equipamento para aplicar os dois compostos poliméricos, cada um foi aplicado conforme indicado pelo próprio fabricante.

O composto polimérico CPA-01 foi fornecido em embalagens plásticas contendo, aproximadamente, 3 kg de material. Essa embalagem possui um formato afunilado em uma de suas extremidades, que permite, após o corte da ponta da embalagem, no local indicado pelo fabricante, a aplicação direta do composto polimérico. A embalagem é pressionada com as mãos e o composto é expelido pelo orifício cortado em sua ponta. Imagem da embalagem e da aplicação do composto CPA-01 podem ser visualizadas na Figura 51.

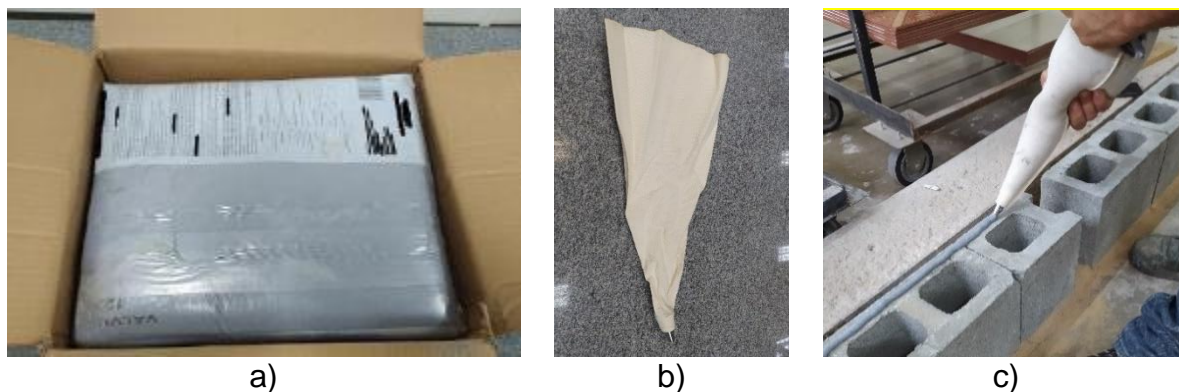
**Figura 51 – Aplicação CPA-01**

Fonte: Autor (2023).

O composto polimérico CPA-02 foi fornecido em embalagens plásticas contendo, aproximadamente, 15 kg de produto. Para realizar a aplicação desse composto polimérico foram utilizados os aplicadores enviados pelo fabricante. O aplicador é formado por um tecido que contém uma de suas extremidades afunilada, na qual uma ponta feita de material metálico, dotada de um orifício circular, permite a saída do composto polimérico, quando o

tecido é pressionado manualmente. Imagem da embalagem e da aplicação do composto CPA-02 podem ser visualizadas na Figura 52.

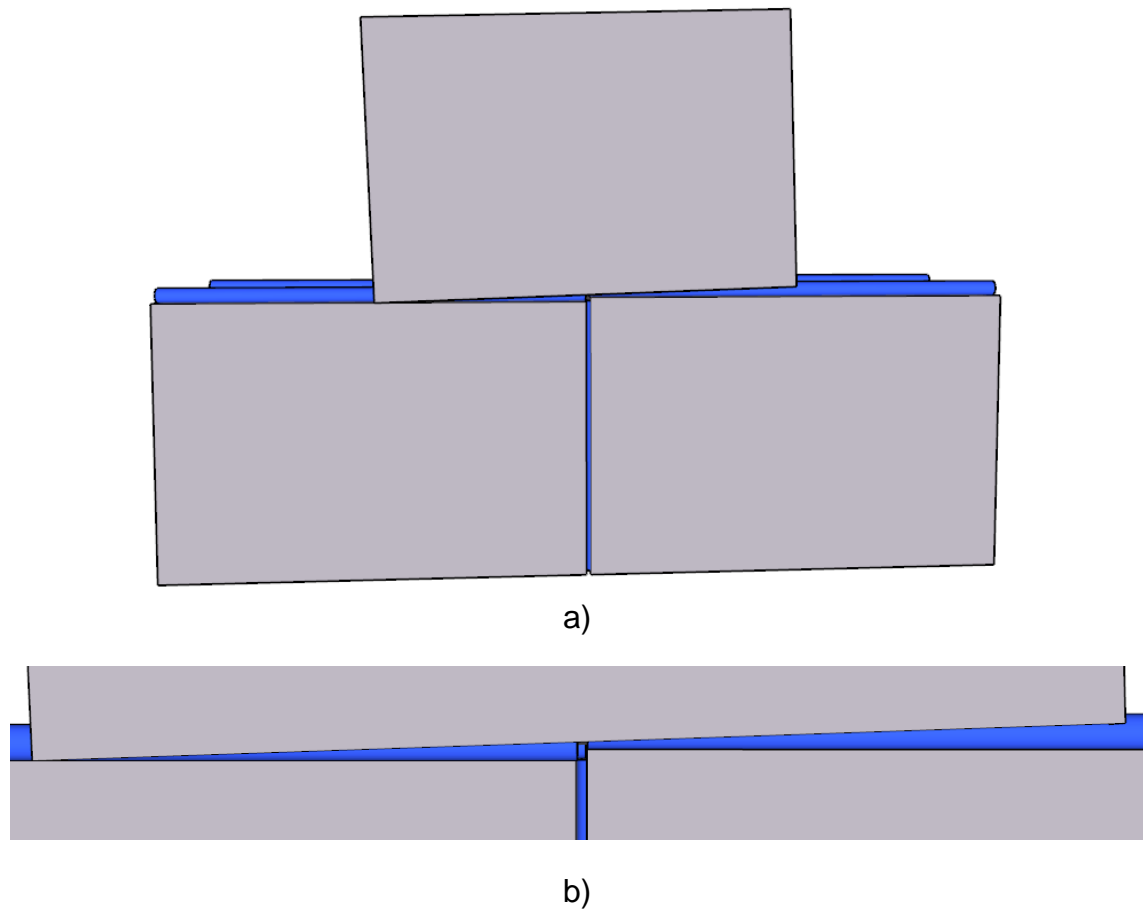
**Figura 52 – Aplicação CPA-02**



Fonte: Autor (2023).

Como já foi demonstrado na revisão bibliográfica, muitas construtoras utilizaram de maneira improvisada pequenas cunhas feitas de diferentes materiais para auxiliar no processo de assentamento, visando compensar certos desalinhamentos e desaprumos provenientes da fiada inferior. Com o uso dessa técnica, o processo de assentamento fica facilitado, evitando a propagação de irregularidades para as fiadas superiores. O fabricante do composto CPA-01 forneceu alguns modelos plásticos de cunhas específicas para realizar essa função. Elas possuem em sua parte mais elevada a dimensão de 6 mm, que é maior espessura prevista na ABNT NBR 16590-1 (2017). Embora a utilização da cunha possa ser feita após o assentamento do bloco, para corrigir algumas irregularidades, percebeu-se que sua introdução após o assentamento pode proporcionar pequenos descolamentos em alguns pontos dos blocos. Portanto, a sua utilização nesta pesquisa foi feita logo após a aplicação do composto polimérico, na região em que precisa ser compensado algum desnível ou desaprumo, ajustando-se sua posição após que o bloco tenha sido colocado sobre o composto polimérico. Exemplo de dificuldades observadas no assentamento sem uso de cunha e o detalhe da junta horizontal podem ser observadas, respectivamente, na Figura 53-a e Figura 53-b.

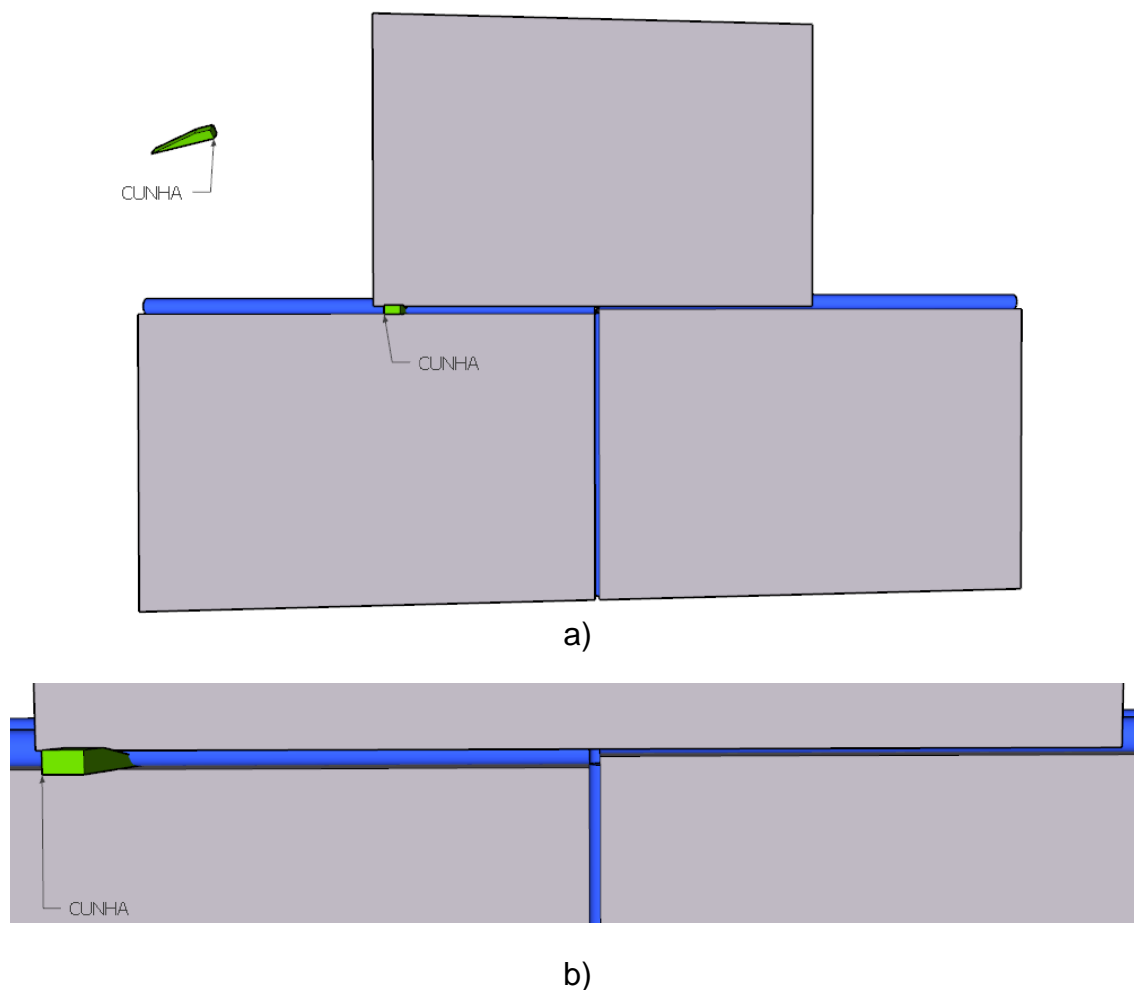
**Figura 53 – Assentamento sem uso de cunha**



Fonte: Autor (2023).

O assentamento com uso de cunha e o detalhe da junta horizontal podem ser visualizados, respectivamente, na Figura 54-a e Figura 54-b.

**Figura 54 – Assentamento com uso de cunha**

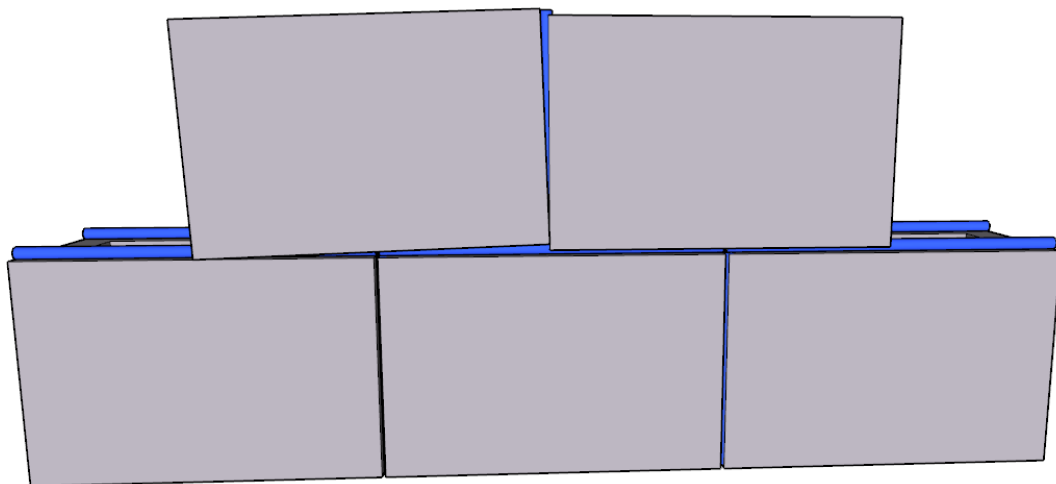


Fonte: Autor (2023).

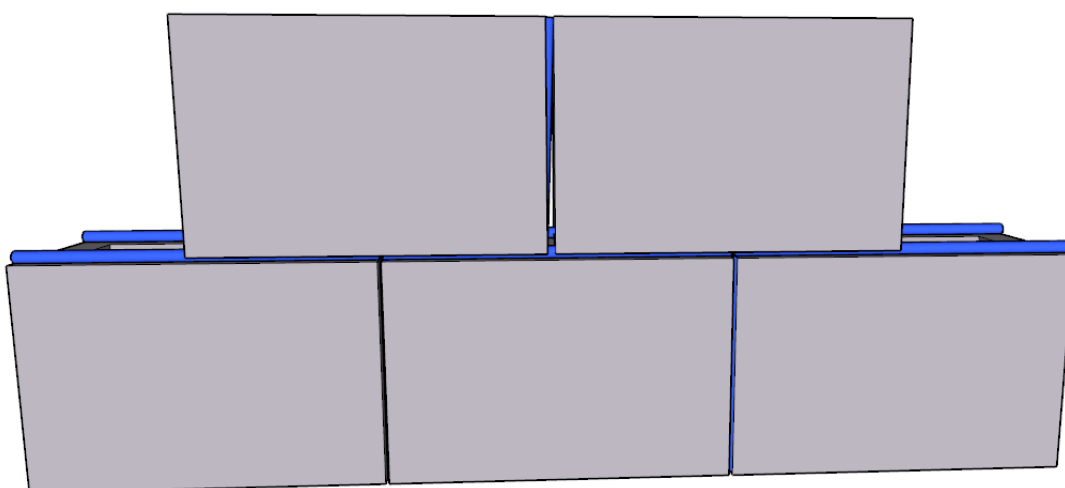
Caso durante o assentamento dos blocos as juntas verticais sejam muito aproximadas e exista a necessidade de corrigir o nivelamento no sentido do comprimento do bloco assentado, pode ocorrer a separação da junta em trechos próximos ao canto superior ou inferior dos blocos. Na Figura 55-a pode ser observado o momento do assentamento em que um bloco é aproximado do outro na junta vertical, sendo necessário, entretanto, corrigir seu nivelamento na direção do comprimento do bloco. Na Figura 55-b pode ser observada a imagem da formação de uma abertura entre os blocos no momento do nivelamento (essa abertura foi exagerada com o objetivo de facilitar a identificação do fenômeno em questão). Na prática a existência dessas aberturas costuma ocorrer apenas em alguns pontos, porém, em menor escala, sendo difícil perceber visualmente à distância, principalmente nos casos em que os cordões de composto polimérico estão mais para dentro da junta de assentamento. Ao perceber esse fenômeno a solução mais prática a ser adotada é remover o bloco, aplicar o composto novamente e repetir assentamento com cuidado, buscando deixar a espessura

da junta um pouco maior, antes do ajuste final, o que contribui para evitar esse tipo de problema.

**Figura 55 – Cuidados no assentamento**



a)



b)

Fonte: Autor (2023). Nota: Abertura exagerada para facilitar visualização.

Outra dificuldade observada foi ao posicionar os blocos durante o assentamento, pois como existem apenas dois cordões de composto polimérico para sustentar o peso do bloco, caso esse seja posicionado de maneira abrupta sobre os cordões. Pode ocorrer de os cordões amassarem de maneira excessiva em um dos lados fazendo com que o nivelamento fique prejudicado, pois no lado amassado não existirá muito espaço para corrigir mais algum nivelamento necessário do bloco, podendo dificultar o processo de assentamento e, em alguns casos, sendo necessário remover o bloco, reaplicar os cordões e repetir o assentamento. Portanto, na hora de assentar os blocos é recomendado que eles sejam

colocados com cuidado e de maneira nivelada sobre os cordões para evitar esse tipo de problema.

Como a espessura das juntas é reduzida, pequenas irregularidades presentes nos blocos, oriundas do processo de fabricação, também podem influenciar na hora de realizar o assentamento. Por isso, antes de realizar o assentamento de cada bloco, as pequenas rebarbas e protuberâncias existentes nos blocos foram removidos com a utilização de uma grosa. Além disso, para remoção de poeira e partículas soltadas dos blocos, que possam influenciar na aderência com o material de assentamento, foi utilizada uma broxa. Todos os corpos de prova de alvenaria foram construídos em locais em que possam ficar abrigados da ação de sol e chuva.

O tempo de cura indicado pelos fabricantes dos dois compostos poliméricos é de 72 horas. Entretanto, o fabricante do composto CPA-01 indica que esse tempo é considerado para climas quentes e secos, podendo variar dependendo das condições climáticas. Embora o tempo de cura indicado pelos fabricantes seja de 72 horas, os ensaios de tração na flexão inicialmente realizados nesta pesquisa indicaram que esse tempo é insuficiente para cura, havendo expressivo aumento de resistência após 72 horas. Como os compostos poliméricos curam e endurecem a partir da evaporação de água contida em seu interior, provavelmente, corpos de prova mais finos irão ganhar resistência de forma mais rápida do que corpos de prova mais espessos e, provavelmente, corpos de prova expostos ao ambiente irão apresentar tendência de endurecer de maneira mais rápida do que os posicionados entre os blocos no assentamento. A partir dessa constatação, nesta pesquisa foi determinado o tempo de 28 dias como padrão para definir cura completa e realização de ensaios. Ensaios foram feitos após 28 dias do término da construção dos corpos de prova de alvenaria, para assegurar que ocorra a secagem dos dois compostos poliméricos empregados.

Os resultados dos ensaios iniciais para determinação da resistência à tração na flexão da alvenaria, realizados pelo método da alavanca na UFSCar, que apontaram que existe diferença entre os resultados obtidos com diferentes idades de assentamento, podem ser observados no Quadro 12.

**Quadro 12 - Variação da resistência flexão com a idade**

Tipo de bloco	Junta	Resistência à tração na flexão (MPa)		
		7 dias	14 dias	28 dias
4 MPa Concreto	J1	-	0,44	0,635
	J2	-	-	0,578
	J3	-	0,542	0,368
	J4	-	0,408	-
	média	-	0,46	0,53
8 MPa Concreto	J1	0,271	0,307	0,651
	J2	0,27	0,589	0,826
	J3	-	-	0,495
	J4	-	0,342	0,55
	média	0,27	0,41	0,63
16 MPa Concreto	J1	0,346	0,403	0,424
	J2	-	-	-
	J3	0,206	-	0,642
	J4	0,622	0,248	0,614
	média	0,39	0,33	0,56

Fonte: Ensaio realizados por Murilo de Carvalho Maturana.

Como pode ser observado no Quadro 12, existe uma expressiva diferença entre os resultados médios obtidos aos 7 e aos 28 dias. Os resultados obtidos aos 7 dias foram, aproximadamente, 57,1 e 30,4% inferiores aos resultados obtidos aos 28 dias, respectivamente, para os blocos de 8 e 16 MPa.

### **3.2.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA JUNTA VERTICAL**

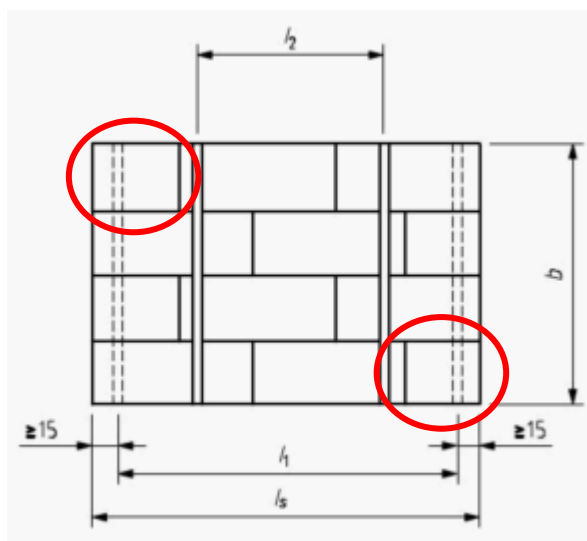
Neste subitem são apresentados os ensaios realizados para avaliar a influência do preenchimento da junta vertical no comportamento da alvenaria de junta fina assentada com compostos poliméricos.

Os resultados dessa etapa foram utilizados para definir qual método de assentamento (com ou sem o preenchimento da junta vertical) seria utilizado para a construção dos corpos de prova de alvenaria empregados nas demais etapas da pesquisa.

A ideia inicial era realizar ensaios de tração na flexão paralela à fiada da alvenaria, conforme a norma BS EN 1052-2 (2016) para avaliar a influência do preenchimento da junta vertical. Entretanto, não foi possível utilizar esse ensaio para avaliar a influência do preenchimento da junta vertical, pois os corpos de prova construídos sem a presença da junta, acabaram sendo danificados durante o transporte e movimentação. No caso, geralmente, o meio bloco utilizado em uma das extremidades do corpo de prova soltava durante o processo. A região de ocorrência dos danos (circulada em vermelho) e o esquema do ensaio de flexão paralela podem ser observados na Figura 56.



**Figura 56 - Esquema do ensaio de flexão paralela**

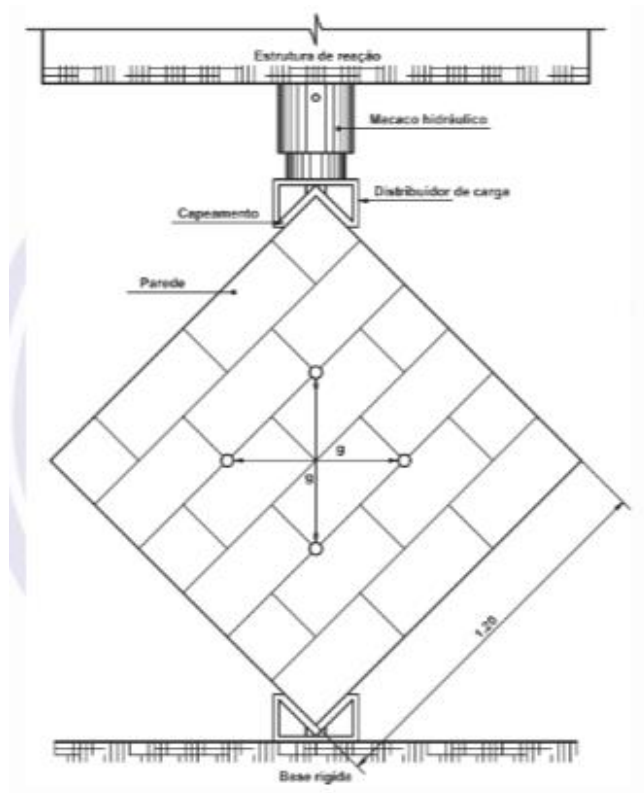


Fonte: Adaptado de BS EN 1052-2 (2016).

Em ensaios de resistência à tração na flexão paralela realizados por Santos (2001) foi possível observar a redução de 32% na resistência para as amostras de alvenaria assentadas sem o preenchimento da junta vertical (0,43 MPa) quando comparadas com amostra assentada com o preenchimento da junta vertical (0,63 MPa). Os blocos utilizados pelo autor foram cerâmicos e possuem escala reduzida de 1:3. A argamassa utilizada foi cimentícia com juntas de, aproximadamente, 10 mm de espessura. O ensaio de resistência à tração na flexão paralela foi realizado em 4 pontos. Embora os resultados encontrados pelo autor indiquem essa redução da resistência sem o preenchimento da junta vertical, o comportamento de alvenaria assentada com compostos poliméricos ainda deve ser investigado.

Para que fosse possível quantificar a influência do preenchimento da junta vertical no comportamento mecânico da alvenaria de junta fina assentada com compostos poliméricos, optou-se por realizar o ensaio de cisalhamento, baseado na norma NBR 16868-3 (ABNT, 2020). Esse ensaio consiste em submeter corpos de prova de formato quadrado a esforços de compressão diagonal para avaliar o comportamento da alvenaria ao cisalhamento.

O esquema do ensaio de cisalhamento pode ser observado na Figura 57.

**Figura 57 - Esquema do ensaio de cisalhamento**

Fonte: ABNT NBR 16868-3 (2020), p. 18.

Como os corpos de prova utilizados nesse ensaio devem ter formato quadrado, cada meio bloco utilizado no assentamento foi obtido através do corte dos blocos inteiros, na metade de seu comprimento, com a serra policorte utilizando água para resfriamento. Como a utilização de blocos úmidos pode impactar no processo de cura dos compostos poliméricos, cada meio bloco, após passar pelo processo de corte, foi seco em estufa ventilada por 24 horas na temperatura de 40°C. Em seguida, o material foi removido da estufa e permaneceu em ambiente de laboratório, por pelo menos, 72 horas antes de serem empregados na construção dos corpos de prova, para que sua temperatura e umidade pudessem equilibrar com a do ambiente. Imagem da serra policorte utilizada e da secagem em estufa podem ser observados, respectivamente, na Figura 58-a e Figura 58-b.

**Figura 58 - Serra policorte e secagem em estufa**



a)



b)

Fonte: Autor (2023).

Os ensaios de cisalhamento foram realizados em corpos de prova construídos sem o preenchimento da junta vertical (SJV) e com o preenchimento da junta vertical (CJV), para avaliar a influência dessa prática no comportamento da alvenaria.

No total, foram construídos seis corpos de prova de alvenaria assentados com cada composto polimérico (CPA-01 e CPA-02b), sendo três com o preenchimento da junta vertical e três sem o preenchimento da junta vertical. Nessa etapa foi utilizado somente o bloco tipo B10 na construção dos corpos de prova. Cada corpo de prova possuía quatro blocos de largura e seis blocos de altura. Imagens mostrando o assentamento e os corpos de prova finalizados podem ser visualizadas, respectivamente, na Figura 59-a e Figura 59-b.

**Figura 59 - Assentamento dos corpos de prova**



a)



b)

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 59, o assentamento da primeira fiada dos corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento foi feito em camada de areia compactada manualmente, para garantir uma maior qualidade na execução do assentamento. Para esse tipo de corpo de prova não foi considerada adequada a execução da primeira fiada utilizando argamassa cimentícia como indicado pela norma ABNT NBR 16590-1 (2017), pois no momento do ensaio, a presença de argamassa na junta pode influenciar nos resultados obtidos.

Os ensaios de cisalhamento foram realizados no pórtico para realização de ensaios de compressão em paredes disponível no Centro Cerâmico do Brasil (CCB), que possui capacidade de 150 tf. Como alguns ensaios preliminares realizados em corpos de prova de teste apresentaram cargas inferiores a 10 toneladas, julgou-se necessário fazer uma adaptação e fixar uma célula de carga do tipo panqueca de 20 tf na parte central do Pórtico, com uma rótula acoplada. Essa adaptação permite uma leitura mais adequada da carga aplicada em valores menores para determinar o comportamento da alvenaria durante os ensaios de compressão diagonal. Na Figura 60 pode ser observada a adaptação feita para uso da célula de carga com a rótula. Na Figura 62 pode ser observada a estrutura usada nos ensaios de cisalhamento.

**Figura 60 - Adaptação feita para ensaio**



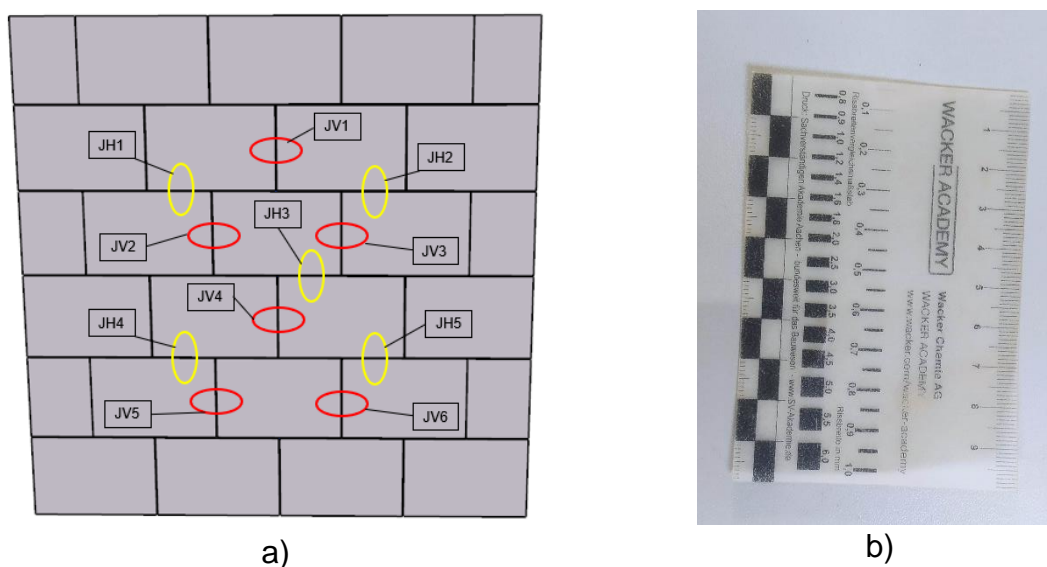
Fonte: Autor (2023).

Os ensaios foram realizados com controle de deslocamento a uma velocidade de 0,5 mm/minuto. Para medir as deformações apresentadas pelos corpos de prova foram introduzidos 2 lvdts em cada face dos corpos de prova, sendo um destinado a medir as deformações verticais e outro para medir as deformações horizontais. As cantoneiras fixadas nos corpos de prova para medir os deslocamentos foram posicionadas com afastamento de

700 mm entre elas. A coleta dos dados obtidos nos ensaios foi feita através de um equipamento aquisição de dados da marca HBM, modelo PMX 455. Na Figura 62 pode ser observada a posição dos instrumentos utilizados para medir as deformações do corpo de prova.

Na Figura 61-a podem ser observados os pontos em que foram realizadas as medidas das espessuras das juntas dos corpos e prova com a utilização do fissurômetro mostrado na Figura 61-b.

**Figura 61 – Medição da espessura das juntas**



Fonte: Autor (2023).

Na parte superior e inferior dos corpos de prova foi utilizado forro pacote (forro de fibra mineral) para evitar danos localizados durante a aplicação do carregamento. Para evitar a queda dos corpos de prova após sua ruptura estavam sendo utilizados, inicialmente, apoios laterais de madeira. No entanto, após a realização de alguns ensaios ocorreu a ruptura de um desses apoios, sendo necessário, então, construir suportes metálicos mais resistentes, que podem ser visualizados na Figura 62.



**Figura 62 - Corpos de prova antes do ensaio de cisalhamento**



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 62 também pode ser observado que os corpos de prova utilizados nos ensaios de cisalhamento foram pintados com cal com o objetivo de tornar mais fácil a visualização do aparecimento de fissuras.

Para calcular a tensão de cisalhamento apresentada por cada corpo de prova foi empregada a equação 12.

$$S_s = \frac{0,7 \times P}{(A_n)} = \frac{0,7 \times P}{\left(\frac{w+h}{2}\right) \times t} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

$S_s$  é a tensão de cisalhamento, expressa em MPa;

$P$  é a carga máxima aplicada, expressa em N;

$A_n$  é a área bruta do corpo de prova, expressa em mm<sup>2</sup>;

$w$  é a largura do corpo de prova, expressa em mm;

$h$  é a altura do corpo de prova, expressa em mm; e

$t$  é a espessura do corpo de prova, expressa em mm.

O critério utilizado nessa etapa para definir se o preenchimento da junta vertical será considerado significativo e, portanto, deve ser utilizado em todos os demais ensaios previstos nesse estudo, foi baseado na comparação da tensão de cisalhamento média apresentada pelas amostras construídas com e sem o preenchimento da junta vertical.

Caso a tensão de cisalhamento média obtida pela amostra assentada com o preenchimento da junta vertical apresentasse resultado superior em 20%, ou mais, com relação à amostra construída sem o preenchimento da junta vertical, todos os demais ensaios dessa pesquisa deveriam ser realizados com o preenchimento da junta vertical. Caso a tensão de cisalhamento média obtida pela amostra assentada com o preenchimento da junta vertical não apresentasse resultado superior em 20% ou mais, com relação à amostra construída sem o preenchimento da junta vertical, todos os demais ensaios dessa pesquisa deveriam ser realizados sem o preenchimento da junta vertical.

Para que seja possível avaliar o comportamento dos corpos de prova foram empregadas curvas que relacionam a tensão de cisalhamento e a deformação, tanto na direção vertical quanto na horizontal. O módulo de deformação transversal da alvenaria também foi determinado para o intervalo de tensão compreendido entre os valores de 10% e 30% da tensão máxima obtida, com base na equação 13.

$$G = \frac{\Delta S_s}{\left(\frac{\Delta H + \Delta V}{2}\right)} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde,

$G$  é o módulo de deformação transversal (MPa);

$\Delta S_s$  é a diferença entre a tensão de cisalhamento obtida no intervalo de 30% e 10% da tensão máxima de ruptura do corpo de prova, em (MPa);

$\Delta H$  é a diferença entre a deformação horizontal média obtida no intervalo de 30% e 10% da tensão máxima de ruptura do corpo de prova, expressa em (mm/mm);

$\Delta V$  é a diferença entre a deformação vertical média obtida no intervalo de 30% e 10% da tensão máxima de ruptura do corpo de prova, expressa em (mm/mm).

Além do valor do módulo de deformação transversal, também foi apresentado qual o percentual de deformação observado na direção vertical e na horizontal nesse mesmo intervalo de tensão (10 a 30%), tendo como base o somatório total de deformações obtidas nas duas direções. Conhecer o valor percentual de deformação em cada direção obtida nesse intervalo de tensão permite visualizar de maneira mais precisa o comportamento do corpo de

prova durante esse trecho inicial de carregamento, indicando se as deformações verticais e horizontais são equivalentes ou diferentes.

Para avaliar a relação existente entre as deformações horizontais e verticais no ponto em que a tensão máxima foi registrada para cada corpo de prova, foi utilizado um coeficiente de proporção entre as deformações que é obtido com o uso da equação 14. Como nem sempre a diferença visual existente entre as deformações horizontais e verticais presentes nas curvas tensão-deformação são claras o suficiente para diferenciar os corpos de prova nesse ponto de carga máxima, esse coeficiente, pode ajudar no processo de compreender o comportamento da alvenaria nesse ponto específico.

$$C_{pd} = \frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_h} \quad (\text{Equação 14})$$

Onde,

$C_{pd}$  é o coeficiente proporcional de deformação no ponto em que a tensão máxima de cisalhamento foi atingida, expresso em unidade adimensional;

$\varepsilon_v$  é o valor médio de deformação vertical registrado no ponto em que a tensão de cisalhamento máxima foi atingida, expresso em mm/mm;

$\varepsilon_h$  é o valor médio de deformação horizontal registrado no ponto em que a tensão de cisalhamento máxima foi atingida, expresso em mm/mm.

Caso o valor obtido para  $C_{pd}$  seja próximo a 1, isso significa que a relação entre as deformações horizontal e vertical, registradas no ponto de tensão máxima do corpo de prova, são semelhantes. Entretanto, quanto mais esse valor se afastar para o sentido superior a 1, maior será a predominância das deformações verticais. Quanto mais se afastar esse valor para o sentido inferior a 1, maior será a predominância das deformações horizontais no ponto de tensão máxima.

### 3.3 TERCEIRA ETAPA - ESTUDO DO COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO

Nesta etapa são descritos os ensaios para determinação da resistência à compressão de prismas, pequenas paredes e de paredes.

Para avaliar o comportamento à compressão da alvenaria de blocos de concreto assentados com juntas finas de compostos poliméricos foram realizados ensaios para determinação da resistência à compressão de prismas, pequenas paredes e de paredes. Esses ensaios foram realizados para cada combinação de tipo de bloco e composto polimérico.



A aplicação do composto polimérico buscou seguir as orientações descritas na NBR 16590-1 (ABNT, 2017), utilizando dois cordões na junta horizontal. Portanto, a junta horizontal foi assentada de maneira parcial, pois o composto foi aplicado somente sobre as paredes longitudinais do bloco. A junta vertical também foi executada com a aplicação de dois cordões de composto polimérico.

Todos os ensaios de compressão dessa etapa foram executados em um pórtico para execução de ensaios de compressão em paredes da fabricante Contenco, disponível no Centro Cerâmico do Brasil (CCB), que possui capacidade de 150 tf. As leituras das cargas obtidas durante os ensaios foram feitas através das três células de carga do tipo pino fixadas no cutelo de aplicação de carga. As leituras dos deslocamentos obtidos nos ensaios foram feitas com a utilização de transdutores lineares de deslocamento (LVDTs). O registro das informações obtidas nos ensaios (cargas e deslocamentos) foi feito com a utilização de um equipamento de aquisição de dados da marca HBM, modelo PMX 455.

Mais detalhes sobre a construção dos corpos de prova e execução dos ensaios são demonstrados a seguir.

### 3.3.1 COMPRESSÃO DOS PRISMAS

Os prismas utilizados nessa pesquisa foram compostos por dois blocos assentados um sobre o outro. Os prismas foram construídos com aplicação de dois cordões de composto polimérico na junta horizontal, sobre as paredes longitudinais do bloco, sem aplicar composto nas paredes transversais. Foram construídos seis prismas para cada combinação de tipo de bloco e composto polimérico. Os prismas foram construídos sobre mesa nivelada com o auxílio de nível, prumo e martelo de borracha para o assentamento. Na Figura 63 pode ser observada a construção dos corpos de prova.

**Figura 63 - Construção dos prismas**



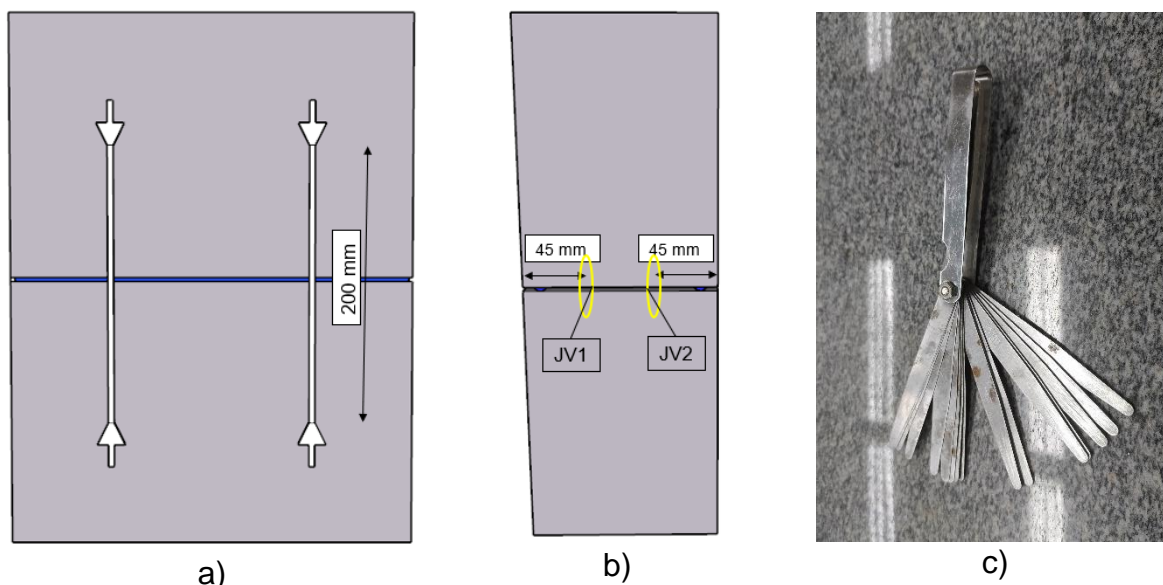
Fonte: Autor (2023).

Para realizar os ensaios de compressão a superfície dos prismas foi regularizada com a utilização de forro pacote (forro de fibra mineral). Esse tipo de material já foi empregado no

capeamento para evitar a concentração de tensões, por outros pesquisadores. Como a aplicação do composto polimérico durante o assentamento foi feita somente nas paredes longitudinais dos blocos, optou-se por seguir a recomendação da normativa canadense S304-14 (CSA, 2014), que indica o uso do capeamento, nesses casos, somente nas paredes longitudinais dos blocos. Essa técnica é utilizada pois a aplicação de carregamento sobre toda a superfície do prisma, que possui argamassa somente nas paredes longitudinais, pode causar acúmulo de tensões na região central do prisma, que está sem argamassa de assentamento, podendo modificar a forma de ruptura. Portanto, o forro mineral utilizado foi cortado manualmente em tiras de aproximadamente 32 mm de largura, que foram posicionadas na parte superior e inferior dos prismas, nas paredes longitudinais dos blocos. O capeamento utilizado pode ser visualizado na Figura 65-a.

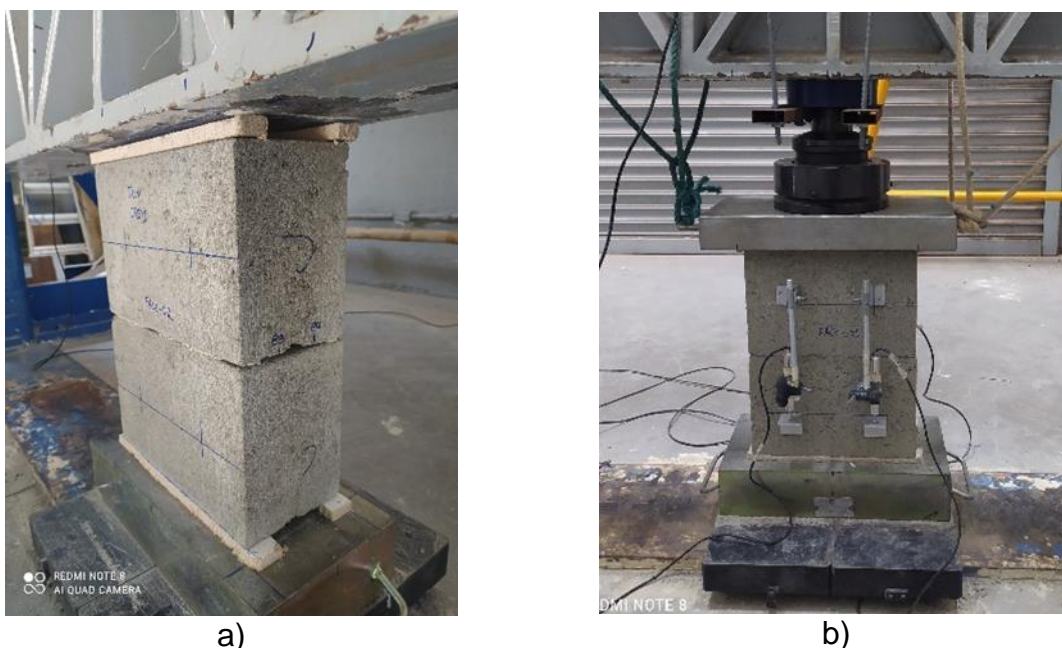
Os ensaios de compressão dos prismas foram realizados com controle de deslocamento a uma velocidade de, aproximadamente, 1 mm/min. Para realizar a leitura das deformações verticais dos corpos de prova quatro transdutores lineares de deslocamento (LVDTs) foram empregados, dois em cada face dos corpos de prova, utilizando um afastamento de 200 mm entre as chapas de fixação. O esquema de instrumentação utilizado no ensaio pode ser visualizado na Figura 64-a. Imagem da instrumentação aplicada em um corpo de prova pode ser observada na Figura 65-b. Antes da realização dos ensaios a espessura da junta de assentamento foi medida nos prismas em quatro pontos com a utilização de um pente de folga e paquímetro. Os locais em que essas medidas foram tomadas, assim como a imagem do pente de folga podem ser observados, respectivamente, na Figura 64-b e Figura 64-c.

**Figura 64 - Esquema de instrumentação utilizado e locais para medir espessura da junta**



Fonte: Autor (2023).

A ideia inicial seria realizar os ensaios de todos os prismas diretamente no cutelo do pórtico, como pode ser observado na Figura 65-a. Entretanto, para o caso dos prismas construídos com a utilização do bloco tipo B4 a carga máxima foi inferior ao esperado, sendo julgado necessário empregar uma célula de carga do tipo panqueca, com capacidade de 20 tf, com uma rótula e prato para distribuição de carga, para realizar os ensaios de compressão dessas amostras. Imagem dessa adaptação utilizada para os prismas construídos com o bloco tipo B4 pode ser observada na Figura 65-b.

**Figura 65 - Corpo de prova antes e após o ensaio**

Fonte: Autor (2023).

### **3.3.2 COMPRESSÃO DAS PEQUENAS PAREDES**

Para o caso das pequenas paredes os corpos de prova foram construídos com a utilização de argamassa cimentícia convencional para nivelamento da primeira fiada. Essa prática é indicada na execução do assentamento de alvenaria com compostos poliméricos da normativa NBR 16590-1 (ABNT, 2017), visando minimizar as irregularidades da superfície. Como a espessura das juntas finas tem baixa capacidade de acomodar imperfeições, essa primeira fiada contribui para melhorar a execução. A argamassa cimentícia utilizada no assentamento da primeira fiada é proveniente da fabricante Argafácil e possui resistência à compressão nominal de 20 MPa, tendo sido aplicada com uma espessura de 10 mm.

A construção das pequenas paredes foi feita no interior do laboratório do Centro Cerâmico do Brasil, sobre piso de concreto, sendo utilizado um filme plástico para impedir que a argamassa cimentícia da primeira fiada fique fixada na superfície do piso concreto. No total foram construídas 18 pequenas paredes, sendo três para cada combinação de tipo de bloco e composto polimérico utilizados na pesquisa. As pequenas paredes utilizadas nos ensaios de compressão foram construídas com 2 blocos de largura e 5 fiadas de altura. Imagens da construção das pequenas paredes podem ser observadas na Figura 66.

**Figura 66 – Construção das pequenas paredes**

Fonte: Autor (2023).

Antes do início do ensaio de compressão de cada corpo de prova, foi realizado o seu escorvamento, que consistiu na aplicação de dois ciclos de carga e descarga até um valor de, aproximadamente, 10% da tensão de ruptura estimada.

Para ensaios de alvenaria convencional, ciclos iniciais de carga e descarga de até 50% da tensão de ruptura estimada costumam ser aplicados. Apesar disso, como existem poucos estudos desenvolvidos para avaliar e prever o comportamento à compressão desse tipo de alvenaria com junta fina de compostos poliméricos, esse ciclo inicial de carga e descarga foi limitado a cargas mais baixas, para não danificar os corpos de prova.

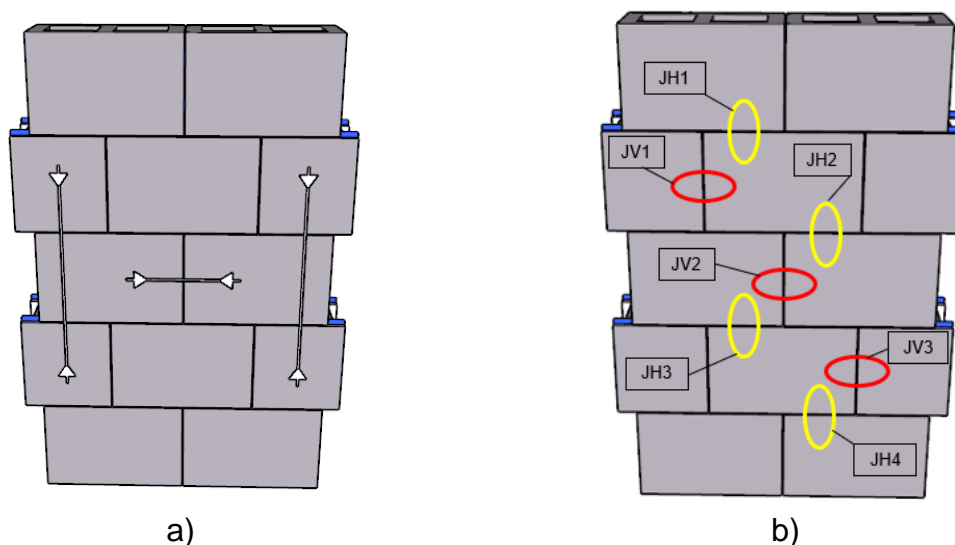
O forro pacote também foi utilizado nas pequenas paredes, regularizando a superfície do corpo de prova que entra em contato com o pórtico de ensaio. Da mesma maneira que o ensaio de prisma, duas tiras de forro mineral foram posicionadas nas paredes longitudinais dos blocos de concreto. As tiras de forro pacote foram empregadas tanto na parte superior quanto na parte inferior das pequenas paredes, para evitar o acúmulo de tensões.

A leitura das deformações verticais dos corpos de prova durante o ensaio de compressão foi realizada por quatro transdutores de deslocamento, sendo dois fixados em cada face. Para realizar a leitura das deformações horizontais dos corpos de prova dois transdutores de deslocamento foram utilizados, um em cada face do corpo de prova, sendo



fixados, aproximadamente, na metade da altura da pequena parede. O esquema dos instrumentos empregados para medir as deformações dos corpos de prova pode ser observado na Figura 67-a. Antes da realização dos ensaios a espessura das juntas verticais e horizontais foram medidas nos pontos destacados na Figura 67-b com o auxílio de um fissurômetro, já mostrado na Figura 61-c.

**Figura 67 - Esquema de instrumentação utilizado e locais para medir espessura da junta**



Fonte: Autor (2023).

Detalhes da instrumentação utilizada para os ensaios podem ser observada na Figura 68.

**Figura 68 – Pequenas paredes utilizadas nos ensaios**



Fonte: Autor (2023).

O ensaio de compressão foi realizado com controle de deslocamento a uma velocidade de aproximadamente 0,6 mm/min.

### **3.3.3 COMPRESSÃO DAS PAREDES**

Para o caso das paredes, cada uma foi construída com o assentamento da primeira fiada de blocos com a utilização de argamassa cimentícia sobre uma chapa de aço, previamente nivelada, apoiada em dois blocos. A argamassa cimentícia utilizada é proveniente da fabricante Argafácil e possui resistência à compressão nominal de 20 MPa, tendo sido aplicada com aproximadamente, 10 mm de espessura. A construção das paredes sobre as chapas foi realizada para facilitar a movimentação das paredes para o local do ensaio. Resultados dos ensaios de caracterização da argamassa cimentícia podem ser observados no Anexo B.

A construção das paredes foi realizada dentro de uma tenda fechada para proteger as paredes da ação direta das intempéries. As principais ferramentas empregadas na construção das paredes foram prumo, nível de bolha, martelo de borracha e cunhas plásticas. Imagens da construção das paredes podem ser observadas na Figura 69.

**Figura 69 - Imagens da construção das paredes**

Fonte: Autor (2023).

As paredes executadas com o bloco B4 e B10 foram construídas com 4 blocos de largura e 13 fiadas de altura. Para o caso das paredes construídas com o bloco B20 foram empregados 3 blocos de largura e 13 fiadas de altura. Essa redução na largura das paredes construídas com o bloco B20 foi feita para evitar que a carga máxima atingida seja maior do que a capacidade do pórtico de ensaios (150 tf).

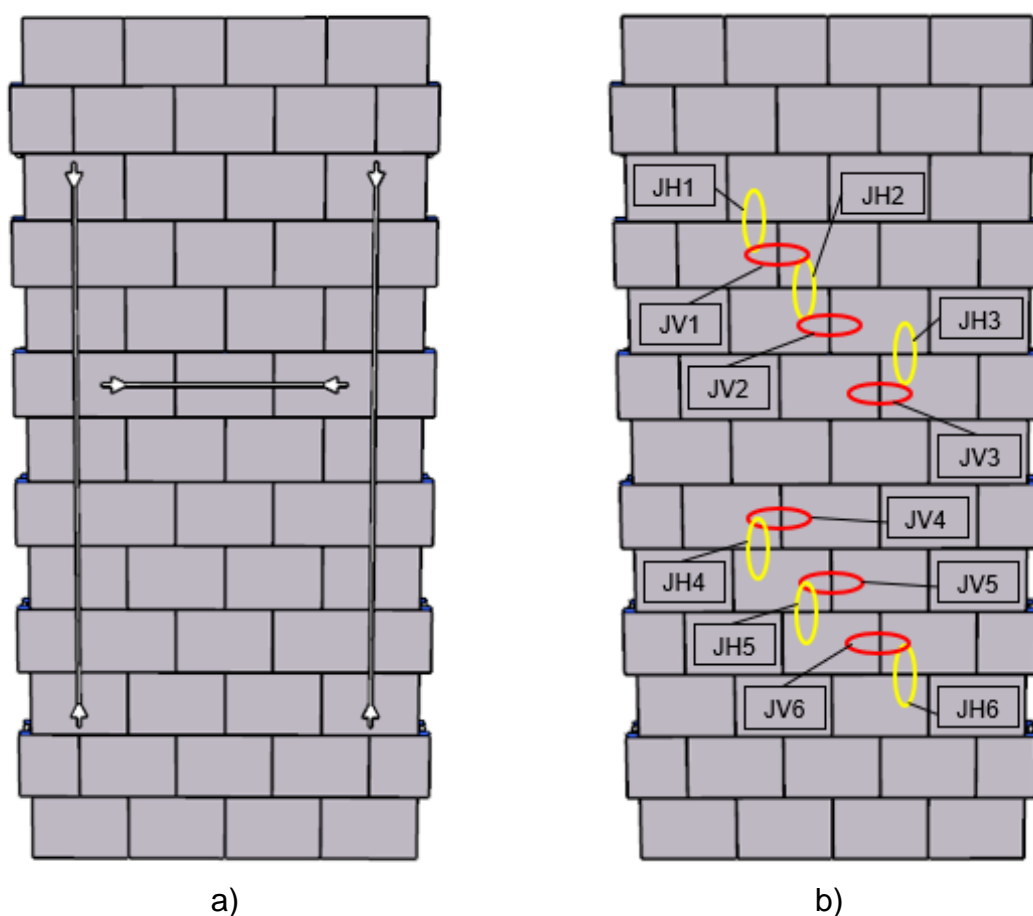
A movimentação de cada parede foi realizada com o auxílio de uma empilhadeira. Para isso, na parte superior de cada parede foi posicionada uma chapa de aço que foi fixada



através de duas barras roscadas na chapa de aço localizada na parte inferior da parede. Para evitar danos provenientes da concentração de tensões na região de contato entre a chapa superior e a parede, forro de fibra mineral foi utilizado entre a chapa e a parede. Após tudo ser fixado, cintas de carga foram empregadas para o transporte do conjunto com a empilhadeira.

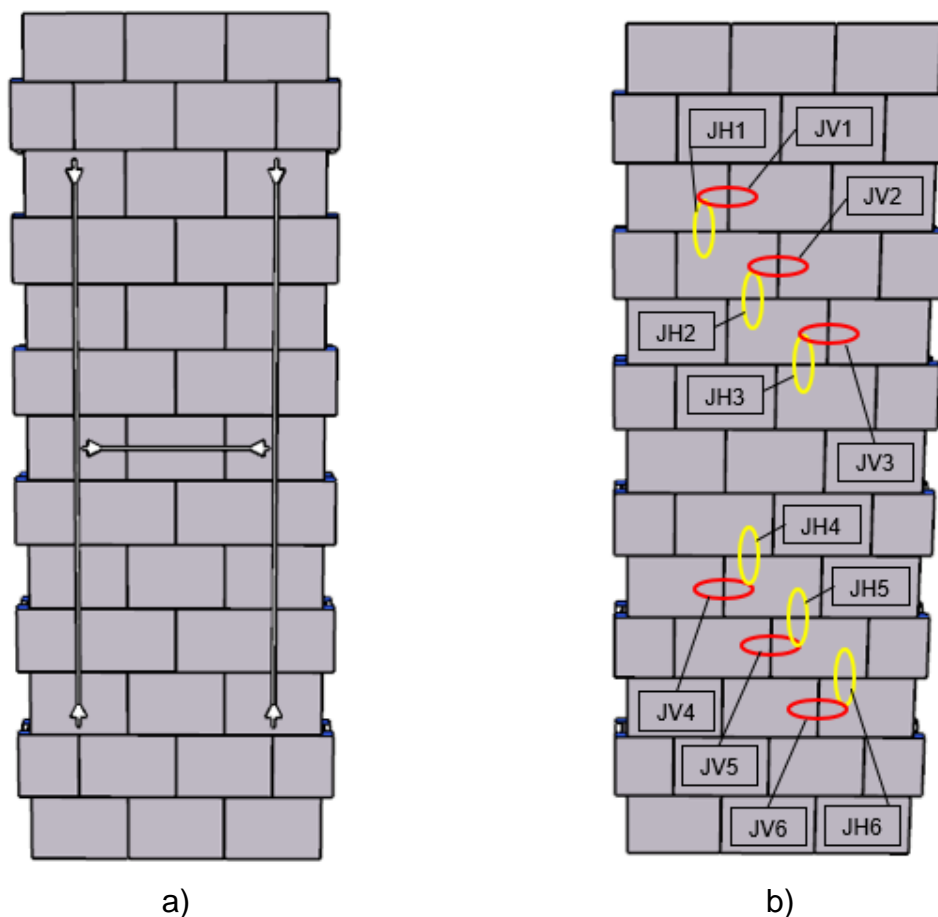
Após a movimentação das paredes para o pórtico de ensaios, a chapa metálica superior da parede foi removida e duas tiras de forro pacote (forro mineral) foram colocadas sobre o topo das paredes, na posição das paredes longitudinais dos blocos, para evitar o acúmulo de tensões durante o ensaio de compressão. Para medir a deformação vertical das paredes foram empregados 4 LVDTs, sendo 2 em cada lado do corpo de prova. Para medir a deformação horizontal foram empregados 2 LVDTs, sendo um em cada lado do corpo de prova, localizados no centro da oitava fiada, de baixo para cima. O esquema da instrumentação utilizada nos ensaios das paredes construídas com bloco B4 e B10 pode ser visualizada na Figura 70-a. A espessura das juntas verticais e horizontais foi medida com fissurômetro nos pontos indicados na Figura 70-b.

**Figura 70 - Esquema da instrumentação e medidas das juntas (B4 e B10)**



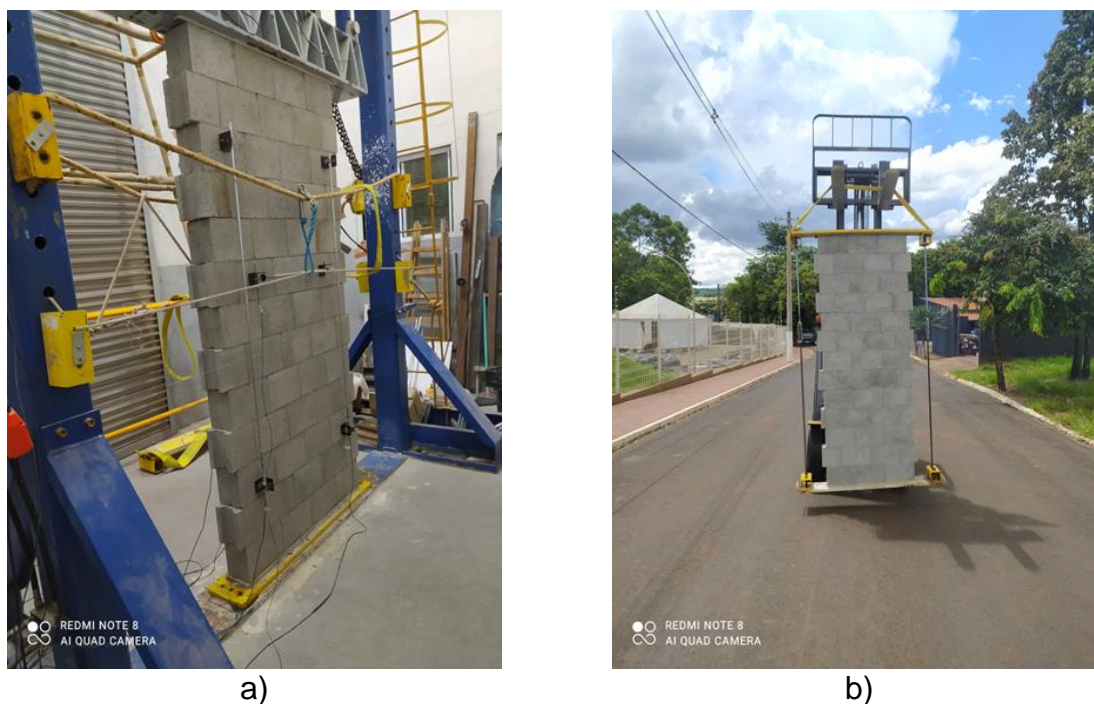
O esquema da instrumentação utilizada nos ensaios das paredes construídas com bloco B20 pode ser visualizada na Figura 71-a. A espessura das juntas verticais e horizontais foi medida com fissurômetro nos pontos indicados na Figura 71-b.

**Figura 71 - Esquema da instrumentação e medidas das juntas (B20)**



Fonte: Autor (2023).

A imagem de um dos corpos de prova e a posição dos LVDTs utilizados pode ser conferida na Figura 72-a. Imagem da movimentação de um corpo de prova construído com o bloco B20 pode ser visualizada na Figura 72-b.

**Figura 72 - Imagem de um corpo de prova e da movimentação**

Fonte: Autor (2023).

Assim como no caso das pequenas paredes, no ensaio de compressão das paredes também foram empregados 2 ciclos de carga e descarga (escorvamento) até, aproximadamente, 10% da carga estimada de ruptura. O ensaio foi realizado com controle de deslocamento, a uma velocidade de, aproximadamente, 0,6 mm/min.

### **3.4 QUARTA ETAPA – ESTUDO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PERPENDICULAR À JUNTA DE ASSENTAMENTO HORIZONTAL**

Nesta etapa são apresentados os ensaios realizados para avaliar a resistência à tração na flexão perpendicular à junta de assentamento horizontal da alvenaria de blocos de concreto assentados com juntas finas de compostos poliméricos. A resistência à tração na flexão é considerada perpendicular, pois a direção das tensões de tração solicitantes é perpendicular à junta horizontal de assentamento. A tendência desses ensaios é formar plano de fratura paralelo com a junta horizontal.

Para avaliar a resistência à tração na flexão perpendicular da alvenaria foram realizados os ensaios baseados na norma NBR 16868-3 (ABNT, 2020) e AS 3700 (2017). O procedimento da norma brasileira consiste em realizar um ensaio de flexão de quatro pontos em um prisma, obtendo um único resultado por prisma. O ensaio de flexão previsto na norma australiana consiste em submeter cada junta individual do prisma a um ensaio de flexão com

o auxílio de uma alavanca, obtendo múltiplos resultados por prisma, um para cada junta horizontal de assentamento.

Esses ensaios foram realizados para cada combinação de tipo de bloco e composto polimérico empregados nessa pesquisa. Portanto, considerando o uso de três tipos de blocos de concreto e dois compostos poliméricos, foram realizados ensaios em seis amostras de alvenaria.

Os corpos de prova utilizados nos dois procedimentos de ensaio são formados por prismas compostos por 5 blocos de altura assentados com dois cordões de composto polimérico aplicados sobre as paredes longitudinais dos blocos.

A construção dos corpos de prova foi feita dentro do laboratório do Centro Cerâmico do Brasil (CCB), com a utilização de martelo de borracha, nível e prumo sobre o piso de concreto nivelado. Para facilitar o processo de assentamento dos prismas, dois cordões de composto polimérico foram aplicados entre o primeiro bloco e o piso de concreto. Uma camada de filme plástico foi aplicada sobre o piso evitando que essa primeira camada de composto polimérico fique aderida ao piso. Na Figura 73-a pode ser observado o início do assentamento de um prisma e na Figura 73-b parte dos corpos de prova construídos, com dois blocos utilizados de sobrecarga após o assentamento. Os ensaios foram realizados após 28 dias do término da construção dos prismas.

**Figura 73 - Construção dos prismas para ensaio de flexão**



Fonte: Autor (2023).

Informações específicas sobre os ensaios são mostradas a seguir.

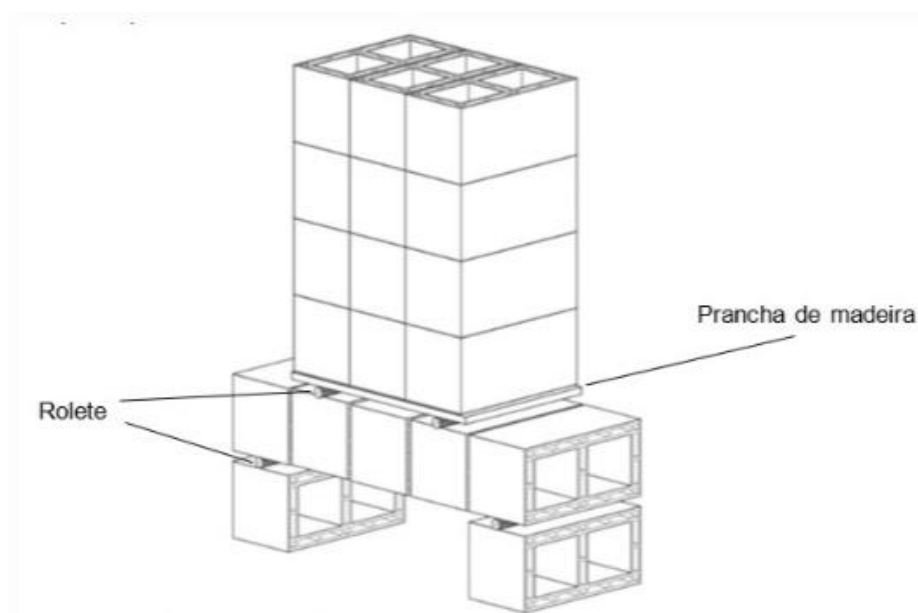
#### **3.4.1 ENSAIO DA NORMA BRASILEIRA – ABNT NBR 16868-3**

O ensaio previsto na norma brasileira NBR 16868-3 (ABNT, 2020) consiste em submeter o prisma inteiro de 5 blocos de altura ao ensaio de flexão de 4 pontos. Dessa forma,

cada prisma proporciona apenas um resultado de resistência à tração na flexão. Foram empregados para esse tipo de ensaio seis corpos de prova por amostra.

O esquema do ensaio de resistência à tração na flexão previsto na norma brasileira pode ser observado na Figura 74. Esse ensaio é realizado com o prisma na posição horizontal. No caso, dois roletes são posicionados abaixo dos blocos da primeira e última fiada do prisma para servir como apoio, enquanto dois roletes são posicionados sobre o segundo e quarto bloco para receber o carregamento que é distribuído com auxílio de uma prancha de madeira. O diâmetro dos roletes utilizados é de, aproximadamente, 25 mm.

**Figura 74 - Esquema do ensaio de tração na flexão (norma brasileira)**

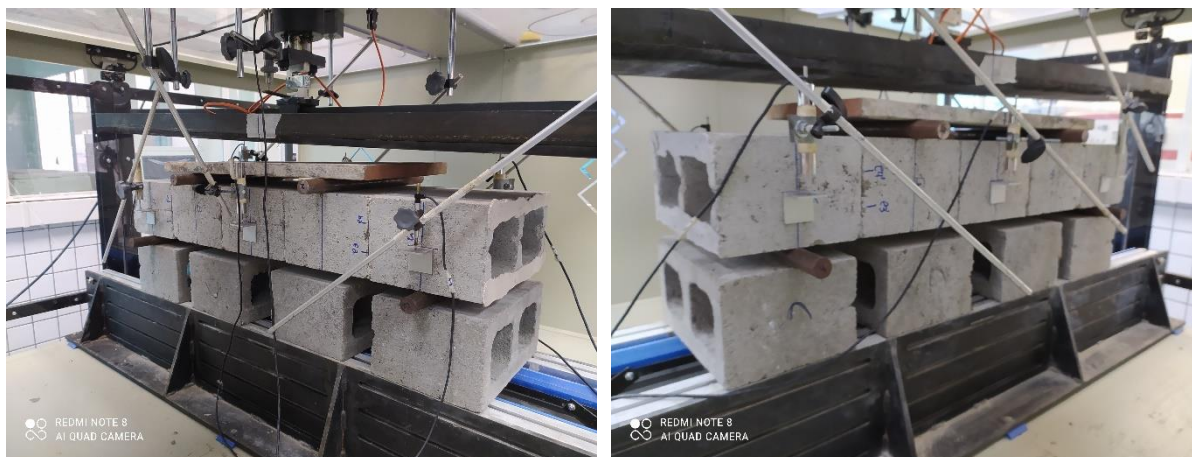


Fonte: NBR 16868-3 (ABNT, 2020).

Como pode ser observado no esquema da Figura 74, a aplicação do carregamento pode ser feita manualmente com a utilização de blocos. Entretanto, para o caso dessa pesquisa a aplicação do carregamento foi feita com um flexímetro da marca Servitech, como pode ser observado na Figura 75. O ensaio foi realizado com controle de aplicação de força, a uma velocidade de 8,3 N/s, que é próximo à velocidade indicada pela norma de 500N/min.



**Figura 75 - Corpo de prova utilizado no ensaio de tração na flexão (norma brasileira)**

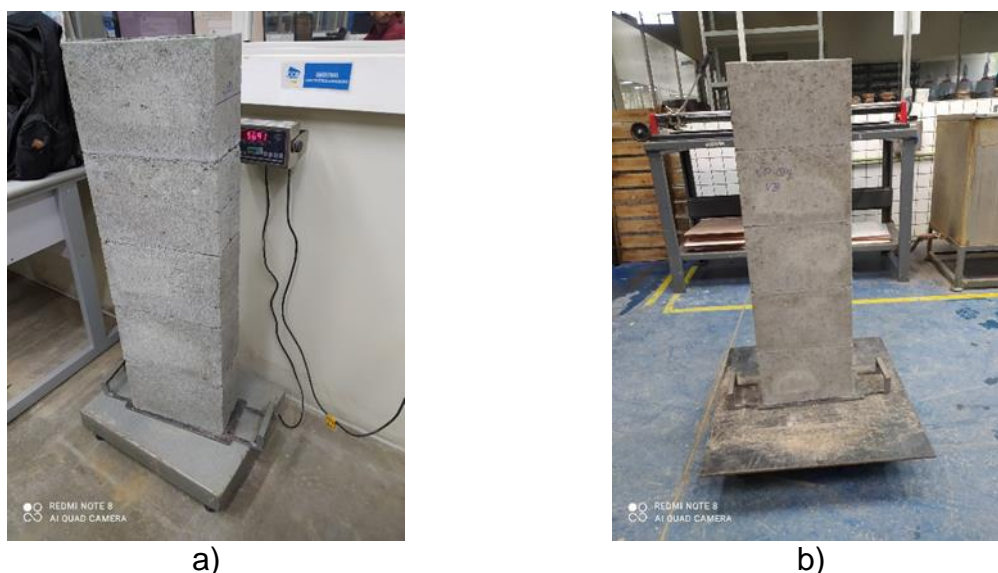


Fonte: Autor (2023).

Para compreender um pouco mais sobre a deformação dos prismas durante a aplicação do carregamento, seis LVDTs foram utilizados para medir o deslocamento vertical dos corpos de prova durante o ensaio. Três LVDTs foram colocados em cada lado do corpo de prova, sendo dois na região do apoio e um na região central.

Como os corpos de prova foram ensaiados na posição horizontal sua massa foi determinada antes do ensaio. Imagem do transporte dos corpos de prova e da pesagem pode ser observada na Figura 76.

**Figura 76 - Transporte e pesagem dos corpos de prova**



Fonte: Autor (2023).

A equação 15 foi utilizada para determinar a resistência à tração na flexão obtida nos ensaios da norma brasileira.

$$f_t = \frac{6 \times M}{(c \times l^2)} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde,

$f_t$  é a resistência à tração na flexão perpendicular, expresso em MPa;

$M$  é o momento máximo, expresso em N x mm;

$c$  é o comprimento do bloco, expresso em mm;

$l$  é a largura do bloco, expressa em mm.

### **3.4.2 ENSAIO DA NORMA AUSTRALIANA – AS 3700 (2017)**

O ensaio de flexão previsto na norma australiana AS 3700 (2017) consiste em utilizar uma alavanca fixada ao bloco superior de um prisma para realizar a flexão da junta de assentamento que está abaixo desse bloco. O bloco logo abaixo da junta superior que será submetida aos esforços de flexão, é fixado por uma estrutura que impede sua movimentação enquanto a força é aplicada na alavanca presa ao bloco superior. Dessa forma, é possível realizar vários ensaios de flexão em um mesmo prisma, pois cada junta é ensaiada individualmente.

Para realização desse ensaio também foram empregados prismas compostos por 5 blocos, construídos da mesma forma que os utilizados no ensaio da norma brasileira. No caso do ensaio de resistência à tração na flexão da norma australiana, cada prisma de 5 blocos pode proporcionar até 4 resultados de resistência à tração na flexão, pois cada uma das juntas de assentamento é ensaiada isoladamente com o auxílio de uma alavanca. Portanto, para o caso do ensaio da alavanca realizado nessa pesquisa, cada junta será considerada como sendo um único corpo de prova.

A ideia desse ensaio é verificar se é possível conseguir resultados equivalentes ao da norma brasileira utilizando o ensaio da alavanca, reduzindo-se o número de prismas construídos para apenas 2, que tem a capacidade de produzir 8 resultados de resistência à tração na flexão, devido a existência de 4 juntas de assentamento em cada prisma.

Para diferenciar cada corpo de prova será utilizada uma nomenclatura que especifica o prisma que foi utilizado e a junta de assentamento. Para identificação do prisma foi empregada a nomenclatura “P1” ou “P2”, pois foram empregados 2 prismas para cada amostra. Para identificação da junta de assentamento, foi utilizada a nomenclatura “J1”, “J2”, “J3” e “J4”, representando, respectivamente, a junta de assentamento da primeira fiada superior até a quarta fiada, de cima para baixo. Por exemplo, o corpo de prova identificado como P2-J3, se refere ao segundo prisma ensaiado, na terceira junta de cima para baixo.

Os equipamentos utilizados para a realização do ensaio de alavanca podem ser visualizados na Figura 77-a e Figura 77-b que demonstram, respectivamente, o ensaio sendo realizado na primeira e na quarta fiada do prisma.

**Figura 77 - Corpos de prova no ensaio de flexão da alavanca**



Fonte: Autor (2023).

Os equipamentos utilizados nos ensaios foram construídos com base nas indicações previstas na norma australiana, mas sofreram algumas modificações visando facilitar a realização dos ensaios. Uma dessas mudanças está relacionada à fixação do bloco logo abaixo da fiada superior. No caso da norma australiana, é indicada a colocação de madeira compensada para auxiliar na fixação do bloco inferior, contudo, durante a realização de ensaios preliminares percebeu-se a existência de movimentação do prisma durante a aplicação do carregamento. Por esse motivo, a fixação do bloco inferior passou a ser feita por duas chapas metálicas em cada lado do bloco. As chapas são pressionadas contra a face lateral do bloco para promover sua fixação através de parafusos. Imagem dessa alteração pode ser observada na Figura 78-a. A alavanca utilizada nos ensaios também sofreu algumas alterações. Inicialmente, ela foi desenvolvida contendo 2 pontos de contato com o bloco na região frontal e 2 pontos de contato na parte traseira. Foram observadas dificuldades para conseguir nivelar a alavanca antes do ensaio e para manter sua posição após o início do carregamento. Dessa forma, na região de contato entre a alavanca e o bloco, tanto na parte frontal, quanto na parte traseira, foram empregadas chapas de aço retangulares. Essas duas chapas foram confeccionadas de forma a permitir realizar seu ajuste e fixação, pressionando contra a face dos blocos através de parafusos. Entretanto, durante a realização dos ensaios, apenas o parafuso que regula a chapa posicionada na região frontal do bloco foi ajustado para posicionamento e fixação da alavanca. A chapa da parte traseira permaneceu fixa para todos os ensaios realizados. Na Figura 78-b podem ser observadas as mudanças feitas na alavanca e na Figura 77 pode ser observada a alavanca em uso durante o ensaio.



**Figura 78 - Fixação do bloco inferior**



Fonte: Autor (2023).

Antes da realização do ensaio, o prisma era posicionado e fixado dentro da estrutura de contenção, que estava alinhada com a máquina utilizada para aplicação dos carregamentos. Na estrutura utilizada para fixação do prisma, o bloco superior fica livre para receber a alavanca que realiza a flexão da junta superior. O bloco posicionado logo abaixo da junta superior é fixado na estrutura através de duas chapas metálicas pressionadas contra sua lateral, através de parafusos. Após a fixação do bloco localizado abaixo da fiada superior, a alavanca foi colocada sobre o bloco superior do prisma, sendo utilizado um calço com espessura de, aproximadamente, 20 mm para auxiliar no seu posicionamento. Nesse momento, o parafuso da parte frontal da alavanca foi utilizado para pressionar a chapa metálica contra o bloco superior, possibilitando a estabilização e fixação da alavanca ao bloco. Em seguida, um nível de bolha foi utilizado para fazer com que a alavanca fique nivelada no sentido de seu comprimento e, também, lateralmente. Após o nivelamento da alavanca, o cabeçote do equipamento foi movimentado até que a rótula entrasse em contato com a alavanca, aplicando pequena carga, geralmente, inferior a 20 N, possibilitando que o calço empregado para posicionar a alavanca seja removido, para dar início à realização do ensaio. Essa carga inicial foi utilizada para evitar que no momento em que a máquina de ensaio entra em contato com a alavanca, ocorra sua movimentação e desalinhamento.

O ensaio de alavanca foi realizado com controle de deslocamento com a utilização de uma máquina de ensaios universal da marca EMIC modelo DL200 dotada de uma célula de carga de 10 kN, utilizando a velocidade de 1,3 mm/min.

A equação 16 foi utilizada para determinar a resistência à tração na flexão obtida no ensaio da alavanca. Os resultados foram apresentados em função da área transversal bruta e da área transversal líquida, sendo que no caso da área líquida, foi considerada a área sobre

a qual foi aplicado o composto polimérico, ou seja, somente nas paredes longitudinais do bloco.

$$f_{sp} = \left( \frac{M_{sp}}{Z_d} \right) - \left( \frac{F_{st}}{A_d} \right) \quad (\text{Equação 16})$$

Onde,

$f_{sp}$  é a resistência à tração na flexão, expressa em MPa;

$M_{sp}$  é o momento fletor no centroide da área de assentamento, expresso em N×mm;

$Z_d$  é o módulo da seção transversal  $A_d$ , expresso em mm<sup>3</sup>;

$F_{st}$  é a força total aplicada sobre a área de assentamento, em N;

$A_d$  é a área transversal do membro, expressa em mm<sup>2</sup>.

Além da resistência à tração na flexão obtida no ensaio com a utilização da alavanca, também foram apresentadas as curvas que relacionam a força e o deslocamento aplicados pela máquina de ensaios em cada corpo de prova. Para que seja possível compreender um pouco melhor sobre o comportamento de cada amostra durante a aplicação do carregamento, será empregada a equação 17 para estimar o coeficiente angular da carga e deslocamento obtidos no equipamento de ensaio para cada corpo de prova entre os pontos de 40 e 50% da força máxima aplicada.

$$C_a = \left( \frac{f_{50} - f_{40}}{d_{50} - d_{40}} \right) \quad (\text{Equação 17})$$

Onde,

$C_a$  é o coeficiente angular, expresso em N/mm;

$f_{50}$  é a força equivalente a 50% da força máxima aplicada, expressa em N;

$f_{40}$  é a força equivalente a 40% da força máxima aplicada, expressa em N;

$d_{50}$  é o deslocamento registrado no momento de aplicação de 50% da força máxima, expresso em mm;

$d_{40}$  é o deslocamento registrado no momento de aplicação de 40% da força máxima, expresso em mm.

Como na análise visual das curvas que relacionam a força e deslocamento obtidas na máquina de ensaio, pode não ser tão perceptível identificar quais amostras apresentam maior inclinação durante o carregamento, esse coeficiente pode facilitar esse entendimento.

### **3.5 QUINTA ETAPA – AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PARALELA E DA ISOTROPIA**

O objetivo dessa etapa é analisar se a alvenaria de junta fina assentada com compostos poliméricos apresenta comportamento ortotrópico, de maneira semelhante ao comportamento da alvenaria convencional, ou comportamento isotrópico. Mais especificamente, será avaliado se a resistência à tração na flexão dessas amostras é semelhante quando os esforços de tração são aplicados na direção perpendicular ou paralela à fiada de assentamento.

Os ensaios de resistência à tração na flexão da alvenaria, com sentido de aplicação dos esforços de tração perpendicular à fiada de assentamento, já foram realizados na etapa anterior. Portanto, nessa etapa serão realizados os ensaios para determinação da resistência à tração na flexão paralela, para permitir a comparação do comportamento da alvenaria nas duas direções.

O ensaio para determinar a resistência à tração na flexão paralela foi realizado com base na norma BS EN 1052-2 (2016). Esse ensaio consiste em submeter uma amostra de alvenaria à flexão em 4 pontos, de maneira semelhante aos ensaios realizados pela norma brasileira de flexão perpendicular apresentados na etapa anterior.

O ensaio de flexão paralela foi realizado somente com a utilização do bloco tipo B10. Foram construídos 5 corpos de prova com cada composto polimérico (CPA-01 e CPA-02b). O bloco tipo B10 foi escolhido por ser o mesmo tipo de bloco que havia sido empregado no ensaio de cisalhamento. Os corpos de prova foram construídos com 2,5 blocos de largura e 4 fiadas de altura.

A primeira fiada desses corpos de prova foi assentada sobre uma camada de areia para facilitar o processo de assentamento. Embora exista uma recomendação da ABNT NBR 16590-1 (2017) para utilização de argamassa cimentícia convencional para o assentamento da primeira fiada na etapa de execução de alvenaria de vedação utilizando juntas finas de compostos poliméricos, essa técnica não foi utilizada, pois a presença dessa camada de argamassa cimentícia poderia impactar na obtenção dos resultados desse ensaio.

Após o término do assentamento, uma madeira foi adicionada sobre cada corpo de prova, para distribuir a sobrecarga empregada através do posicionamento de 4 blocos de concreto. Imagem dos corpos de prova pode ser observada na Figura 78-a e Figura 78-b, respectivamente, para os corpos de prova construídos com o composto CPA-01 e CPA-02b.

**Figura 79 - Construção dos corpos de prova**

a)



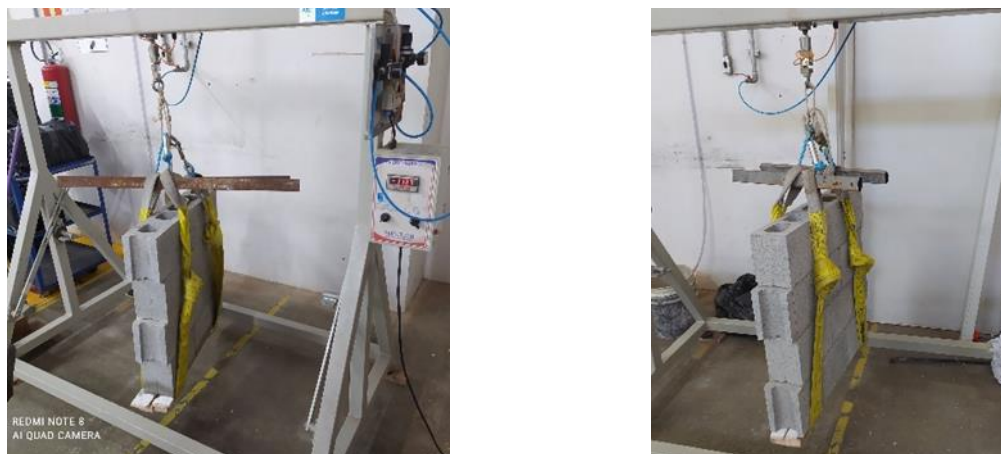
b)

Fonte: Autor (2023). Legenda: a) Corpos de prova assentados com CPA-01; b) Corpos de prova assentados com CPA-02.

O ensaio de flexão paralela foi realizado em 4 pontos, sendo dois externos que serviram como apoio e dois internos para aplicação do carregamento. A ideia inicial seria utilizar quatro roletes de aço com o mesmo diâmetro dos utilizados no ensaio de flexão perpendicular da norma brasileira. Entretanto, para garantir que os dois roletes da parte superior do corpo de prova possam aplicar a carga de maneira distribuída em todo seu comprimento, eles foram substituídos por dois roletes com, aproximadamente, 60 mm de diâmetro. A distância utilizada entre os roletes externos usados como apoio foi de 695 mm, enquanto a distância utilizada entre os roletes internos empregados para aplicação do carregamento foi de 320 mm. Para reduzir a existência de concentração de tensões em pontos específicos dos corpos de prova, na região de contato com os roletes, foram empregadas tiras de EVA com espessura de 8 mm.

O equipamento empregado no ensaio foi um flexímetro da marca Servitech, utilizando uma célula de carga com capacidade de 3000 kgf. O carregamento foi realizado com controle de aplicação de força, com uma velocidade de 8,3 N/s, mesmo valor utilizado no ensaio de flexão perpendicular da norma brasileira.

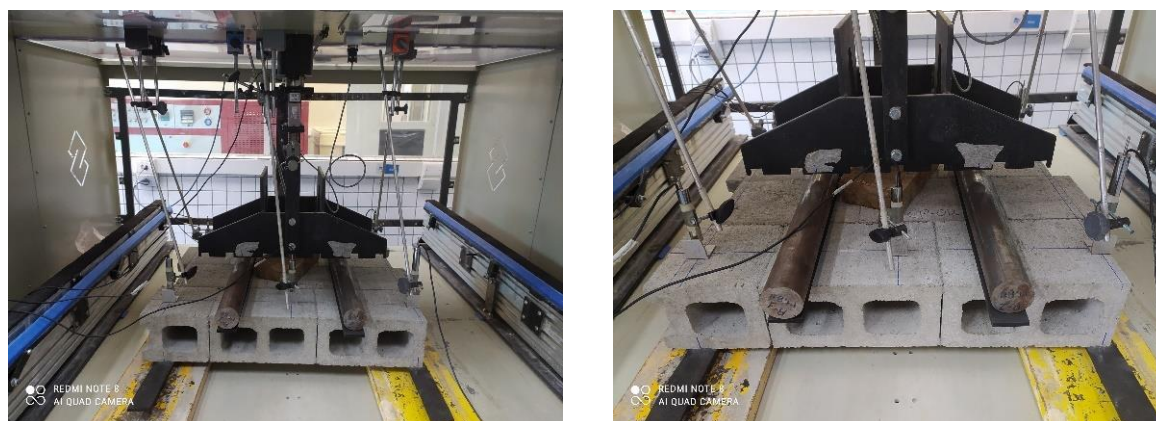
O ensaio de flexão foi realizado com os corpos de prova na posição horizontal. Dessa forma, a massa de cada exemplar foi determinada antes da aplicação dos esforços, com a utilização de uma célula de carga com capacidade de 200 kgf. O procedimento de pesagem pode ser observado na Figura 80.

**Figura 80 - Pesagem dos corpos de prova**

Fonte: Autor (2023).

Para registrar os deslocamentos dos corpos de prova durante o processo de aplicação de carga foram empregados seis LVDTs. Três desses LVDTs foram empregados de maneira alinhada na metade da altura dos blocos da primeira fiada. Os outros três LVDTs foram posicionados de maneira alinhada na metade da altura dos blocos da última fiada. Considerando os três LVDTs posicionados de maneira alinhada, os dois da extremidade foram colocados sobre os blocos na região do apoio, enquanto o LVDT central foi colocado sobre o espécime, na metade da distância entre os apoios externos. Para evitar a ocorrência de danos aos LVDTs ao entrar em contato direto com os corpos de prova, foram empregadas cantoneiras de alumínio que possuem superfície lisa, no local de contato entre a ponteira do LVDT e corpos de prova. Os dados de deslocamento obtidos durante o ensaio foram registrados com a utilização de um aquisitor de dados da marca HBM, modelo PMX 455.

Imagens dos corpos de prova antes do ensaio podem ser observados na Figura 81.

**Figura 81 - Esquema utilizado no ensaio**

Fonte: Autor (2023).

A equação 18 foi empregada para calcular a resistência à tração na flexão paralela de cada corpo de prova de alvenaria.

$$f_{xi} = \frac{3 \times F_{i,max} \times (l_1 - l_2)}{2 \times b \times t_u} + \frac{3 \times m_i}{b \times t_u^2} \left\{ x_i - \frac{(l_3 + x_i)^2}{l_s} \right\} \quad (\text{Equação 18})$$

Onde,

$f_{xi}$  é a resistência à tração na flexão de cada espécime, expressa em MPa;

$F_{i,max}$  é a força máxima aplicada durante o ensaio de um corpo de prova, expressa em N;

$l_1$  é a distância entre os apoios externos, expressa em mm;

$l_2$  é a distância entre os apoios internos, expressa em mm;

$l_3$  é a distância entre os apoios internos, expressa em mm;

$l_s$  é o comprimento do corpo de prova fora dos apoios externos, expressa em mm;

$m_i$  é a massa do corpo de prova, expressa em kg;

$x_i$  é a distância média entre a falha até o apoio externo mais próximo, expressa em mm;

$b$  é a altura ou largura do corpo de prova perpendicular à direção do vão, expressa em mm;

$t_u$  é a largura da unidade de alvenaria, expressa em mm.

Com a obtenção dos resultados dos ensaios tornou-se possível comparar se existe uma diferença significativa entre a resistência à tração na flexão da alvenaria, quando os esforços são aplicados na direção perpendicular ou paralela à junta de assentamento horizontal. Para isso, foram comparados os resultados obtidos nessa etapa com os resultados do ensaio de flexão perpendicular realizados na etapa anterior, considerando as mesmas amostras construídas com o boco tipo B10 e cada um dos compostos poliméricos. Para realizar essa comparação será empregado o coeficiente de resistência ortogonal obtido através da equação 19.

$$\mu = \frac{f_{par}}{f_{per}} \quad (\text{Equação 19})$$

Onde,

$\mu$  é o coeficiente de resistência ortogonal, expressa em unidade adimensional;

$f_{par}$  é a resistência à tração na flexão paralela da amostra, expressa em MPa;

$f_{per}$  é a resistência à tração na flexão perpendicular da amostra, expressa em MPa.

Caso o coeficiente de resistência ortogonal seja próximo a 1, pode ser considerado que existe uma tendência de maior isotropia para esse tipo de alvenaria, pois não apresenta diferenças significativas entre as direções em que o ensaio foi realizado. Caso o coeficiente



de resistência ortogonal proporcione resultado mais afastado de 1, pode-se dizer que a tendência apresentada por esse tipo de alvenaria é de que o seu comportamento seja ortotrópico, pois possui diferença de comportamento conforme a direção em que o ensaio é executado.

Para o caso da alvenaria convencional a norma de projeto NBR 16868-1 (ABNT, 2020) considera a resistência à tração na flexão paralela como sendo o dobro da resistência à tração na flexão perpendicular. Dessa forma, para o caso da alvenaria convencional o coeficiente de resistência ortogonal seria igual a 2,0. Sendo assim, caso os resultados obtidos para a alvenaria de blocos de concreto assentados com juntas finas de composto polimérico sejam próximos a 2,0 seu comportamento pode ser considerado semelhante ao da alvenaria convencional nesse aspecto.

### **3.6 SEXTA ETAPA – ESTUDO DO DESEMPENHO**

Para esta etapa foram utilizadas duas amostras de alvenaria de blocos de concreto assentados com juntas finas de compostos poliméricos para realização de ensaios com base na norma de desempenho das edificações NBR 15575-4 (ABNT, 2021). Foi selecionada uma amostra de alvenaria para cada composto polimérico. A resistência de bloco escolhida para construir as amostras de alvenaria com cada composto polimérico, foi a que apresentou os resultados mais baixos no ensaio de resistência à tração na flexão, realizado conforme a norma NBR 16868-3 (ABNT, 2020). Foi considerado o valor médio de resistência à tração na flexão para a escolha.

Dessa forma, o bloco tipo B20 foi utilizado para a construção da alvenaria assentada com o composto CPA-01 e o bloco tipo B4 foi utilizado para a construção da alvenaria com o composto CPA-02b.

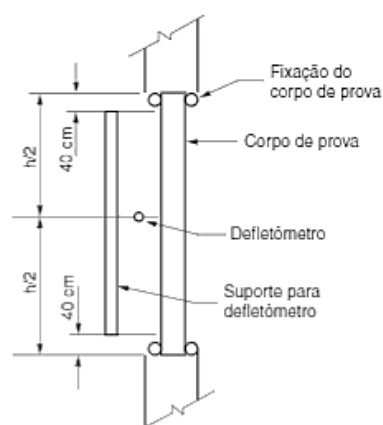
O motivo para a escolha das combinações de materiais que apresentaram os menores resultados no ensaio de resistência à tração na flexão, é devido ao fato que, se essas amostras de alvenaria apresentarem comportamento adequado, o restante das amostras que possuem maior resistência à tração na flexão, provavelmente terão desempenho igual ao superior.

Para realizar todos os ensaios previstos foram construídas duas paredes com cada composto polimérico. A ideia seria realizar os ensaios em uma sequência que permita utilizar os mesmos corpos de prova para todos os ensaios. A sequência escolhida foi a seguinte: choque térmico, carga suspensa, impacto de corpo duro e impacto de corpo mole.

Os ensaios da norma de desempenho das edificações são realizados para avaliar o sistema de vedação vertical, podendo englobar, além da alvenaria composta pelos blocos assentados, o revestimento aplicado em sua superfície. Para o caso desse estudo, foi optado por não aplicar sistema de revestimento sobre a alvenaria, por se configurar uma condição mais crítica a ser testada. Teoricamente, se o sistema construtivo atender aos critérios da norma de desempenho sem possuir revestimento, é bem provável que ele possa atender com qualquer sistema de revestimento que possua características adequadas, pois o revestimento seria mais uma camada contribuindo com as funções do sistema.

As paredes utilizadas nessa etapa foram construídas em pórticos destinados a realização dos ensaios, disponíveis no Centro Cerâmico do Brasil (CCB). Elas foram construídas no próprio local de realização dos ensaios, sem necessidade de realizar seu transporte. As paredes foram fixadas ao pórtico nas primeira e última fiadas, de maneira semelhante ao esquema da Figura 82.

**Figura 82 – Esquema de fixação**



Fonte: NBR 15575-4 (ABNT, 2021), p. 52.

Cada parede foi construída com 5 blocos de largura e 13 fiadas de altura. Foram aplicados dois cordões de composto polimérico no assentamento da junta vertical e dois na junta horizontal. Para o assentamento da primeira fiada foi utilizada argamassa cimentícia industrializada da marca Argafácil, com resistência nominal de 20 MPa. Para impedir a aderência da primeira fiada na camada de concreto da base, um filme plástico foi aplicado para fazer a separação.

Na sequência são apresentados detalhes específicos sobre os ensaios realizados.

### **3.6.1 Ensaio de choque térmico**

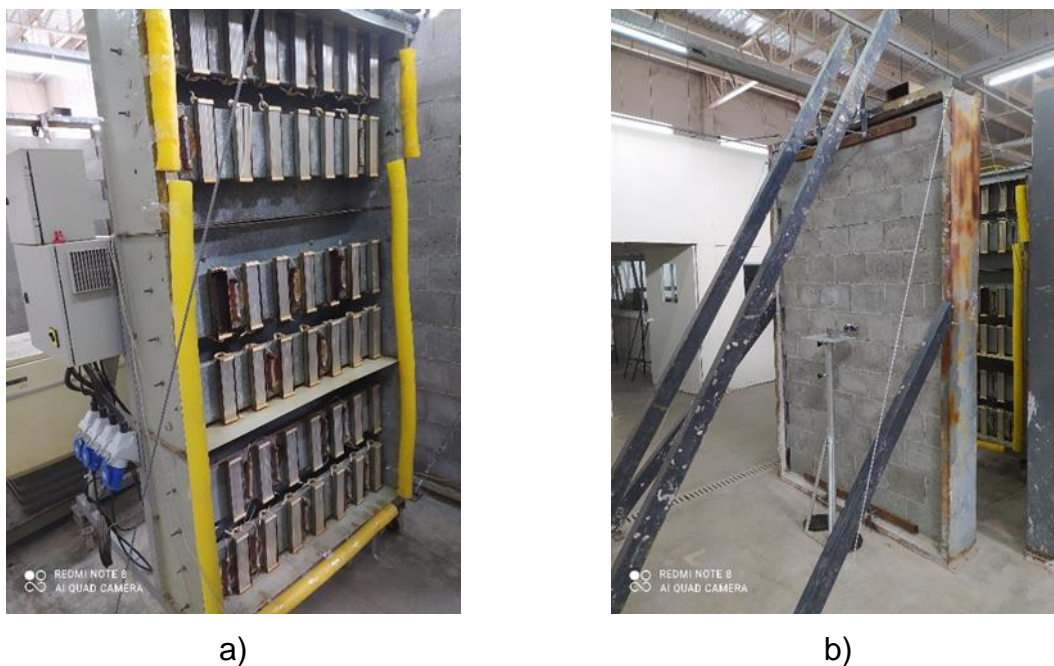


Esse ensaio foi realizado com base no anexo E da norma ABNT NBR 15575-4 (2021) e tem o objetivo de avaliar o comportamento do sistema de vedação vertical quando exposto à ação do calor e choque térmico. Esse ensaio foi executado nas duas paredes construídas com cada tipo de composto polimérico.

O ensaio foi realizado de modo a submeter o sistema de vedação vertical a ciclos de aquecimento, provenientes de uma fonte radiante e resfriamento, oriundos de jatos de água. No caso, cada corpo de prova foi submetido a 10 ciclos de aquecimento e resfriamento. Cada ciclo consiste em fazer com que a temperatura superficial de uma das faces do corpo de prova seja aquecida até 80°C e permaneça nessa condição por uma hora. Após esse tempo, a face aquecida do corpo de prova é resfriada com a utilização de aspersão de água, até que a temperatura superficial atinja uma temperatura entre 15 e 25°C. Então, o processo se repete, novamente, até serem completados os 10 ciclos.

No lado oposto da parede, onde não foram aplicados os ciclos de aquecimento e resfriamento, um relógio comparador com resolução de 0,01 mm foi posicionado para registrar os deslocamentos horizontais do corpo de prova. Os deslocamentos foram registrados na fase de aquecimento, 45 minutos após a temperatura de 80°C ter sido atingida, e, no resfriamento, logo após a temperatura entre 15 e 25°C ter sido atingida. O ensaio foi realizado nos dois corpos de prova de cada amostra de sistema de vedação vertical.

Imagem do equipamento utilizado no ensaio de choque térmico pode ser observado na figura 2-a. Na figura 2-b pode ser visualizado o relógio comparador posicionado no verso da parede para medir o deslocamento horizontal do corpo de prova.

**Figura 83 – Ensaio de choque térmico**

Fonte: Autor (2023).

### **3.6.2 Ensaio para determinação da resistência às solicitações de peças suspensas**

Outro ensaio que foi utilizado para avaliar o sistema de vedação vertical composto pelos blocos de concreto assentados com juntas finas de compostos poliméricos foi o ensaio para determinação da resistência às solicitações de peças suspensas.

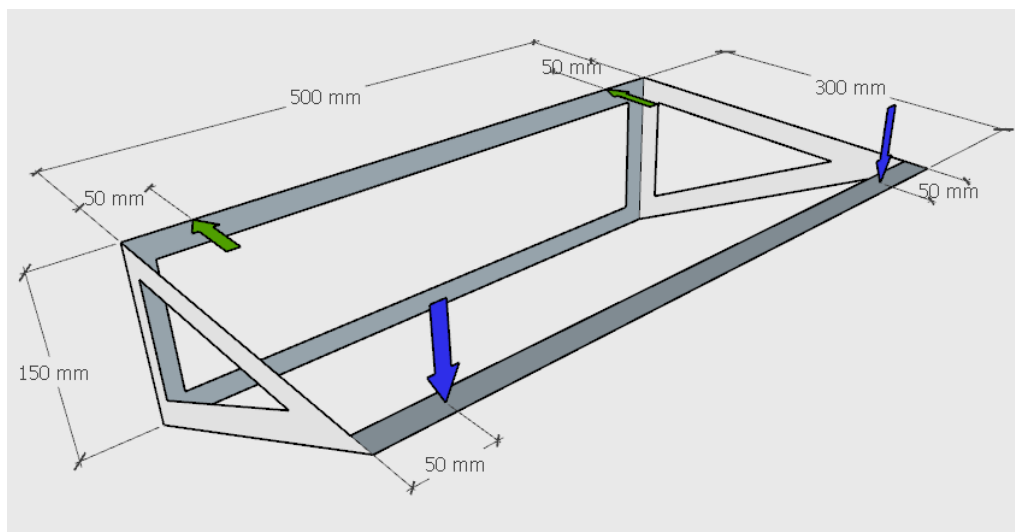
A ideia desse ensaio é simular condições de fixação semelhantes ao que ocorre com armários e prateleiras, por meio de uma mão francesa padronizada e aplicação de pesos. Nesse ensaio são avaliados a resistência e o deslocamento, tanto dos materiais utilizados na fixação da mão francesa, quanto do sistema de vedação vertical.

O ensaio foi realizado com a fixação da mão francesa na parede, em uma posição em que o centro da mão francesa coincidia com o centro da parede, no lado oposto ao que o ensaio de choque térmico havia sido realizado. O ensaio foi realizado em apenas um corpo de prova por amostra. Para fixar a mão francesa na parede foram utilizados dois parafusos sextavados zincados com rosca soberba (5/16" x 80mm) e buchas da marca Fischer. Detalhes da fixação da mão francesa podem ser observados na Figura 84.

**Figura 84 - Detalhes da fixação da mão francesa**

Fonte: Autor (2023).

Na extremidade frontal da mão francesa foram adicionados relógios comparadores com resolução de 0,01 mm, para medir a movimentação no sentido vertical da mão francesa, conforme são aplicados os pesos. A posição dos relógios comparadores utilizados é representada pelas flechas azuis na Figura 85. Para medir a movimentação horizontal da mão francesa em relação à superfície do sistema de vedação, foi utilizada a vareta de profundidade de um paquímetro com resolução de 0,01 mm. Nessa medida a parte traseira do paquímetro foi apoiada sobre a mão francesa, nas regiões indicadas pelas flechas verdes na Figura 85, e sua vareta foi movimentada até entrar em contato com a superfície do sistema de vedação, obtendo a medida da distância.

**Figura 85 - Locais de medição na mão francesa**

Fonte: Autor (2023).

Par registrar a movimentação do sistema de vedação foi posicionado no lado oposto da parede, na região central, relógio comparador com resolução de 0,01 mm para registrar as deformações horizontais da parede, de maneira semelhante ao mostrado na Figura 83-b.

A aplicação dos pesos foi realizada através de um suporte localizado no centro da mão francesa, em patamares de 50 N. Entre cada patamar de adição de carga foi aguardado um intervalo de 3 minutos para aplicação do próximo. Após esse tempo cada uma das medidas de deslocamento foi registrada, antes de adicionar o novo carregamento. A carga máxima aplicada foi de, aproximadamente 0,8 kN, que permaneceu aplicada por um intervalo de 24 horas. Decorrido esse tempo, os deslocamentos do sistema de vedação vertical e da mão francesa foram anotados. A aplicação dos carregamentos na mão francesa pode ser visualizada na Figura 86.

**Figura 86 - Ensaio de peças suspensas**



Fonte: Autor (2023).

### **3.6.3 Ensaio de impacto de corpo duro**

Para verificar a resistência dos sistemas de vedação vertical a impactos de corpo duro, foi realizado o ensaio com base no anexo B da ABNT NBR 15575-4 (2021). Esse ensaio consiste em aplicar impactos na superfície do sistema de vedação vertical, com a utilização de esferas de aço, liberada de certa altura sob efeito de pêndulo, permitindo avaliar o efeito que diferentes energias de impacto provocam no sistema. A alteração da energia do impacto pode ser feita pela mudança da massa da esfera utilizada, ou da altura de queda da esfera.

Para os ensaios realizados nessa pesquisa as características das esferas utilizadas e as energias de impacto podem ser observadas no Quadro 13.

**Quadro 13 - Energias utilizadas no ensaio de impacto de corpo duro**

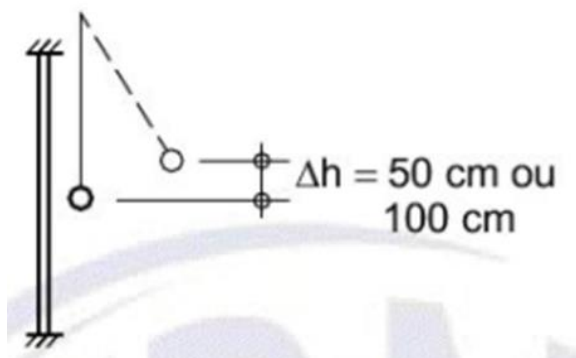
<b>Corpo percussor de impacto</b>	<b>Massa da esfera (kg)</b>	<b>Altura de queda (m)</b>	<b>Energia de impacto (J)</b>
10 impactos de esfera de aço pequena	0,5	0,75	3,75
10 impactos de esfera de aço grande	1,0	2,00	20,0

Fonte: Adaptado de NBR 15575-4 (2021), p. 43.

Para esses ensaios foram realizados 10 impactos sobre a superfície de um corpo de prova para cada energia. No lado da parede que é oposto ao dos impactos, foi posicionado um paquímetro para medir as deformações instantâneas registradas na região central da parede após cada impacto (Figura 87-b).

O esquema de realização do ensaio de impacto de corpo duro pode ser observado na Figura 87-a.

**Figura 87 - Esquema de ensaio de impacto de corpo duro**



a)

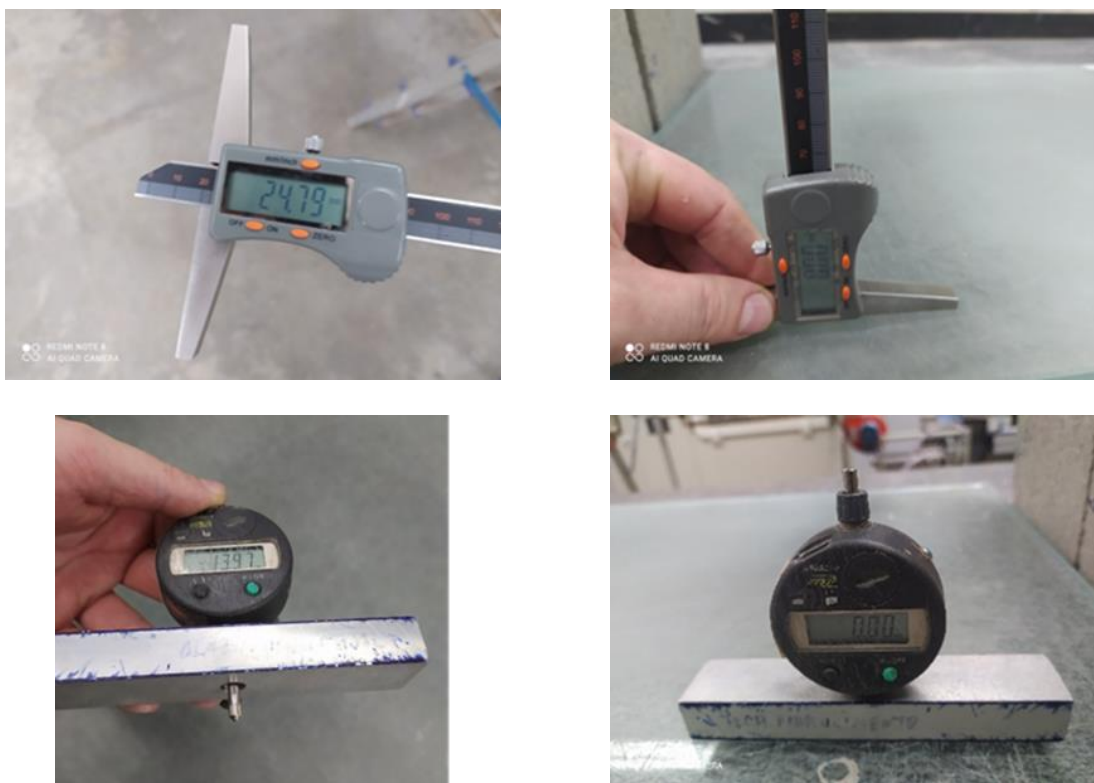


b)

Fonte: a) NBR 11675 (2016), p. 4; b) Autor (2023).

Os danos gerados pelos impactos na superfície foram anotados, sendo o diâmetro das moças medido com um paquímetro e sua profundidade com um relógio comparador e, também, com um paquímetro de profundidade. Antes de medir a profundidade das moças o relógio comparador e o paquímetro de profundidade foram zerados sobre uma superfície nivelada, como pode ser observado na Figura 88. Dessa forma, ao posicionar os instrumentos sobre a moça torna-se possível medir sua profundidade.



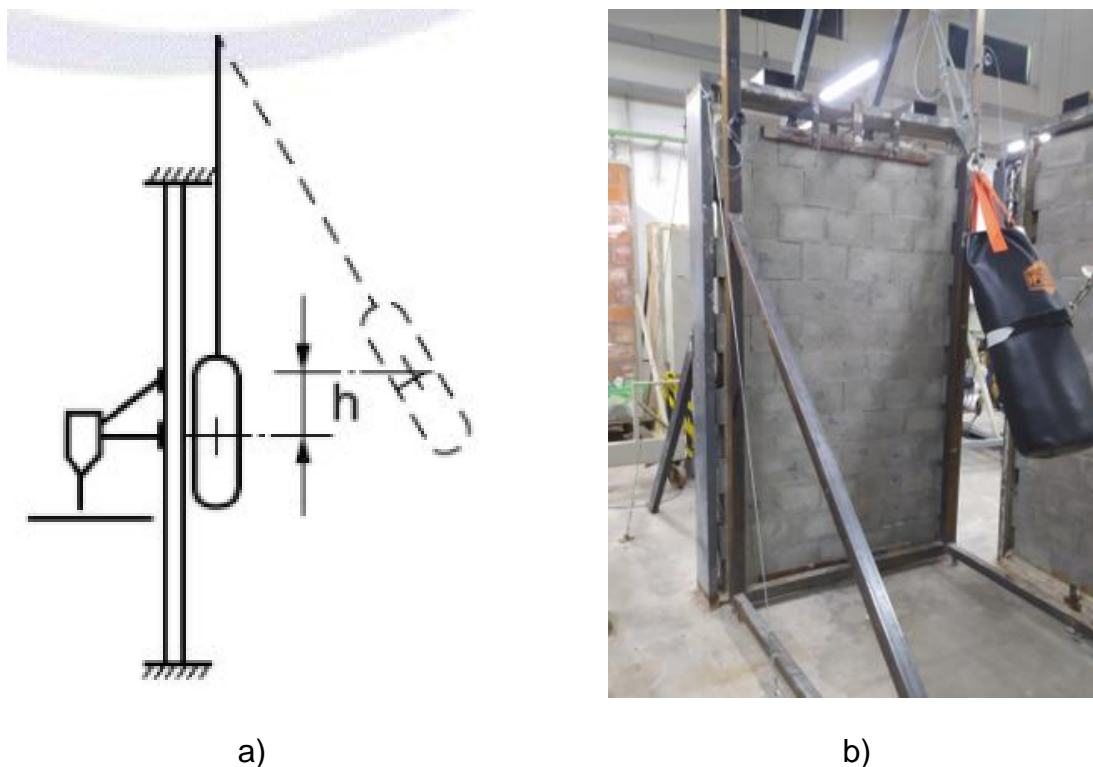
**Figura 88 - Equipamentos utilizados para medir profundidade das mossas**

Fonte: Autor (2023).

#### **3.6.4 Ensaio de impacto de corpo mole**

Os ensaios de impacto de corpo mole foram realizados em um corpo de prova para cada combinação de tipo de bloco e composto polimérico. O ensaio consiste em aplicar uma série de impactos com a utilização de um saco com, aproximadamente, 40 kg de massa sobre a superfície do sistema de vedação vertical. O saco é fixado em uma estrutura separada com cabos de aço, que permitem a aplicação dos impactos pelo efeito pêndulo contra os corpos de prova.

Os impactos foram aplicados na região central da parede, buscando que o centro de massa do saco coincida com o centro da parede. Em cada ensaio uma série de impactos foram aplicados sobre a parede, em ordem crescente de energia. Como a massa do saco não é alterada, o aumento de energia ocorre pelo aumento da altura de lançamento do saco. O esquema de realização dos ensaios pode ser observado na Figura 89-a. Uma imagem da estrutura utilizada para aplicar os impactos pode ser observada na Figura 89-b.

**Figura 89 - Esquema de ensaio e estrutura para impactos**

Fonte: Autor (2023).

No centro da parede, no lado oposto ao impacto, foram registradas as deformações instantâneas com a utilização de um paquímetro e residuais com a utilização de um relógio comparador. Ambos com resolução de 0,01 mm. Após a realização dos impactos as paredes foram inspecionadas e, após 5 minutos, os valores residuais de deslocamento foram registrados.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nesta pesquisa serão apresentados neste capítulo. Para facilitar a compreensão dos resultados, as informações deste capítulo foram divididas em 6 subitens principais, referentes a cada uma das etapas do programa experimental. Esses subitens são mostrados abaixo:

- Resultados da primeira etapa - Caracterização dos materiais;
- Resultados da segunda etapa - Estudo preliminar do assentamento;
- Resultados da terceira etapa – Estudo do comportamento à compressão;
- Resultados da quarta etapa – Estudo do comportamento à flexão;
- Resultados da quinta etapa – Estudo do cisalhamento e isotropia;
- Resultados da sexta etapa – Estudo do desempenho.

Os resultados das diferentes etapas definidas para essa pesquisa serão discutidos com maiores detalhes em sequência.

### 4.1 RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para realização desta pesquisa foram utilizados 3 tipos de blocos de concreto e 2 tipos de compostos poliméricos. Os resultados dos ensaios de caracterização desses materiais serão apresentados a seguir.

#### 4.1.1 *BLOCOS DE CONCRETO*

Nesta pesquisa foram utilizados 3 tipos de blocos de concreto com dimensões nominais de 140x190x290 mm, provenientes de mesmo fabricante. A diferença entre cada tipo de bloco é sua resistência à compressão. Dessa forma, para diferenciar cada tipo de bloco utilizado foi adotada a nomenclatura B4, B10 e B20, sendo a letra “B” indicativa de bloco e o número na sequência é um valor aproximado da resistência característica à compressão da amostra.

### 4.1.1.1 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão obtidos para as 3 amostras de blocos podem ser observados no Quadro 14, Quadro 15 e Quadro 16, respectivamente, para os blocos B4, B10 e B20.

**Quadro 14 - Resistência à compressão dos blocos tipo B4**

CP	Carga máxima (N)	Área bruta (mm <sup>2</sup> )	Resistência à compressão (MPa)
1	184561	40310	4,6
2	199369	40600	4,9
3	210647	40310	5,2
4	185346	40310	4,6
5	203684	40600	5,0
6	176422	40310	4,4
<b>Média</b>	193338	40407	4,8
<b>D. Pad.</b>	13191	149,76	0,30
<b>CV (%)</b>	6,82	0,37	6,26

Fonte: Autor (2023).

**Quadro 15 - Resistência à compressão dos blocos tipo B10**

CP	Carga máxima (N)	Área bruta (mm <sup>2</sup> )	Resistência à compressão (MPa)
1	516418	40310	12,8
2	536031	40600	13,2
3	613504	40310	15,2
4	502100	40310	12,5
5	443163	40310	11,0
6	460716	40032	11,5
<b>Média</b>	511989	40312	12,7
<b>D. Pad.</b>	60608	179,64	1,48
<b>CV (%)</b>	11,84	0,45	11,62

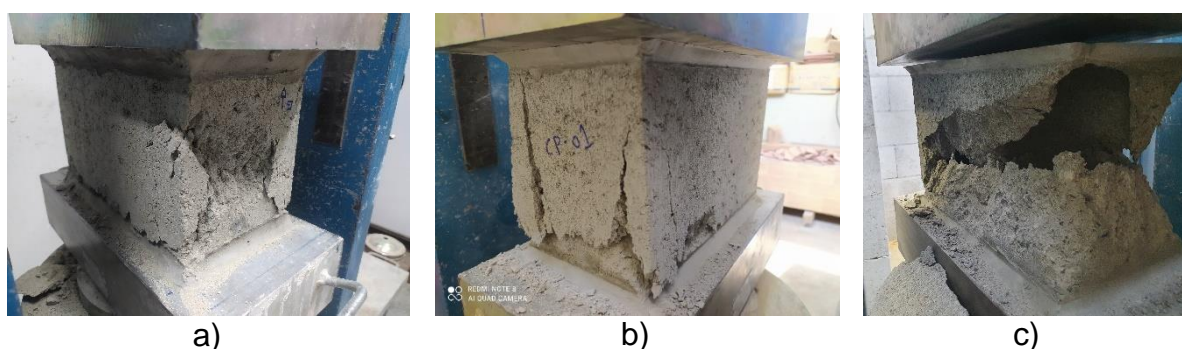
Fonte: Autor (2023).

**Quadro 16 - Resistência à compressão dos blocos tipo B20**

CP	Carga máxima (N)	Área bruta (mm <sup>2</sup> )	Resistência à compressão (MPa)
1	921041	40310	22,8
2	899956	40310	22,3
3	890640	40310	22,1
4	883971	40310	21,9
5	927709	40310	23,0
6	850335	40310	21,1
<b>Média</b>	895609	40310	22,2
<b>D. Pad.</b>	27950	0,00	0,68
<b>CV (%)</b>	3,12	0,00	3,07

Fonte: Autor (2023).

Exemplos das rupturas observadas para os blocos podem ser observados na Figura 90-a, a Figura 90-b e a Figura 90-c, respectivamente, para os blocos tipo B4, B10 e B20.

**Figura 90 - Exemplos da forma de ruptura**

Fonte: Autor (2023).

A ruptura observada para os blocos tipo B4, B10 e B20 apresentou formato semelhante a um cone, que é comumente observado para corpos de prova confinados nas extremidades. A ruptura para os blocos tipo B10 e B20 costumou ocorrer de maneira súbita e explosiva. Para o caso do bloco tipo B4 a ruptura ocorreu de maneira mais lenta, com a formação de fissuras.

A resistência característica do bloco tipo B4 foi de 4,4 MPa, a resistência característica do bloco tipo B10 foi de 10,0 MPa e a resistência característica do bloco tipo B20 foi de 20,9 MPa.

### 4.1.1.2 Análise dimensional

Os resultados dos ensaios de análise dimensional para determinação do comprimento, altura, largura e área bruta dos blocos são apresentados no Quadro 17, Quadro 18 e Quadro 19, respectivamente, para os blocos tipo B4, B10 e B20.

**Quadro 17 - Dimensões dos blocos tipo B4**

CP	Largura (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Área Bruta (mm <sup>2</sup> )
1	139	188	290	40310
2	139	188	290	40310
3	139	188	290	40310
4	139	189	290	40310
5	139	188	290	40310
6	139	189	291	40449
<b>Média</b>	139	188	290	40333
<b>D. Pad.</b>	0,00	0,52	0,41	56,75
<b>CV (%)</b>	0,00	0,27	0,14	0,14

Fonte: Autor (2023).

**Quadro 18 - Dimensões dos blocos tipo B10**

CP	Largura (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Área Bruta (mm <sup>2</sup> )
1	139	189	290	40310
2	139	191	290	40310
3	139	190	290	40310
4	140	189	291	40740
5	139	191	291	40449
6	139	190	291	40449
<b>Média</b>	139	190	291	40428
<b>D. Pad.</b>	0,41	0,89	0,55	167,33
<b>CV (%)</b>	0,29	0,47	0,19	0,41

Fonte: Autor (2023).

**Quadro 19 - Dimensões dos blocos do tipo B20**

CP	Largura (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Área Bruta (mm <sup>2</sup> )
1	139	188	290	40310
2	139	189	290	40310
3	139	188	290	40310
4	139	189	290	40310
5	139	190	290	40310
6	139	187	290	40310
<b>Média</b>	139	189	290	40310
<b>D. Pad.</b>	0,00	1,05	0,00	0,00
<b>CV (%)</b>	0,00	0,56	0,00	0,00

Fonte: Autor (2023).

A tolerância da NBR 6136 (ABNT, 2016) para a variação da largura de blocos com essas dimensões nominais é de 138 a 142 mm, para a altura é de 187 a 193 mm e, para o comprimento é de 287 a 293 mm. Como pode ser observado no Quadro 17, Quadro 18 e Quadro 19, todos os blocos estão dentro da variação permitida.

Os resultados dos ensaios de análise dimensional para determinação da espessura mínima das paredes dos blocos são apresentados no Quadro 20, Quadro 21 e Quadro 22, respectivamente, para os blocos tipo B4, B10 e B20.

**Quadro 20 – Espessura mínima das paredes dos blocos tipo B4**

CP	Paredes longitudinais	Paredes transversais	
	Espessura mínima média (mm)	Espessura equivalente mínima (mm)	Espessura mínima média (mm)
1	26	260	25
2	26	263	25
3	26	266	26
4	26	259	25
5	26	264	25
6	26	266	26
<b>Média</b>	26	263	25
<b>D. Pad.</b>	0,00	2,97	0,52
<b>CV (%)</b>	0,00	1,13	2,04

Fonte: Autor (2023).

**Quadro 21 – Espessura mínima das paredes dos blocos tipo B10**

CP	Paredes longitudinais	Paredes transversais	
	Espessura mínima média (mm)	Espessura equivalente mínima (mm)	Espessura mínima média (mm)
1	26	263	25
2	26	260	25
3	26	261	25
4	25	265	26
5	25	262	25
6	26	264	26
<b>Média</b>	26	263	25
<b>D. Pad.</b>	0,52	1,87	0,52
<b>CV (%)</b>	2,01	0,71	2,04

Fonte: Autor (2023).

**Quadro 22 – Espessura mínima das paredes dos blocos tipo B20**

CP	Paredes longitudinais	Paredes transversais	
	Espessura mínima média (mm)	Espessura equivalente mínima (mm)	Espessura mínima média (mm)
1	25	265	26
2	25	262	25
3	25	262	25
4	25	263	25
5	25	266	26
6	25	266	26
<b>Média</b>	25	264	26
<b>D. Pad.</b>	0,00	1,90	0,55
<b>CV (%)</b>	0,00	0,72	2,15

Fonte: Autor (2023).

A NBR 6136 (ABNT, 2016) estabelece que, para os blocos utilizados nessa pesquisa, a tolerância para espessura mínima das paredes deve ser de 24 mm e a tolerância para a espessura equivalente deve ser de 188 mm/m. Como pode ser observado nos Quadro 20, Quadro 21 e Quadro 22 os valores determinados para os blocos foram superiores aos mínimos indicados.

Os resultados dos ensaios de análise dimensional para determinação da dimensão dos furos dos blocos na direção longitudinal e transversal dos blocos são apresentados no Quadro 23, Quadro 24 e Quadro 25, respectivamente, para os blocos tipo B4, B10 e B20.

**Quadro 23 – Dimensões dos furos dos blocos tipo B4**

CP	Direção longitudinal		Direção transversal	
	DL1 (mm)	DL2 (mm)	DT1 (mm)	DT2 (mm)
1	96,78	97,33	77,31	77,59
2	97,04	97,67	78,13	78,14
3	97,04	97,41	78,51	77,92
4	98,00	97,72	77,47	78,08
5	97,40	97,44	78,06	78,11
6	97,65	96,51	78,95	78,29
<b>Média</b>	97	97	78	78
<b>D. Pad.</b>	0,45	0,44	0,62	0,24
<b>CV (%)</b>	0,47	0,45	0,79	0,31

Fonte: Autor (2023).

**Quadro 24 – Dimensões dos furos dos blocos tipo B10**

CP	Direção longitudinal		Direção transversal	
	DL1 (mm)	DL2 (mm)	DT1 (mm)	DT2 (mm)
1	97,13	98,08	79,01	77,6
2	97,10	98,12	79,03	78,13
3	97,47	97,10	78,26	78,83
4	96,51	96,19	79,55	79,36
5	97,00	97,36	79,02	78,38
6	96,94	97,52	78,7	79,02
<b>Média</b>	97	97	79	79
<b>D. Pad.</b>	0,31	0,71	0,43	0,64
<b>CV (%)</b>	0,32	0,73	0,54	0,82

Fonte: Autor (2023).

**Quadro 25 – Dimensões dos furos dos blocos tipo B20**

CP	Direção longitudinal		Direção transversal	
	DL1 (mm)	DL2 (mm)	DT1 (mm)	DT2 (mm)
1	98,57	98,77	78,47	79,44
2	99,09	99,22	78,69	78,43
3	98,30	99,01	78,52	78,99
4	99,28	98,99	78,39	79,01
5	97,56	98,36	78,21	78,12
6	98,19	98,63	78,23	79,04
<b>Média</b>	98	99	78	79
<b>D. Pad.</b>	0,63	0,31	0,18	0,48
<b>CV (%)</b>	0,64	0,31	0,23	0,61

Fonte: Autor (2023).

A NBR 6136 (ABNT, 2016) estabelece que a menor dimensão dos furos deve ser maior ou igual a 70 mm. Como pode ser observado no Quadro 23, Quadro 24 e Quadro 25 todos os blocos estão acima desse valor.

### 4.1.1.3 Absorção de água e área líquida

Os resultados dos ensaios de absorção de água e área líquida realizados conforme a NBR 12118 (ABNT, 2013), para cada uma das amostras podem ser observados nos Quadros 26, Quadro 27 e Quadro 28, respectivamente, para os blocos B4, B10 e B20.

**Quadro 26 – Massa seca e absorção de B4**

CP	Massa seca (g)	Absorção (%)
1	9883	6,09
2	9668	6,95
3	9790	6,18
<b>Média</b>	9780,33	6,41
<b>D. Pad.</b>	107,83	0,47
<b>CV (%)</b>	1,10	7,33

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 26, o bloco B4 apresentou valores individuais de absorção inferiores a 10,0 % e, valores de absorção média inferior a 9,0 %. Portanto, B4 atende aos requisitos previstos na norma NBR 6136 (ABNT, 2016) para blocos com função estrutural da classe B ( $4,0 \text{ MPa} \leq f_{bk} < 8,0 \text{ MPa}$ ).



**Quadro 27 – Massa seca e Absorção de B10**

CP	Massa seca (g)	Absorção (%)
1	9917	5,62
2	9642	5,74
3	9902	5,73
<b>Média</b>	9820,33	5,70
<b>D. Pad.</b>	154,62	0,07
<b>CV (%)</b>	1,57	1,23

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 27, o bloco B10 apresentou valores individuais de absorção inferiores a 9,0 % e, valores de absorção média inferior a 8,0 %. Portanto, B10 atende aos requisitos previstos na norma NBR 6136 (ABNT, 2016) para blocos com função estrutural da classe A ( $f_{bk} \geq 8,0$  MPa).

**Quadro 28 – Massa seca e absorção de B20**

CP	Massa seca (g)	Absorção (%)
1	9981	5,18
2	10176	4,87
3	10375	4,69
<b>Média</b>	10177,33	4,91
<b>D. Pad.</b>	197,00	0,25
<b>CV (%)</b>	1,94	5,09

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 28, o bloco B20 apresentou valores individuais de absorção inferiores a 9,0 % e, valores de absorção média inferior a 8,0 %. Portanto, B20 atende aos requisitos previstos na norma NBR 6136 (ABNT, 2016) para blocos com função estrutural da classe A ( $f_{bk} \geq 8,0$  MPa).

A relação determinada entre a área líquida e área bruta obtida para o bloco tipo B4 pode ser observada no Quadro 29.

**Quadro 29 – Relação entre a área líquida e área bruta de B4**

CP	A <sub>B</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>L</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>L</sub> /A <sub>B</sub>
1	40351	23495	0,582
2	40403	23824	0,590
3	40435	23958	0,593
<b>Média</b>	40396	23759	0,588
<b>D. Pad.</b>	42,39	238,25	0,01
<b>CV (%)</b>	0,10	1,00	1,70

Fonte: Autor (2023). Legenda: A<sub>B</sub>: Área bruta; A<sub>L</sub>: Área líquida.

A relação determinada entre a área líquida e área bruta obtida para o bloco tipo B10 pode ser observada no Quadro 30.

**Quadro 30 – Relação entre área líquida e área bruta de B10**

CP	A <sub>B</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>L</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>L</sub> /A <sub>B</sub>
1	40445	23495	0,581
2	40595	23432	0,577
3	40475	23201	0,573
<b>Média</b>	40505	23376	0,577
<b>D. Pad.</b>	79,37	154,79	0,00
<b>CV (%)</b>	0,20	0,66	0,00

Fonte: Autor (2023). Legenda: A<sub>B</sub>: Área bruta; A<sub>L</sub>: Área líquida.

A relação determinada entre a área líquida e área bruta obtida para o bloco tipo B20 pode ser observada no Quadro 31.

**Quadro 31 – Relação entre área líquida e área bruta de B20**

CP	A <sub>B</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>L</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>L</sub> /A <sub>B</sub>
1	40413	23458	0,580
2	40298	23291	0,578
3	40453	23411	0,579
<b>Média</b>	40388	23387	0,579
<b>D. Pad.</b>	80,47	86,12	0,00
<b>CV (%)</b>	0,20	0,37	0,00

Fonte: Autor (2023). Legenda: A<sub>B</sub>: Área bruta; A<sub>L</sub>: Área líquida.

### 4.1.1.4 Tração indireta dos blocos

Os resultados dos ensaios de tração indireta podem ser observados nos Quadro 32, Quadro 33 e Quadro 34, respectivamente, para os blocos B4, B10 e B20.

**Quadro 32 – Tração indireta do bloco B4**

CP	Carga máxima (kN)	Resistência à tração indireta (MPa)	
		Área bruta	Área Líquida
1	6,42	0,16	0,39
2	6,93	0,17	0,42
3	6,04	0,15	0,36
4	7,02	0,17	0,43
5	5,98	0,15	0,36
6	6,83	0,16	0,41
<b>Média</b>	6,54	0,16	0,39
<b>D. Pad.</b>	0,46	0,01	0,03
<b>CV (%)</b>	7,00	7,54	7,27

Fonte: Autor (2023).

**Quadro 33 – Tração indireta do bloco B10**

CP	Carga máxima (kN)	Resistência à tração indireta (MPa)	
		Área bruta	Área Líquida
1	20,71	0,50	1,24
2	18,52	0,45	1,12
3	20,39	0,49	1,24
4	18,65	0,45	1,13
5	23,28	0,56	1,42
6	19,09	0,46	1,16
<b>Média</b>	20,11	0,48	1,22
<b>D. Pad.</b>	1,80	0,04	0,11
<b>CV (%)</b>	8,94	9,12	9,12

Fonte: Autor (2023).

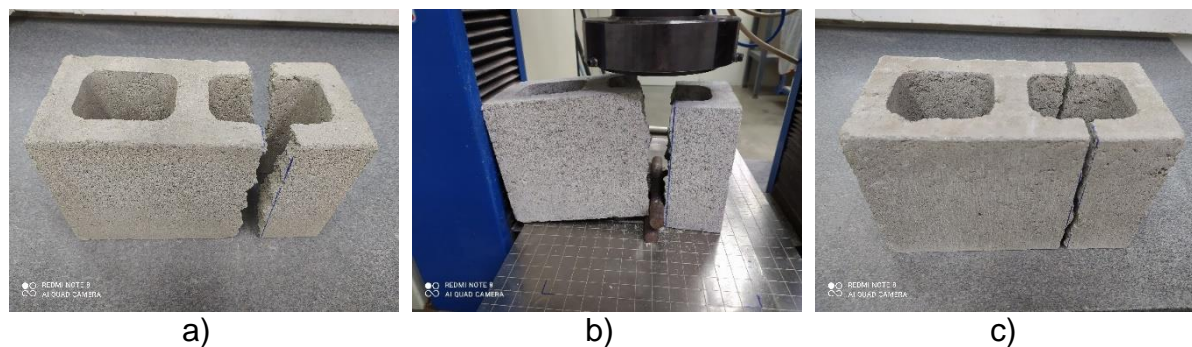
Quadro 34 – Tração indireta do bloco B20

CP	Carga máxima (kN)	Resistência à tração indireta (MPa)	
		Área bruta	Área Líquida
1	37,01	0,89	2,23
2	29,76	0,73	1,80
3	27,78	0,68	1,71
4	36,26	0,88	2,21
5	33,80	0,82	2,05
6	36,55	0,89	2,23
<b>Média</b>	33,53	0,81	2,04
<b>D. Pad.</b>	3,90	0,09	0,23
<b>CV (%)</b>	11,63	11,32	11,36

Fonte: Autor (2023).

A forma de ruptura observada no ensaio de tração indireta pode ser visualizada na Figura 91-a, Figura 91-b e Figura 91-c, respectivamente, para os blocos tipo B4, B10 e B20. Para as três amostras foi observada a formação de uma fissura vertical como forma de ruptura.

Figura 91 - Forma de ruptura observada no ensaio de tração indireta



Fonte: Autor (2023).

A relação entre a resistência à tração indireta na área líquida e resistência à compressão dos blocos foi de aproximadamente 8,1% para B4, 9,6% para B10 e 9,2% para B20. Foi considerada a área líquida nessa comparação, pois a norma C1006-19 (ASTM, 2019) sugere na sua equação, que seja desconsiderada a presença dos vazios do bloco no cálculo da tração indireta.

De acordo com Parsekian et al. (2012) a tração indireta do bloco de concreto resulta em uma resistência entre 8% a 16% da sua resistência à compressão. A relação obtida entre

tração e compressão dos blocos da pesquisa está próxima aos valores indicados pelos autores.

### 4.1.1.5 Módulo de elasticidade

Os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade podem ser observados no Quadro 35, para cada tipo de bloco de concreto.

**Quadro 35 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade**

CP	Módulo de elasticidade (GPa)					
	Área Bruta			Área Líquida		
	B4	B10	B20	B4	B10	B20
1	11,91*	10,87	23,02	20,26*	18,84	39,76
2	6,47	13,15	18,83	11,00	22,79	32,52
3	4,41	9,10	44,30*	7,50	15,77	76,51*
4	4,43	14,00	24,36	7,53	24,26	42,07
5	7,22	17,18	23,87	12,28	29,77	41,23
6	7,28	17,61	28,07	12,38	30,52	48,48
<b>Média</b>	5,96	13,65	23,63	11,83	23,66	46,76
<b>D. Pad.</b>	1,44	3,37	3,31	4,68	5,85	15,44
<b>CV (%)</b>	24,16	24,69	14,01	39,56	24,73	33,02

Fonte: Autor (2023). (\*) – valor descartado, pois foi considerado espúrio empregando o procedimento do item 7.1 da ASTM E 178 (2021), para um nível de significância de 10%.

Como pode ser observado no Quadro 35, o valor médio obtido para o módulo de elasticidade na área bruta foi, aproximadamente 1242, 1075 e 1064 vezes superiores à resistência média à compressão apresentada, respectivamente, pelos blocos tipo B4, B10 e B20.

## 4.1.1 COMPOSTOS POLIMÉRICOS

Os ensaios realizados para caracterização dos compostos poliméricos podem ser observados na sequência.

### 4.1.1.1 Propriedades no estado fresco

Para avaliar as propriedades do material em estado fresco foram realizados os ensaios para determinação do índice de consistência e da densidade de massa. Os resultados desses dois ensaios podem ser observados no Quadro 36, para os dois compostos poliméricos.

**Quadro 36 – Resultados dos ensaios de índice, de consistência e densidade de massa**

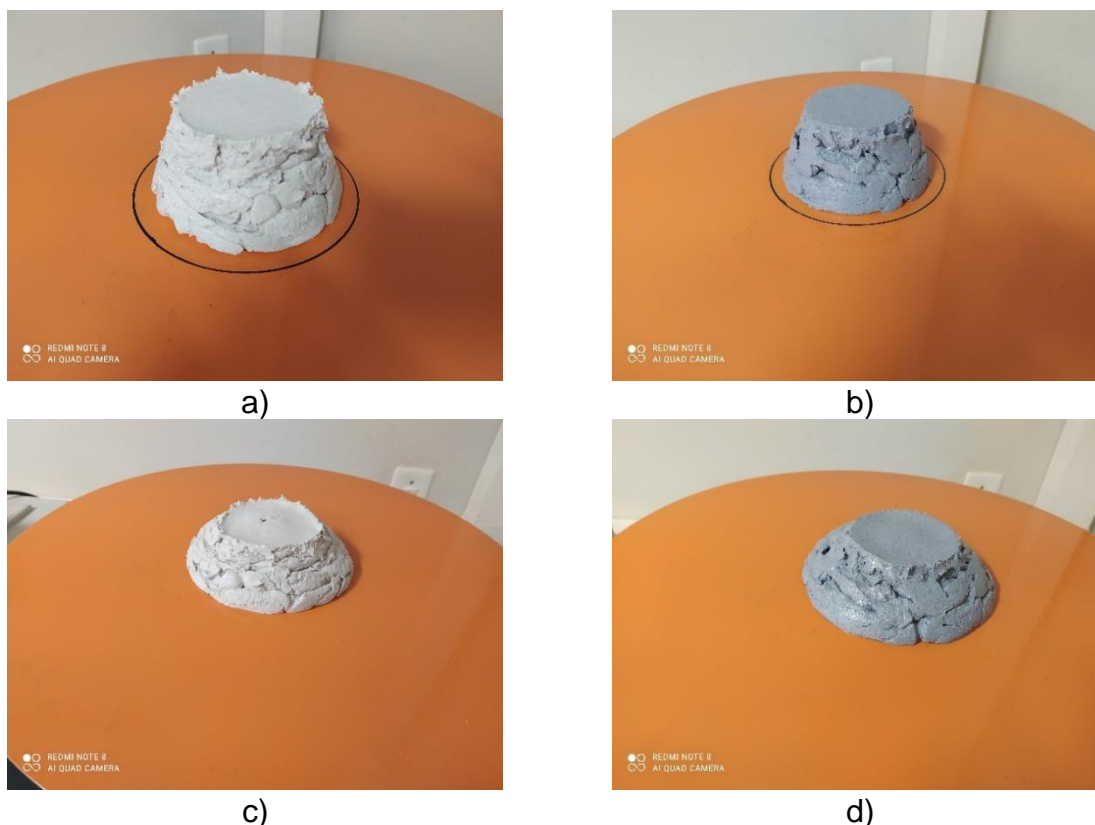
<b>COMPOSTO</b>	<b>Índice de consistência (mm)</b>	<b>Densidade de massa no estado fresco (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>CPA-01</b>	153,39	1844
<b>CPA-02a</b>	160,29	1709
<b>Diferença entre compostos</b>	6,90	135

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 36, o CPA-01 apresentou o índice de consistência 6,90 mm inferior ao CPA-02a, indicando que a trabalhabilidade do CPA-02a tende a ser um pouco maior, pois para uma mesma energia aplicada, o espalhamento mensurado foi maior. A densidade de massa no estado fresco de CPA-01 foi 135 kg/m<sup>3</sup> maior do que o CPA-02a, indicando maior densidade no estado fresco. Portanto, o CPA-02a possui menor densidade (mais leve) e maior índice de consistência (maior espalhamento).

Os valores de espalhamento observados nos ensaios foram inferiores aos obtidos por Paul Filho (2016). O autor obteve espalhamento superior a 180 mm para os 3 compostos poliméricos analisados.

A imagem do índice de consistência dos dois compostos poliméricos, antes e após a aplicação das 30 quedas na mesa para determinação do índice de consistência pode ser observada na Figura 92. As Figura 92-a e Figura 92-c apresentam o comportamento do CPA-01, respectivamente, antes e após as 30 quedas. As Figura 92-b e Figura 92-d apresenta o comportamento do CPA-02a, respectivamente, antes e após as 30 quedas.

**Figura 92 - Índice de consistência dos compostos**

Fonte: Autor (2023).

Se o índice de consistência desse tipo de material polimérico for comparado com o valor de índice de consistência recomendado para argamassa cimentícia convencional para assentamento e revestimento da NBR16541 (ABNT, 2016) que é de  $260 \pm 5$  mm, é possível perceber que o material polimérico apresenta espalhamento bem inferior.

Como pode ser observado na Figura 92, a utilização da energia de adensamento prevista para essa norma de ensaio pode não ser a mais indicada para esse tipo de material, haja visto que não ficou completamente lisa a superfície dos compostos poliméricos após a remoção do molde troncocônico. Como os valores de consistência após a aplicação das quedas produziram espalhamento pouco expressivo dos compostos, talvez seja interessante desenvolver estudos que avaliem a utilização de outros métodos na compreensão das propriedades em estado fresco dos compostos poliméricos.

Se os valores da densidade de massa obtidos para os compostos poliméricos fossem classificados utilizando os valores estabelecidos para argamassa de assentamento e fixação de alvenaria da NBR 13281-2 (ABNT, 2023), poderia ser verificado que o CPA-01 seria pertencente à classe DF3 ( $1800 \leq DF < 2000$  kg/m<sup>3</sup>) e CPA-02a seria pertencente à classe DF2 ( $1600 \leq DF < 1800$  kg/m<sup>3</sup>).

É possível que essa diferença apresentada nas propriedades em estado fresco dos compostos poliméricos dos dois fabricantes pode contribuir para maior facilidade ou dificuldade na aplicação do material na hora do assentamento. Na segunda etapa são apresentadas mais algumas informações observadas no assentamento dos compostos.

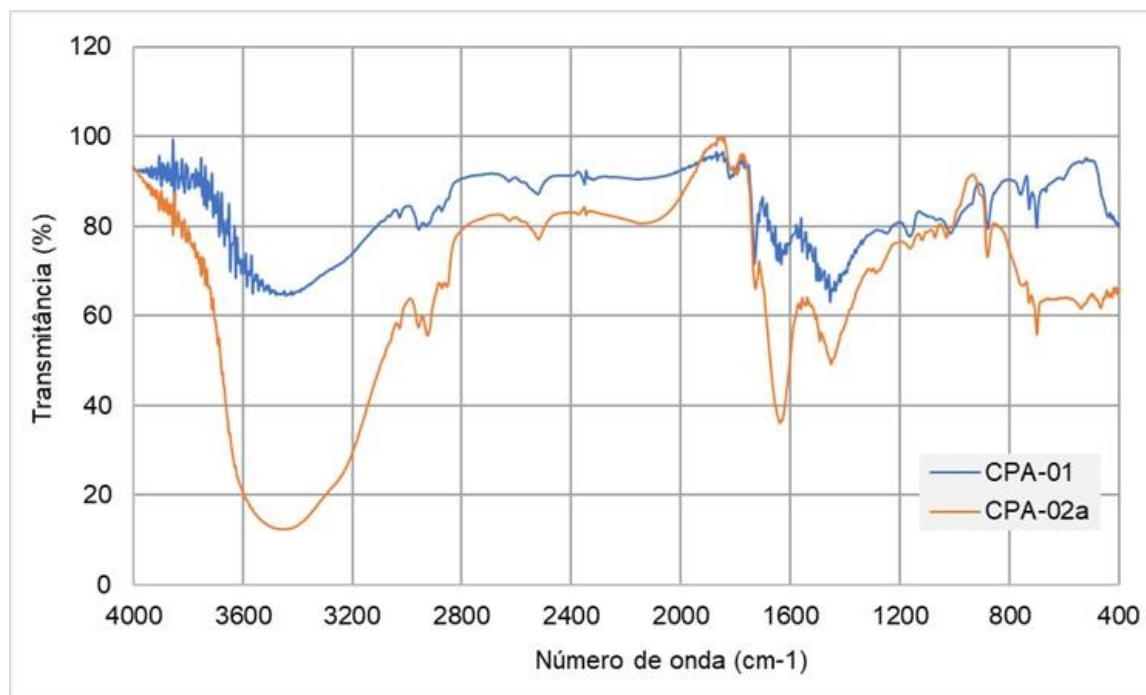
### 4.1.1.2 Caracterização das propriedades térmicas e químicas

Os resultados dos ensaios de Espectroscopia por absorção no infravermelho e de Análise Termogravimétrica realizados pelo Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM) da UFSCar nos dois compostos poliméricos podem ser observados a seguir.

#### 4.1.1.2.1 Resultados – Espectroscopia por absorção no infravermelho

O espectro de absorção no infravermelho obtido para os compostos CPA-01 e CPA-02a, em amostras retiradas diretamente da embalagem, em estado fresco, podem ser observados na Figura 93.

Figura 93 - Espectro de transmissão no infravermelho de CPA-01



Fonte: Adaptado de CCDM (2023a).



De acordo com CCDM (2023a), ao se comparar o espectro no infravermelho das duas amostras com espectros existentes no banco de dados (Hummel Polymer and Additives) de um Poliacrilato Estireno, a correlação foi superior a 54,51% para o CPA-01 e 54,12% para o CPA-02a. Ainda de acordo com CCDM (2023a), a grande quantidade de água nas amostras pode ter contribuído para reduzir a correlação, porém, analisando as absorções das duas amostras indicam similaridades entre as mesmas indicando que ambas têm como base um adesivo acrílico e são provavelmente compostas por um poliacrilato estireno.

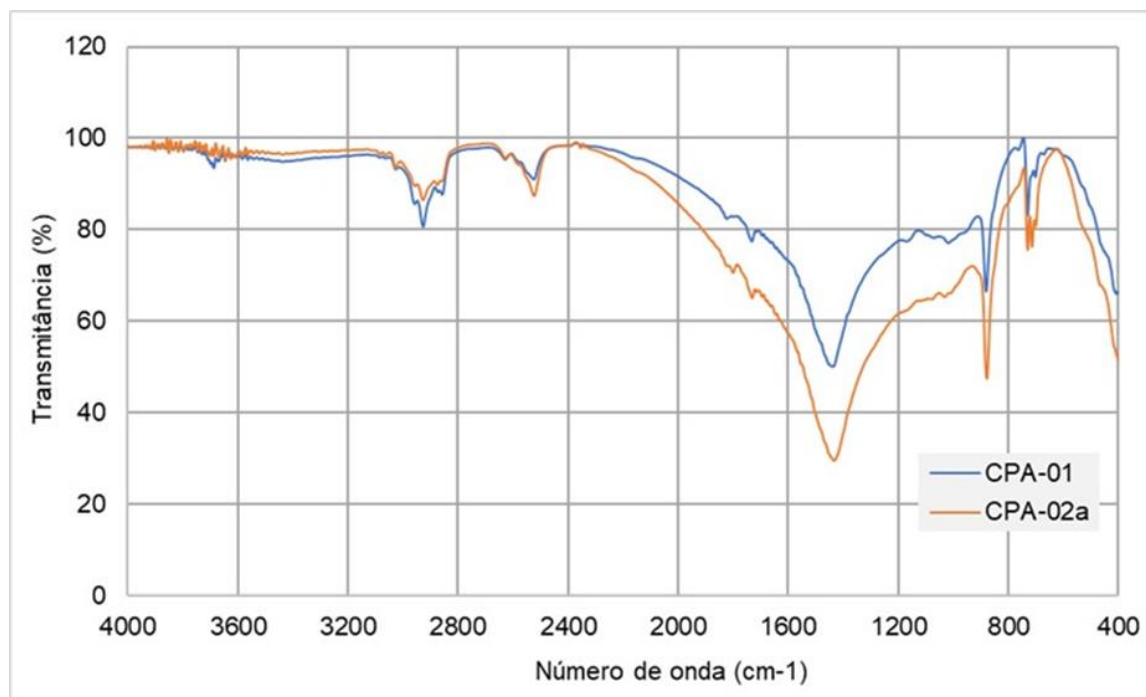
Os resultados obtidos pelas duas amostras de compostos poliméricos extraídas diretamente da embalagem indicam que o material é compatível com uma resina acrílica estirenada, atendendo ao requisito da NBR 16590-2 (ABNT, 2017).

O processo de preparação das amostras de composto polimérico para o ensaio de espectroscopia pode ser melhorado. A adoção, por parte da norma, de um procedimento padronizado para separar os compostos polimérico do restante do material contido na embalagem (agregados, adições minerais e água), pode contribuir para reduzir a variação nos resultados e aprimorar a comparação.

A definição de um padrão espectroscópico de referência por parte da norma NBR 16590-2 (ABNT, 2017) também pode permitir o aprimoramento na obtenção dos resultados, facilitando a tarefa de identificar os compostos poliméricos no ensaio de espectroscopia. Além disso, a adoção de um padrão espectroscópico de referência pode impedir que compostos poliméricos com composições distintas atendam ao requisito da norma, por terem utilizado padrões de materiais diferentes no momento da análise.

Além dos ensaios de espectroscopia realizados nas amostras extraídas diretamente das embalagens, em estado fresco, também foram realizados ensaios em amostras do material em estado endurecido, em corpos de prova remanescentes dos ensaios de resistência à compressão.

Os espectros de absorção no infravermelho obtidos para as amostras do composto CPA-01 e CPA-02a, em estado endurecido, podem ser observados na Figura 94.

**Figura 94 – Espectros de transmissão no infravermelho (endurecido)**

Fonte: CCDM (2023b) e CCDM (2023c).

Como pode ser observado na Figura 94, a semelhança entre os espectros de transmissão no infravermelho dos dois compostos poliméricos aparenta ser maior do que a apresentada pelas amostras extraídas diretamente da embalagem, em estado fresco, como pode ser observado na Figura 93. Provavelmente, a menor presença de água nas amostras em estado endurecido pode ter contribuído para uma menor variação nos resultados entre os dois compostos.

De acordo com as informações fornecidas por CCDM (2023b) e CCDM (2023c), ao ser buscado na base de dados do equipamento espectro semelhante aos obtidos nos ensaios, foram encontradas correlações de 72,4% e 69,2% com carbonato de cálcio, respectivamente, para o uso do composto CPA-01 e CPA-02a, em estado endurecido. Além disso, em função da intensidade da banda a  $1436\text{ cm}^{-1}$ , que corresponde a ligação Si-O, devido a presença de minerais misturados ao polímero, grande parte das informações utilizadas na caracterização dos polímeros foram encobertas.

Nesse sentido, para que seja possível realizar os ensaios de espectroscopia por absorção no infravermelho em amostras no estado endurecido, devem ser investigados métodos para separar a fração de polímero do restante dos materiais presentes no composto. Aparentemente, a filtragem empregada para as amostras em estado fresco foi benéfica, pois evitou a obtenção da interferência da fração mineral que encobriu parte das informações para as amostras ensaiadas em estado endurecido.

## 4.1.1.2.2 Resultados – Análise termogravimétrica

Os resultados desse ensaio são fornecidos através da curva que relaciona a perda de massa em função da temperatura, chamada de curva termogravimétrica (TG), e sua derivada em função da temperatura (DTG).

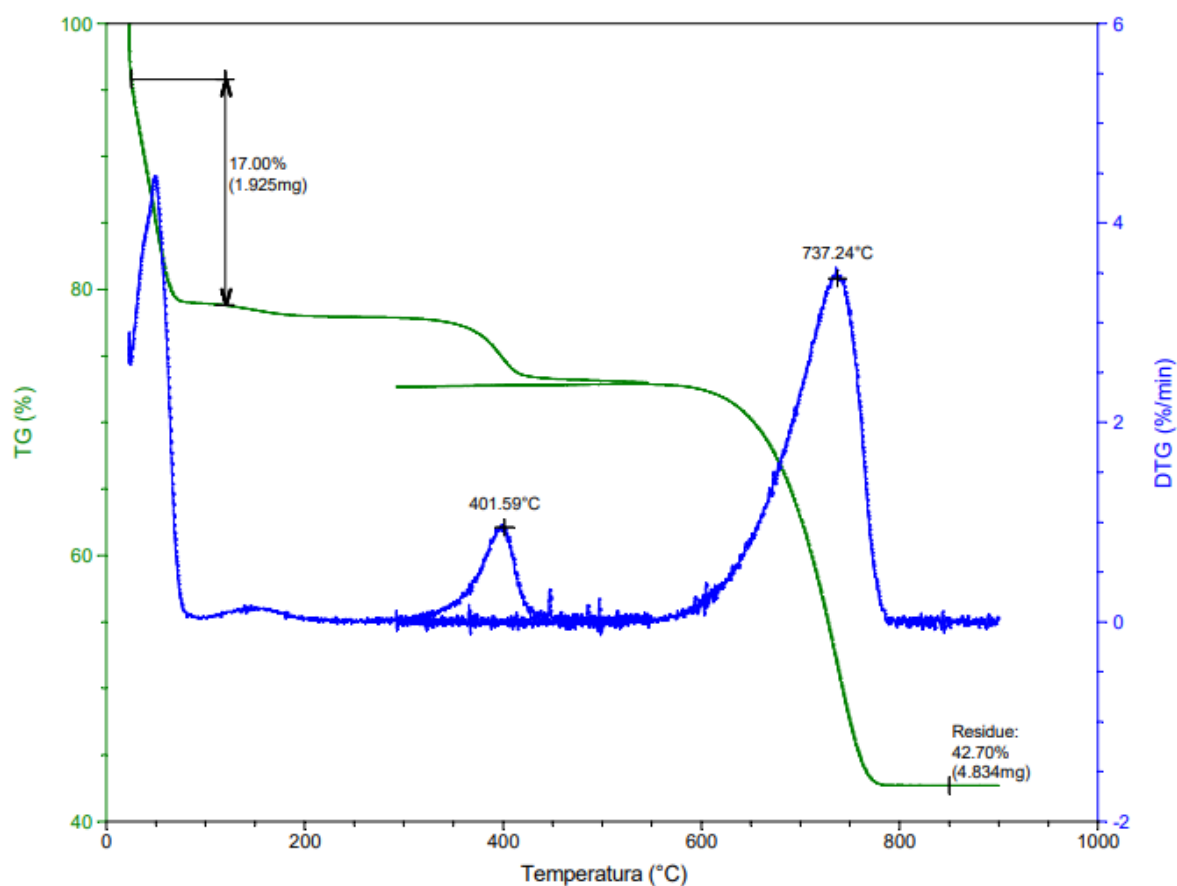
Os resultados dos ensaios de Análise termogravimétrica realizados para o composto CPA-01, em amostra extraída da embalagem, em estado fresco, podem ser observados na Figura 95.

**Figura 95 - Curva Termogravimétrica - CPA-01**

Fonte: CCDM (2023a).

Os resultados dos ensaios de Análise termogravimétrica realizados para o composto CPA-02a, em amostra extraída da embalagem, em estado fresco, podem ser observados na Figura 96.

**Figura 96 - Curva Termogravimétrica - CPA-02a**



Fonte: CCDM (2023a).

Segundo Stuart (2002) os picos formados na curva DTG, na região que separa (entre) os patamares identificados na curva TG, correspondem à taxa máxima de perda de massa observada na região.

A redução da massa observada no trecho inicial de aumento de temperatura, até o primeiro patamar formado na curva TG, corresponde em parte à saída da água presente nas amostras. Parte da redução de massa observada entre o primeiro e segundo patamar da curva TG corresponde ao processo de degradação dos polímeros presentes no material, haja visto que CCDM (2023d) identificou durante os incrementos de temperatura realizados no ensaio DSC, evidências da degradação dos polímeros em temperaturas próximas de 400°C.

Como foi identificado durante os ensaios de espectroscopia, realizados nas amostras em estado endurecido a presença de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), é possível que parte da redução de massa observada entre o segundo e o terceiro patamar das curvas TG seja decorrente de sua presença, uma vez que Stuart (2002) identificou que nas curvas da análise termogravimétrica a decomposição do carbonato de cálcio em CaO ocorre para temperaturas próximas a 800°C.

Os valores percentuais de perda de massa apresentados pelos dois compostos são demonstrados no Quadro 37, juntamente com os percentuais máximos apresentados pela norma NBR 16590-2 (ABNT, 2017).

**Quadro 37 - Comparação da perda de massa com valores normativos**

Intervalo de temperatura	Perda de massa (%)		Percentuais máximos da NBR 16590-2
	CPA-01	CPA-02a	
25 a 120° C	15,71	17,00	18
Temperatura	Resíduo (%)		Resíduo máximo NBR 16590 (%)
850° C	45,37	42,70	52

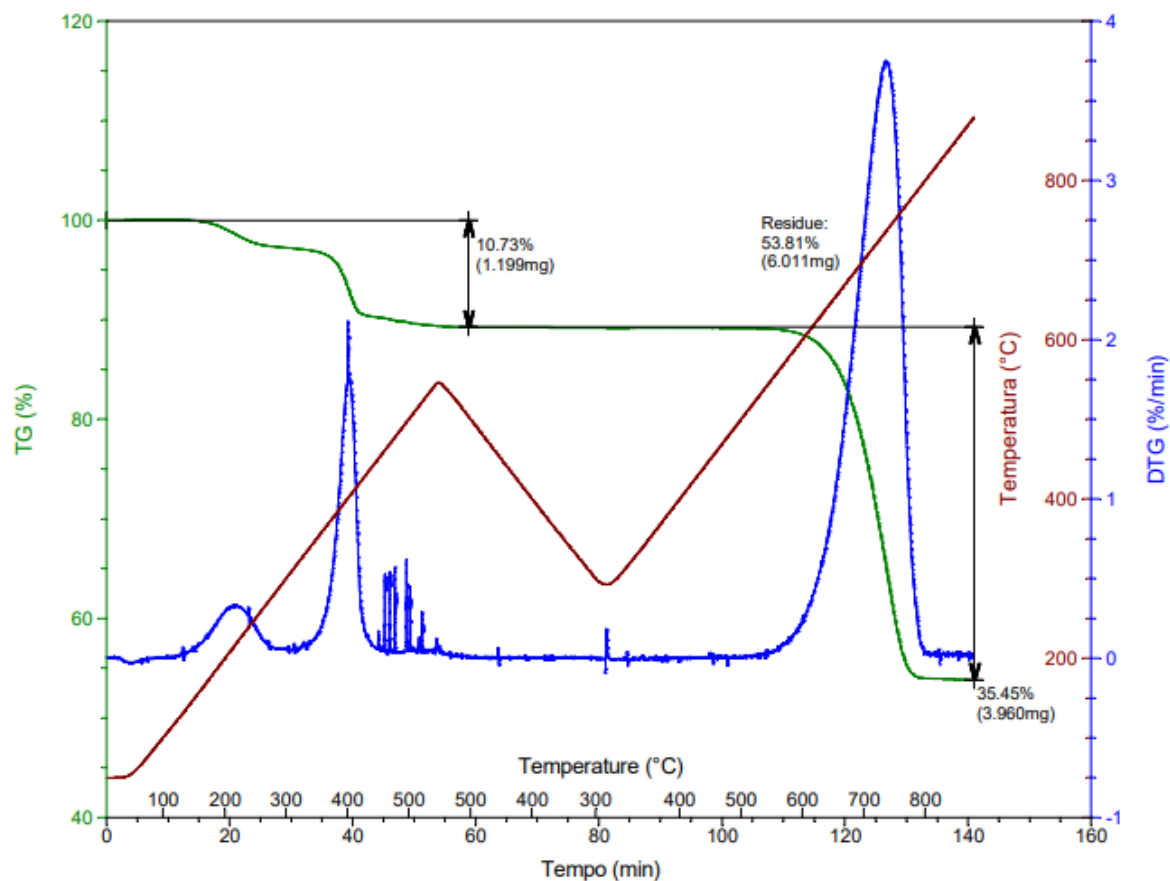
Fonte: Adaptado de CCDM (2023a).

Como pode ser observado no Quadro 37 os valores de perda de massa obtidos para os dois compostos estão abaixo dos limites definidos pela normativa NBR 16590-2 (ABNT, 2017).

Além dos ensaios realizados nos materiais obtidos diretamente das embalagens, também foi realizado o ensaio em amostras no estado endurecido, para permitir a comparação entre os resultados nessas duas condições.

Os resultados dos ensaios de Análise termogravimétrica realizados para o composto CPA-01, em estado endurecido, podem ser observados na Figura 97.

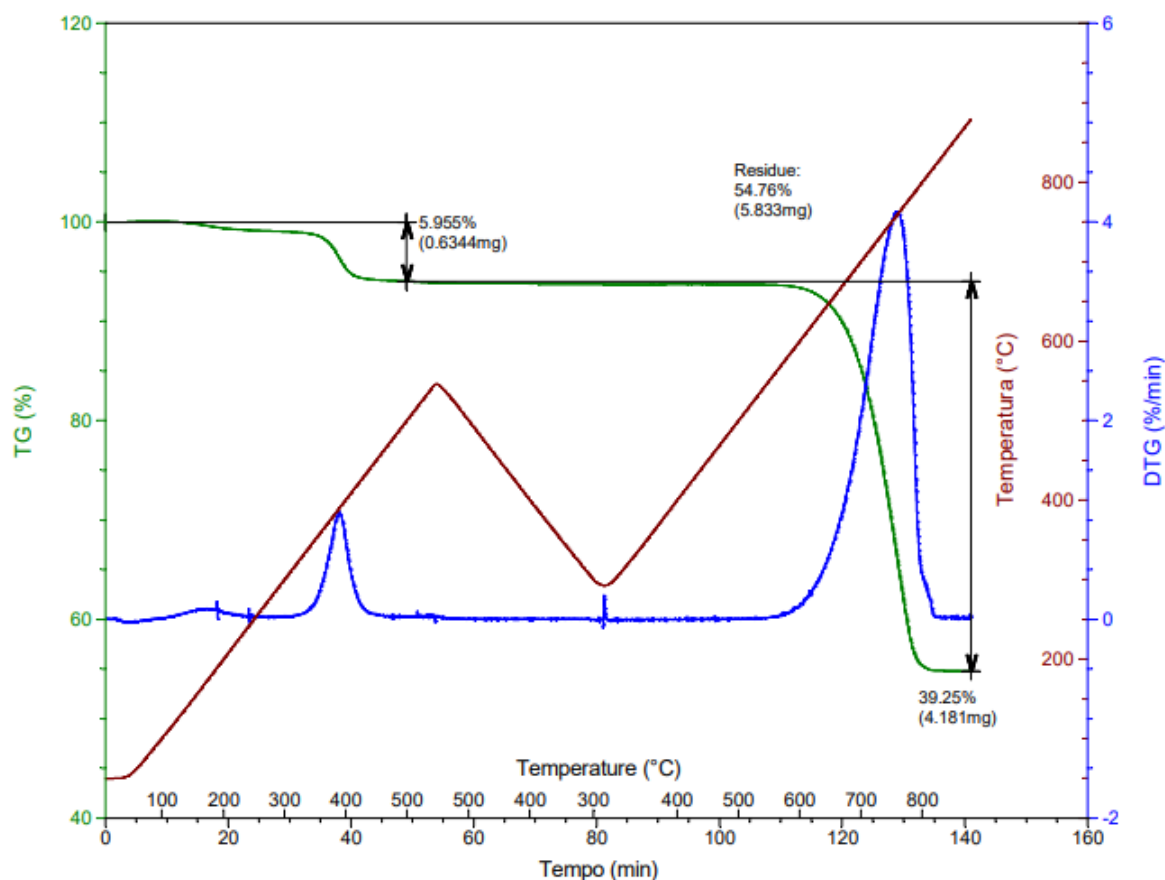
**Figura 97 - Curva termogravimétrica - CPA-01**



Fonte: CCDM (2023b).

Os resultados dos ensaios de Análise termogravimétrica realizados para o composto CPA-02a, em estado endurecido, podem ser observados na Figura 98.

Figura 98 - Curva termogravimétrica - CPA-02a



Fonte: CCDM (2023c).

Os valores percentuais de perda de massa apresentados pelos dois compostos, em estado endurecido, são demonstrados no Quadro 38.

**Quadro 38 - Comparação da perda de massa com valores normativos**

Intervalo de temperatura	Perda de massa (%)		Percentuais máximos da NBR 16590 (%)
	CPA-01	CPA-02	
25 a 120° C	0,07	0,01	18
<b>Temperatura</b>	<b>Resíduo (%)</b>		<b>Resíduo máximo NBR 16590 (%)</b>
<b>850° C</b>	53,81	54,76	52

Fonte: Adaptado de CCDM (2023b) e CCDM (2023c).

Como pode ser observado no Quadro 38, os valores de perda de massa obtidos para os dois compostos estão bem abaixo dos limites definidos pela normativa NBR 16590-2 (ABNT, 2017), para o caso da temperatura de 25 a 120 °C. Isso se deve ao fato de o material já ter perdido grande parte da massa durante o processo natural de secagem para o ambiente.

Para o caso do resíduo a 850°C, o valor máximo previsto na norma foi ultrapassado pelas duas amostras. Isso ocorre, provavelmente, devido ao percentual de água inicial que está mais baixo na amostra em estado endurecido, provocando a redução expressiva observada no percentual de perda de massa obtido no intervalo de 25 a 120°C, o que provocou o aumento do percentual residual final.

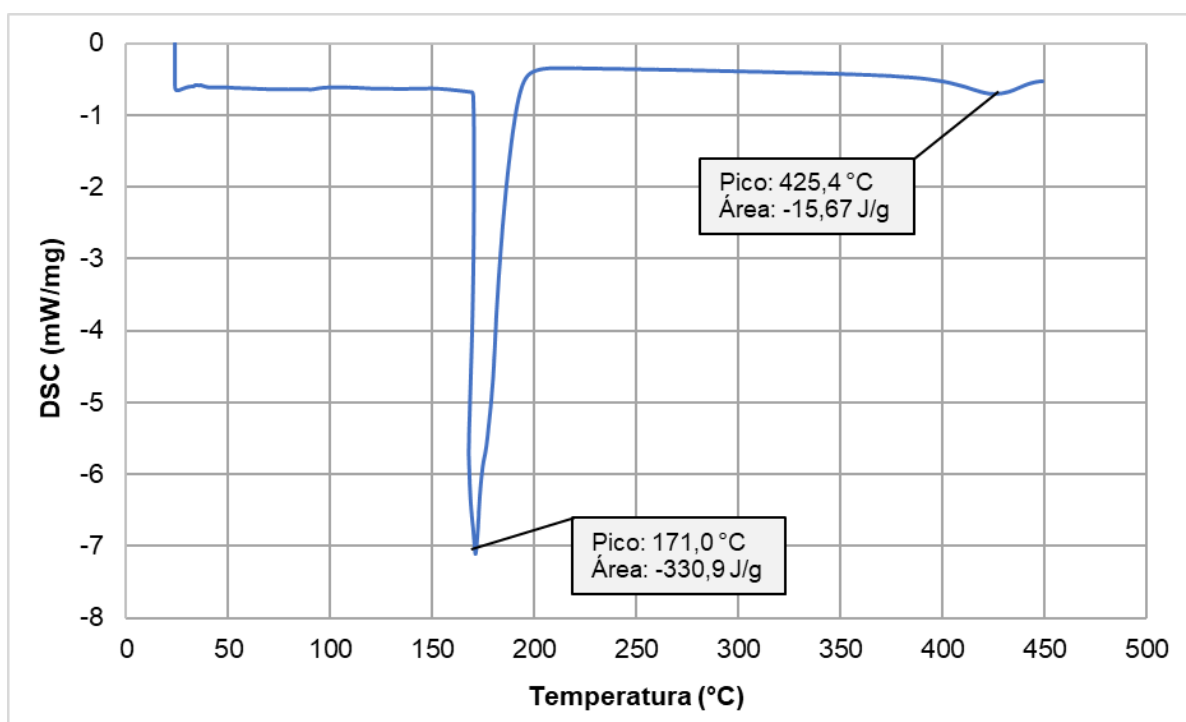
Existe diferença entre a realização do ensaio no material em estado fresco e endurecido. Portanto, a realização do ensaio em estado fresco é preferida, pois permite verificar essa variação inicial da massa no intervalo de 25 a 120°C, o que não pode ser feito no material endurecido, pois boa parte dessa massa é perdida durante a secagem.

### 4.1.1.2.3 Resultados – Calorimetria exploratória diferencial

Os resultados dos ensaios de Calorimetria exploratória diferencial realizados para as duas amostras de compostos poliméricos, provenientes diretamente da embalagem são mostrados na sequência. Essas informações são referentes do relatório fornecido pelo CCDM (2023d) da UFSCar.

O comportamento apresentado pela amostra CPA-01 durante o aquecimento no ensaio de DSC pode ser observado na Figura 99.

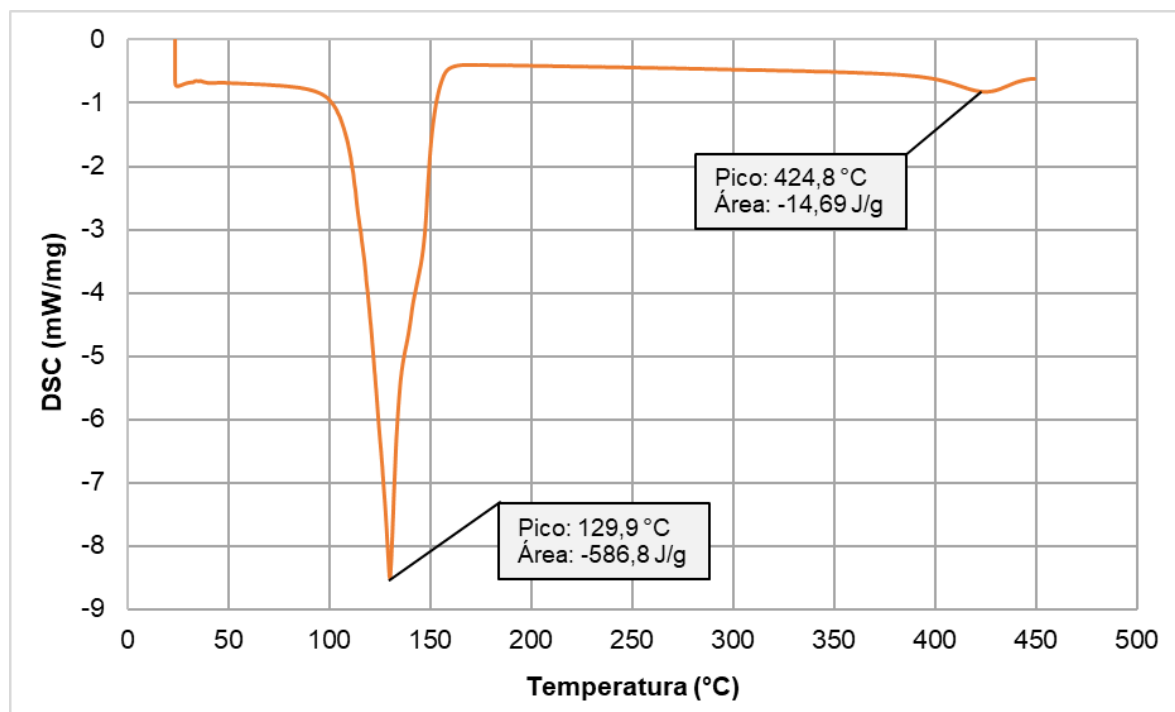
Figura 99 - Curva DSC da amostra CPA-01



Fonte: Adaptado de CCDM (2023d).

O comportamento apresentado pela amostra CPA-02a durante o aquecimento no ensaio de DSC pode ser observado na Figura 100.

**Figura 100 - Curva DSC da amostra CPA-02a**



Fonte: Adaptado de CCDM (2023d).

Segundo as informações disponibilizadas por CCDM (2023d), devido a programação de temperatura utilizada, a amostra acabou se degradando, alterando o formato do porta amostras devido a liberação de gases. O último pico observado nas Figura 99 e Figura 100, corresponde à degradação do polímero.

As transições térmicas observadas nas análises DSC podem ser conferidas no Quadro 39. Foi observado, apenas a presença de temperaturas de fusão ( $T_m$ ), mas não de temperaturas de transição vítrea ( $T_g$ ). A presença de temperaturas de transição vítrea durante o aquecimento era esperada para esse tipo de material polimérico, entretanto, provavelmente a presença de água, agregados e adições minerais podem ter contribuído para ocultar esse tipo de informação.

**Quadro 39 – Resultados de DSC dos compostos**

Amostra	Primeiro pico observado		Segundo pico observado	
	$T_m$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)	$T_m$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)
CPA-01	171,0	-330,9	425,4	-15,67
CPA-02a	129,9	-586,8	424,8	-14,69

Fonte: Adaptado de CCDM (2023d).

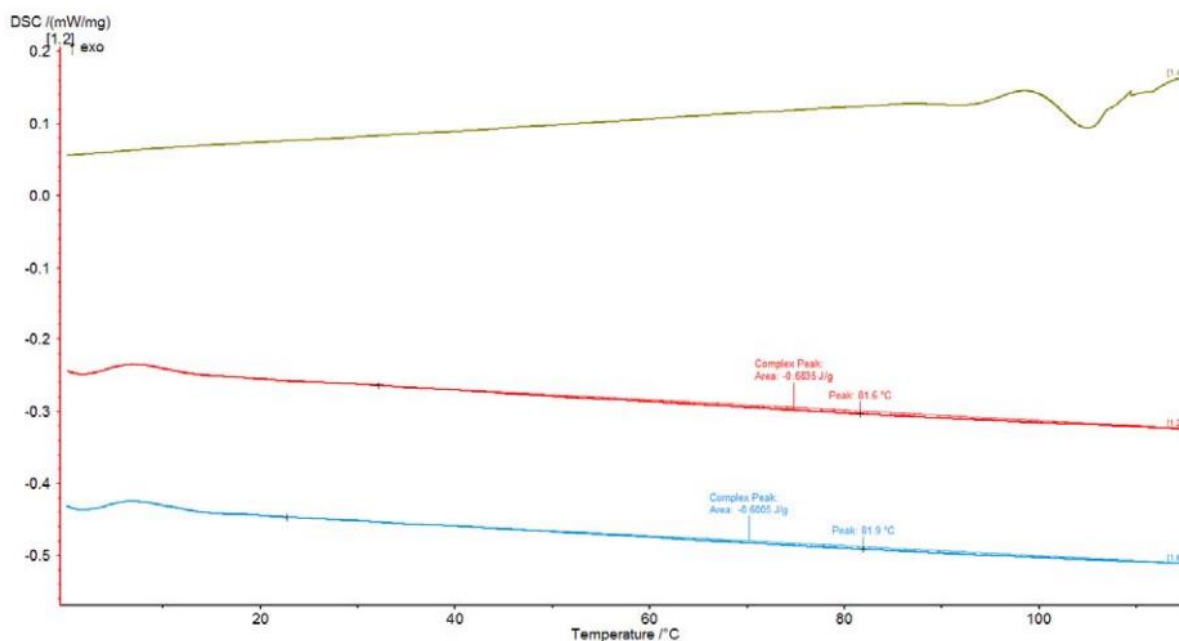


Além dos ensaios realizados nos materiais provenientes das embalagens, também foi realizado o ensaio no material em estado endurecido. Os resultados dos ensaios de calorimetria exploratória diferencial, realizados para as duas amostras de compostos poliméricos, provenientes de amostras de composto polimérico em estado endurecido são mostrados na sequência. Essas informações são referentes aos resultados provenientes de CCDM (2023b) e CCDM (2023c).

Por sugestão do laboratório do CCDM, o ensaio foi realizado com dois aquecimentos até temperaturas de aproximadamente, 120°C. As informações obtidas durante o primeiro aquecimento são mais influenciadas pelo processo de fabricação do material, enquanto o segundo aquecimento é mais indicado para analisar os fatores intrínsecos do polímero.

O comportamento apresentado pela amostra CPA-01 durante o aquecimento no ensaio de DSC pode ser observado na Figura 101.

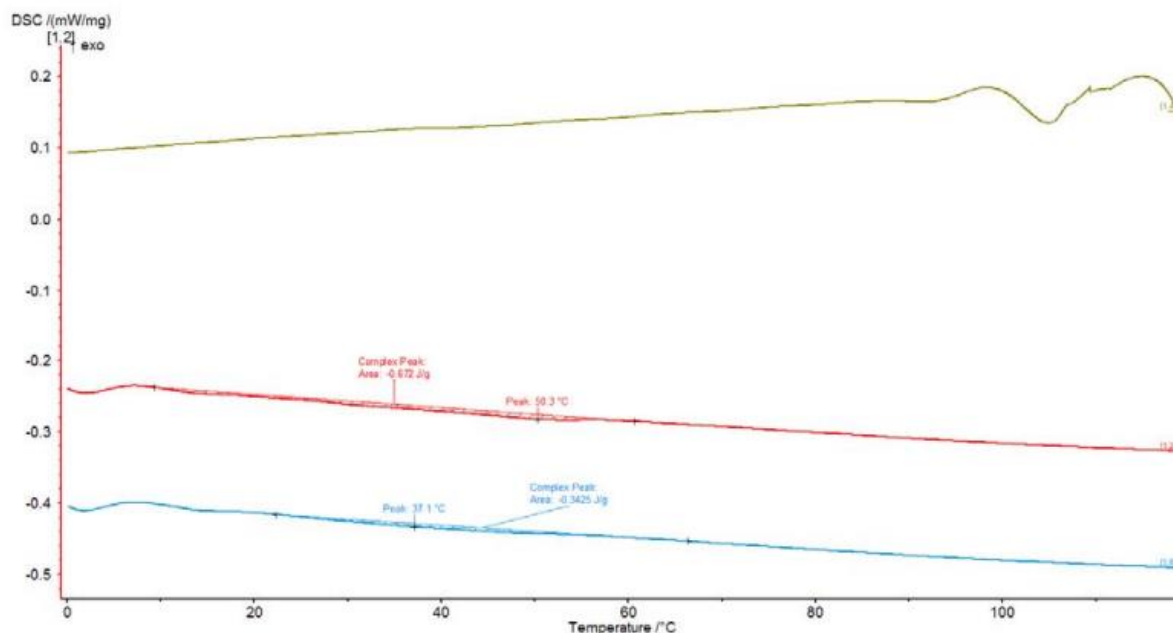
**Figura 101 - Curva DSC da amostra CPA-01**



Fonte: CCDM (2023b).

O comportamento apresentado pela amostra CPA-02a durante o aquecimento no ensaio de DSC pode ser observado na Figura 102.

**Figura 102 - Curva DSC da amostra CPA-02a**



Fonte: CCDM (2023c).

As transições térmicas observadas na análise DSC podem ser observadas no Quadro 48. Novamente, foi observada a presença de pontos de fusão nos dois aquecimentos realizados em cada uma das amostras. Não foi possível identificar a temperatura de transição vítrea nos compostos poliméricos.

**Quadro 40 – Resultados de DSC dos compostos.**

Amostra	Segundo aquecimento	
	Tm (°C)	$\Delta H$ (J/g)
CPA-01	81,9	-0,6005
CPA-02a	37,1	-0,3425

Fonte: Adaptado de CCDM (2023b-c).

A presença de agregados, carga mineral e água nos compostos pode prejudicar a identificação da temperatura de transição vítrea. A adoção de outras técnicas pode permitir a identificação dessa temperatura de transição nos compostos poliméricos, como a análise térmica dinâmico-mecânica (DMTA) que analisa a variação do módulo de elasticidade do material com o aumento de temperatura. Mais informações sobre essa técnica podem ser observadas no trabalho de Canevarolo (2020).

### 4.1.1.3 Determinação das propriedades mecânicas

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas dos compostos poliméricos.

#### 4.1.1.3.1 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão foram realizados para diferentes idades a partir da data de desmoldagem dos compostos poliméricos. Além da resistência máxima à compressão, também foi estimado o módulo de elasticidade dos compostos poliméricos. Os resultados são mostrados para o composto CPA-01, CPA-02a e CPA-02b.

A resistência à compressão e módulo de elasticidade estimado dos compostos poliméricos são demonstrados no Quadro 41, para a idade de 14 dias após a desmoldagem.

**Quadro 41 - Resistência à compressão – 14 dias**

CP	Resistência à compressão (MPa)			Módulo estimado (MPa)		
	CPA-01	CPA-02a	CPA-02b	CPA-01	CPA-02	CPA-02b
1	3,28	1,50	1,59	52,17	25,03	43,21
2	2,64	1,44	1,63	41,68	21,43	25,86
3	2,35	1,56	1,88	36,22	27,63	28,44
4	4,19	1,56	1,67	51,93	23,11	42,09
5	3,76	1,66	1,78	61,04	23,04	57,43
6	2,39	1,67	1,73	41,28	30,69	49,95
<b>Média</b>	3,10	1,57	1,71	47,39	25,16	41,16
<b>Desvio Padrão</b>	0,77	0,09	0,11	9,21	3,44	12,19
<b>C. V. (%)</b>	24,70	5,71	6,21	19,44	13,69	29,61

Fonte: Autor (2023).

A resistência à compressão e módulo de elasticidade estimado dos compostos poliméricos são demonstrados no Quadro 42, para a idade de 28 dias após a desmoldagem.

**Quadro 42 - Resistência à compressão – 28 dias**

CP	Resistência à compressão (MPa)			Módulo estimado (MPa)		
	CPA-01	CPA-02a	CPA-02b	CPA-01	CPA-02a	CPA-02b
1	6,61	4,28	3,73	126,29	81,68	68,32
2	7,07	4,19	3,73	130,40	71,60	91,64
3	7,63	4,84	3,79	130,24	83,19	65,68
4	7,94	4,51	3,84	169,94	90,73	129,89
5	7,59	4,54	3,56	159,90	88,72	124,01
6	7,36	4,64	3,18	127,00	87,66	89,85
<b>Média</b>	7,37	4,50	3,64	140,63	83,93	94,90
<b>Desvio Padrão</b>	0,47	0,24	0,24	19,15	6,94	27,09
<b>C. V. (%)</b>	6,39	5,27	6,70	13,62	8,27	28,54

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 42, a resistência à compressão do composto CPA-02b foi, aproximadamente, 19,1 e 50,6% inferior à resistência apresentada, respectivamente, pelo composto CPA-02a e CPA-01. O módulo estimado para o composto CPA-02a foi, aproximadamente, 11,6 e 40,3% inferior ao módulo estimado, respectivamente, para o composto CPA-02b e CPA-01.

Os valores de resistência à compressão observados para o composto CPA-01 aos 28 dias foram semelhantes aos encontrados para um dos compostos ensaiados por Paul Filho (2016) que obteve 7,13 MPa de resistência à compressão. Os outros compostos poliméricos ensaiados pelo autor apresentaram resistência à compressão de, aproximadamente, 10 MPa. É possível que, como os corpos de prova usados pelo autor tenham formato de cubos com 20 mm de lado, a tendência seja de obter valores mais elevados de resistência à compressão do que os obtidos com os formatos utilizados nessa pesquisa que possuem a altura 2 vezes maior que a largura.

A resistência à compressão e módulo de elasticidade estimado dos compostos poliméricos são demonstrados no Quadro 43, para a idade de 56 dias após a desmoldagem.

**Quadro 43 - Resistência à compressão – 56 dias**

CP	Resistência à compressão (MPa)			Módulo estimado (MPa)		
	CPA-01	CPA-02a	CPA-02b	CPA-01	CPA-02a	CPA-02b
1	6,73	4,28	3,82	183,53	73,38	149,14
2	7,03	4,52	3,83	-	83,41	96,50
3	6,77	4,87	4,09	186,05	132,52	115,62
4	6,73	4,77	3,73	156,84	77,08	116,11
5	6,71	4,35	3,86	130,83	74,81	98,17
6	6,80	4,92	3,95	198,73	107,56	122,61
<b>Média</b>	6,80	4,62	3,88	171,20	91,46	116,36
<b>Desvio Padrão</b>	0,12	0,27	0,12	27,23	23,75	19,18
<b>C. V. (%)</b>	1,76	5,92	3,22	15,91	25,97	16,48

Fonte: Autor (2023).

A resistência à compressão e módulo de elasticidade estimado dos compostos poliméricos são demonstrados no Quadro 44, para a idade de 84 dias após a desmoldagem.

**Quadro 44 - Resistência à compressão – 84 dias**

CP	Resistência à compressão (MPa)			Módulo estimado (MPa)		
	CPA-01	CPA-02a	CPA-02b	CPA-01	CPA-02a	CPA-02b
1	7,12	5,16	3,91	123,85	110,32	120,53
2	7,53	4,98	4,06	181,25	122,50	85,01
3	6,92	5,13	4,37	141,44	132,44	153,39
4	6,85	5,16	4,82	170,44	124,30	213,67
5	7,15	5,54	4,92	169,20	161,28	183,67
6	7,15	5,60	4,76	172,11	98,91	206,58
<b>Média</b>	7,12	5,26	4,47	159,72	124,96	160,48
<b>Desvio Padrão</b>	0,24	0,25	0,42	22,10	21,33	50,66
<b>C. V. (%)</b>	3,34	4,73	9,49	13,84	17,07	31,57

Fonte: Autor (2023).

A resistência à compressão e módulo de elasticidade estimado dos compostos poliméricos são demonstrados no Quadro 45, para a idade de 112 dias após a desmoldagem.

**Quadro 45 - Resistência à compressão – 112 dias**

CP	Resistência à compressão (MPa)			Módulo estimado (MPa)		
	CPA-01	CPA-02a	CPA-02b	CPA-01	CPA-02a	CPA-02b
1	5,96	5,75	3,97	108,38	110,60	75,81
2	6,57	6,03	4,15	166,01	188,51	122,39
3	6,69	5,53	4,02	171,90	143,10	98,08
4	7,00	5,86	4,45	168,60	109,71	109,31
5	7,12	5,35	4,44	155,40	94,25	120,93
6	7,10	5,18	4,62	126,45	163,12	92,13
<b>Média</b>	6,74	5,62	4,28	149,46	134,88	103,11
<b>Desvio Padrão</b>	0,44	0,32	0,26	26,06	36,37	17,99
<b>C. V. (%)</b>	6,57	5,73	6,19	17,44	26,97	17,45

Fonte: Autor (2023).

A forma de ruptura mais comum observada nos compostos foi caracterizada pela redução da altura do corpo de prova e alargamento da região central durante a aplicação da carga. Ao final do ensaio o material normalmente formava fissuras com formato semelhante a letra “X” em duas laterais opostas dos corpos de prova, enquanto nas outras duas faces costumavam se destacar inteiramente, ou apresentar alguma fissura. Exemplos da forma de ruptura podem ser observados na Figura 103.

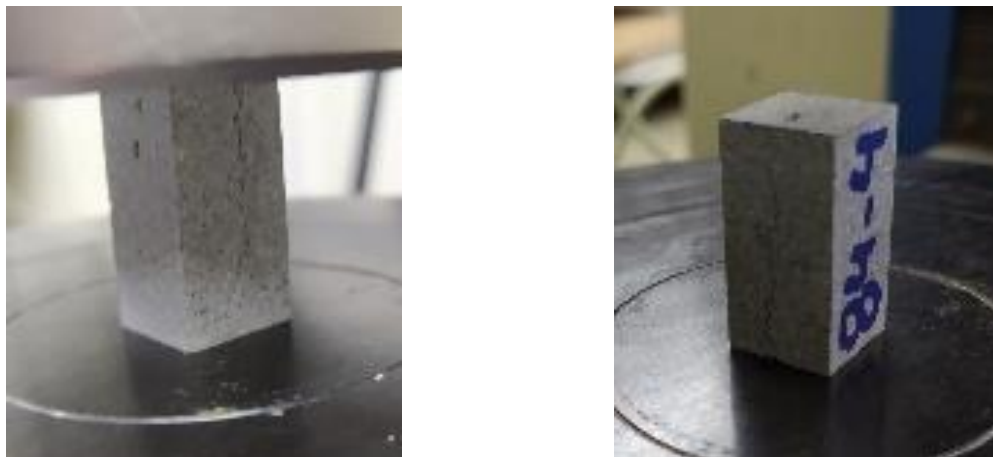
**Figura 103 – Exemplo de ruptura dos compostos**

Fonte: Autor (2023).

Principalmente nas idades mais avançadas foi observado que alguns corpos de prova de composto apresentaram a presença de fissuras verticais de pequena espessura em uma de suas faces e, eventualmente, alguns vazados. Essas manifestações foram encontradas em maior quantidade para os corpos de prova do CPA-02. Uma das possíveis causas aventadas sobre essas manifestações, principalmente das fissuras verticais, foram atribuídas a efeitos de retração interna provenientes da perda de água do material que fez parte de seu processo

de endurecimento. Algumas imagens dessas observações podem ser conferidas na Figura 104.

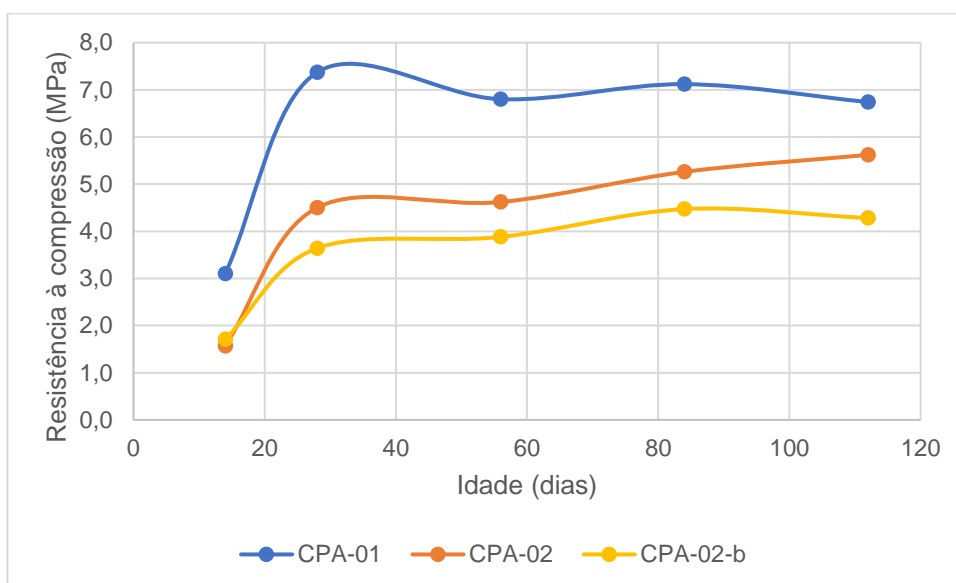
**Figura 104 - Exemplos de fissura vertical**



Fonte: Autor (2023).

A evolução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade estimado pode ser observada, respectivamente, na Figura 105 e Figura 106.

**Figura 105 - Evolução da resistência à compressão**

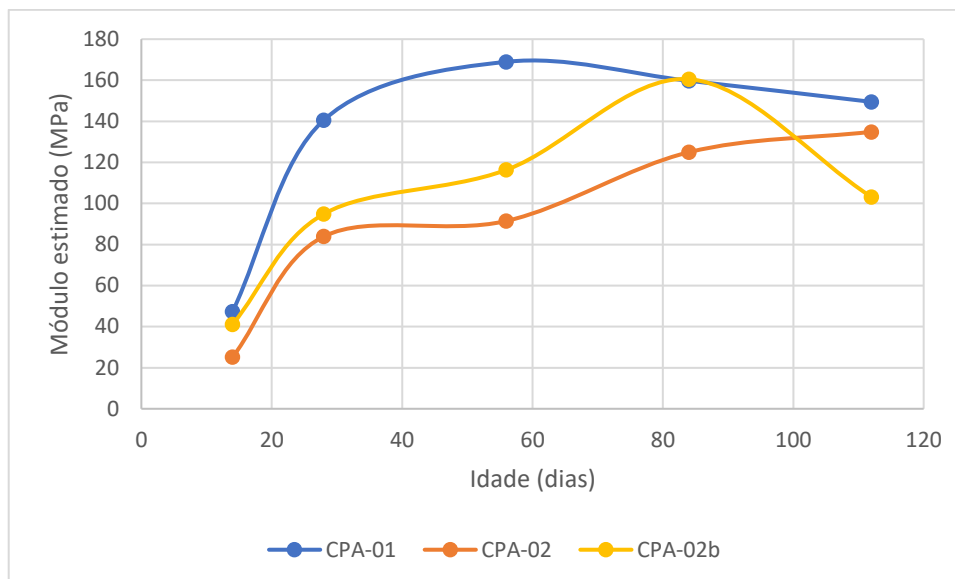


Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 105 a resistência à compressão do composto CPA-01 foi superior à resistência obtida pelos compostos CPA-02-a e CPA-02b, em todas as idades. Após 28 dias de idade, aparentemente, a resistência à compressão apresentada pelos compostos teve pouca alteração no seu valor. Uma exceção foi para o caso do composto

CPA-02a na idade de 112 dias que apresentou, aproximadamente, 24,9% de aumento na resistência à compressão em comparação ao valor obtido com 28 dias.

**Figura 106 - Evolução do módulo estimado**



Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 106 o módulo de elasticidade obtido pelo composto CPA-01 foi superior ao módulo obtido para os compostos CPA-02a e CPA-02b, em quase todas as idades. Os únicos pontos em que o módulo obtido com o composto CPA-01 ficou próximo ao composto CPA-02b foram aos 14 e 84 dias. O módulo de CPA-01 aumentou até a idade de 56 dias quando passou a apresentar redução, ficando seu valor aos 112 dias ligeiramente superior ao apresentado aos 28 dias. O CPA-02a apresentou a tendência de aumento do módulo de elasticidade com o passar do tempo. Esse aumento foi de cerca de 60,7%, quando se compara o valor obtido aos 28 dias com o obtido aos 112 dias. Como pode ser observado CPA-02 apresentou aumentos tanto na resistência à compressão quanto no módulo de elasticidade com o passar do tempo, sendo esse aumento mais evidente no módulo de elasticidade.

Parte da mudança das propriedades mecânicas dos compostos poliméricos pode estar associada à redução de sua massa devido a saída da água que possui em estado fresco. Devido a isso, os valores percentuais de perda de massa média entre diferentes idades, são apresentados no Quadro 46.



Quadro 46 - Perda de massa

Período (dias)	CPA-01			CPA-02a			CPA-02b		
	Redução da massa			Redução da massa			Redução da massa		
	Média (%)	D. Padr. (%)	C.V. (%)	Média (%)	D. Padr. (%)	C.V. (%)	Média (%)	D. Padr. (%)	C.V. (%)
<b>3 a 7</b>	-2,83	0,81	-28,62	-7,58	1,21	-15,95	-7,95	1,27	-16,01
<b>7 a 14</b>	-1,14	0,11	-9,41	-2,77	0,19	-6,86	-2,14	0,27	-12,75
<b>14 a 28</b>	-0,43	0,05	-11,69	-0,80	0,08	-10,55	-0,35	0,07	-18,73
<b>28 a 56</b>	-0,08	0,01	-14,72	-0,12	0,03	-24,92	-0,05	0,02	-37,43
<b>56 a 84</b>	-0,02	0,02	-91,84	-0,07	0,02	-27,89	-0,04	0,03	-76,83
<b>84 a 112</b>	-0,03	0,02	-60,51	-0,05	0,03	-55,99	-0,03	0,02	-68,19

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 46, a redução média da massa identificada para os três compostos poliméricos entre os 14 e 28 dias da desforma foi inferior a 1%, indicando a tendência de estabilização da massa. Para o período de 28 a 56 dias a perda de massa dos 3 compostos foi inferior a 0,15% e para as idades mais avançadas, inferior a 0,1%, mostrando sua estabilização.

Além da resistência à compressão, a densidade das amostras também foi avaliada para diferentes idades. Os valores médios da densidade específica determinada para os diferentes compostos poliméricos podem ser observados no Quadro 47.

Quadro 47 - Densidade relativa em diferentes idades

Idade (dias)	CPA-01			CPA-02a			CPA-02b		
	Densidade relativa			Densidade relativa			Densidade relativa		
	Média (adim)	D. Padrão (adim)	C.V. (%)	Média (adim)	D. Padrão (adim)	C.V. (%)	Média (adim)	D. Padrão (adim)	C.V. (%)
<b>14</b>	1,874	0,01	0,58	1,736	0,01	0,49	1,768	0,02	0,98
<b>28</b>	1,883	0,00	0,15	1,738	0,01	0,32	1,765	0,00	0,03
<b>56</b>	1,860	0,01	0,45	1,695	0,01	0,39	1,760	0,00	0,16
<b>84</b>	1,855	0,01	0,49	1,710	0,00	0,18	1,756	0,01	0,35
<b>112</b>	1,855	0,02	0,85	1,711	0,01	0,64	1,745	0,01	0,54

Fonte: Autor (2023). Legenda: adim – unidade adimensional.

Como pode ser observado no Quadro 47, a densidade dos corpos de prova mostrou valores um pouco mais elevados para as idades iniciais do que para as finais. Isso foi

observado para os 3 compostos poliméricos e talvez possa estar ligado a maior presença de água nas idades iniciais dos corpos de prova. A variação da densidade observada foi inferior a 2,5% para um mesmo composto polimérico nas diferentes idades, o que representa um valor relativamente baixo de variação. Ainda mais se considerar que o coeficiente de variação em alguns casos ficou próximo a 1%.

### 4.1.1.3.2 Resistência à tração e à flexão

Os ensaios de tração e de flexão dos compostos poliméricos foram realizados pelo Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Esses ensaios foram realizados nos compostos CPA-01, CPA-02a e CPA-02b. Os resultados dos ensaios de flexão são apresentados no Quadro 48.

**Quadro 48 - Propriedades mecânicas em flexão**

CP	Módulo de flexão (MPa)			Resistência à flexão (MPa)		
	CPA-01	CPA-02a	CPA-02b	CPA-01	CPA-02a	CPA-02b
1	268,58	712,65	1441,13	2,28	2,32	2,69
2	281,77	735,86	2050,37	2,27	2,53	3,21
3	195,42	877,04	1555,76	2,35	2,50	2,28
4	1551,48*	894,08	1608,74	0,25*	2,26	2,1
5	331,13	1142,03	1673,07	2,19	2,55	2,57
<b>Média</b>	269,23	872,33	1665,81	2,27	2,43	2,57
<b>Desvio Padrão</b>	56,09	171,29	231,19	0,07	0,13	0,43
<b>C. V. (%)</b>	20,83	19,64	13,88	3,08	5,45	16,61

Fonte: Adaptado de CCDM (2023). (\*) – Corpo de prova descartado, pois o valor foi considerado espúrio empregando o procedimento do item 7.1 da ASTM E 178 (2021), para um nível de significância de 10%.

Como pode ser observado no Quadro 48, o menor valor de resistência à flexão foi obtido pelo composto CPA-01. Esse valor foi, aproximadamente, 6,6 e 11,7% inferior ao obtido, respectivamente, pelo CPA-02a e CPA-02b. O valor médio do módulo de flexão obtido pelo composto CPA-01 foi aproximadamente 69,1 e 83,8% inferior, respectivamente, ao composto CPA-02a e CPA-02b.

As curvas que relacionam a tensão e deformação observada pelas amostras são apresentadas no anexo A. O comportamento observado para todos os compostos é

semelhante ao apresentado para a curva “b” mostrada na Figura 16, em que o ponto de maior tensão no ensaio de flexão coincide com o ponto de escoamento.

Para avaliar se a resistência à flexão apresentada por cada composto polimérico apresenta diferença significativa, foi realizada a análise de variância (ANOVA) com fator único, para um nível de confiança de 95%. Essa análise identificou que não existe diferença significativa entre os resultados de resistência à flexão obtidos pelos 3 compostos poliméricos.

Os resultados dos ensaios de tração realizados pelo CCDM da Universidade Federal de São Carlos são apresentados no Quadro 49, para todos os compostos.

**Quadro 49 - Propriedades mecânicas em tração**

CP	Módulo (MPa)			Tensão (MPa)			Deformação (%)		
	CPA-01	CPA-02a	CPA-02b	CPA-01	CPA-02a	CPA-02b	CPA-01	CPA-02a	CPA-02b
1	191,8	-	1030,40	1,04	1,07	2,77	1,24	0,44	0,56
2	163,07	395,91	1952,26	1,12	1,44	3,09	1,80	0,84	0,43
3	239,98	271,59	1816,83	1,22	1,02	3,22	1,42	0,70	0,44
4	207,09	356,86	819,20	0,93	1,42	2,00	1,50	0,97	0,45
5	200,17*	281,53	802,10	0,29*	0,94	1,65	0,91*	0,72	0,42
<b>Média</b>	200,49	326,47	1284,16	1,08	1,18	2,55	1,49	0,73	0,46
<b>D. Pad.</b>	32,04	59,94	557,46	0,12	0,23	0,69	0,23	0,20	0,06
<b>C. V. (%)</b>	15,98	18,36	43,41	11,11	19,93	27,08	15,44	26,79	12,39

Fonte: Adaptado de CCDM (2023). (\*) – Corpo de prova descartado, pois o valor foi considerado espúrio empregando o procedimento do item 7.1 da ASTM E 178 (2021), para um nível de significância de 10%.

Como pode ser observado no Quadro 49, o composto CPA-01 apresentou o menor valor de resistência à tração, com resultados, aproximadamente, 8,5 e 57,6% inferiores, respectivamente, ao composto CPA-02a e CPA-02b. O composto CPA-01 apresentou o maior valor de deformação (1,49%), enquanto o composto CPA-02b apresentou o menor valor de deformação (0,46%).

As curvas que relacionam a tensão e deformação obtidas nos ensaios de flexão e tração podem ser observadas no Anexo A. Analisando-se as curvas tensão-deformação apresentadas pelos compostos poliméricos durante o ensaio de tração, é possível identificar que eles apresentaram comportamento dúctil, considerando a definição apresentada por

Xavier in Utracki (2002). No início da aplicação da carga os materiais apresentaram proporção decrescente entre tensão e deformação até atingirem a tensão máxima, que coincidiu com o ponto de escoamento. A partir desse ponto, a tensão foi reduzindo até atingir a ruptura em uma tensão inferior a tensão observada no ponto de escoamento. Esse comportamento observado nas curvas tensão-deformação é semelhante ao exemplo mostrado na Figura 13, para a curva que contém os pontos “B” e “C”.

## **4.2 RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA – ESTUDO PRELIMINAR DO ASSENTAMENTO E ANÁLISE DO CISALHAMENTO**

Essa etapa tem como objetivo avaliar a influência do preenchimento da junta vertical no comportamento da alvenaria de junta fina assentada com compostos poliméricos, visando definir qual método de assentamento (com ou sem o preenchimento da junta vertical) seria utilizado para a construção dos corpos de prova de alvenaria empregados nas demais etapas da pesquisa.

Para a realização dos ensaios de cisalhamento, apenas o bloco do tipo B10 foi empregado nessa etapa, com os dois compostos poliméricos. Os ensaios de cisalhamentos foram realizados com 6 corpos de prova para cada composto polimérico utilizado. Três desses corpos de prova foram construídos com o preenchimento da junta vertical (CJV) e três foram construídos sem o preenchimento da junta vertical (SJV). Portanto, 12 corpos de prova foram construídos, sendo 6 com CPA-01 e 6 com CPA-02b.

Os resultados dessa etapa foram divididos em dois subitens, sendo o primeiro destinado a comparar de forma direta os resultados de tensão de cisalhamento obtidos pelas amostras construídas com e sem o preenchimento da junta vertical. Nesse subitem é definido se os corpos de prova de alvenaria utilizados nas próximas etapas da pesquisa serão construídos com o preenchimento da junta vertical (CJV), ou, sem o preenchimento da junta vertical (SJV). O segundo subitem é utilizado para analisar as deformações obtidas nos ensaios de cisalhamento, visando compreender melhor o comportamento da alvenaria de junta fina assentada com compostos poliméricos durante o ensaio de cisalhamento.

### **4.2.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PREENCHIMENTO DA JUNTA VERTICAL**

Os resultados do ensaio de cisalhamento obtidos para os corpos de prova construídos com o composto CPA-01 podem ser observados no Quadro 50. Os resultados apresentados contemplam tanto a amostra construída com o preenchimento da junta vertical, quanto a amostra construída sem o preenchimento da junta vertical. A carga máxima, a tensão de

cisalhamento, e o módulo de deformação transversal obtidos nos ensaios podem ser observados no Quadro 50.

O ensaio de cisalhamento não foi realizado para o corpo de prova n° 3 da amostra sem preenchimento da junta vertical, pois sofreu danos durante sua movimentação.

**Quadro 50 – Resistência ao cisalhamento (CPA-01)**

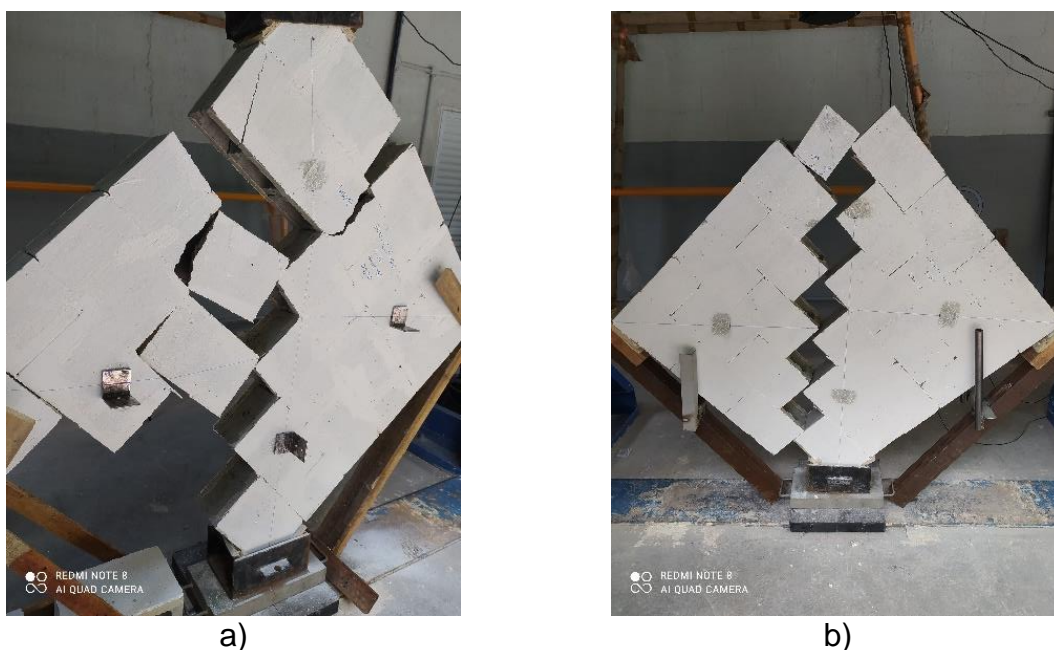
CP	Com Junta Vertical - CJV			Sem Junta Vertical - SJV		
	Carga máxima (kN)	Tensão de cisalhamento (MPa)	Módulo de deformação (GPa)	Carga máxima (kN)	Tensão de cisalhamento (MPa)	Módulo de deformação (GPa)
1	58,19	0,25	0,63	19,9	0,09	0,60
2	50,67	0,22	0,88	22,23	0,10	0,56
3	61,58	0,27	0,70	-	-	-
<b>Média</b>	56,81	0,25	0,74	21,07	0,10	0,58
<b>D. Pad.</b>	5,58	0,03	0,13	1,65	0,01	0,03
<b>C.V. (%)</b>	9,82	12,00	17,57	7,83	10,00	5,17

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 50 a tensão de cisalhamento média obtida para a amostra sem preenchimento da junta vertical foi, aproximadamente, 60% inferior ao resultado obtido para a amostra com o preenchimento da junta vertical. Portanto, fica clara a influência do preenchimento da junta vertical no aumento da resistência ao cisalhamento para essas amostras que foram construídas com o composto CPA-01. A média do módulo de deformação obtido para a amostra sem preenchimento da junta vertical foi, aproximadamente, 22% inferior ao valor obtido para a amostra com o preenchimento da junta vertical. O valor característico da resistência ao cisalhamento obtido para a amostra assentadas com o preenchimento da junta vertical com o composto CPA-01 é de 0,18 MPa.

Exemplos de ruptura observados durante o ensaio de cisalhamento para corpos de prova construídos com preenchimento da junta vertical utilizando o composto CPA-01 podem ser observados na Figura 107-a. Exemplos de ruptura observados durante o ensaio de cisalhamento para corpos de prova construídos sem preenchimento da junta vertical utilizando o composto CPA-01 podem ser observados na Figura 107-b.

**Figura 107 – Ruptura do ensaio de cisalhamento com composto CPA-01**



Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 107-a, para a amostra construída com preenchimento da junta vertical, parte da ruptura ocorreu nas juntas de assentamento, sendo observado, também, ruptura em alguns blocos de concreto. Para o caso da ruptura observada na Figura 107-b, para o corpo de prova construído sem o preenchimento da junta vertical, a forma de ruptura principal observada ocorreu nas juntas de assentamento.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento obtidos para os corpos de prova construídos com o composto polimérico CPA-02b podem ser observados no Quadro 51. São apresentados os resultados das amostras construídas com e sem o preenchimento da junta vertical.

**Quadro 51 – Resistência ao cisalhamento (CPA-02b)**

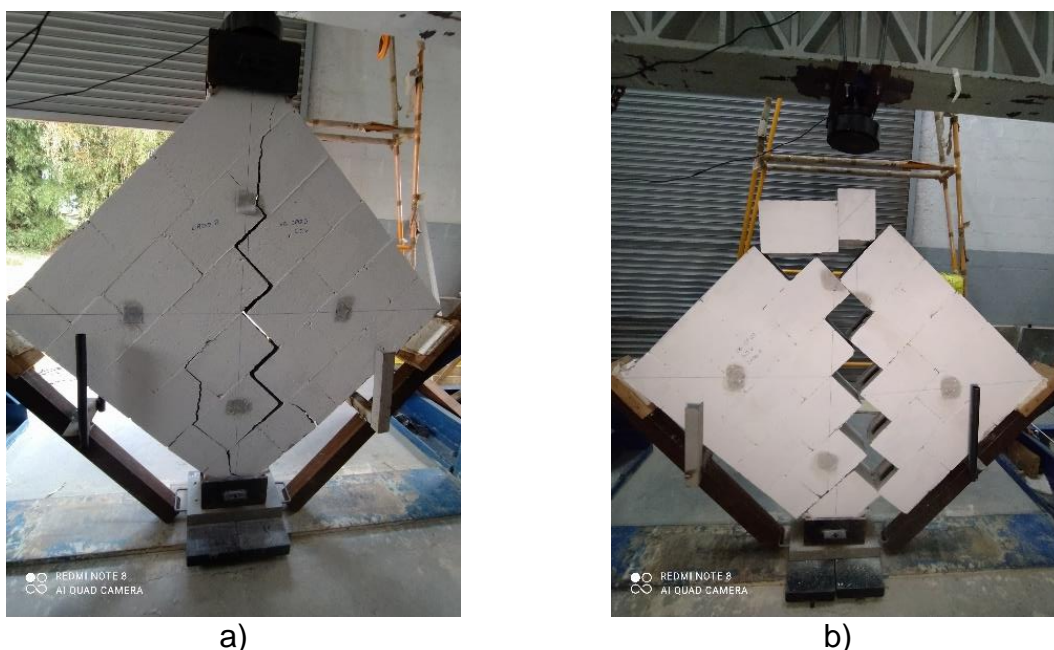
CP	Com Junta Vertical - CJV			Sem Junta Vertical - SJV		
	Carga máxima (kN)	Tensão de cisalhamento (MPa)	Módulo de deformação (GPa)	Carga máxima (kN)	Tensão de cisalhamento (MPa)	Módulo de deformação (GPa)
1	117,19	0,51	2,16	40,99	0,18	1,48
2	116,26	0,50	2,33	49,52	0,21	2,24
3	116,49	0,50	1,92	51,27	0,22	1,71
<b>Média</b>	116,65	0,50	2,14	47,26	0,20	1,81
<b>D. Pad.</b>	0,48	0,01	0,21	5,50	0,02	0,39
<b>CV (%)</b>	0,41	2,00	9,81	11,64	10,00	21,55

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 51 a tensão de cisalhamento média obtida para a amostra construída sem o preenchimento da junta vertical foi, aproximadamente, 60% menor do que a amostra construída com o preenchimento da junta vertical. Portanto, fica clara a influência do preenchimento da junta vertical no aumento da resistência ao cisalhamento para essas amostras que foram construídas com o composto CPA-02b. A média do módulo de deformação obtida para a amostra construída sem o preenchimento da junta vertical foi, aproximadamente 15% inferior à média obtida para a amostra construída com o preenchimento da junta vertical. O valor característico obtido para as amostras assentadas com e sem o preenchimento da junta vertical com o composto CPA-02b é, respectivamente, 0,40 e 0,14 MPa.

Exemplos de ruptura observados durante o ensaio de cisalhamento para corpos de prova construídos com o composto CPA-02b, com preenchimento de junta vertical, podem ser observados na Figura 108-a. Exemplos de ruptura observados durante o ensaio de cisalhamento para corpos de prova construídos com o composto CPA-02b, sem o preenchimento de junta vertical, podem ser observados na Figura 108-b.

**Figura 108 - Ruptura do ensaio de cisalhamento com composto CPA-02b**



Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 108-a, para o corpo de prova construído com o preenchimento da junta vertical, parte da ruptura ocorreu nos blocos de concreto e parte ocorreu nas juntas de assentamento. Para o caso do corpo de prova construído sem preenchimento da junta vertical que pode ser observado que na Figura 108-b, a forma de ruptura principal ocorreu nas juntas de assentamento.



Ao se comparar os resultados médios de tensão de cisalhamento das amostras construídas sem o preenchimento da junta vertical com cada composto, é possível verificar que os resultados obtidos com o CPA-01 foram, aproximadamente, 50% inferiores aos obtidos com os corpos de prova construídos com CPA-02b. O módulo de deformação também foi inferior para a amostra construída com o composto CPA-01, obtendo valor, aproximadamente, 67,5% inferior.

Ao se comparar os resultados de tensão máxima de cisalhamento obtidos com os corpos de prova construídos com o preenchimento da junta vertical com cada um dos compostos, é possível verificar a tensão média de cisalhamento dos corpos de prova construídos com CPA-01 foi, aproximadamente, 50% inferior aos corpos de prova construídos com o composto CPA-02b. O módulo de deformação também foi inferior para a amostra construída com o composto CPA-01, obtendo valor, aproximadamente, 65,7% inferior.

Para o caso da alvenaria convencional também existe a tendência de redução da resistência ao cisalhamento para amostras sem o preenchimento da junta vertical. Para o caso de Miranda (2012) foi observado para alvenaria convencional de bloco cerâmico de parede vazada uma redução de 50% na resistência média ao cisalhamento para amostras assentadas sem o preenchimento da junta vertical (0,15 MPa) em comparação com amostra assentada com preenchimento da junta vertical (0,30 MPa). A autora observou que, apesar disso, não ocorreu diferença significativa no módulo de deformação transversal das duas amostras, significando que a amostra construída com o preenchimento da junta vertical aumentou a resistência, mas deformou com maior intensidade. O motivo para esse comportamento foi atribuído à presença da argamassa nas juntas verticais proporcionou aumento na área de contato que possibilitou mais caminhos para as tensões melhorando a distribuição das mesmas.

Vilató e Franco (2012) avaliaram a resistência ao cisalhamento em juntas de argamassa cimentícia convencional para alvenaria estrutural de blocos de concreto. Considerando a utilização de diferentes traços de argamassas e resistências de blocos de concreto, os autores observaram que o tipo de bloco tem maior influência na resistência ao cisalhamento do que o tipo de argamassa. Para o caso dos resultados dos ensaios de cisalhamento realizados nesta pesquisa com a utilização de juntas finas de composto polimérico, pode ser observado que o tipo de composto polimérico exerce diferença significativa nos resultados dos ensaios. Portanto, essa é uma diferença em relação aos resultados desses pesquisadores.

Sousa (2009) realizou ensaios de compressão diagonal em amostras de alvenaria de blocos de concreto leve com juntas de argamassa cimentícia horizontal de 10 mm de



espessura, com e sem o preenchimento da junta vertical. A tensão de cisalhamento obtida com a amostra de referência que possuía a junta vertical preenchida foi de 0,57 MPa e o coeficiente de variação foi de 5,3%. A amostra construída sem o preenchimento da junta vertical proporcionou tensão de cisalhamento de 0,30 MPa e coeficiente de variação de 11,7%. Portanto, comparando as duas amostras foi possível observar uma redução de, aproximadamente, 47% na resistência ao cisalhamento da amostra construída sem o preenchimento da junta vertical. O coeficiente de variação da amostra construída sem preenchimento da junta vertical foi maior do que a amostra construída com preenchimento da junta. A redução da tensão de cisalhamento e aumento do coeficiente de variação para a amostra assentada sem o preenchimento da junta vertical também foi observado nesta pesquisa com compostos poliméricos.

Gomes (2008), realizou ensaios de compressão diagonal em amostras de alvenaria construídas com e sem o preenchimento da junta vertical. O autor utilizou nos ensaios, blocos perfurados de concreto contendo agregados leves, com resistência média à compressão de 2 MPa e argamassa cimentícia com resistência média à compressão de 10,15 MPa. Como resultado o autor observou uma redução de aproximadamente, 38% na carga máxima obtida no ensaio para a amostra construída sem o preenchimento da junta vertical. O autor também observou que a amostra com juntas verticais preenchidas apresentou maior deformação durante o ensaio de compressão diagonal. O módulo de deformação médio observado foi de aproximadamente 1,40 e 1,56 GPa, respectivamente para a amostra assentada com e sem o preenchimento da junta vertical.

No trabalho realizado por Santos (2001), para alvenaria convencional de blocos de concreto foi observado nas estruturas com juntas verticais não preenchidas que a resistência ao cisalhamento é inferior, sendo essa diferença atribuída, principalmente à diferença de aderência inicial, variando de 25 a 5% conforme se aumenta a pré-compressão.

Com base nos resultados obtidos é possível considerar que é significativa a contribuição do preenchimento da junta vertical para o aumento da resistência ao cisalhamento das amostras e, por esse motivo, os demais ensaios dessa pesquisa foram realizados em amostras de alvenaria executada com o preenchimento da junta vertical.

## **4.2.2**

### **NO ENSAIO DE CISALHAMENTO**

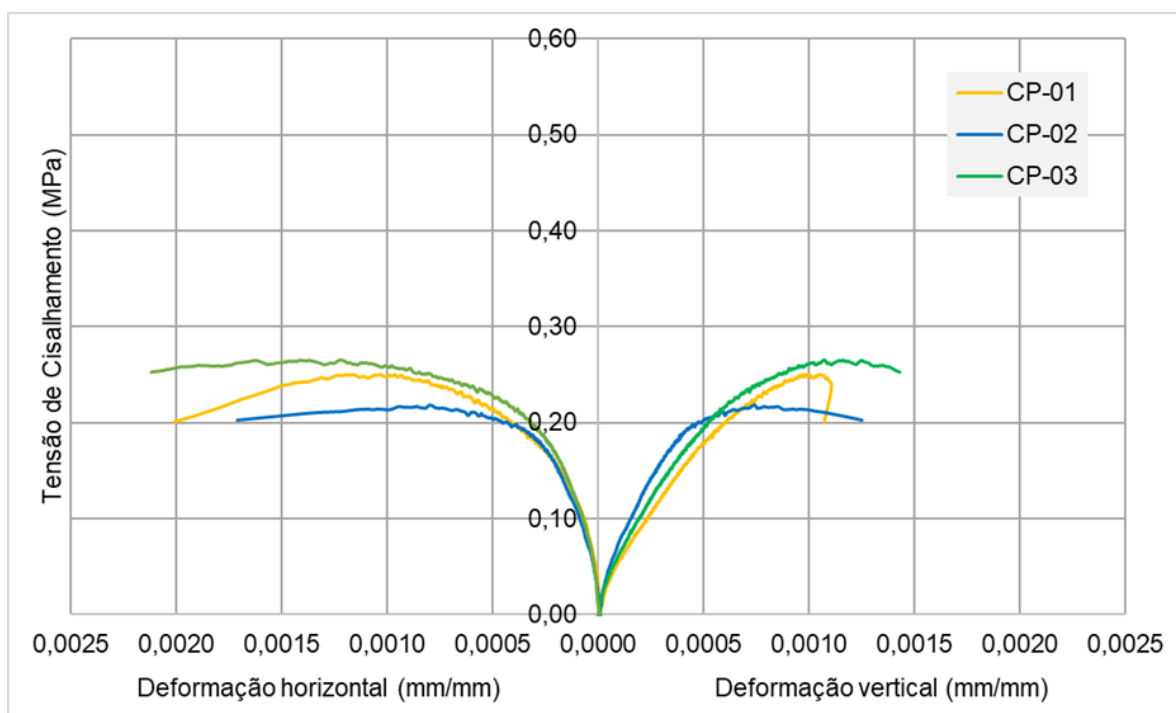
### **ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES OBTIDAS**

Neste subitem, serão apresentadas as curvas tensão-deformação obtidas para cada amostra. Além disso, serão apresentados os valores percentuais de deformação horizontal e vertical obtidos para o intervalo de tensão compreendido entre o trecho correspondente a 10 e 30% do valor de tensão máxima de cisalhamento. Para avaliar a relação existente entre a

deformação vertical e horizontal no ponto de carga máxima, será utilizado o coeficiente proporcional de deformação ( $C_{pd}$ ).

As curvas que relacionam a tensão e deformação obtidas para os corpos de prova construídos com CPA-01, com preenchimento da junta vertical, podem ser observadas na Figura 109. Os valores de deformação vertical estão apresentados no lado direito da figura e se relacionam ao encurtamento dos corpos de prova. Os valores de deformação do lado esquerdo do eixo vertical da figura se referem a expansão observada no sentido horizontal.

**Figura 109 - Curvas tensão-deformação no cisalhamento (CPA-01 - CJV)**



Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 109, existe uma parcela maior de deformação vertical do que deformação horizontal atuando na parte inicial da curva tensão-deformação, onde a tensão está entre os valores de zero e 0,10 MPa. Por outro lado, na parte final da curva, em que a tensão já ultrapassou o valor máximo registrado, a curva tensão-deformação apresenta valores de deformação obtidos na direção horizontal que superam os valores de deformação obtidos na direção vertical.

Para facilitar o entendimento da relação entre a deformação horizontal e vertical obtida para a amostra construída com o composto CPA-01, com o preenchimento da junta vertical, pode ser observado o Quadro 52.

**Quadro 52 - Resultados cisalhamento (CPA-01 - CJV)**

CP	Parcela de deformação entre 10% e 30% da tensão máxima		Coeficiente proporcional de deformação - $C_{pd}$
	Horizontal (%)	Vertical (%)	
1	24,7	75,3	0,96
2	37,0	63,0	0,93
3	24,8	75,2	0,88
<b>Média</b>	28,83	71,17	0,92
<b>D. Pad.</b>	7,07	7,07	0,04
<b>C.V. (%)</b>	24,52	9,93	4,35

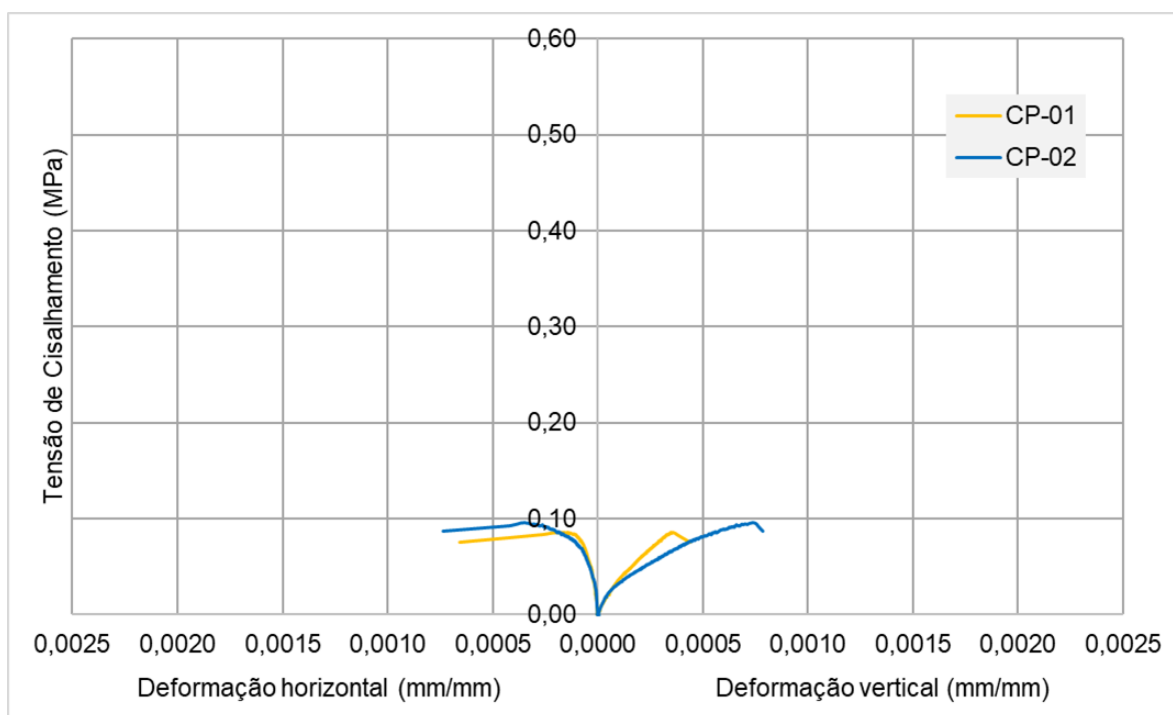
Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 52, a deformação apresentada pelas amostras, para valores de tensão entre 10 e 30% da tensão máxima, corresponde a, aproximadamente, 29% de deformação horizontal e 71% deformação vertical. Ou seja, para esse intervalo de carregamento, aproximadamente, um terço das deformações ocorreram no sentido horizontal.

Para o caso das deformações obtidas no ponto de tensão máxima aplicada, o coeficiente de proporcionalidade médio foi 0,92, ou seja, como esse valor ficou próximo de 1, é possível perceber que nesse ponto as deformações estavam bem semelhantes na direção vertical e horizontal, ficando ligeiramente superiores na direção horizontal.

As curvas que relacionam a tensão e deformação obtidas para os corpos de prova construídos com CPA-01, sem preenchimento da junta vertical, podem ser observadas na Figura 110.

**Figura 110 - Curvas tensão-deformação no cisalhamento (CPA-01 - SJV)**



Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 110, existe uma parcela maior de deformação vertical do que deformação horizontal atuando na parte inicial da curva tensão-deformação. Na parte final da curva, após a tensão máxima ter sido atingida, aparentemente, ocorreu um trecho maior de deformação no sentido horizontal do que vertical, antes da ruptura.

Para facilitar o entendimento da relação entre a deformação horizontal e vertical obtida para a amostra construída com o composto CPA-01, sem o preenchimento da junta vertical, pode ser observado o Quadro 53.

**Quadro 53 - Resultados cisalhamento (CPA-01 - SJV)**

CP	Parcela de deformação entre 10% e 30% da tensão máxima		Coeficiente proporcional de deformação - $C_{pd}$
	Horizontal (%)	Vertical (%)	
1	15,3	84,7	2,44
2	11,8	88,2	2,11
3	-	-	-
<b>Média</b>	13,55	86,45	2,28
<b>D. Pad.</b>	2,47	2,47	0,23
<b>CV (%)</b>	18,23	2,86	10,09

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 53 a deformação apresentada no trecho correspondente aos valores de 10 e 30% da tensão máxima obtida corresponde a, aproximadamente, 14% de deformação horizontal e 86% de deformação vertical.

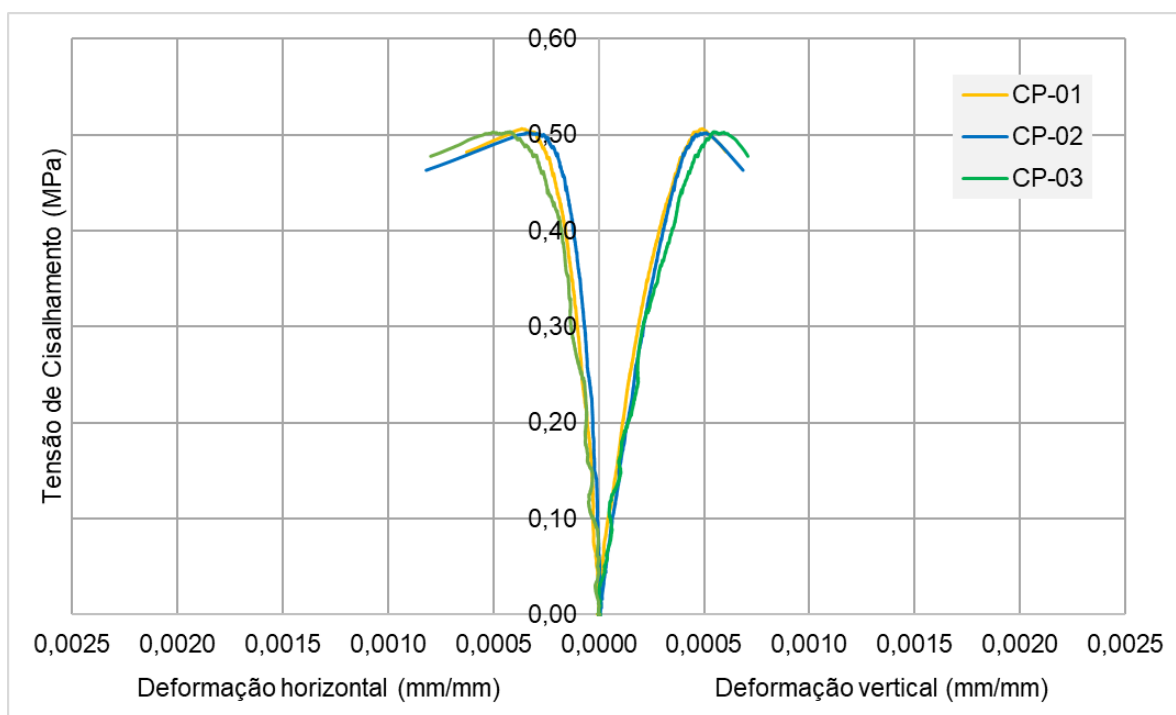
Para o caso das deformações obtidas na tensão máxima aplicada, o coeficiente de proporcionalidade médio foi 2,29, ou seja, como esse valor ficou mais afastado de 1, é possível perceber que as deformações foram bem diferentes na direção vertical e horizontal. Nesse ponto, as deformações foram maiores do que o dobro na direção vertical em relação à horizontal.

Avaliando somente a deformação horizontal obtida nos valores de 10 e 30% da tensão máxima, das amostras com e sem o preenchimento da junta, é possível inferir que a presença da junta vertical proporciona, aproximadamente, o dobro da parcela horizontal de deformação no trecho considerado. Isso pois, a parcela de deformação horizontal obtida para a amostra sem preenchimento da junta vertical foi de, aproximadamente, 14% e, para a amostra com preenchimento da junta vertical foi de, aproximadamente, 29%.

Ao se comparar o coeficiente de proporcionalidade obtido pelas amostras construídas com o composto CPA-01 com e sem o preenchimento da junta, é possível verificar que a parcela de deformação horizontal no ponto de carga máxima passa de um valor semelhante ao vertical com coeficiente de 0,92 para um coeficiente de 2,29. Portanto, a presença da junta vertical proporcionou um coeficiente de proporcionalidade, aproximadamente, 60% inferior ao observado para a amostra construída sem a presença da junta vertical.

As curvas que relacionam a tensão e deformação obtidas para os corpos de prova construídos com CPA-02b com preenchimento da junta vertical podem ser observadas na Figura 111.

**Figura 111 - Curvas tensão-deformação no cisalhamento (CPA-02b - CJV)**



Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 111, existe uma parcela maior de deformação vertical do que deformação horizontal atuando nos corpos de prova até o ponto de tensão máxima observada. Após esse ponto, aparentemente, pode ser observado um aumento das deformações horizontais, chegando a ultrapassar as verticais antes da ruptura.

Para facilitar o entendimento da relação entre a deformação horizontal e vertical obtida para a amostra construída com o composto CPA-02b, com o preenchimento da junta vertical, pode ser observado o Quadro 54.

**Quadro 54 - Resultados cisalhamento (CPA-02b - CJV)**

CP	Parcela de deformação entre 10% e 30% da tensão máxima		Coeficiente de proporcionalidade - $C_{pd}$
	Horizontal (%)	Vertical (%)	
1	26,0	74,0	1,35
2	28,1	71,9	1,50
3	26,5	73,5	1,30
<b>Média</b>	26,87	73,13	1,38
<b>D. Pad.</b>	1,1	1,1	0,1
<b>CV (%)</b>	4,09	1,50	7,25

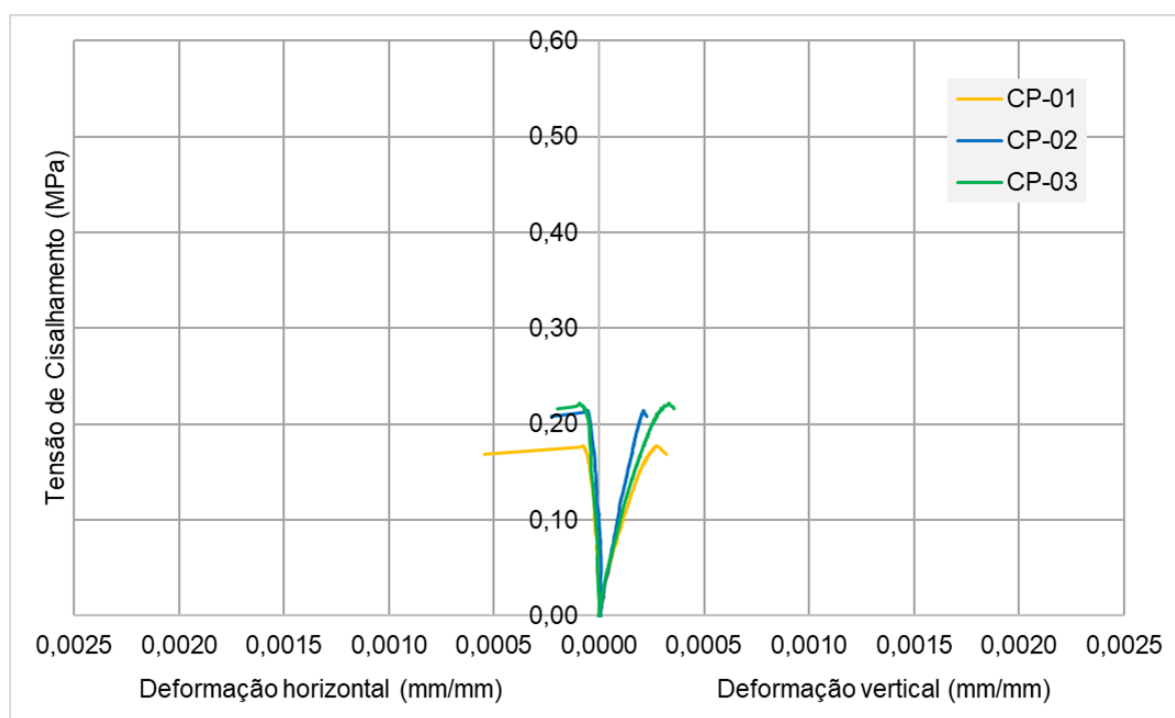
Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 54 a deformação apresentada no trecho entre 10% e 30% da tensão máxima obtida corresponde a, aproximadamente, 27% de deformação horizontal e 73% de deformação vertical.

Para o caso das deformações obtidas no ponto de tensão máxima aplicada, o coeficiente de proporcionalidade médio foi 1,38, ou seja, como esse valor ficou, relativamente, próximo de 1, é possível perceber que nesse ponto as deformações foram semelhantes, porém, ainda superiores na direção vertical em relação à horizontal.

As curvas que relacionam a tensão e deformação obtidas para os corpos de prova construídos com CPA-02b sem preenchimento da junta vertical podem ser observadas na Figura 112.

**Figura 112 - Curvas tensão-deformação no cisalhamento (CPA-02b - SJV)**



Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 112 existe uma parcela maior de deformação vertical do que deformação horizontal atuando nos corpos de prova até o ponto de tensão máxima obtida. O comprimento do trecho compreendido entre o ponto de carga máxima e o ponto de ruptura parece ser maior no sentido horizontal do que no vertical.

Para facilitar o entendimento da relação entre a deformação horizontal e vertical obtida para a amostra construída com o composto CPA-02b, sem o preenchimento da junta vertical, pode ser observado o Quadro 55.

**Quadro 55 - Resultados cisalhamento (CPA-02b - SJV)**

CP	Parcela de deformação entre 10% e 30% da tensão máxima		Coeficiente de proporcionalidade - $C_{pd}$
	Horizontal (%)	Vertical (%)	
1	30,4	69,6	3,55
2	7,5	96,7	3,96
3	7,4	92,6	3,59
<b>Média</b>	15,10	86,30	3,70
<b>D. Pad.</b>	13,25	14,61	0,23
<b>CV (%)</b>	87,75	16,93	6,22

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 55, a deformação apresentada no trecho entre 10 e 30% da tensão máxima obtida corresponde a, aproximadamente, 14% de deformação horizontal e 86% de deformação vertical. Valores semelhantes aos obtidos com o outro composto polimérico, assentados sem o preenchimento da junta vertical. Entretanto, ao observar os valores do Quadro 55 para a parcela de deformação horizontal e vertical do corpo de prova nº 01 é possível perceber que os valores de deformação são superiores aos outros dois corpos de prova. Ou seja, é possível que essa amostra do Quadro 55 apresente uma maior tendência a obter valores mais baixos de deformação horizontal no trecho considerado, do que a amostra assentada com o outro composto.

Para o caso das deformações obtidas na tensão máxima aplicada, o coeficiente de proporcionalidade médio foi 3,70, ou seja, como esse valor ficou mais afastado de 1 do que todas as outras amostras, é possível perceber que nesse ponto as deformações foram bem superiores na direção vertical em relação à horizontal.

Ao se comparar a parcela de deformação horizontal obtida para a amostra sem preenchimento da junta vertical (aprox. 14%) com a parcela de deformação horizontal apresentado pela amostra construída com o mesmo composto polimérico, porém, com o preenchimento da junta vertical (aprox. 27%), é possível inferir que a presença da junta vertical proporciona, aproximadamente, o dobro da parcela horizontal de deformação no trecho considerado. Resultado semelhante ao obtido com o outro composto polimérico.

Ao se comparar o coeficiente de proporcionalidade obtido pelas amostras construídas com o composto CPA-02b com e sem o preenchimento da junta vertical, é possível verificar que a parcela de deformação horizontal no ponto de carga máxima passa de um valor semelhante ao vertical com coeficiente de 1,38 para um coeficiente de 3,70, indicando



aumento expressivo de deformação vertical observado nesse ponto para amostra sem preenchimento da junta vertical.

## **4.3 RESULTADOS DA TERCEIRA ETAPA – ESTUDO COMPRESSÃO**

Nessa etapa serão apresentados os resultados dos ensaios de compressão realizados em prismas, pequenas paredes e paredes, para as diferentes combinações de blocos e compostos poliméricos utilizados na pesquisa.

### **4.3.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO EM PRISMAS**

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados em amostras de prismas construídos com cada combinação de tipos de bloco e composto polimérico serão apresentados na sequência.

Os valores médios e individuais da resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos nos ensaios são apresentados em quadros. Cada quadro possui os resultados obtidos por duas amostras construídas com o mesmo tipo de bloco, com cada composto polimérico.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados com as duas amostras de prismas construídas com o bloco tipo B4, com cada um dos compostos poliméricos, podem ser observadas no Quadro 56.

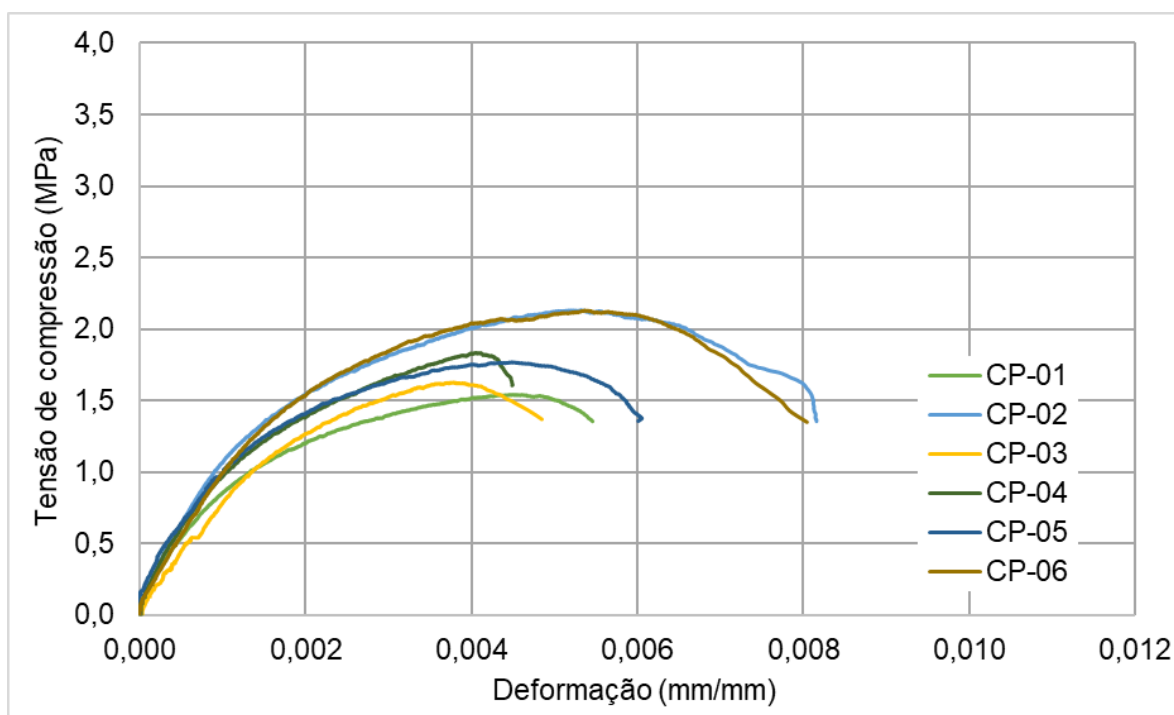
**Quadro 56 - Resistência à compressão de prismas construídos com bloco tipo B4**

CP	CPA-01			CPA-02a		
	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)
1	62,57	1,54	0,88	121,09	2,98	1,43
2	86,58	2,13	1,06	115,44	2,84	1,65
3	66,04	1,63	1,03	104,67	2,58	1,44
4	74,47	1,83	0,89	141,88	3,49	1,95
5	71,81	1,77	0,89	97,32	2,40	1,53
6	86,49	2,13	0,95	133,88	3,30	1,75
<b>Média</b>	74,66	1,84	0,95	119,05	2,93	1,63
<b>Desvio Padrão</b>	10,11	0,25	0,08	16,95	0,42	0,20
<b>C. V. (%)</b>	13,54	13,59	8,42	14,24	14,33	12,27
<b><math>f_{pk,est}</math> (MPa)</b>	-	1,40	-	-	2,14	-

Fonte: Autor (2023).

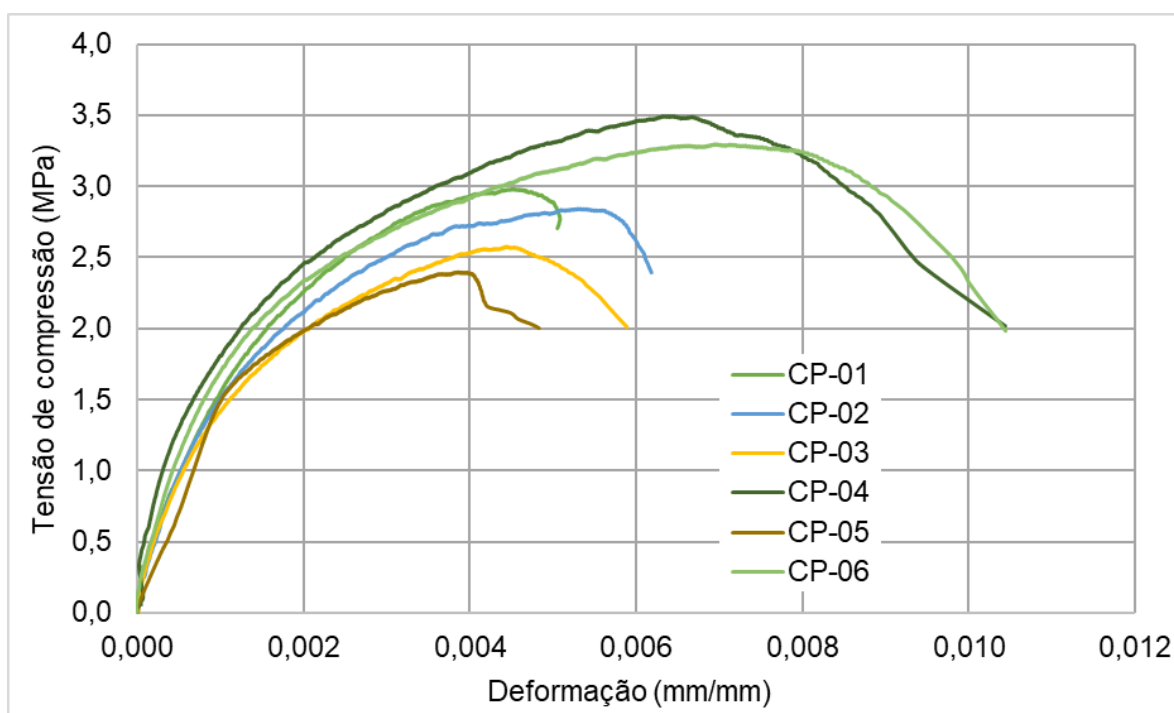
Como pode ser observado no Quadro 56, os valores médios da resistência à compressão e módulo de elasticidade apresentados pela amostra construída com o composto CPA-01 foram inferiores aos valores apresentados pelo composto CPA-02a. A redução observada para a resistência à compressão foi de, aproximadamente 37,2%, enquanto para o módulo de elasticidade foi de, aproximadamente 41,7%.

As curvas que relacionam a tensão e deformação obtidas para os corpos de prova construídos com o bloco tipo B4 e compostos CPA-01 podem ser observadas na Figura 113.

**Figura 113 – Curva tensão-deformação – Prisma (B4 – CPA-01)**

Fonte: Autor (2023).

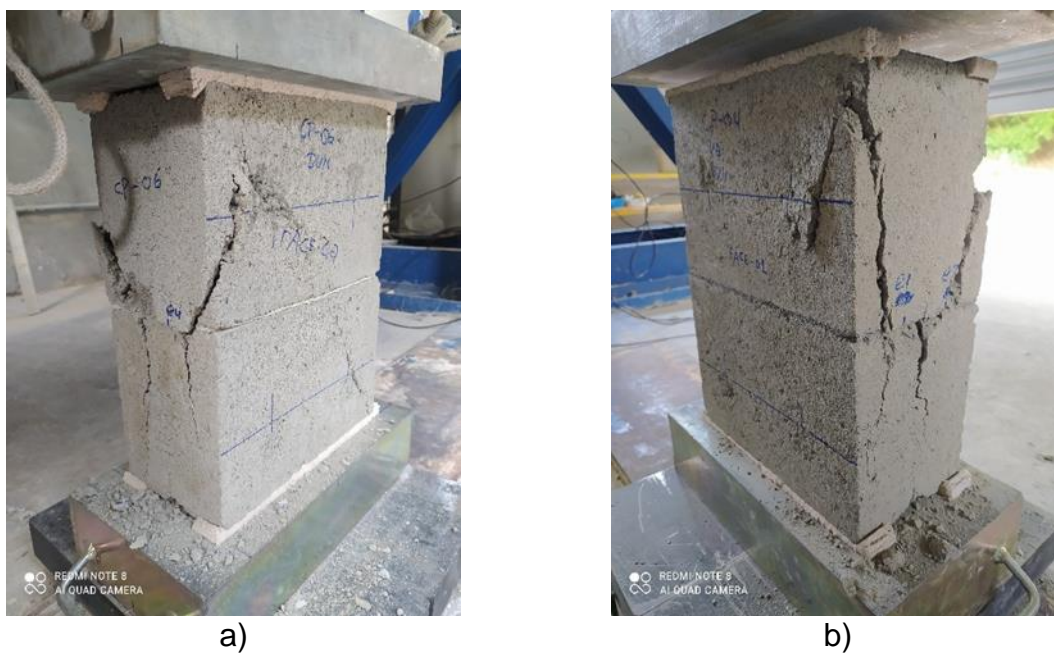
As curvas que relacionam a tensão e deformação obtidas para os corpos de prova construídos com bloco tipo B4 e composto CPA-02a podem ser observadas na Figura 114.

**Figura 114 – Curva tensão-deformação – Prisma (B4 – CPA-02a)**

Fonte: Autor (2023).

Exemplos de ruptura identificados para as amostras construídas com o bloco tipo B4 podem ser observados na Figura 115-a e Figura 115-b, respectivamente, para os prismas construídos com o composto CPA-01 e CPA-02a.

**Figura 115 - Exemplo de ruptura observado para os prismas construídos com bloco B4**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) assentamento com CPA-01; b) assentamento com CPA-02a.

Os resultados do ensaio de compressão realizados em amostras de prismas construídos com o bloco tipo B10 podem ser observados no Quadro 57, para cada um dos compostos poliméricos utilizados no assentamento.

**Quadro 57 - Resistência à compressão de prismas construídos com bloco tipo B10**

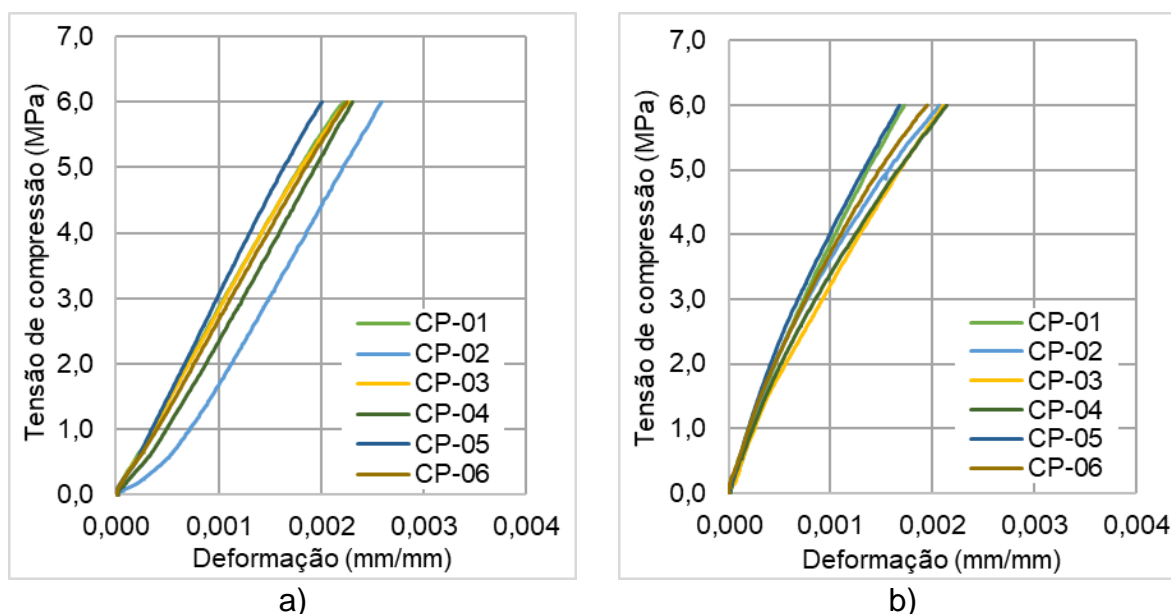
CP	CPA-01			CPA-02a		
	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)
1	296,26	7,30	2,83	377,53	9,30	3,53
2	342,62	8,44	2,67	288,26	7,10	3,69
3	285,08	7,02	2,81	349,70	8,61	2,79
4	336,60	8,29	2,76	307,23	7,57	3,14
5	306,36	7,55	3,09	354,71	8,74	3,96
6	317,96	7,83	2,75	312,88	7,71	3,35
<b>Média</b>	314,15	7,74	2,82	331,72	8,17	3,41
<b>Desvio Padrão</b>	22,60	0,56	0,14	34,04	0,84	0,41
<b>C. V. (%)</b>	7,19	7,24	4,96	10,26	10,28	12,02
<b><math>f_{pk,est}</math> (MPa)</b>	-	6,77	-	-	6,96	-

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 57, os valores médios da resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos pelas amostras assentadas com o bloco tipo B10 e cada um dos compostos poliméricos foram semelhantes. A redução observada para a amostra assentada com o composto CPA-01 foi de, aproximadamente, 5,3% para resistência à compressão e, aproximadamente, 17,3% para o módulo de elasticidade.

As curvas que relacionam a tensão e deformação obtidas para os prismas construídos com bloco tipo B10 podem ser observadas na Figura 116-a e Figura 116-b, respectivamente, para a amostra construída com o composto CPA-01 e CPA-02a.

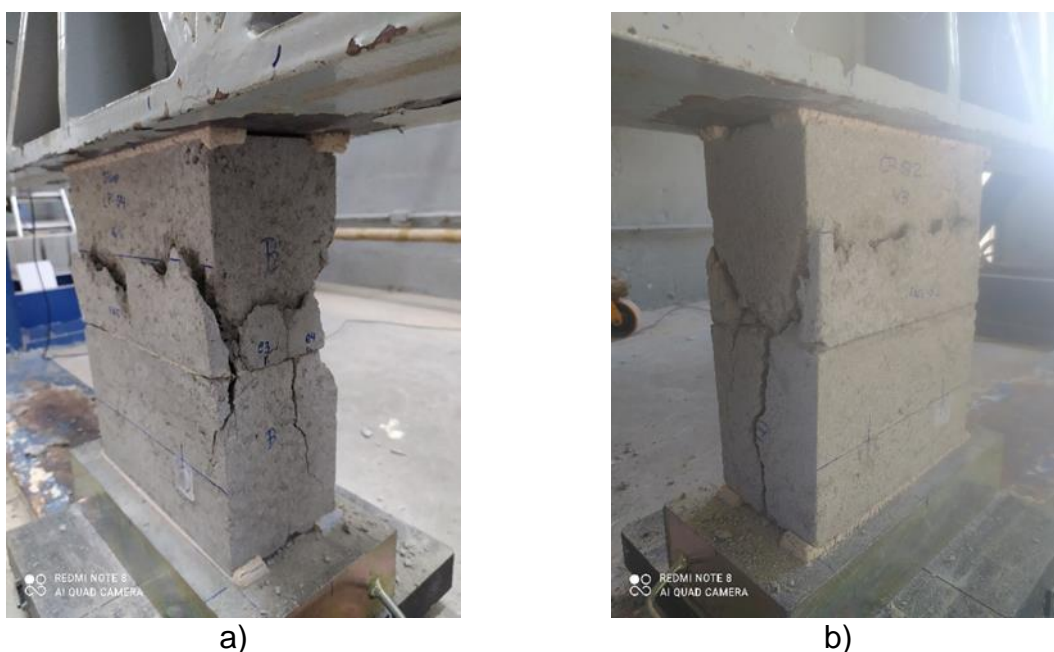
**Figura 116 - Curva tensão-deformação - prismas construídos com bloco B10**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) assentamento com CPA-01; b) assentamento com CPA-02a.

Exemplos de rupturas identificados para as amostras construídas com o bloco tipo B10 podem ser observados nas Figura 117-a e Figura 117-b, respectivamente, para corpos de prova construídos com CPA-01 e CPA-02a.

**Figura 117 - Exemplos de ruptura de prismas construídos com bloco B10**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) assentamento com CPA-01; b) assentamento com CPA-02a.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão realizados nas duas amostras de prismas construídos com o bloco tipo B20, com cada um dos compostos poliméricos, podem ser observados no Quadro 58.

**Quadro 58 - Resistência à compressão de prismas construídos com bloco tipo B20**

CP	CPA-01			CPA-02a		
	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)
1	418,93	10,32	2,99	509,73	12,56	3,44
2	410,48	10,11	2,43	468,59	11,54	3,71
3	404,38	9,96	2,87	511,57	12,60	3,34
4	482,61	11,89	3,34	486,39	11,98	4,16
5	401,81	9,90	2,96	526,22	12,96	3,90
6	419,15	10,32	3,35	592,63	14,60	4,39
<b>Média</b>	422,89	10,42	2,99	515,86	12,71	3,82
<b>Desvio Padrão</b>	30,12	0,74	0,34	42,80	1,06	0,41
<b>C. V. (%)</b>	7,12	7,10	11,37	8,30	8,34	10,73
<b><math>f_{pk,est}</math> (MPa)</b>	-	9,75	-	-	10,96	-

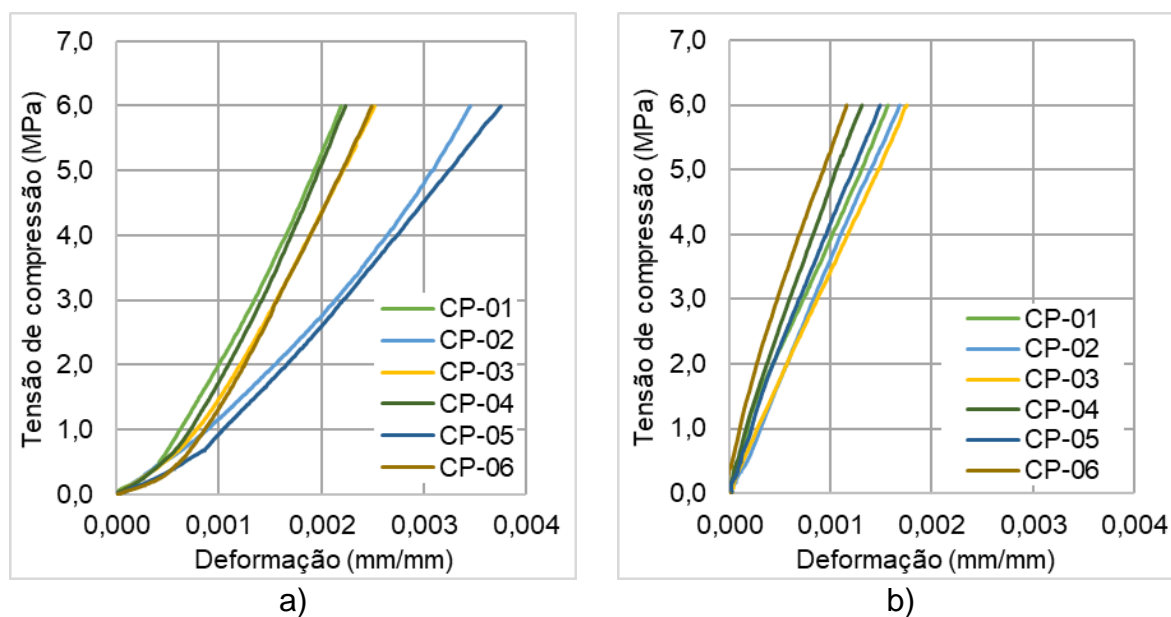
Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 58, os valores médios da resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos para a amostra construída com o composto CPA-01, foram inferiores aos obtido para o composto CPA-02a, para o uso do bloco tipo B20. A redução foi de, aproximadamente, 18,0% para a resistência à compressão e 21,7% para o módulo de elasticidade.

As curvas que relacionam a tensão e deformação obtida para os prismas construídos com bloco tipo B20 podem ser observadas na Figura 118-a e Figura 118-b, respectivamente, para as amostras construídas com o composto CPA-01 e CPA-02.



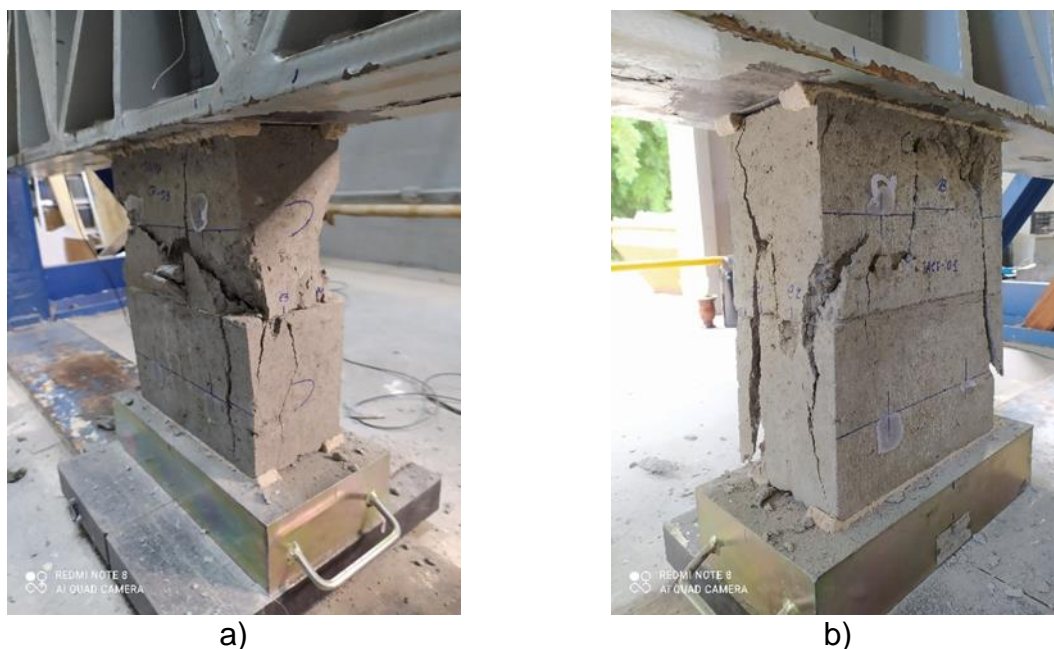
**Figura 118 - Curva tensão-deformação - prismas construídos com bloco B20**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) assentamento com CPA-01; b) assentamento com CPA-02a.

Exemplos de ruptura identificados para as amostras construídas com o bloco tipo B20 podem ser observados na Figura 119-a e Figura 119-b, respectivamente, para prismas assentados com CPA-01 e CPA-02a.

**Figura 119 - Exemplo de ruptura observada para os prismas construídos com bloco B20**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) assentamento com CPA-01; b) assentamento com CPA-02a.

Para avaliar se o tipo de bloco e o tipo de composto polimérico apresentam influência significativa na resistência à compressão dos prismas, foi realizada a análise de variância



(ANOVA) com dois fatores, para um nível de confiança de 95%. Essa análise identificou que existem diferenças significativas entre os tipos de blocos, tipos de compostos e na interação entre blocos e compostos utilizados.

Para comparar diretamente a diferença entre as médias dos resultados dos ensaios de resistência à compressão de prismas foi realizado o teste Tukey, com nível de confiança de 95%. Dessa forma, é possível verificar no Quadro 59, quais médias foram consideradas equivalentes, pois possuem a mesma letra, enquanto as médias consideradas diferentes possuem letras diferentes.

**Quadro 59 - Grupamento de letras - diferença de médias (Tukey)**

Fator considerado	Composto polimérico	Bloco de concreto	Média (MPa)	Grupos			
Tipo de composto	CPA-02a	-	7,94	A	-	-	-
	CPA-01		6,66	-	B	-	-
Tipo de Bloco	-	B20	11,56	C	-	-	-
		B10	7,96	-	D	-	-
		B4	2,39	-	-	E	-
Interação (bloco/composto)	CPA-02a	B20	12,7	F	-	-	-
	CPA-01	B20	10,42	-	G	-	-
	CPA-02a	B10	8,17	-	-	H	-
	CPA-01	B10	7,74	-	-	H	-
	CPA-02a	B4	2,93	-	-	-	I
	CPA-01	B4	1,84	-	-	-	I

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 59, para o tipo de composto polimérico a diferença entre a média produzida por cada tipo de composto é significativa, pois possui duas letras diferentes no grupo. Para o tipo de bloco utilizado a diferença entre as 3 médias é significativa, pois possuem letras diferentes. Considerando a interação entre cada tipo de bloco e composto polimérico, é possível perceber que os resultados produzidos pelas amostras construídas com o bloco B10 utilizando o composto CPA-01 e CPA-02a são considerados equivalentes, pois possuem a mesma letra no agrupamento. O mesmo pode ser dito da comparação das médias de resistência à compressão dos prismas produzidos com o bloco B4 e cada um dos compostos poliméricos.

Para avaliar se o tipo de bloco e o tipo de composto polimérico apresentam influência significativa no resultado de módulo de elasticidade dos prismas, foi realizada a análise de variância (ANOVA) com dois fatores, para um nível de confiança de 95%. Essa análise

identificou que existem diferenças significativas entre os tipos de blocos, tipos de compostos e na interação entre blocos e compostos utilizados.

Para comparar de maneira específica a diferença entre as diferentes médias foi empregado o teste Tukey, com 95% de confiança. Os resultados são demonstrados no Quadro 60.

**Quadro 60 - Grupamento de letras - diferença de médias (Tukey)**

Fator considerado	Composto polimérico	Bloco de concreto	Média (MPa)	Grupos				
Tipo de composto	CPA-02a	-	2,95	A		-	-	-
	CPA-01		2,25		B	-	-	-
Tipo de Bloco	-	B20	3,41	C	-	-	-	-
		B10	3,11	C	-	-	-	-
		B4	1,29	-	D	-	-	-
Interação (bloco/composto)	CPA-02a	B20	3,82	E	-	-	-	-
	CPA-02a	B10	3,41	E	F	-	-	-
	CPA-01	B20	2,99	-	F	G	-	-
	CPA-01	B10	2,82	-	-	G	-	-
	CPA-02a	B4	1,63	-	-	-	H	-
	CPA-01	B4	0,95	-	-	-	-	I

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 60, o tipo de composto polimérico utilizado apresenta diferença significativa nos resultados. Para o caso do tipo de bloco utilizado existe diferença significativa entre os resultados nas médias obtidas com o bloco tipo B4 com relação ao bloco B10 e B20, contudo, não é considerada significativa a diferença produzida pelos blocos tipo B10 e B20. Para o caso da interação entre cada tipo de bloco e composto nos resultados, é possível verificar que os resultados obtidos entre as amostras construídas com o composto CPA-02a com o bloco B10 e B20 não apresentaram diferença significativa no valor do módulo de elasticidade. Também não foi observada diferença significativa entre os resultados obtidos por esses dois tipos de bloco com o composto CPA-01. Os resultados obtidos pelo bloco B10 com CPA-02a e pelo bloco B20 e CPA-01, também são considerados equivalentes. Os resultados obtidos entre as amostras construídas com o bloco B4 e cada um dos compostos são considerados diferentes. Os resultados obtidos entre as amostras construídas com o bloco B20 e cada um dos compostos poliméricos são considerados diferentes.

A relação entre a resistência à compressão dos prismas e dos blocos pode ser observada no Quadro 61.

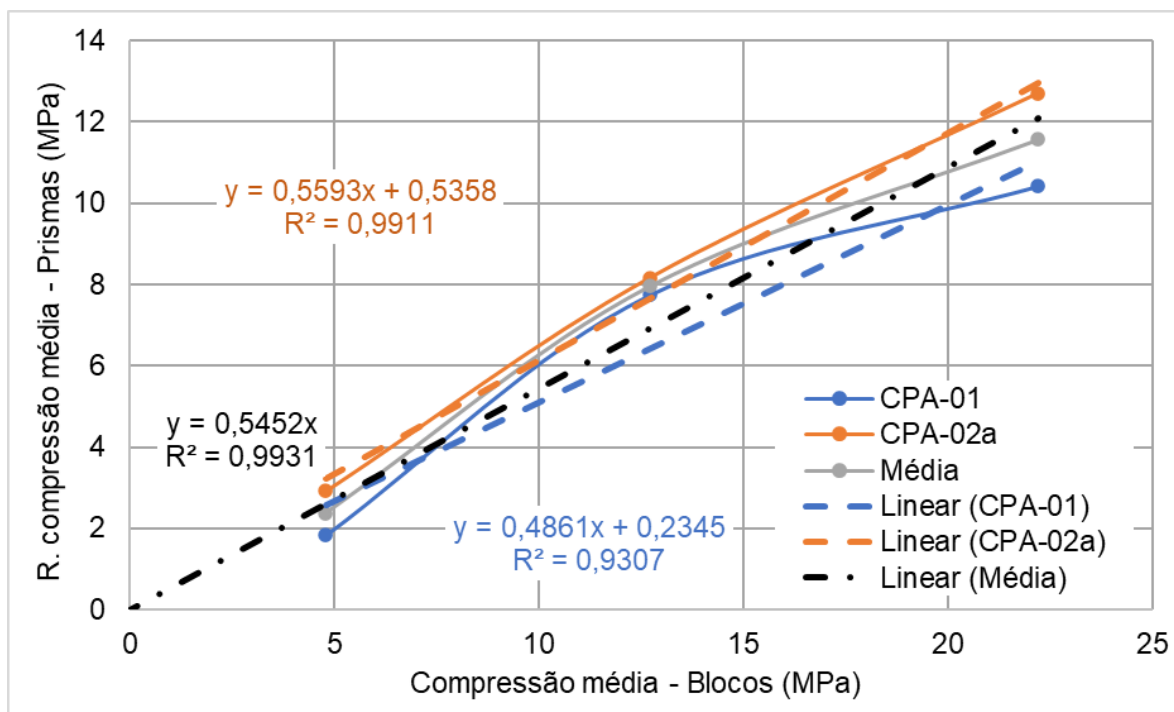
**Quadro 61 - Relação da resistência de prismas e blocos**

Relação	B4		B10		B20	
	CPA-01	CPA-02a	CPA-01	CPA-02a	CPA-01	CPA-02a
$f_{pm}/f_{bm}$	0,38	0,61	0,61	0,64	0,47	0,57
$f_{pk}/f_{bk}$	0,32	0,49	0,68	0,70	0,47	0,52

Fonte: Autor (2023). Legenda:  $f_{bm}$  – resistência média à compressão da amostra de bloco;  $f_{pm}$  resistência média à compressão da amostra de prisma;  $f_{bk}$  – resistência característica à compressão da amostra de bloco;  $f_{pk}$  – resistência característica à compressão da amostra de prisma.

As curvas que relacionam a resistência à compressão média das amostras de prismas, em função da resistência média à compressão dos blocos de concreto podem ser observadas na Figura 120. Nela é apresentada uma curva considerando a resistência à compressão média dos prismas construídos com cada composto polimérico e, também, uma curva com o valor médio dos dois compostos poliméricos. A linha de tendência também é apresentada para cada curva.

**Figura 120 - Relação entre resistência à compressão de prismas e blocos**



Fonte: ABNT NBR 16868-1 (2020).

Como pode ser observado na Figura 120, a linha de tendência referente a média das duas amostras (linha de cor preta), consegue descrever de maneira precisa ( $R^2 \approx 0,993$ ) o

aumento da resistência média à compressão observada nos prismas, em função da resistência à compressão média dos blocos de concreto. O coeficiente angular da reta formada foi de aproximadamente, 0,55, indicando que a resistência à compressão dos prismas é de aproximadamente 55% da resistência à compressão dos blocos utilizados em sua construção.

O valor dessa relação é inferior ao observado para a alvenaria convencional. Um motivo para esse resultado pode estar relacionado ao módulo de elasticidade mais baixo observado para os compostos poliméricos, que implica em maiores deformações do material na junta de assentamento, podendo provocar incrementos nos esforços de tração atuantes nas paredes do bloco, como demonstrado na Figura 6-b. Além disso, o fato de os compostos poliméricos terem sido aplicados somente sobre as paredes longitudinais dos blocos, sem aplicação nas paredes transversais, pode contribuir para redução da resistência à compressão obtida nos ensaios de prisma. Até mesmo para alvenaria convencional pode ser observada a redução na resistência à compressão de prismas e pequenas paredes quando se compara o argamassamento parcial (somente nas paredes longitudinais dos blocos) em relação ao argamassamento total. Izquierdo (2011), observou redução média da resistência à compressão de 36% e 14%, respectivamente, para prismas e mini-paredes, quando se compara o uso de argamassamento parcial e argamassamento total dos blocos de concreto. A autora observou reduções na relação entre a resistência média à compressão de prismas e blocos quando assentados com argamassamento total e parcial. Essa redução foi de 0,70 para 0,47 para blocos de 11,16 MPa de resistência a compressão média e, de 0,78 para 0,48 para blocos com resistência à compressão média de 7,48 MPa.

Lima et al. (2021) realizou ensaios de compressão em amostras de prismas de blocos de concreto com resistência à compressão de 6,01 MPa, assentados com dois tipos de argamassa cimentícia convencional com 8,93 e 5,72 MPa de resistência à compressão. O assentamento utilizado foi parcial, somente nas paredes longitudinais do bloco. A resistência à compressão obtida para o prisma de 3,91 MPa para a argamassa de maior resistência à compressão e 2,98 MPa para o prisma de menor resistência à compressão, o que corresponde a uma relação prisma/blocos de respectivamente, 0,65 e 0,50. Nesse caso os autores observaram que o aumento de 36% na resistência à compressão da argamassa de assentamento proporcionou um aumento de 24% na resistência à compressão do prisma. Para o caso dos compostos poliméricos não foi observada tendência de aumento da resistência à compressão do prisma com o aumento da resistência à compressão do composto polimérico, pois o composto CPA-02a que apresentou valores inferiores de resistência à compressão em relação a CPA-01, proporcionou valores maiores de resistência à compressão média nos prismas. Talvez outras propriedades dos compostos poliméricos

podem influenciar nos resultados obtidos. Curiosamente, a resistência à tração na flexão observada nas amostras de prismas assentadas com o composto CPA-01 também foi mais baixa, indicando que existe uma menor aderência entre os blocos e esse composto polimérico, o que pode estar relacionado com esses resultados. Mas essa influência deve ser avaliada em mais estudos.

### 4.3.2

#### **RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO EM PEQUENAS PAREDES**

Os resultados dos ensaios para determinação da resistência à compressão das pequenas paredes são apresentados na sequência. Esses ensaios foram realizados para cada combinação de tipo de bloco e composto polimérico.

Os valores médios e individuais da resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos para cada amostra foram apresentados em quadros. Cada quadro contém os resultados das duas amostras construídas com um mesmo tipo de bloco e cada um dos compostos poliméricos.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos para as amostras de pequenas paredes construídas com o bloco tipo B4 e os dois compostos poliméricos podem ser observados no Quadro 62.

**Quadro 62 - Resistência à compressão de pequena parede construídos com bloco B4**

CP	CPA-01			CPA-02a		
	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)
1	146,74	1,80	0,84	158,58	1,94	1,23
2	146,47	1,80	1,03	133,48	1,64	0,81
3	156,74	1,92	0,98	159,90	1,96	1,05
<b>Média</b>	149,98	1,84	0,95	150,65	1,85	1,03
<b>Desvio Padrão</b>	5,85	0,07	0,10	14,89	0,18	0,21
<b>C. V. (%)</b>	3,90	3,80	10,53	9,88	9,73	20,39
<b><math>f_{pk,est}</math> (MPa)</b>	-	1,44	-	-	1,31	-

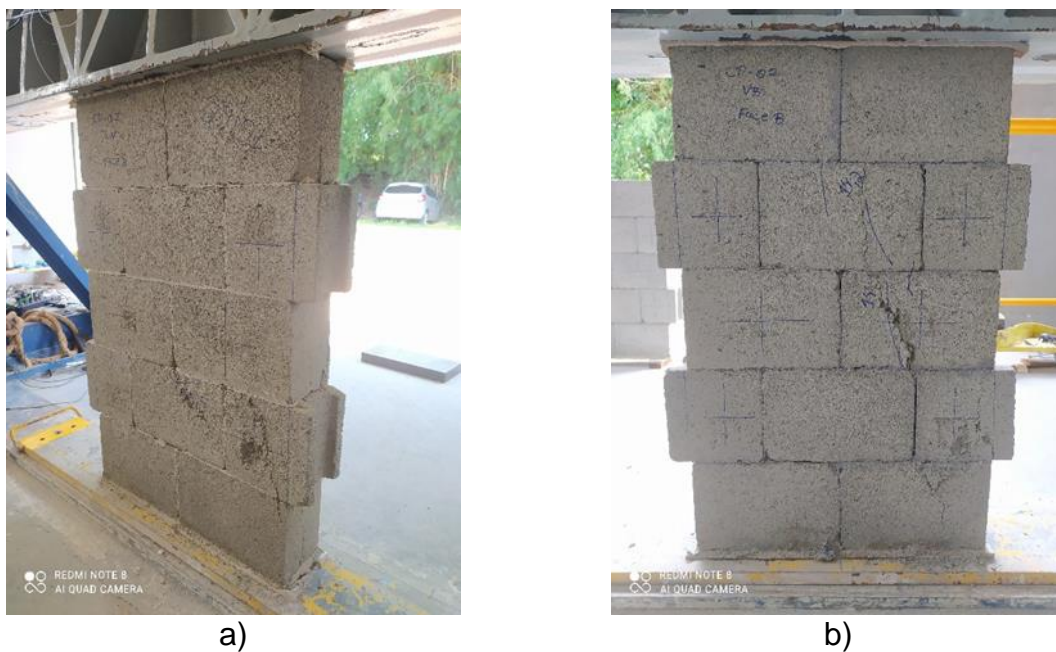
Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 62, os valores médios de resistência à compressão apresentados pelas amostras construídas com os dois compostos poliméricos foram praticamente iguais. Para o caso do módulo de elasticidade médio, a amostra

construída com o composto CPA-01 apresentou valores 7,8% inferiores aos obtidos com a amostra construída com o composto CPA-02a.

Na Figura 121-a e Figura 121-b podem ser observados, respectivamente, exemplos de ruptura obtidos para paredes construídas com o composto CPA-01 e CPA-02a, utilizando o bloco tipo B4.

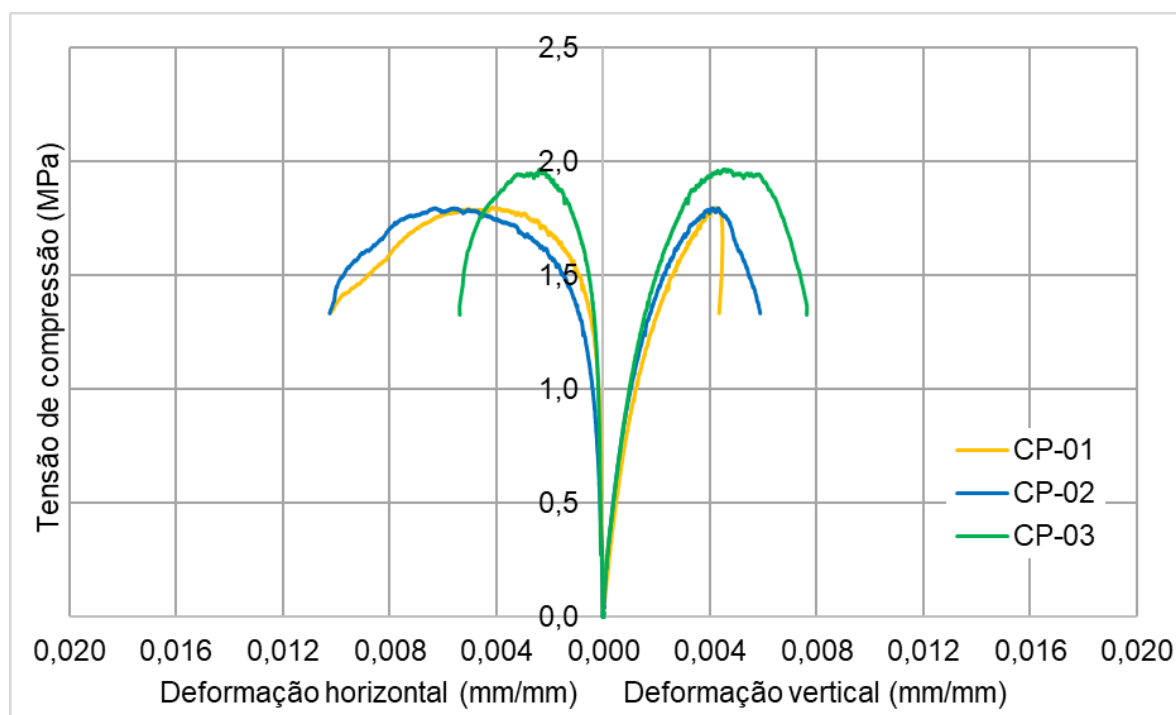
**Figura 121 - Exemplo de ruptura de pequenas paredes construídas com o bloco tipo B4**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) assentamento com CPA-01; b) assentamento com CPA-02a.

Como a forma de ruptura observada para as duas amostras construídas com o bloco tipo B4 ocorreu de forma mais lenta, com a formação de fissuras, foi possível obter os dados de deformação, até para cargas posteriores à carga máxima obtida durante o ensaio. Para o caso dos demais blocos foram obtidos dados de deformação apenas até, aproximadamente, 50% da carga de ruptura estimada, para evitar danos aos equipamentos com a ruptura.

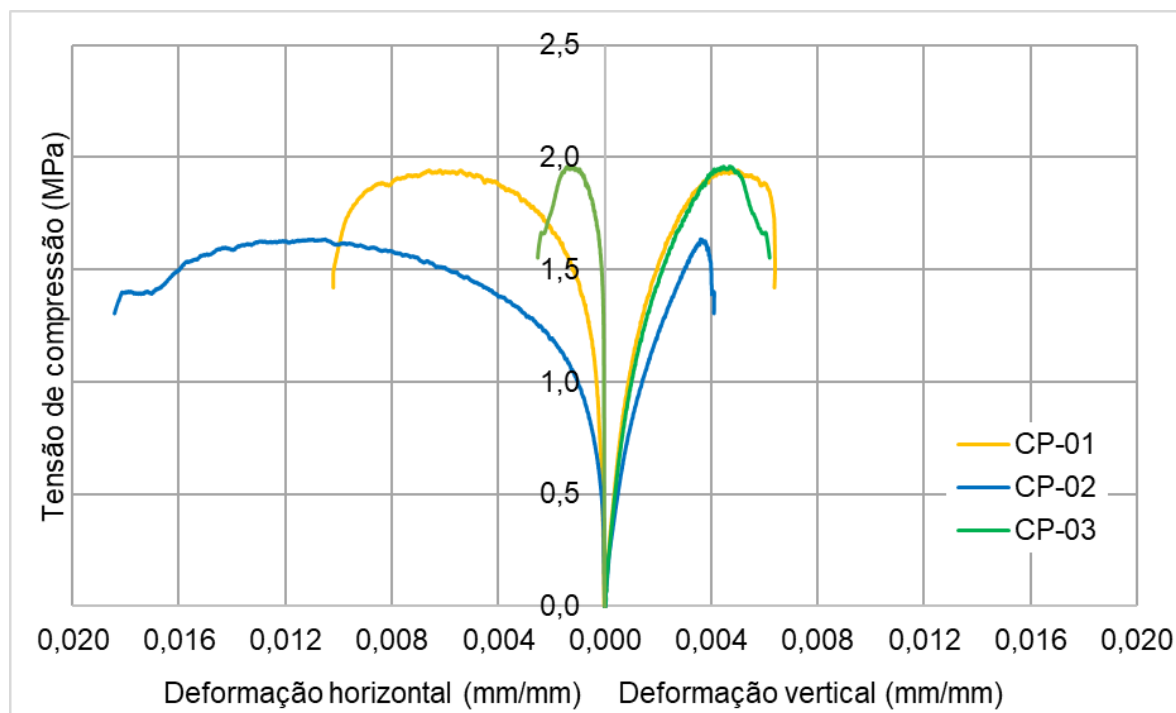
As curvas que relacionam a tensão e deformação obtidas para a amostra de pequenas paredes construída com o bloco tipo B4 com o composto CPA-01 podem ser observadas na Figura 122.

**Figura 122 - Curvas tensão-deformação - Pequena Parede (B4 - CPA-01)**

Fonte: Autor (2023).

As curvas que relacionam a tensão e deformação obtidas para a amostra de pequenas paredes construídas com o bloco tipo B4 com o composto CPA-02a podem ser observadas na Figura 123.

**Figura 123 - Curvas tensão-deformação - Pequena Parede (B4 - CPA-02a)**



Fonte: Autor (2023).

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão das pequenas paredes construídas com o bloco tipo B10 e os dois compostos polimérico podem ser observados no Quadro 63.

**Quadro 63 - Resistência à compressão de pequena parede construídos com bloco B10**

CP	CPA-01			CPA-02a		
	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)
1	427,66	5,25	1,63	561,61	6,89	3,41
2	480,89	5,90	1,50	525,47	6,44	2,21
3	505,21	6,20	2,17	499,65	6,13	2,85
<b>Média</b>	471,25	5,78	1,77	528,91	6,49	2,82
<b>Desvio Padrão</b>	39,66	0,49	0,36	31,12	0,38	0,60
<b>C. V. (%)</b>	8,42	8,48	20,34	5,88	5,86	21,28
<b>f<sub>pk,est</sub> (MPa)</b>	-	4,20	-	-	4,90	-

Fonte: Autor (2023).

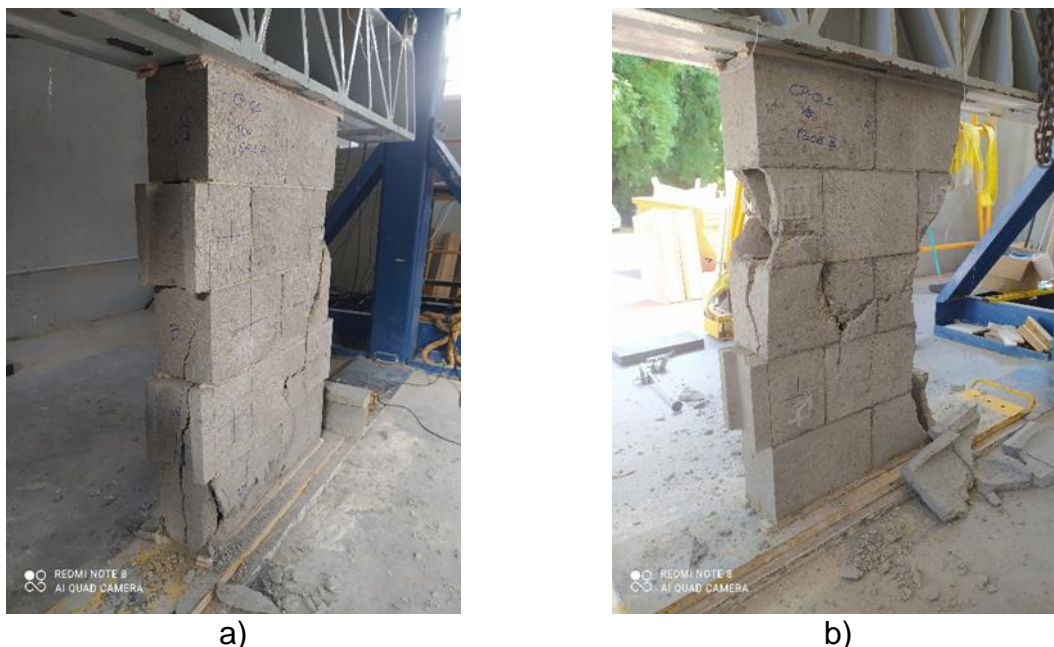
Como pode ser observado no Quadro 63, a resistência à compressão média obtida pela amostra assentada com o composto CPA-01 foi, aproximadamente, 10,9% inferior à



obtida pela amostra assentada com o composto CPA-02a. O valor médio do módulo de elasticidade obtido pela amostra construída com o composto CPA-01 foi, aproximadamente, 37,2% inferior ao obtido pela amostra construída com a utilização do composto CPA-02a.

Na Figura 124-a e Figura 124-b podem ser observados, respectivamente, exemplos de ruptura obtidos para paredes construídas com o composto CPA-01 e CPA-02a, utilizando o bloco tipo B10. Como pode ser verificado nessas figuras foi observada a formação de fissuras em toda a largura das pequenas paredes. Inclusive nas laterais das pequenas paredes foi observada a formação de fissuras verticais em alguns pontos. A formação dessas fissuras verticais na lateral das pequenas paredes pode estar ligada ao fato de o assentamento ter sido realizado com a aplicação de composto polimérico somente sobre as paredes longitudinais dos blocos. Izquierdo (2011), também identificou a maior tendência de formação de fissuras nas laterais das mini-paredes de alvenaria convencional de blocos de concreto assentados com argamassa cimentícia, quando a forma de assentamento é parcial, somente nas paredes longitudinais dos blocos. Donadello (2023) e Andrade (2019), também observaram sinais de ruptura nas laterais das paredes de blocos cerâmicos vazados assentados com 4 filetes de compostos poliméricos, aplicados somente no sentido longitudinal dos blocos.

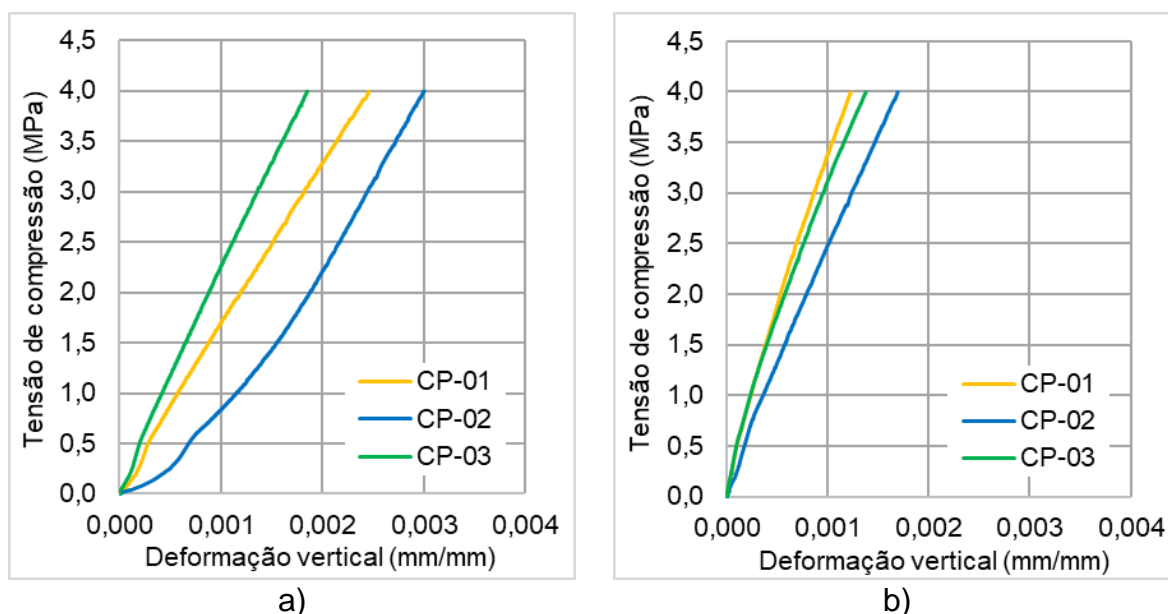
**Figura 124 - Exemplos de ruptura de pequenas paredes construídas com bloco B10**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) assentamento com CPA-01; b) assentamento com CPA-02a.

As curvas que relacionam a tensão e deformação obtidas para a amostra de pequenas paredes construídas com o bloco tipo B10 podem ser observadas nas Figura 125-a e Figura 125-b, respectivamente, para o composto CPA-01 e CPA-02a.

**Figura 125 - Curvas tensão-deformação - Pequena Parede (B10)**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) assentamento com CPA-01; b) assentamento com CPA-02a.

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão das pequenas paredes construídas com o bloco tipo B20 e cada um dos dois compostos poliméricos podem ser observados no Quadro 64.

**Quadro 64 - Resistência à compressão de pequena parede construídos com bloco B20**

CP	CPA-01			CPA-02a		
	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)
1	698,70	8,58	2,60	621,20	7,63	1,10
2	647,78	7,95	2,34	697,78	8,56	3,36*
3	429,42	5,27	2,59	675,95	8,30	1,70
<b>Média</b>	591,97	7,27	2,51	664,98	8,16	1,40
<b>Desvio Padrão</b>	143,05	1,76	0,15	39,45	0,48	0,42
<b>C. V. (%)</b>	24,17	24,21	5,98	5,93	5,88	30,00
<b>f<sub>pk,est</sub> (MPa)</b>	-	4,22	-	-	6,10	-

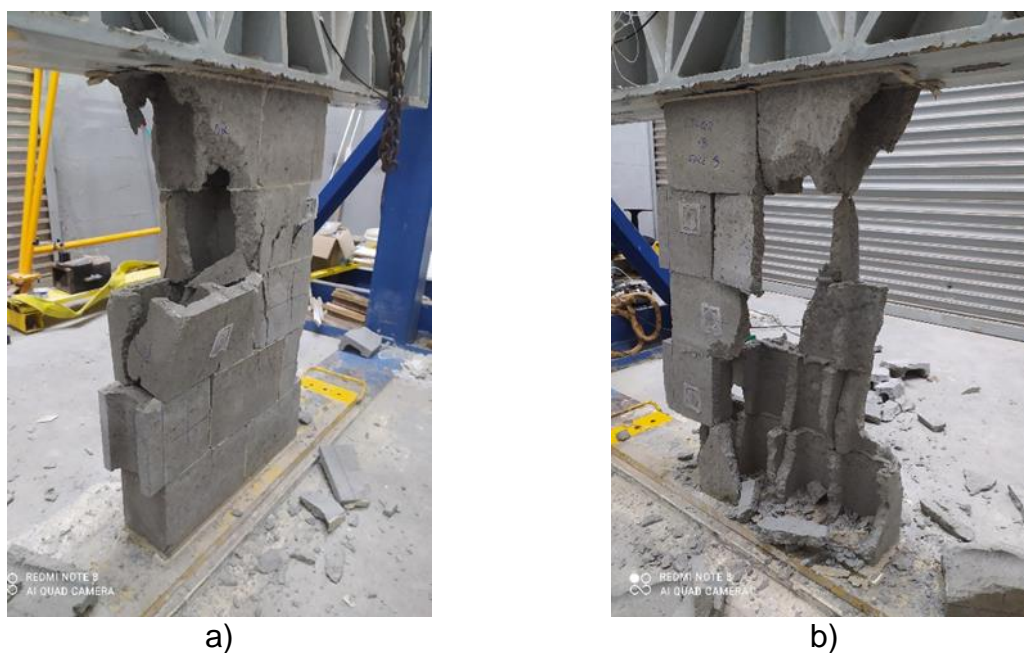
Fonte: Autor (2023). (\*) amostra desconsiderada do cálculo da média, pois foi necessário fazer um segundo carregamento.

Como pode ser observado no Quadro 64, a resistência média à compressão da amostra assentada da com o composto CPA-01 foi, aproximadamente, 10,9% superior à resistência média da amostra assentada com o composto CPA-02a. O módulo de elasticidade médio

obtido para a amostra assentada com o composto CPA-02a foi, aproximadamente, 44,2% inferior ao obtido com o CPA-01.

Nas Figura 126-a e Figura 126-b podem ser observados, respectivamente, exemplos de ruptura obtidos para paredes construídas com o composto CPA-01 e CPA-02a, utilizando o bloco tipo B20. As duas amostras apresentaram a tendência de romper de forma brusca, sendo necessário remover os instrumentos utilizados para medir deformação com aproximadamente 50% da carga estimada de ruptura. Aparentemente, as rupturas observadas para a amostra construída com o composto CPA-02a apresentaram maiores danos do que com amostra do CPA-01. Também foi observada a tendência de formação de fissuras verticais na lateral da pequena parede, na parte central do bloco, como pode ser visualizado na Figura 126-a. No caso da Figura 126-b pode ser observado grande dano na parte central dos blocos, restando, principalmente, as paredes externas dos blocos após a ruptura.

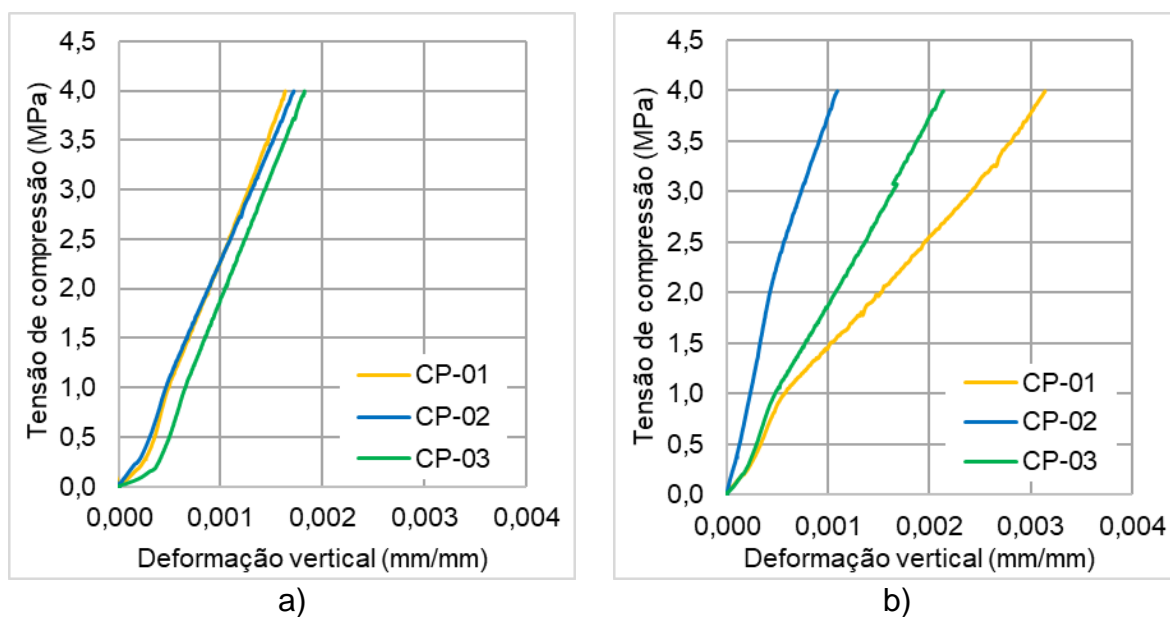
**Figura 126 - Exemplos de ruptura de pequenas paredes construídas com bloco B20**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) assentamento com CPA-01; b) assentamento com CPA-02a.

As curvas que relacionam a tensão e deformação obtidas para a amostra de pequenas paredes construídas com o bloco tipo B20 podem ser observadas nas Figura 127-a e Figura 127-b, respectivamente, para o composto CPA-01 e CPA-02a.

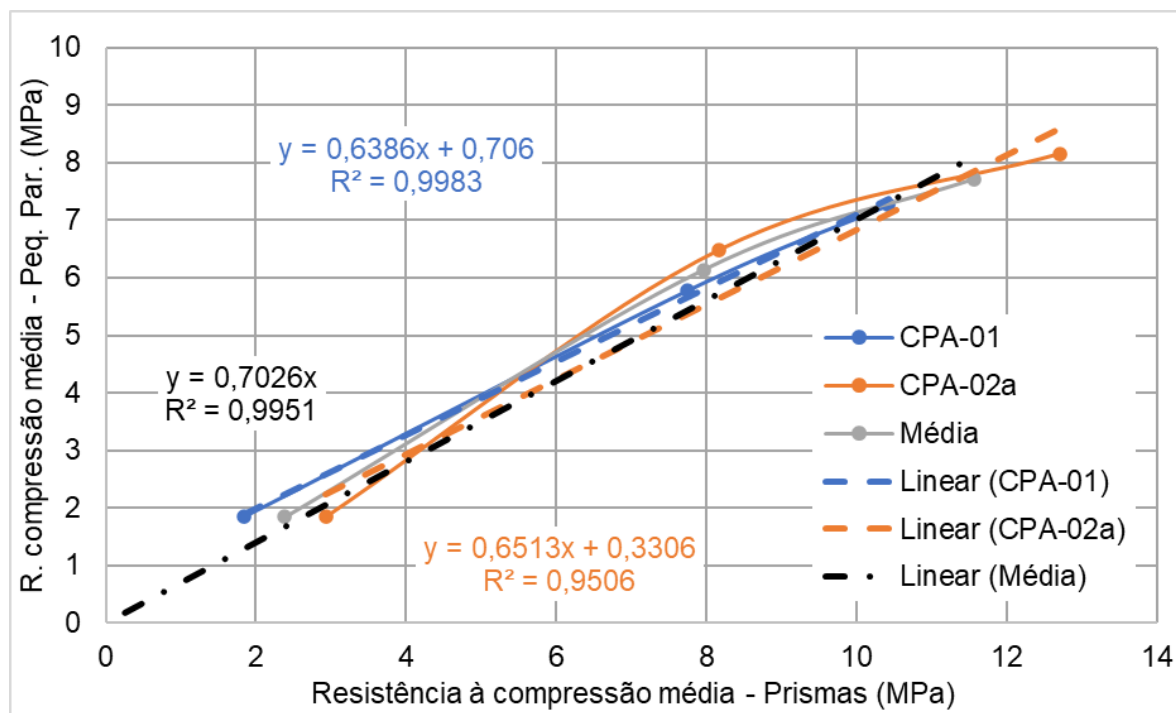
**Figura 127 - Curvas tensão-deformação - Pequena Parede (B20)**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) assentamento com CPA-01; b) assentamento com CPA-02a.

Na Figura 128 é apresentada a resistência à compressão média das pequenas paredes em função da resistência à compressão média dos prismas obtidos para as mesmas combinações de tipo de bloco e composto polimérico. É apresentada uma curva para cada composto polimérico e, também, uma curva contendo o valor médio obtido entre os dois compostos poliméricos.

**Figura 128 - Relação entre a resistência à compressão média das pequenas paredes e dos prismas**



Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 128, o coeficiente de inclinação da linha de tendência que relaciona a resistência à compressão média das pequenas paredes e dos prismas foi de, aproximadamente, 0,64 e 0,65, respectivamente, para as amostras assentadas com o composto CPA-01 e CPA-02a. Para o caso da linha de tendência que relaciona o valor médio obtido entre os dois compostos poliméricos, é possível perceber que o coeficiente de inclinação da linha seria de, aproximadamente, 0,70. Portanto, para esse caso, a resistência à compressão da pequena parede poderia ser estimada como sendo 70% da resistência à compressão observada nos prismas.

### 4.3.3

#### COMPRESSÃO EM PAREDES

#### RESULTADOS DOS ENSAIOS DE

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados em paredes podem ser observados na sequência. Foram realizados ensaios para cada combinação de tipo de bloco e composto polimérico.

Os valores individuais e médios da resistência à compressão e módulo de elasticidade são apresentados em quadros. Cada quadro apresenta os resultados referentes a duas amostras de paredes construídas com um mesmo tipo de bloco e os dois compostos poliméricos empregados no assentamento.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão obtidos para as amostras construídas com o bloco tipo B4 e cada um dos compostos poliméricos podem ser observados no Quadro 65.

**Quadro 65 - Resistência à compressão de paredes construídas com bloco B4**

CP	CPA-01			CPA-02a		
	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)
1	266,65	1,63	0,73	303,44	1,86	1,12
2	270,90	1,66	0,90	338,18	2,07	1,29
3	278,31	1,70	0,83	352,41	2,16	1,68
<b>Média</b>	271,95	1,66	0,82	331,34	2,03	1,36
<b>Desvio Padrão</b>	5,90	0,04	0,09	25,19	0,15	0,29
<b>C. V. (%)</b>	2,17	2,41	10,98	7,60	7,39	21,32
<b><math>f_{pk,est}</math> (MPa)</b>	-	1,30	-	-	1,49	-

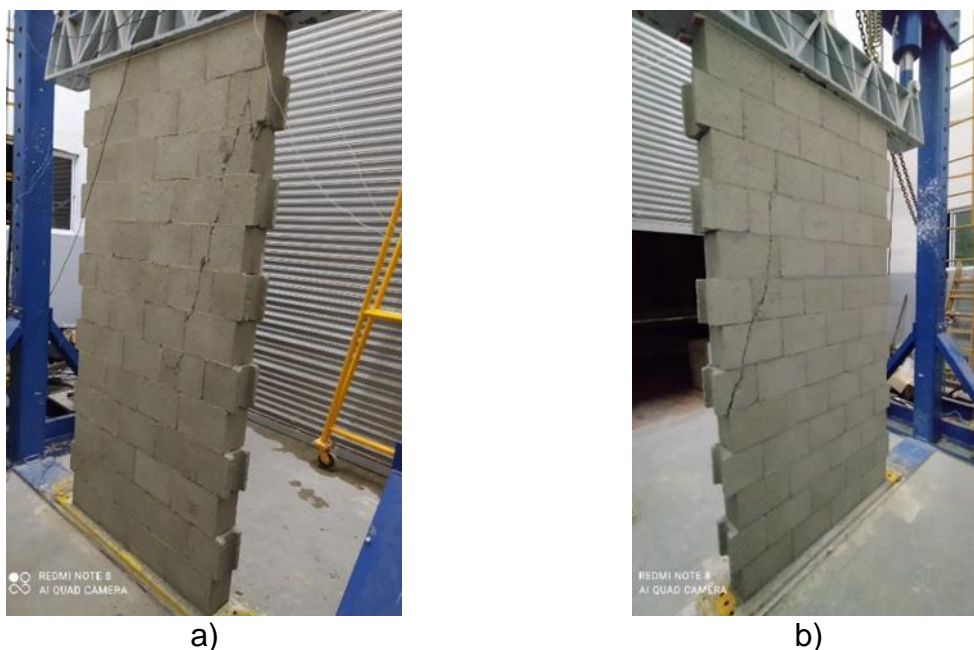
Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 65, considerando somente as paredes construídas com o bloco tipo B4, a resistência média à compressão das paredes construídas com o composto CPA-01 foi, aproximadamente, 18,2% inferior à resistência média das paredes construídas com o composto CPA-02a. O módulo de elasticidade médio da amostra construída com o composto CPA-01 foi inferior ao da amostra construída com o composto CPA-02a, em cerca de 39,7%.

Nas Figura 129-a e Figura 129-b podem ser observados, respectivamente, exemplos de ruptura obtidos para paredes construídas com o composto CPA-01 e CPA-02a, utilizando o bloco tipo B4.



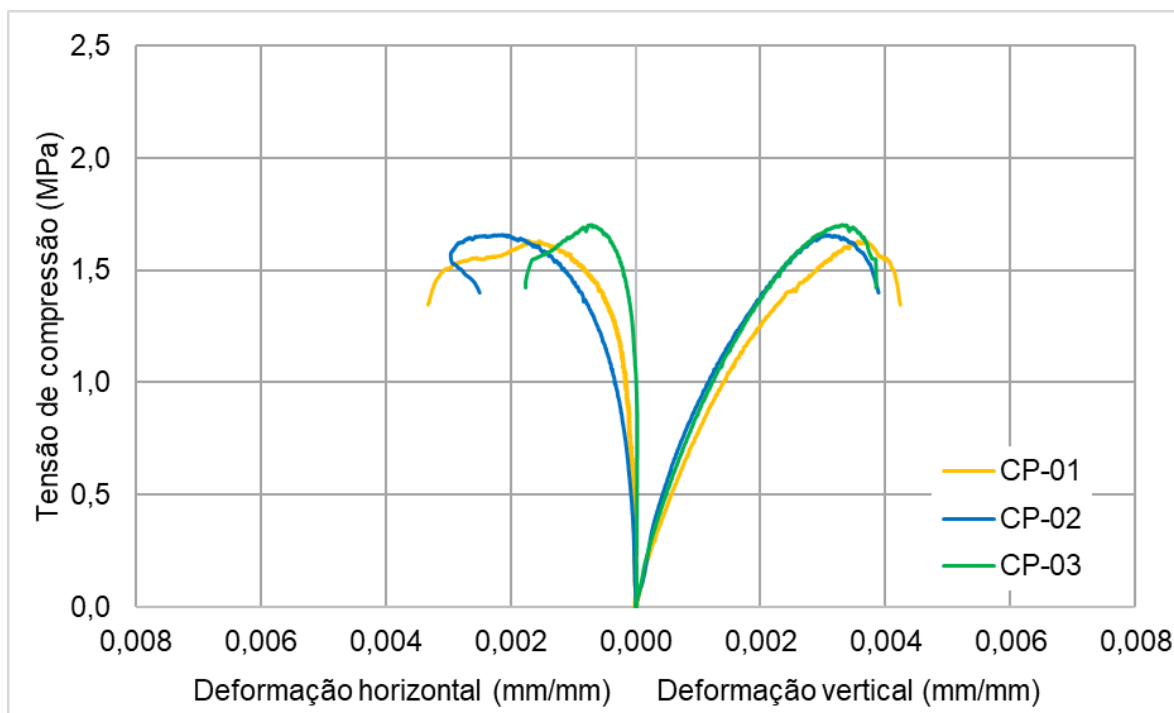
**Figura 129 - Exemplo de ruptura de paredes construídas com bloco B4**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) assentamento com CPA-01; b) assentamento com CPA-02a.

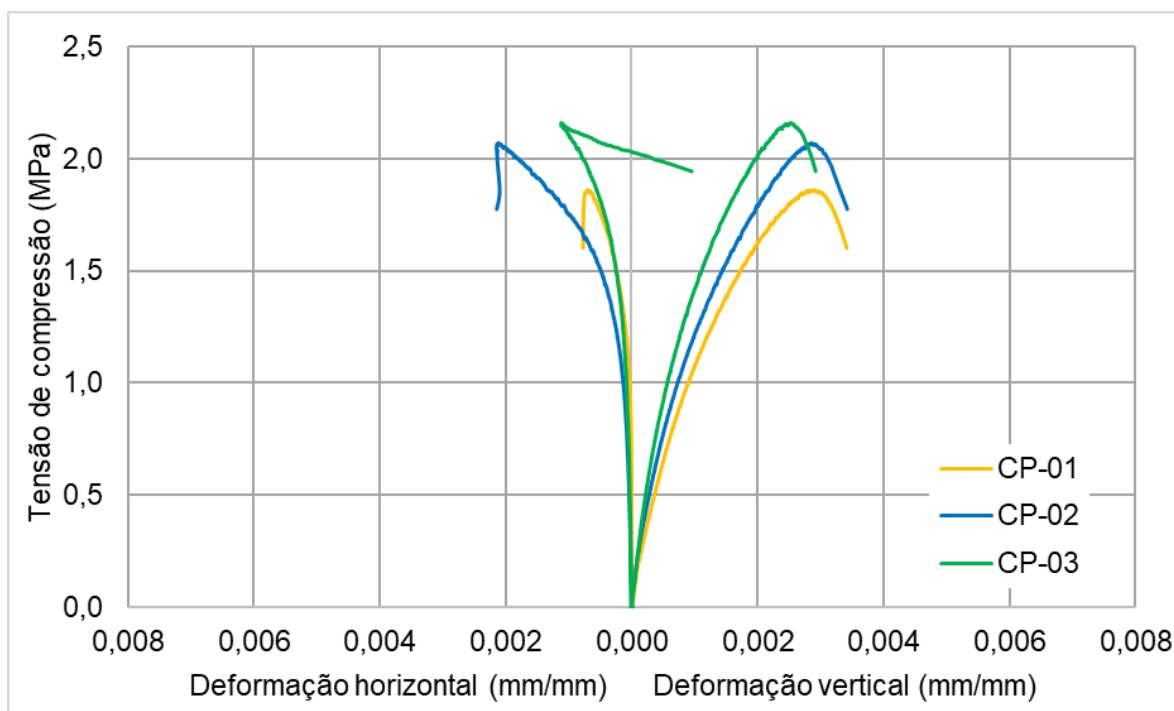
A ruptura das paredes construídas com o bloco tipo B4 ocorreu de forma mais lenta, com a formação de fissuras, possibilitando a obtenção de dados de deformação até para cargas que ultrapassaram o valor máximo atingido durante o ensaio. Foi identificada a formação de algumas fissuras em diferentes pontos das paredes, entretanto, as fissuras mais evidentes foram observadas com direção inclinada, geralmente, tendo início em algum meio bloco utilizado nas laterais da parede, indicando, possivelmente, um acúmulo de tensões localizado nesses pontos.

As curvas que relacionam a tensão e deformação obtidas para a amostra construída com o bloco B4 e composto CPA-01 podem ser observadas na Figura 130.

**Figura 130 - Curvas tensão-deformação de paredes (B4 – CPA-01)**

Fonte: Autor (2023).

As curvas que relacionam a tensão e deformação obtidas para a amostra construída com o bloco B4 e composto CPA-02a podem ser observadas na Figura 131.

**Figura 131 - Curvas tensão-deformação de paredes (B4 - CPA-02a)**

Fonte: Autor (2023).



Os resultados dos ensaios de resistência à compressão obtidos para as amostras construídas com o bloco tipo B10 e cada um dos compostos poliméricos podem ser observados no Quadro 66.

**Quadro 66 - Resistência à compressão de paredes construídas com blocos B10**

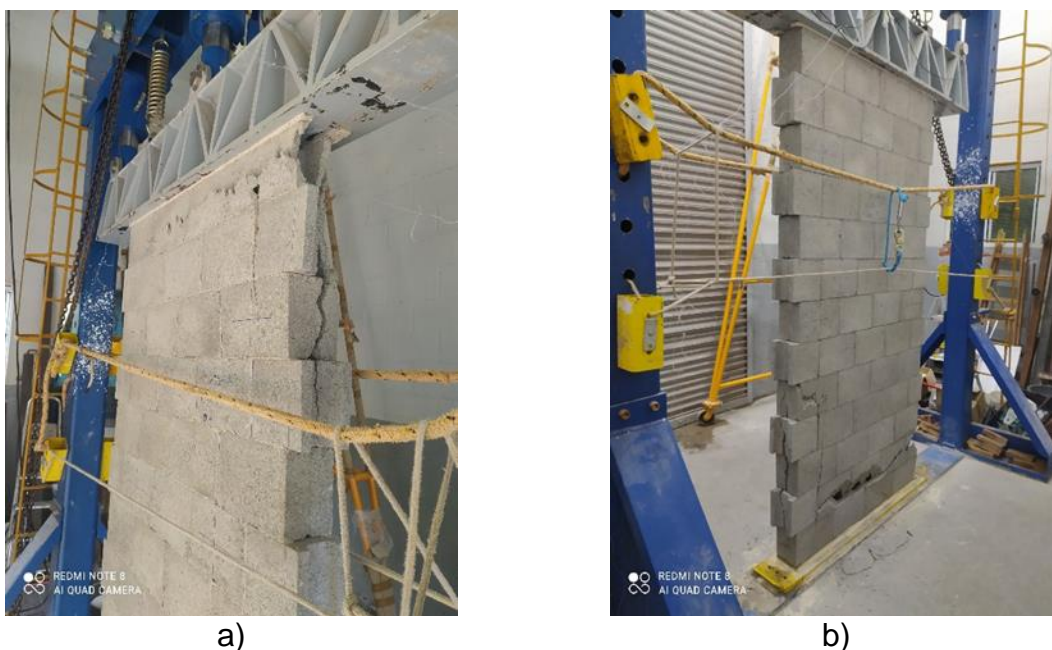
CP	CPA-01			CPA-02a		
	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)
1	772,14	4,73	2,57	779,59	4,77	2,07
2	785,99	4,81	3,96*	905,06	5,54	2,24
3	897,56	5,49	2,65	714,52	4,38	2,84
<b>Média</b>	818,56	5,01	2,61	799,72	4,90	2,38
<b>Desvio Padrão</b>	68,76	0,42	0,06	96,85	0,59	0,40
<b>C. V. (%)</b>	8,40	8,38	2,30	12,11	12,04	16,81
<b><math>f_{pk,est}</math> (MPa)</b>	-	3,78	-	-	3,50	-

Fonte: Autor (2023). (\*) Valor desconsiderado da média, pois corpo de prova passou por um segundo carregamento com cerca de 50% da carga estimada de ruptura.

Como pode ser observado no Quadro 66, a resistência à compressão média obtida pela amostra de paredes construídas com o composto CPA-02-a, foram aproximadamente, 2,2% inferior à resistência média apresentada pelo composto CPA-01. Para o caso do módulo de elasticidade, o valor médio obtido pela amostra construída com CPA-02a, foi cerca de 8,8% inferior ao obtido pela amostra construída com CPA-01.

Nas Figura 132-a e Figura 132-b podem ser observados, respectivamente, exemplos de ruptura obtidos para paredes construídas com o composto CPA-01 e CPA-02a, utilizando o bloco tipo B10.

**Figura 132 - Exemplo de ruptura de paredes construídas com bloco B10**

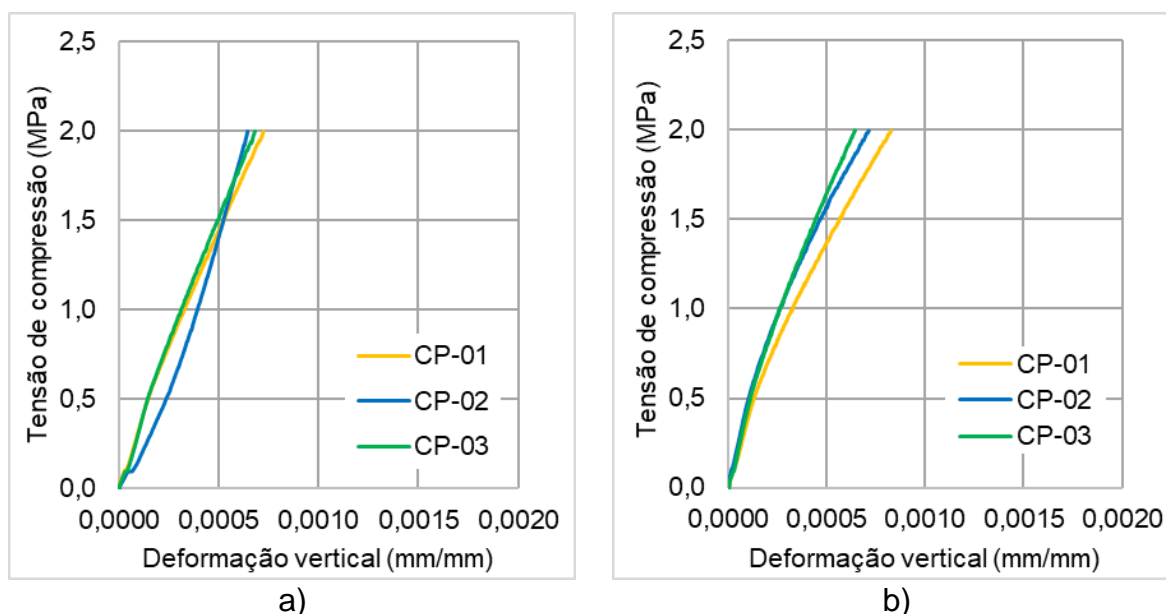


Fonte: Autor (2023). Legenda: a) assentamento com CPA-01; b) assentamento com CPA-02a.

Como pode ser observado na Figura 132, para as paredes construídas com o bloco tipo B10 foi observada a formação de fissura vertical na lateral das paredes. A formação dessas fissuras ocorreu, principalmente, na parte superior das paredes construídas com o composto CPA-01. Para o caso das paredes construídas com o composto CPA-02a, essa formação de fissuras foi observada na parte superior e, também inferior.

As curvas que relacionam a tensão e deformação obtidas para as amostras construídas com o bloco tipo B10 podem ser conferidas nas Figura 133-a e Figura 133-b, respectivamente, para o uso do composto CPA-01 e CPA-02a.

**Figura 133 - Curva tensão-deformação - Parede (B10)**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) assentamento com CPA-01; b) assentamento com CPA-02a.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão obtidos para as amostras construídas com o bloco tipo B20 e cada um dos compostos poliméricos podem ser observados no Quadro 67.

**Quadro 67 - Resistência à compressão de parede construída com bloco B20**

CP	CPA-01			CPA-02a		
	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)
1	908,79	7,42	1,45	918,50	7,51	2,98
2	984,93	8,05	1,98	1065,25	8,70	1,62
3	823,61	6,72	2,28	1111,78	9,09	2,28
<b>Média</b>	905,78	7,40	1,90	1031,84	8,43	2,29
<b>Desvio Padrão</b>	80,70	0,67	0,42	100,88	0,82	0,68
<b>C. V. (%)</b>	8,91	9,05	22,11	9,78	9,73	29,69
<b>f<sub>pk,est</sub> (MPa)</b>	-	5,38	-	-	6,01	-

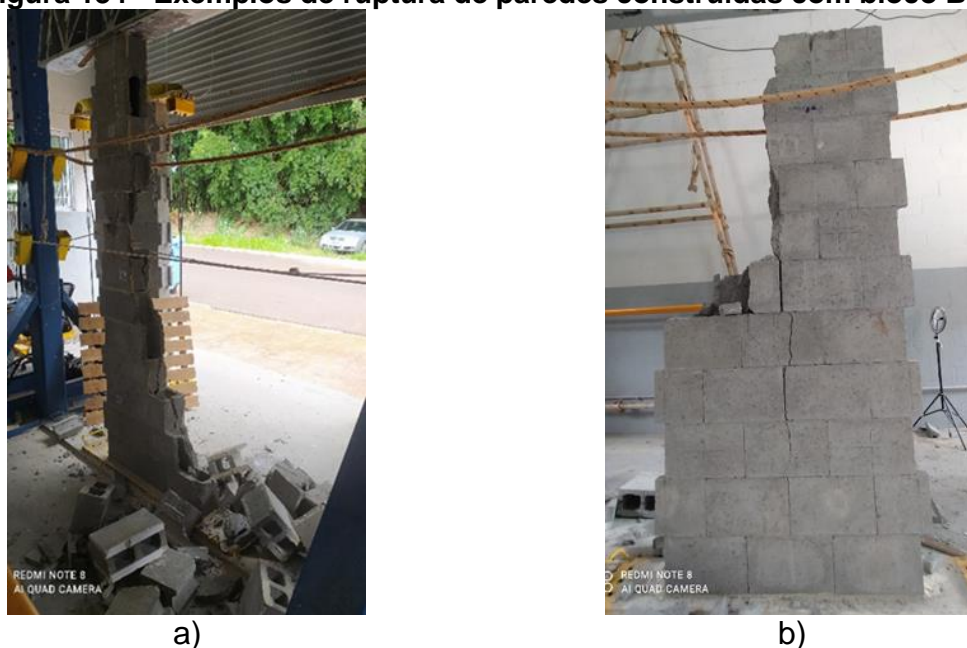
Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 67, a resistência à compressão média da amostra construída com composto CPA-01 foi, aproximadamente, 12,2% inferior à resistência média obtida pela amostra construída com o composto CPA-02a. Para o caso do módulo de elasticidade médio, o resultado obtido pela amostra construída com o composto CPA-01 foi,

aproximadamente 17,0% inferior ao resultado obtido pela amostra construída com o composto CPA-02a.

Nas Figura 134-a e Figura 134-b podem ser observados, respectivamente, exemplos de ruptura obtidos para paredes construídas com o composto CPA-01 e CPA-02a, utilizando o bloco tipo B20.

**Figura 134 - Exemplos de ruptura de paredes construídas com bloco B20**

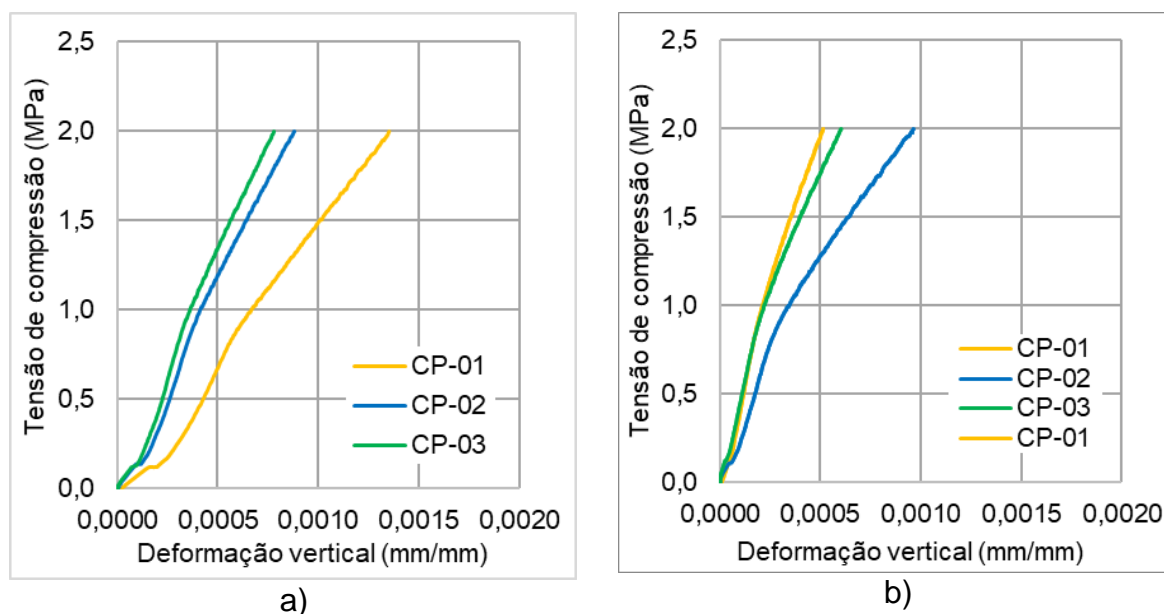


Fonte: Autor (2023). Legenda: a) assentamento com CPA-01; b) assentamento com CPA-02a.

A forma de ruptura das paredes construídas com esse tipo de bloco, normalmente, apresentou a tendência de ocorrer de forma mais brusca do que os outros tipos de blocos, resultando na destruição parcial ou completa dos corpos de prova. Como essa amostra de paredes foi construída com a utilização de apenas 3 blocos de largura, um a menos do que nas demais amostras, pode ter contribuído para apresentar esse tipo de ruptura mais brusca.

As curvas que relacionam a tensão e deformação obtidas para as amostras construídas com o bloco tipo B20 podem ser conferidas nas Figura 135-a e Figura 135-b, respectivamente, para o uso do composto CPA-01 e CPA-02a.

Figura 135 - Curvas tensão-deformação - Paredes (B20)



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) assentamento com CPA-01; b) assentamento com CPA-02a.

### 4.3.3.1 Relação entre a resistência à compressão das paredes com a apresentada pelos blocos, prismas e pequenas paredes

Na sequência são apresentadas as relações existentes entre a resistência à compressão das paredes com a resistência à compressão dos demais materiais ensaiados. Mais especificamente, essa relação será expressa pela divisão da resistência à compressão das paredes pela resistência à compressão de pequenas paredes e prismas.

No Quadro 68 são apresentadas as relações entre a resistência à compressão das paredes com os demais tipos de corpos de prova, tanto em função do valor médio quanto em função do valor característico.

Quadro 68 - Relação da resistência à compressão

Relação	B4		B10		B20	
	CPA-01	CPA-02a	CPA-01	CPA-02a	CPA-01	CPA-02a
$f_{parm}/f_{pm}$	0,90	0,69	0,65	0,60	0,71	0,66
$f_k/f_{pk}$	0,93	0,70	0,56	0,50	0,55	0,55
$f_{ppm}/f_{pm}$	1,00	0,63	0,75	0,79	0,70	0,64
$f_{ppk}/f_{pk}$	1,03	0,61	0,62	0,70	0,43	0,56
$f_{parm}/f_{ppm}$	0,90	1,10	0,87	0,76	1,02	1,03
$f_k/f_{ppk}$	0,90	1,14	0,90	0,71	1,27	0,99

Fonte: Autor (2023). Legenda:  $f_{parm}$  – resistência média à compressão da amostra de parede;  $f_{pm}$  resistência média à compressão da amostra de prisma;  $f_k$  – resistência característica à compressão da amostra de parede;  $f_{pk}$  – resistência característica à compressão da amostra de prisma;  $f_{ppm}$  – resistência média à compressão da amostra de pequena parede;  $f_{ppk}$  – resistência característica à compressão da amostra de pequena parede.

De acordo com a NBR 16868-1 (2020), a resistência à compressão da alvenaria convencional pode ser estimada como sendo 70% da resistência característica à compressão de prismas, ou, 85% da resistência característica à compressão de pequenas paredes. Para o caso dos ensaios realizados nessa pesquisa para alvenaria de junta fina com compostos poliméricos essa relação entre a resistência dos prismas e das pequenas paredes com as paredes ficou um pouco diferente, como pode ser observado no Quadro 68.

Ao analisar a relação obtida entre a resistência característica à compressão das paredes ( $f_k$ ) com a resistência característica dos prismas ( $f_{pk}$ ), pode ser observado que foram obtidos valores de relação entre 0,50 e 0,56 para os blocos tipo B10 e B20. Portanto, para esses tipos de blocos, a estimativa da resistência à compressão da alvenaria seria de, aproximadamente, 50 a 56% da resistência, característica obtida pelos prismas, ficando abaixo dos 70% utilizado para a alvenaria convencional. Para o caso das paredes construídas com bloco tipo B4 essa relação foi de 0,93 e 0,70, respectivamente, para o uso do composto CPA-01 e CPA-02a. Portanto, para o uso do bloco B4 essa relação foi igual ou maior à utilizada para alvenaria convencional. Esse resultado maior obtido com o bloco B4 pode estar ligado ao fato de que a resistência à compressão apresentada pelos compostos poliméricos está mais próxima da resistência à compressão apresentada por esse tipo de bloco do que dos demais tipos de blocos utilizados na pesquisa. Lembrando, que na alvenaria convencional a resistência à compressão da argamassa costuma ser semelhante à do bloco utilizado.

Para os casos em que uma relação maior do que 1 foi encontrada na comparação entre as resistências de paredes e pequenas paredes, uma possível explicação pode ser extraída

de Drysdale, Hamid and Baker (1994), que sugerem que existem muitos casos em que pequenas paredes foram ensaiadas em compressão e apresentaram resistência à compressão maior do que os prismas ensaiados sem o efeito de confinamento dos pratos. Sendo que, a possível explicação para esse fenômeno pode estar ligada ao fato de a formação de defeitos significativos em uma pequena parte da seção de uma parede podem ser menos importantes do que os formados em uma grande parcela da seção de um prisma. Portanto, como as pequenas paredes receberam tiras de forro pacote (forro de fibra mineral) na parte superior e inferior, é possível que tenham sofrido um menor efeito de confinamento do que o observado nas paredes que só receberam tiras de forro pacote na parte superior.

No Quadro 69 é apresentado um comparativo entre a resistência à compressão de prismas e pequenas paredes obtido por alguns autores utilizando alvenaria convencional com assentamento total e parcial. Como pode ser observado, o valor da relação estabelecida entre a resistência da pequena parede e do prisma apresentou variação de 0,52 a 1,14. Essa variação foi semelhante à observada para essa pesquisa com alvenaria de junta fina que apresentou variação de 0,43 a 1,03.

**Quadro 69 - Relação da resistência à compressão**

Autor	Tipo de bloco	Resistência à compressão média (MPa)				$f_{ppm}/f_{pm}$	Assentamento
		Bloco	Argamassa	Prisma	Peq. Parede		
Izquierdo (2011)	concreto	11,76	7,22	7,82	4,62	0,59	Total
	concreto	11,76	6,12	5,25	4,2	0,80	Parcial
	concreto	7,48	7,4	5,83	3,83	0,66	Total
	concreto	7,48	6,44	3,55	3,15	0,89	Parcial
Oliveira (2014)	concreto	10,21	6,93	5,31	5,45	1,03	Parcial
	concreto	10,21	3,52	5,16	4,88	0,95	Parcial
	cerâmico	13,07	5,91	2,99	3,22	1,08	Parcial
	cerâmico	13,07	3,08	3,04	2,9	0,95	Parcial
Juste (2001)	Concreto	10,8	10,24	7,96	4,97	0,62	Total
	Concreto	22,92	10,24	7,75	8,84	1,14	Total
	Concreto	10,8	5,05	7,93	4,12	0,52	Total
	Concreto	22,92	5,05	9,22	5,65	0,61	Total

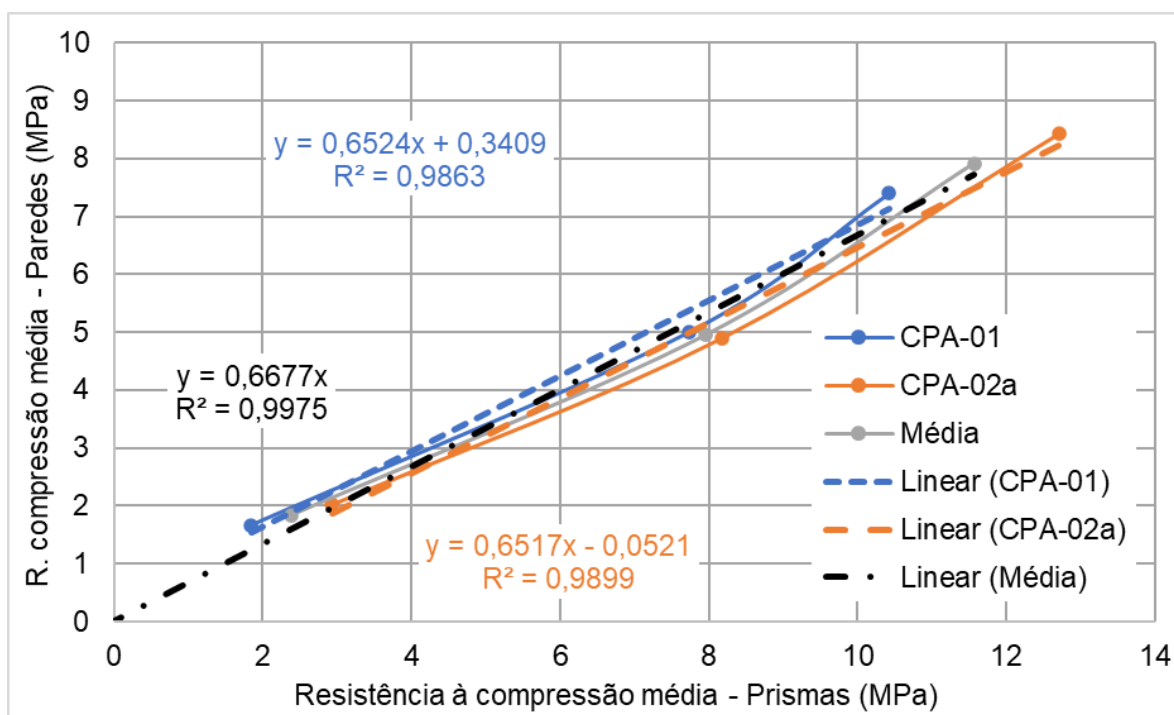
Fonte: Autor (2023). Legenda:  $f_{pm}$  resistência média à compressão da amostra de prisma;  $f_{ppm}$  – resistência média à compressão da amostra de pequena parede.

Na Figura 136 podem ser observadas as curvas que relacionam a resistência à compressão média, obtidas pelas amostras de paredes construídas com cada composto



polimérico, em função da resistência média à compressão dos prismas obtidos para a mesma combinação de tipo de bloco e composto polimérico. Também é apresentada uma curva “média” que apresenta os valores médios obtidos entre os dois compostos polimérico para um mesmo tipo de bloco. Como pode ser observado, o coeficiente angular da linha de tendência referente a média, apresentou coeficiente de inclinação de aproximadamente 0,668, indicando que a utilização da estimativa de que a resistência à compressão da parede será de, aproximadamente 66,8% da resistência à compressão do prisma apresenta boa correlação com os resultados obtidos. Entretanto, vale ressaltar que no Quadro 68, foram observados diferentes valores para a relação entre a resistência média de paredes e prismas, sendo o menor valor obtido para essa relação igual a 0,60. Portanto, talvez seja mais adequado utilizar essa relação mais conservadora, para estimar a resistência média das paredes.

**Figura 136 – Curvas relacionando a resistência média à compressão das paredes e dos prismas**



Fonte: Autor (2023).

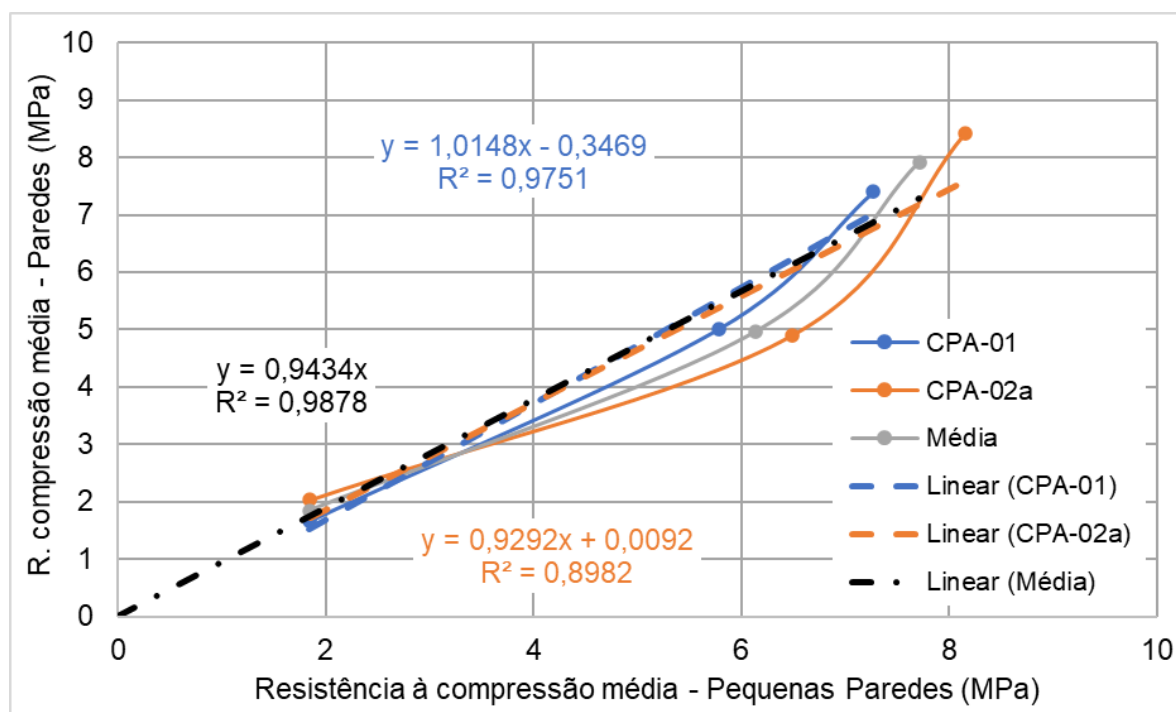
No Quadro 68, comparando-se a relação entre a resistência característica à compressão das paredes e pequenas paredes, pode ser observado que o menor valor obtido foi de 0,71 para as paredes construídas com o bloco tipo B10 e composto CPA-02a. Portanto, para esse caso, a resistência da alvenaria poderia ser estimada como 71% da resistência da pequena parede. Entretanto, o número de variáveis empregadas nessa pesquisa ainda é pequeno, devendo mais ensaios serem realizados, variando as dimensões e resistência dos blocos utilizados, assim como os tipos de compostos poliméricos, para que a relação entre esses resultados possa ser mais bem compreendida. Para as demais amostras, essa relação



ficou igual ou superior a 0,90, indicando que a resistência à compressão da alvenaria poderia ser considerada como sendo 90% da resistência obtida para a pequena parede. Um valor até superior aos 85% previstos para a alvenaria convencional.

Na Figura 137 podem ser observadas as curvas que relacionam a resistência à compressão média obtida pelas amostras de paredes construídas com cada composto polimérico, em função da resistência média à compressão das pequenas paredes. Também é apresentada uma curva “média” que apresenta os valores médios obtidos entre os dois compostos poliméricos para um mesmo tipo de bloco. Como pode ser observado, existe uma mudança nítida na inclinação das curvas quando é comparado o trecho inicial de 2 a 6 MPa de resistência à compressão das pequenas paredes com o trecho final de 6 a 8 MPa. O trecho final fica bem mais íngreme do que o inicial. Essa mudança na inclinação observada no trecho final pode estar ligada ao fato de que as dimensões das paredes construídas com o bloco tipo B20 foram diferentes das demais, provocando uma alteração na relação observada. As paredes construídas com o bloco B20 possuíam apenas 3 blocos de largura, ao invés de 4, visando limitar a carga máxima obtida nos ensaios. No caso da Figura 136 também pode ser observada uma mudança na inclinação do trecho final, mas, bem mais leve.

**Figura 137 - Curvas relacionando a resistência média à compressão das paredes e das pequenas paredes**



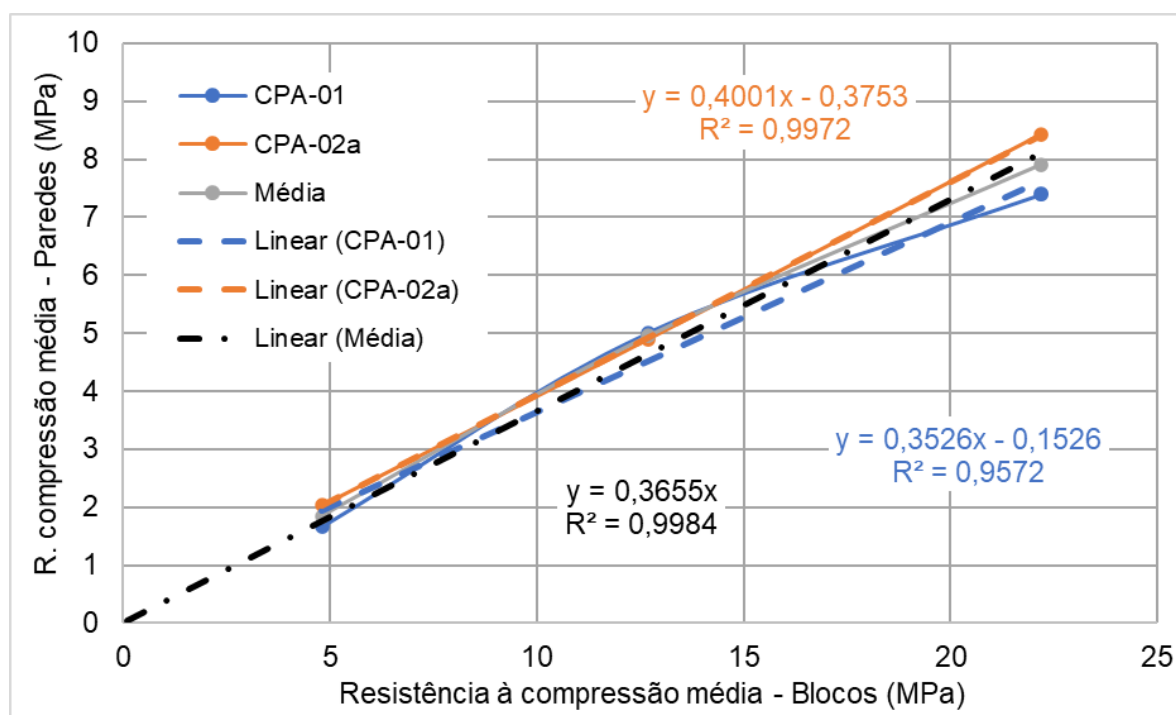
Fonte: Autor (2023).

A linha de tendência referente à média dos resultados obtidos com os dois compostos poliméricos, apresentou boa correlação com os resultados ( $R^2 \approx 0,988$ ), proporcionando,

coeficiente de inclinação de 0,94. Isso indica que a resistência à compressão média das paredes pode ser estimada como sendo 94% da resistência obtida no ensaio da pequena parede. Todavia, ao serem observados os valores individuais da relação entre a resistência característica à compressão da parede e da pequena parede mostrados no Quadro 68, é possível perceber a presença de relações mais baixas, de até 0,71. Dessa forma, talvez seja melhor ser mais conservador e considerar que a resistência à compressão característica das paredes possa ser considerada como sendo 71% da resistência característica observada para as amostras de pequenas paredes. Mais ensaios devem ser realizados para definir qual a relação correta para esse tipo de material.

Na Figura 138 podem ser observadas as curvas que relacionam a resistência média à compressão das amostras de parede em função da resistência média à compressão dos blocos de concreto utilizados. Nessa figura também são mostradas as linhas de tendência de cada amostra.

**Figura 138 - Curvas relacionando a resistência média à compressão das paredes e dos blocos de concreto**



Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 138, a curva “média” que relaciona a média dos resultados obtidos com cada tipo de composto polimérico para um mesmo tipo de bloco, apresentou um coeficiente de inclinação de, aproximadamente, 0,37. Isso indica que a resistência à compressão média das paredes representa, aproximadamente, 37% resistência à compressão dos blocos de concreto utilizados em sua construção.

O Eurocode 6 (CEN, 2021) considera a utilização de uma equação com base na resistência do bloco para estimar a resistência característica da alvenaria de junta fina. Para o caso de aplicação de argamassa somente nas paredes longitudinais dos blocos, esse valor pode ser obtido considerando a Equação 20. Essa equação seria mais indicada para alvenaria assentada para tiras de composto polimérico com 30 mm de largura ou mais. Entretanto, foi considerado que é possível utilizar os valores obtidos com essa equação para comparar com os valores obtidos nos ensaios de compressão das paredes, pois a espessura média das paredes dos blocos (contando a fina e a grossa), será de, aproximadamente, 27,5 mm, que é próximo aos 30 mm previstos na norma. Deve ser destacado, entretanto, que seria mais adequado ao atendimento dos requisitos da norma europeia para o tipo de bloco utilizado nessa pesquisa, trabalhar com sua resistência à compressão obtida com a realização de capeamento somente nas paredes longitudinais e não capeamento total como foi realizado

$$f_{k_{alv}} = \left(\frac{k}{2}\right) \times (f_{bn})^{0,85} \quad (\text{Equação 20})$$

Onde,

$f_{k_{alv}}$  é valor estimado da resistência característica à compressão da alvenaria;

$k$  é um valor tabelado (adotado 0,65) dependente do tipo de bloco e argamassa de assentamento utilizada. Nesse caso foi considerado apenas metade de seu valor, pois a relação ( $g/t \approx 0,4$ ), sendo “g” a largura total das tiras de composto polimérico empregadas no assentamento e “t” a largura nominal do bloco utilizado;

$f_{bn}$  é a resistência normalizada à compressão do bloco, obtida pela multiplicação da resistência à compressão média por dois fatores. Um destes equivalente a 1,24 que foi obtido por interpolação linear no quadro disponível no Anexo C, tendo como referência os valores nominais da largura e altura do bloco. O outro fator é relativo às condições do bloco e varia de 0,8 para blocos secos em estufa até 1,2 para blocos para blocos saturados em água, sendo neste caso adotado 1,0 pois, dentre as opções disponíveis, é o que mais se aproxima da norma brasileira.

Pode ser salientado que a adoção de estudos no futuro para o desenvolvimento de equações específicas para os materiais, sistema construtivo e normas brasileiras é fundamental para assegurar resultados mais adequados à realidade do país.

Os valores obtidos de resistência característica estimada da alvenaria à compressão utilizando a equação 14 são mostrados no Quadro 70. Nesse quadro também estão sendo comparados os erros entre os valores obtidos pela equação em comparação com os valores característicos obtidos nos ensaios das paredes.

**Quadro 70 – Estimativa da resistência característica à compressão da parede**

Bloco	Composto	$f_k$ (MPa)	$f_{kalv}$ (MPa)	Erro (%)	Erro médio absoluto (%)
B4	CPA-01	1,30	1,49	14,62	7,31
	CPA-02b	1,49	1,49	0	
B10	CPA-01	3,78	3,38	-10,58	7,01
	CPA-02b	3,50	3,38	-3,43	
B20	CPA-01	5,38	5,44	1,12	5,30
	CPA-02b	6,01	5,44	-9,48	

Fonte: Autor (2023). Legenda:  $f_{kalv}$  é o valor característico estimado pela equação 20;  $f_k$  é o valor característico calculado conforme NBR 16868-3 (ABNT, 2020) a partir dos resultados dos ensaios de resistência à compressão das paredes.

Como pode ser observado no Quadro 70, o maior erro observado entre o valor característico obtido no ensaio e o valor obtido com a equação 14 foi de, aproximadamente, 15%. Dessa forma, existe a possibilidade de utilizar as equações previstas no Eurocode 6 (CEN, 2021) para estimar a resistência da alvenaria, entretanto, mais estudos devem ser feitos para avaliar o uso dessa equação, tendo em vista que os tipos de blocos que costumam ser utilizados na Europa possuem características geométricas diferentes das utilizadas no Brasil e, também, costumam ser empregados em edificações mais baixas do que as praticadas no Brasil. Além disso, as variações nos procedimentos de ensaio de paredes e blocos podem provocar variações nos resultados obtidos, sendo necessários mais pesquisas para contemplar todas as variáveis envolvidas nas obtenções desses resultados.

### 4.3.3.2 Estimativa do módulo de elasticidade das paredes

A norma ABNT NBR 16868-1 (2020) permite considerar o valor do módulo de elasticidade da alvenaria convencional construída com blocos de concreto como sendo 800 vezes o valor da resistência característica à compressão do prisma.

Para que seja possível verificar se esses mesmos valores poderiam ser utilizados para estimar o módulo de elasticidade da alvenaria de blocos de concreto assentados com juntas finas de compostos poliméricos, pode ser observado o Quadro 71. Nele estão apresentados os valores dos módulos de elasticidade média das paredes, divididos pela resistência característica dos prismas para cada combinação de bloco e composto polimérico.

**Quadro 71 - Relação entre módulo da alvenaria e  $f_{pk}$** 

Relação	B4		B10		B20	
	CPA-01	CPA-02a	CPA-01	CPA-02a	CPA-01	CPA-02a
$E_{param}/f_{pk}$	585,71	635,51	385,52	341,95	194,87	208,94

Fonte: Autor (2023). Legenda:  $E_{param}$  – módulo de elasticidade médio da parede,  $f_{pk}$  – resistência característica à compressão do prisma.

Como pode ser observado no Quadro 71, para todas as amostras avaliadas, o valor obtido pela divisão do módulo de elasticidade das paredes pela resistência característica à compressão do prisma foi menor do que os 800 previsto na NBR 6118 (ABNT, 2021). Portanto, para o caso da alvenaria de blocos de concreto assentados com juntas finas de compostos poliméricos, utilizar a mesma expressão para estimar o módulo de elasticidade da alvenaria convencional não é adequado.

Aparentemente, os resultados demonstrados no Quadro 71 apresentaram a tendência de reduzir seus valores, conforme aumentou a resistência à compressão do bloco empregado na construção das paredes. Esse comportamento foi observado para o uso dos dois compostos poliméricos. Parte desse comportamento deve estar relacionado ao fato de o valor do módulo de elasticidade obtido pelos compostos poliméricos ser significativamente inferior ao obtido pelos blocos de concreto. Além disso, para o caso da alvenaria convencional, normalmente, a resistência à compressão das argamassas empregadas é semelhante à resistência à compressão dos blocos utilizados, o que não foi o caso da resistência dos compostos poliméricos utilizados. O fato de os compostos poliméricos terem sido aplicados somente nas paredes longitudinais dos blocos também exerce influência nesses resultados.

Dessa forma, talvez seja mais adequado estimar o módulo de elasticidade da alvenaria de junta fina, levando em consideração a influência do módulo de elasticidade dos blocos e dos compostos poliméricos empregados na construção das paredes. Portanto, podem ser empregadas as equações 21 e 22 apresentadas por Drysdale, Hamid and Baker (1994), que estimam o módulo de elasticidade da alvenaria levando em conta a altura do bloco utilizado e a espessura da junta de assentamento horizontal através da Equação 21, e o valor do módulo de elasticidade dos blocos e da argamassa utilizada em seu assentamento na equação 22.

$$\delta = \frac{t_b}{(t_b + t_a)} \quad (\text{Equação 21})$$

$$E_{Alv} = \frac{1}{\left(\frac{\delta}{E_b} + \frac{1-\delta}{E_a}\right)} \quad (\text{Equação 22})$$

Onde,

$E_{alv}$  é o módulo de elasticidade estimado da alvenaria;

$E_b$  é o módulo de elasticidade do bloco na área bruta;

$E_a$  é o módulo de elasticidade da argamassa usada no assentamento;

$t_b$  é a altura do bloco;

$t_a$  é a espessura da argamassa de assentamento.

Ocorre que as paredes utilizadas nessa pesquisa foram assentadas com a aplicação de composto polimérico somente nas paredes longitudinais dos blocos. Portanto, a equação 21 foi modificada, pois existe uma diferença entre a área bruta considerada para o bloco (140 X 290 mm) e a área em que o composto polimérico foi aplicado, somente sobre as duas paredes longitudinais do bloco (2 X 25 X 290 mm). Sendo assim, insere-se o fator demonstrado na equação 23 que será utilizado para compensar a diferença de área entre os materiais, como pode ser observado na equação 24.

$$\beta = \frac{A_{cp}}{A_{bn}} = \frac{2 \times (C_n \times e_p)}{(C_n \times L_n)} = \frac{(2 \times e_p)}{L_n} = \frac{(2 \times 25)}{140} = 0,357 \quad (\text{Equação 23})$$

$$\delta_{cor} = \frac{t_b \times \beta}{(t_b \times \beta + t_a)} \quad (\text{Equação 24})$$

Onde,

$\beta$  é a relação entre as áreas do composto polimérico e do bloco, em unidade adimensional;

$A_{cp}$  é a área do composto polimérico, expressa em mm<sup>2</sup>;

$A_{bn}$  é a área bruta nominal de um bloco, expressa em mm<sup>2</sup>;

$L_n$  é a largura nominal do bloco, expressa em mm;

$C_n$  é o comprimento nominal do bloco, expresso em mm;

$e_p$  é a espessura nominal da parede longitudinal do bloco, tomada como 25 mm;

$\delta_{cor}$  é o valor corrigido da relação entre a espessura do bloco e do composto polimérico.

Dessa forma, considerando a modificação feita na equação 24, a equação 22 pode ser reescrita na forma da equação 25 mostrada abaixo.

$$E_{Alv} = \frac{1}{\left( \frac{\delta_{cor}}{E_b} + \frac{1 - \delta_{cor}}{E_a} \right)} \quad (\text{Equação 25})$$

A equação 25 será então utilizada para comparar se os valores de módulo de elasticidade obtidos com sua utilização são semelhantes aos valores de módulo de elasticidade obtidos principalmente nos ensaios de compressão feitos nas amostras de prismas. Essa comparação foi feita com os resultados de prismas, pois para o caso das paredes existem mais variáveis que podem influenciar nos resultados obtidos, decorrentes principalmente de suas maiores dimensões.

No Quadro 72 ao Quadro 74, são mostrados os erros referentes a comparação do módulo de elasticidade proveniente da equação 25 com o módulo obtido nos ensaios de compressão feitos para as diferentes amostras de prismas.

A comparação entre os valores de módulo de elasticidade obtidos no ensaio de compressão de prismas com os valores estimados pela equação 25 podem ser observados no Quadro 72, para as amostras construídas com o bloco B4.

**Quadro 72 - Módulo estimado dos prismas construídos com bloco B4**

CP	Composto	$\delta_{cor}$	$E_{prm}$ (MPa)	$E_{ep}$ (MPa)	Erro (%)	Erro médio absoluto (%)
1	CPA-01	0,976	880	1589,36	80,61	58,87
2		0,972	1060	1524,98	43,87	
3		0,961	1030	1372,12	33,22	
4		0,964	890	1410,68	58,50	
5		0,974	890	1556,50	74,89	
6		0,973	950	1540,58	62,17	
1	CPA-02a	0,982	1430	1479,71	3,48	10,74
2		0,982	1650	1479,71	-10,32	
3		0,987	1440	1616,60	12,26	
4		0,983	1950	1505,20	-22,81	
5		0,979	1530	1408,17	-7,96	
6		0,987	1750	1616,60	-7,62	

Fonte: Autor (2023). Legenda:  $E_{pm}$  é o valor médio do módulo de elasticidade obtido para o prisma;  $E_{ep}$  é o valor estimado para o módulo do prisma utilizando a equação 23.

Como pode ser observado no Quadro 72, no caso dos prismas construídos com o bloco B4, a estimativa do módulo de elasticidade com o uso da equação 25 apresentou valores superiores aos obtidos no ensaio, produzindo um erro médio de, aproximadamente, 59%. Para o caso da amostra construída com o composto CPA-02a a estimativa do módulo de elasticidade utilizando a equação 25 apresentou resultados mais próximos aos obtidos no ensaio, apresentando erro médio absoluto de aproximadamente 11%.

A comparação entre os valores de módulo de elasticidade obtidos no ensaio de compressão dos prismas com os valores estimados pela equação 25 pode ser observada no Quadro 73, para as amostras construídas com o bloco B10.

**Quadro 73 - Módulo estimado dos prismas construídos com bloco B10**

CP	Composto	$\delta_{cor}$	$E_{prm}$ (MPa)	$E_{ep}$ (MPa)	Erro (%)	Erro médio absoluto (%)
1	CPA-01	0,969	2830	2385,46	-15,71	12,77
2		0,971	2670	2466,73	-7,61	
3		0,970	2810	2425,42	-13,69	
4		0,968	2760	2346,80	-14,97	
5		0,974	3090	2599,58	-15,87	
6		0,972	2750	2509,48	-8,75	
1	CPA-02a	0,980	3530	2276,25	-35,52	26,56
2		0,985	3690	2626,25	-28,83	
3		0,985	2790	2626,25	-5,87	
4		0,982	3140	2404,42	-23,43	
5		0,983	3960	2474,08	-37,52	
6		0,982	3350	2404,42	-28,23	

Fonte: Autor (2023). Legenda:  $E_{pm}$  é o valor médio do módulo de elasticidade obtido para o prisma;  $E_{ep}$  é o valor estimado para o módulo do prisma utilizando a equação 23.

Como pode ser observado no Quadro 73, o valor estimado do módulo de elasticidade da amostra assentada com o composto CPA-01 apresentou resultado ligeiramente inferior ao obtido no ensaio, proporcionando um erro médio de aproximadamente 13%. Para o caso da amostra assentada com composto CPA-02a, o valor estimado do módulo de elasticidade também apresentou resultado inferior ao obtido no ensaio, proporcionando um erro médio de, aproximadamente 27%.

A comparação entre os valores de módulo de elasticidade obtidos no ensaio de compressão dos prismas com os valores estimados pela equação 25 pode ser observada no Quadro 74, para as amostras construídas com o bloco B20.



**Quadro 74 - Módulo estimado dos prismas construídos com bloco B20**

CP	Composto	$\delta_{cor}$	$E_{prm}$ (MPa)	$E_{ep}$ (MPa)	Erro (%)	Erro médio absoluto (%)
1	CPA-01	0,968	2990	2921,85	-2,28	9,32
2		0,968	2430	2921,85	20,24	
3		0,970	2870	3046,32	6,14	
4		0,970	3340	3046,32	-8,79	
5		0,972	2960	3181,88	7,50	
6		0,969	3350	2982,79	-10,96	
1	CPA-02a	0,985	3440	3384,82	-1,60	21,87
2		0,974	3710	2351,86	-36,61	
3		0,978	3340	2645,43	-20,80	
4		0,978	4160	2645,43	-36,41	
5		0,983	3900	3134,51	-19,63	
6		0,987	4390	3678,58	-16,21	

Fonte: Autor (2023). Legenda:  $E_{pm}$  é o valor médio do módulo de elasticidade obtido para o prisma;  $E_{ep}$  é o valor estimado para o módulo do prisma utilizando a equação 23.

Como pode ser observado no Quadro 74, o valor estimado do módulo de elasticidade da amostra assentada com o composto CPA-01 apresentou erro médio de aproximadamente 9% em relação aos resultados obtidos no ensaio. Para o caso da amostra assentada com composto CPA-02a, o valor estimado do módulo de elasticidade proporcionou erro médio de aproximadamente 22% com relação aos resultados obtidos no ensaio de compressão.

Pelo que pode ser observado, ainda existe uma variação significativa entre o valor do módulo de elasticidade obtido no ensaio de resistência à compressão dos prismas e o valor obtido pela equação 25 para algumas amostras. Entretanto, os valores provenientes da estimativa feita usando a equação 25, proporcionaram valores mais próximos ao módulo de elasticidade obtido nos ensaios, do que a expressão empregada pela NBR 16868-3 (ABNT, 2021) utilizada para estimar o módulo de elasticidade da alvenaria convencional.

No Anexo D são apresentados os valores de erro obtidos com o uso da equação 25 para estimar o módulo de elasticidade obtido nos ensaios de compressão das pequenas paredes.

## 4.4 RESULTADOS DA QUARTA ETAPA – ESTUDO DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO

Os resultados dos ensaios realizados para avaliar o comportamento à flexão perpendicular da alvenaria são apresentados a seguir, em dois subitens. No primeiro, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão obtidas com base no procedimento previsto na norma brasileira NBR 16868-3 (ABNT, 2020). No segundo subitem são apresentados os resultados do ensaio de flexão obtidos pelo método da alavanca, realizado com base na norma AS 3700 (2017).

### 4.4.1 *RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DA NBR 16868-3*

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão realizados com base na norma brasileira ABNT NBR 16868-3 (2020), serão apresentados nesse item. A direção de aplicação dos esforços de tração foi na direção perpendicular à fiada de assentamento.

A apresentação dos resultados foi dividida em quadros, contendo a resistência à tração na flexão obtida para cada corpo de prova, seu valor médio e, também, o valor característico obtido conforme a ABNT NBR 16868-3 (2020). Cada quadro corresponde aos resultados obtidos para amostras construídas com um mesmo tipo de bloco, para os dois compostos poliméricos.

A forma de ruptura dos prismas costumou ocorrer na região da junta de assentamento da segunda e/ou terceira fiada, para todas as amostras ensaiadas. Imagem de corpos de prova após ensaio pode ser visualizada na Figura 139.

**Figura 139 - Ruptura de corpos de prova na flexão**



Fonte: Autor (2023).

Os resultados dos ensaios para determinação da resistência à tração na flexão obtidos em amostras construídas com o bloco tipo B4, para cada tipo de composto polimérico, podem ser observados no Quadro 75.

**Quadro 75 - Resistência à tração na flexão perpendicular - Bloco B4**

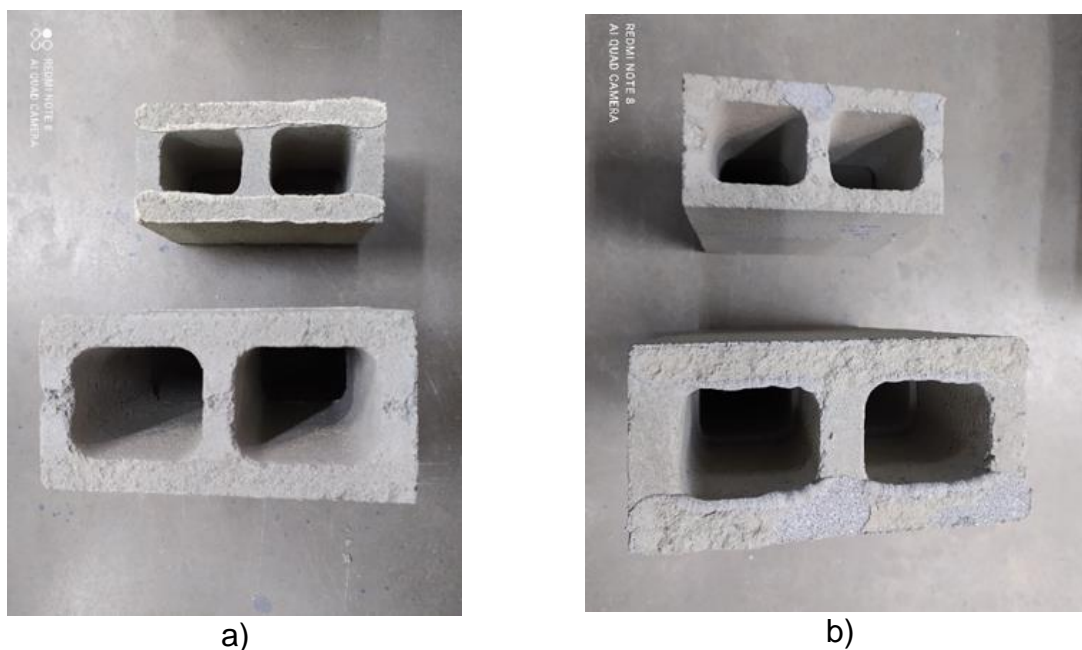
CP	Resistência à tração na flexão perpendicular (MPa)	
	CPA-01	CPA-02b
1	0,22	0,36
2	0,29	0,50
3	0,24	0,46
4	0,23	0,39
5	0,32	0,53
6	0,26	0,38
<b>Média</b>	0,26	0,43
<b>Desvio Padrão</b>	0,04	0,07
<b>C. V. (%)</b>	14,83	15,81
<b><math>f_{tk,est}</math> (MPa)</b>	0,22	0,35

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 75, para a utilização do bloco tipo B4, a resistência à tração na flexão média obtida para a amostra construída com o composto CPA-01, foi aproximadamente 39,5% inferior à obtida com a amostra construída com CPA-02b.

Detalhes da interface de ruptura obtida com o uso do bloco tipo B4 podem ser observados nas Figura 140-a e Figura 140-b, respectivamente, para o uso de CPA-01 e CPA-02b. Para o caso do composto CPA-01, parte da ruptura ocorreu no bloco e parte na interface entre bloco e composto polimérico. Para o caso do composto CPA-02b, aparentemente, uma parcela um pouco maior de ruptura no bloco foi observada, assim como, sinais de ruptura na argamassa e na interface entre bloco e composto polimérico.

**Figura 140 - Detalhes da ruptura com bloco B4**



Fonte: Autor (2023).

No Quadro 76 podem ser observados os resultados dos ensaios de tração na flexão perpendicular obtidos com o bloco tipo B10, para o uso de cada composto polimérico.

**Quadro 76 - Resistência à tração na flexão - Bloco B10**

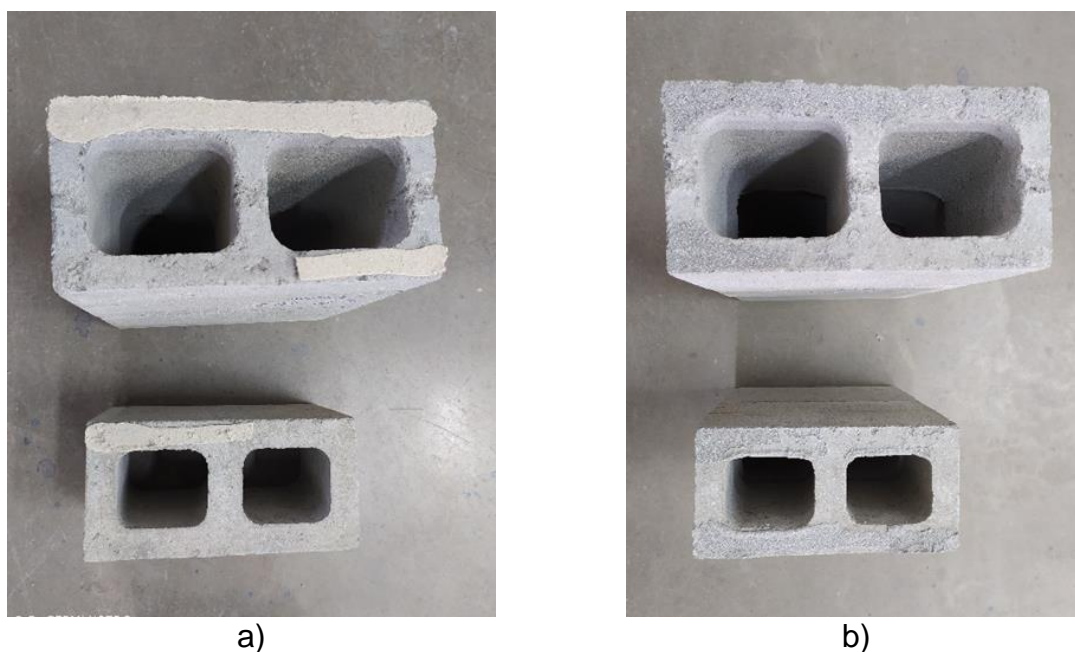
CP	Resistência à tração na flexão (MPa)	
	CPA-01	CPA-02b
1	0,20	0,89
2	0,26	0,67
3	0,16	0,82
4	0,29	0,90
5	0,35	0,70
6	0,25	0,89
<b>Média</b>	0,25	0,81
<b>Desvio Padrão</b>	0,07	0,10
<b>C. V. (%)</b>	27,01	12,42
<b><math>f_{tk,est}</math> (MPa)</b>	0,14	0,60

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado nos resultados demonstrados no Quadro 76, a resistência média à tração na flexão obtida para a amostra construída com o composto CPA-01 foi, aproximadamente, 69,1% inferior ao resultado obtido com o composto CPA-02b.

Detalhes das interfaces de ruptura obtidas com o bloco tipo B10 podem ser observados nas Figura 141-a e Figura 141-b, respectivamente, com o uso de CPA-01 e CPA-02b. Aparentemente, a principal forma de ruptura obtida com CPA-01 ocorreu na interface entre bloco e composto polimérico. Para o caso de CPA-02, aparentemente a ruptura ocorreu parte no composto polimérico e parte na interface entre bloco e composto polimérico.

**Figura 141 - Detalhes da ruptura com bloco B10**



Fonte: Autor (2023).

No Quadro 77 podem ser observados os resultados dos ensaios de flexão perpendicular obtidos em amostras construídas com o bloco tipo B20 para os dois compostos poliméricos. O corpo de prova n° 3 construído com o composto CPA-01 não foi ensaiado, pois sofreu danos durante sua movimentação.

**Quadro 77 - Resistência à tração na flexão - Bloco B20**

CP	Resistência à tração na flexão (MPa)	
	CPA-01	CPA-02b
1	0,24	0,69
2	0,10	0,74
3	-	0,60
4	0,27	0,46
5	0,39	0,93
6	0,15	0,43
<b>Média</b>	0,23	0,64
<b>Desvio Padrão</b>	0,11	0,19
<b>C. V. (%)</b>	47,82	29,40
<b><math>f_{tk,est}</math> (MPa)</b>	0,09	0,38

Fonte: Autor (2023).

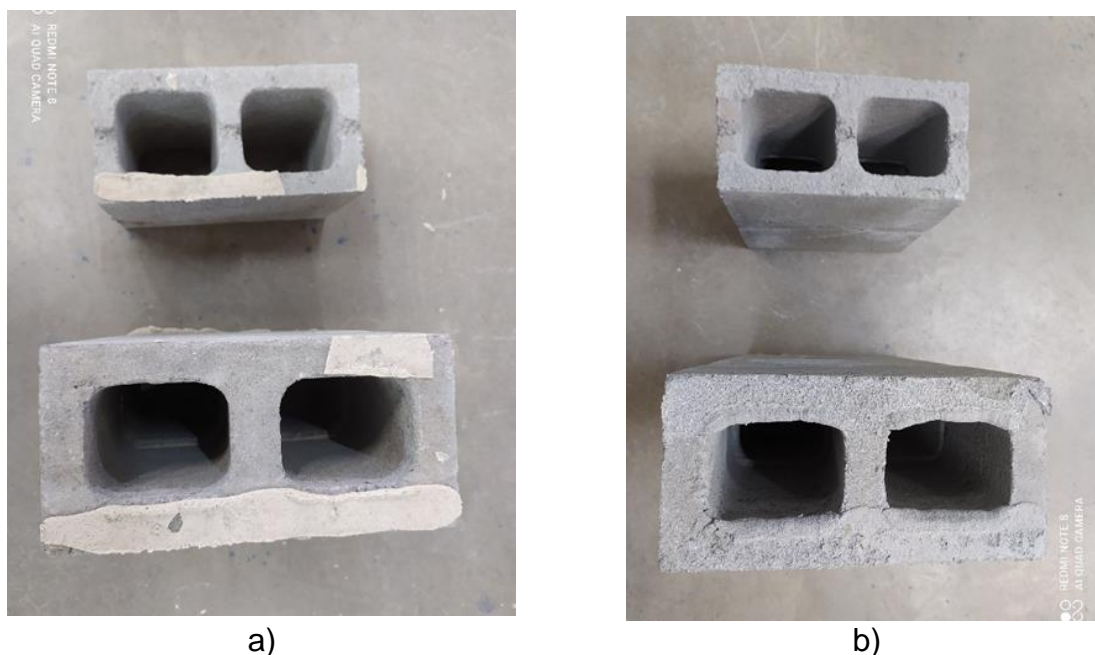
Como pode ser observado nos resultados demonstrados no Quadro 77, a resistência média à tração na flexão obtida para a amostra construída com o composto CPA-01 foi aproximadamente 64,1% inferior ao resultado obtido com o composto CPA-02b.

Embora o coeficiente de variação obtido nos ensaios de resistência à tração na flexão perpendicular tenha apresentado resultados elevados, é possível observar que os resultados apresentados no Quadro 10 referente ao trabalho de Drysdale e Hamid (1988) com alvenaria convencional apresentaram coeficiente de variação para as amostras não grauteadas acima de 30% na maior parte dos casos. Isso indica que nesse tipo de ensaio pode existir a tendência de maior coeficiente de variação.

O fato de os maiores valores de coeficiente de variação terem sido obtidos com a utilização do bloco B20 para os dois compostos poliméricos, pode indicar que existe maior dificuldade no estabelecimento da aderência entre os compostos e esse tipo de bloco. O menor valor de absorção de água observado para esse tipo de bloco pode estar ligado a esse resultado, porém, mais ensaios devem ser realizados para comprovar essa influência.

Detalhes da interface de ruptura obtidos em corpos de prova construídos com bloco do tipo B20 podem ser observados nas Figura 142-a e Figura 142-b, respectivamente, para o uso de CPA-01 e CPA-02b. Aparentemente, a forma de ruptura obtida com CPA-01 ocorreu, predominantemente, na interface entre bloco e composto polimérico. Para o caso de CPA-02b, aparentemente, a ruptura correu parte no composto polimérico e parte na interface entre bloco e composto polimérico.



**Figura 142 - Detalhes da ruptura com bloco B20**

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado nos resultados dos ensaios de tração na flexão perpendicular mostrados acima, considerando o mesmo tipo de bloco, os resultados obtidos com o composto CPA-02b foram superiores aos obtidos com o composto CPA-01. Isso ocorreu para os três tipos de blocos empregados.

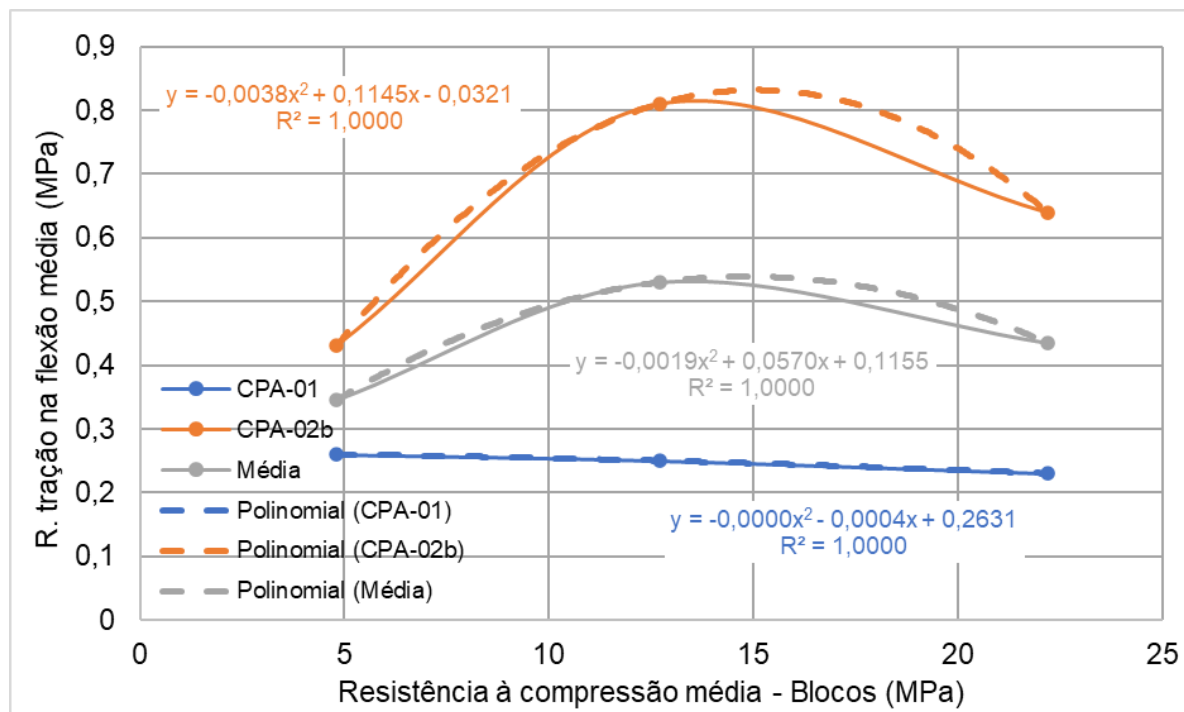
A resistência média e característica apresentada pelas amostras construídas com o composto CPA-01 apresentaram a tendência de redução em seu valor, conforme aumenta a resistência à compressão do bloco utilizado em sua construção. Essa redução foi pouco perceptível para o valor médio de tração na flexão obtido, entretanto, para o caso do valor característico foi mais acentuada.

Para o caso das amostras construídas com o uso do composto CPA-02b o maior valor médio e característico foi obtido com o uso do bloco tipo B10. Isso indica que existem outros fatores além da resistência do bloco de concreto que podem influenciar nos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão. Além disso, o valor semelhante da resistência característica à tração na flexão apresentado pelas amostras construídas com o bloco tipo B4 e B20, colaboram para o entendimento de que não é somente a resistência do bloco que exerce influência na resistência à tração na flexão das amostras.

Para facilitar a comparação dos resultados obtidos pelas diferentes amostras são apresentadas, na Figura 143, as curvas que relacionam a resistência média à tração na flexão, obtidas com as amostras construídas com cada composto polimérico, em função da resistência média à compressão do tipo de bloco utilizado em sua construção. Também é

apresentada uma curva relacionando a média entre os resultados obtidos com cada composto polimérico, considerando um mesmo tipo de bloco.

**Figura 143 - Resistência à tração na flexão obtidas para diferentes amostras**



Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 143, as amostras construídas com o composto CPA-01 apresentaram a tendência de reduzir o valor da resistência à tração na flexão média, conforme se aumenta a resistência do bloco de concreto utilizado. No entanto, essa redução da resistência média obtida com os diferentes tipos de blocos foi bem pequena, ficando os 3 resultados bem próximos. Essa tendência de comportamento não foi observada para as amostras construídas com o composto CPA-02b, que apresentou o maior valor de resistência à tração na flexão para a amostra construída com o Bloco B10 e o resultado mais baixo com o bloco B4.

Para avaliar se o tipo de bloco e o tipo de composto polimérico apresentam influência significativa no resultado de resistência à tração na flexão, foi realizada a análise de variância (ANOVA) com dois fatores, para um nível de confiança de 95%. Como resultado, foi encontrado que o tipo de bloco, tipo de composto e a interação entre bloco e composto exercem influência significativa nos resultados.

Para comparar de maneira específica a diferença entre as diferentes médias foi empregado o teste Tukey, com 95% de confiança. Os resultados são demonstrados no Quadro 78.



**Quadro 78 - Grupamento de letras - diferença de médias (Tukey)**

Fator considerado	Composto polimérico	Bloco de concreto	Média (MPa)	Grupos		
Tipo de composto	CPA-02b	-	0,63	A	-	-
	CPA-01		0,25	-	B	-
Tipo de Bloco	-	B10	0,53	C	-	-
		B20	0,45	C	D	-
		B4	0,35	-	D	-
Interação (bloco/composto)	CPA-02b	B10	0,81	E	-	-
	CPA-02b	B20	0,64	E	-	-
	CPA-02b	B4	0,44	-	F	-
	CPA-01	B4	0,26	-	F	G
	CPA-01	B10	0,25	-	F	G
	CPA-01	B20	0,23	-	-	G

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 78, as médias produzidas por cada composto polimérico não são consideradas equivalentes. Considerando apenas o tipo de bloco, é possível verificar que a diferença entre as médias obtidas com o bloco B10 e B20 são consideradas insignificantes. A média obtida com os blocos B4 e B20, também são consideradas equivalentes. Considerando a interação bloco/composto é possível verificar que o composto CPA-02b proporcionou resultados considerados equivalentes com o uso do bloco B10 e B20. Os resultados obtidos com o Bloco B4 e cada um dos compostos, assim como o resultado do composto B10 e CPA-01, foram considerados equivalentes. Os resultados obtidos com o composto CPA-01 e cada um dos três tipos de blocos foram considerados equivalentes.

#### **4.4.1.1 Comparação com valores especificados em normas**

No Quadro 79 são apresentados os valores característicos de resistência à tração na flexão perpendicular previstos na norma NBR 16868-1 (ABNT, 2020), para a alvenaria convencional.

**Quadro 79 - Valores característicos de flexão perpendicular**

<b>Resistência média à compressão da argamassa</b>	<b>Valor característico de resistência à tração na flexão – perpendicular (MPa)</b>
Entre 1,5 a 3,4 MPa	0,10
Entre 3,5 a 7,0 MPa	0,20
Acima de 7,0 MPa	0,25

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16868-1 (2020).

Analisando-se os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão perpendicular, é possível perceber que todas as amostras assentadas com o composto CPA-02b apresentaram valor característico superior ao maior valor previsto no Quadro 79 para alvenaria convencional (0,25 MPa).

A resistência característica obtida para a amostra construída com CPA-01 e bloco B4 (0,22 MPa) foi superior ao valor característico do Quadro 79 para alvenaria convencional, considerando o uso de argamassa convencional com resistência à compressão entre 3,5 a 7,0 MPa. A resistência característica obtida para a amostra construída com CPA-01 e bloco B10 (0,14 MPa) foi superior ao valor característico do Quadro 79 para alvenaria convencional, considerando o uso de argamassa convencional com resistência à compressão entre 1,5 a 3,5 MPa. A resistência característica obtida para a amostra construída com CPA-01 e bloco B20 (0,09 MPa) foi quase igual, porém, um pouco inferior, do valor característico do Quadro 79 para alvenaria convencional, considerando o uso de argamassa convencional com resistência à compressão entre 1,5 e 3,5 MPa.

O valor característico da resistência à tração na flexão perpendicular previsto no Eurocode 6 (CEN, 2021), para a alvenaria de junta fina com a utilização de blocos de concreto é de 0,20 MPa. Se comparados os valores característicos obtidos nos ensaios com o valor característico previsto no Eurocode 6 (CEN, 2021), é possível perceber que a maioria das amostras apresentaram valor superior, com exceção das amostras construídas com o composto CPA-01 e blocos tipo B10 e B20. Deve ser ressaltado, entretanto, que no caso do Eurocode 6 (CEN, 2021), não é considerada a utilização de compostos poliméricos para o assentamento da alvenaria de junta fina.

A resistência à tração na flexão perpendicular observada no trabalho de Marrocchino et al. (2009) para blocos de concreto (14 MPa), assentados com juntas finas de argamassa cimentícia modificada por polímeros foi de 0,76 MPa. Para a utilização de blocos de 20 MPa o valor observado foi de 1,31 MPa. Os valores médios de resistência à tração na flexão perpendicular observados para as amostras construídas com o composto CPA-01

apresentaram valores inferiores aos obtidos pelos autores, entretanto, para as amostras construídas com o composto CPA-02b os valores obtidos ficaram próximos aos observados pelos autores para o bloco de 14 MPa.

## 4.4.2

### **RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO PELO MÉTODO DA ALAVANCA (BOND WRENCH)**

Outro ensaio empregado para avaliar o comportamento à flexão perpendicular da alvenaria de junta fina assentada com compostos poliméricos foi o ensaio da alavanca, com base na norma AS 3700 (2017). Os resultados desses ensaios são demonstrados na sequência.

A apresentação dos resultados foi dividida em quadros, contendo a resistência à tração na flexão obtida para cada corpo de prova, seu valor médio e, também, o valor característico obtido conforme indicado na NBR 16868-3 (ABNT, 2020). Cada quadro corresponde aos resultados obtidos para amostras construídas com um mesmo tipo de bloco, para os dois compostos poliméricos.

No Quadro 80 é possível observar os resultados dos ensaios de flexão realizados com o bloco tipo B4 para cada composto polimérico.

**Quadro 80 - Resistência à tração na flexão obtida no ensaio de alavanca com bloco B4**

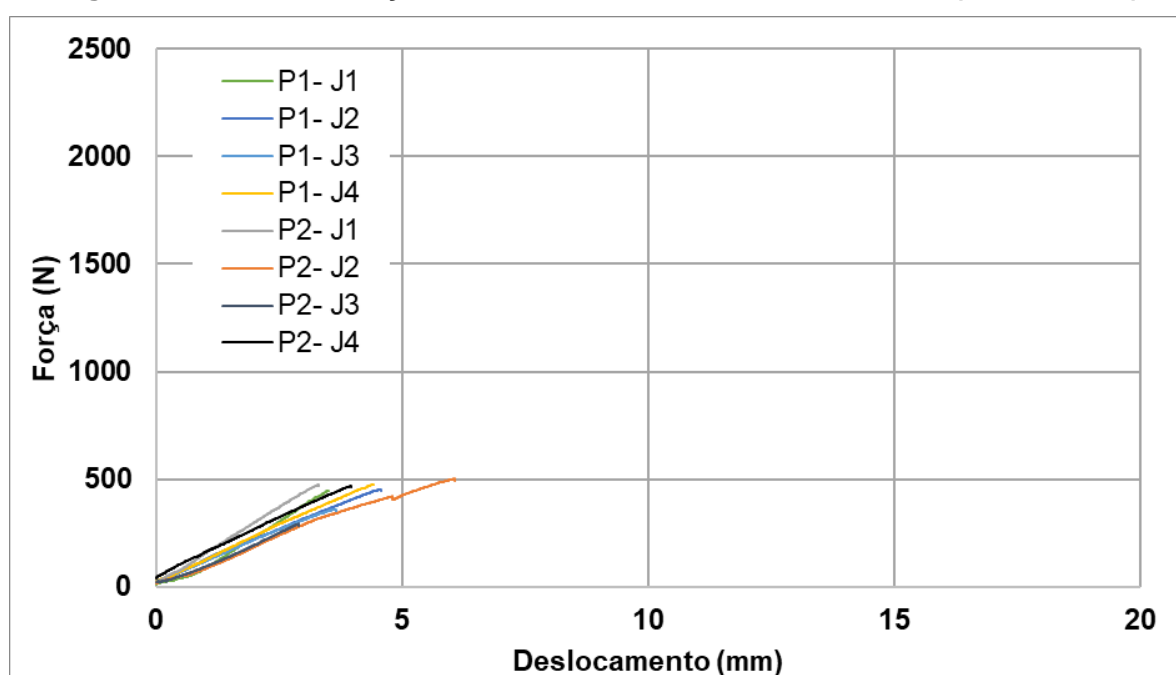
CP	Resistência à t. na flexão - Área bruta (MPa)		Resistência à t. na flexão - Área líquida (MPa)	
	CPA-01	CPA-02b	CPA-01	CPA-02b
P1-J1	0,27	0,39	0,35	0,51
P1-J2	0,28	0,41	0,36	0,53
P1-J3	0,22	0,39	0,28	0,50
P1-J4	0,29	0,36	0,38	0,46
P2-J1	0,29	0,34	0,37	0,44
P2-J2	0,31	0,24	0,40	0,30
P2-J3	0,18	0,44	0,23	0,57
P2-J4	0,29	0,21	0,37	0,27
<b>Média</b>	0,27	0,35	0,34	0,45
<b>Desvio Padrão</b>	0,04	0,08	0,06	0,11
<b>C. V. (%)</b>	16,11	23,85	16,39	24,17
<b><math>f_{tak,est}</math></b>	0,17	0,20	0,22	0,25

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 80, a resistência à tração na flexão obtida na área bruta pela amostra assentada com o composto CPA-01 foi, aproximadamente, 22,9% menor do que a obtida pela amostra assentada com o composto CPA-02b.

As curvas que relacionam a força aplicada e o deslocamento do cutelo do equipamento durante o ensaio da alavanca para cada junta ensaiada para os prismas construídos com o bloco B4 e composto CPA-01 podem ser observadas na Figura 144. Normalmente, a ruptura observada ocorreu de maneira brusca, apresentando queda acentuada na força, logo após a carga máxima ser atingida.

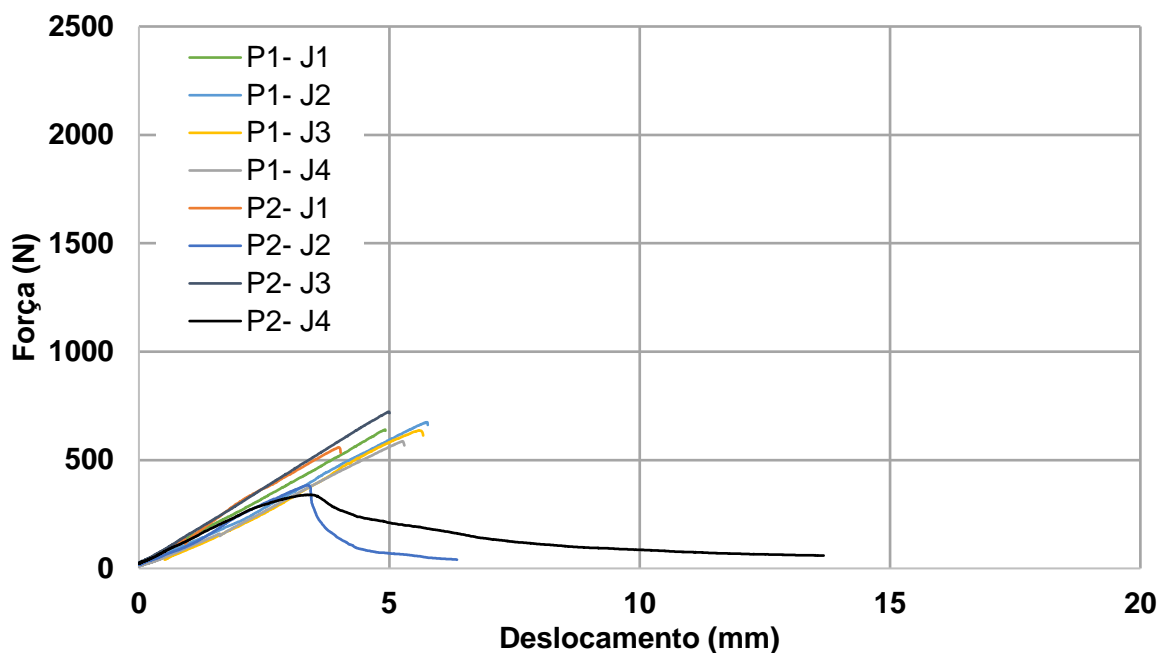
**Figura 144 – Curvas força-deslocamento do ensaio da alavanca (B4 - CPA-01)**



Fonte: Autor (2023).

As curvas que relacionam a força aplicada e o deslocamento do cutelo da prensa durante o ensaio da alavanca para os corpos de prova construídos com o bloco B4 e composto CPA-02b podem ser observadas na Figura 145. Normalmente, a ruptura observada ocorreu de maneira brusca, apresentando queda acentuada na força, logo após a carga máxima ser atingida. Entretanto, para alguns casos, pôde ser observado um decréscimo mais lento de carga após a carga máxima ter sido atingida, normalmente associado à formação e propagação de fissuras nos blocos de concreto.

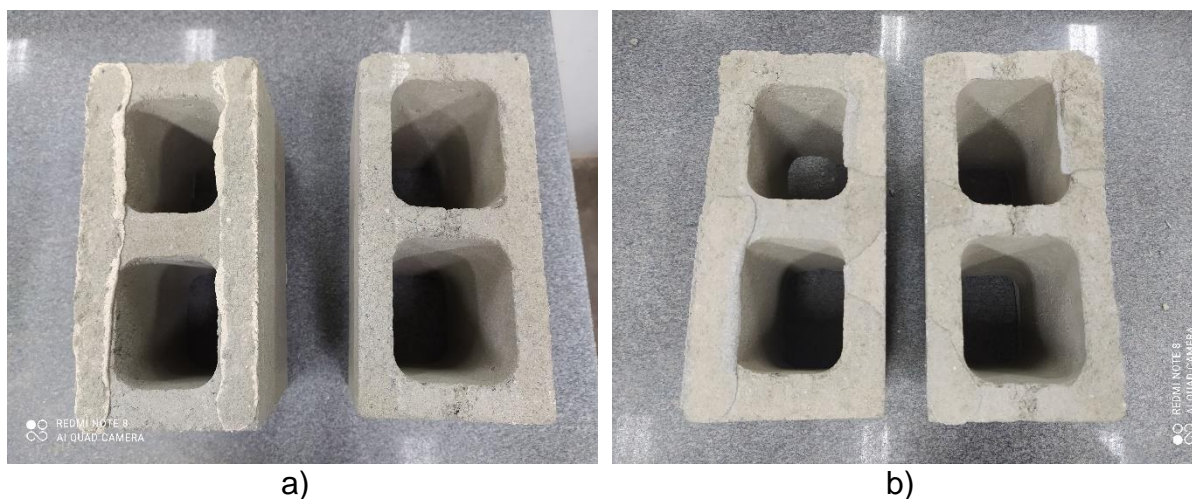
**Figura 145 - Curvas força-deslocamento do ensaio da alavanca (B4 - CPA-02b)**



Fonte: Autor (2023).

Exemplo de ruptura observada para as amostras construídas com o bloco tipo B4 podem ser verificadas nas Figura 146-a e Figura 146-b, respectivamente, para o composto CPA-01 e CPA-02b.

**Figura 146 - Rupturas observadas (bloco B4)**



Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 146, para amostras construídas com o bloco tipo B4, para os dois compostos poliméricos utilizados, a principal forma de ruptura observada ocorreu no bloco de concreto, apresentando também, alguns sinais de ruptura na interface entre bloco e composto polimérico.

No Quadro 81 é possível observar os resultados dos ensaios de flexão realizados em corpos de prova construídos com o bloco tipo B10 para cada composto polimérico.

**Quadro 81 - Resistência à tração na flexão obtida no ensaio de alavanca com bloco B10**

CP	Resistência à t. na flexão - Área bruta (MPa)		Resistência à t. na flexão - Área líquida (MPa)	
	CPA-01	CPA-02b	CPA-01	CPA-02b
P1-J1	0,86	1,32	1,12	1,71
P1-J2	0,84	-	1,09	-
P1-J3	0,45	1,38	0,58	1,79
P1-J4	0,95	1,32	1,23	1,72
P2-J1	0,80	1,24	1,04	1,61
P2-J2	0,88	1,49	1,15	1,94
P2-J3	0,97	1,46	1,26	1,90
P2-J4	0,90	1,46	1,17	1,89
<b>Média</b>	0,83	1,38	1,08	1,80
<b>Desvio Padrão</b>	0,16	0,09	0,21	0,12
<b>C. V. (%)</b>	19,72	6,67	19,83	6,69
<b><math>f_{tak,est}</math></b>	0,53	1,24	0,68	1,61

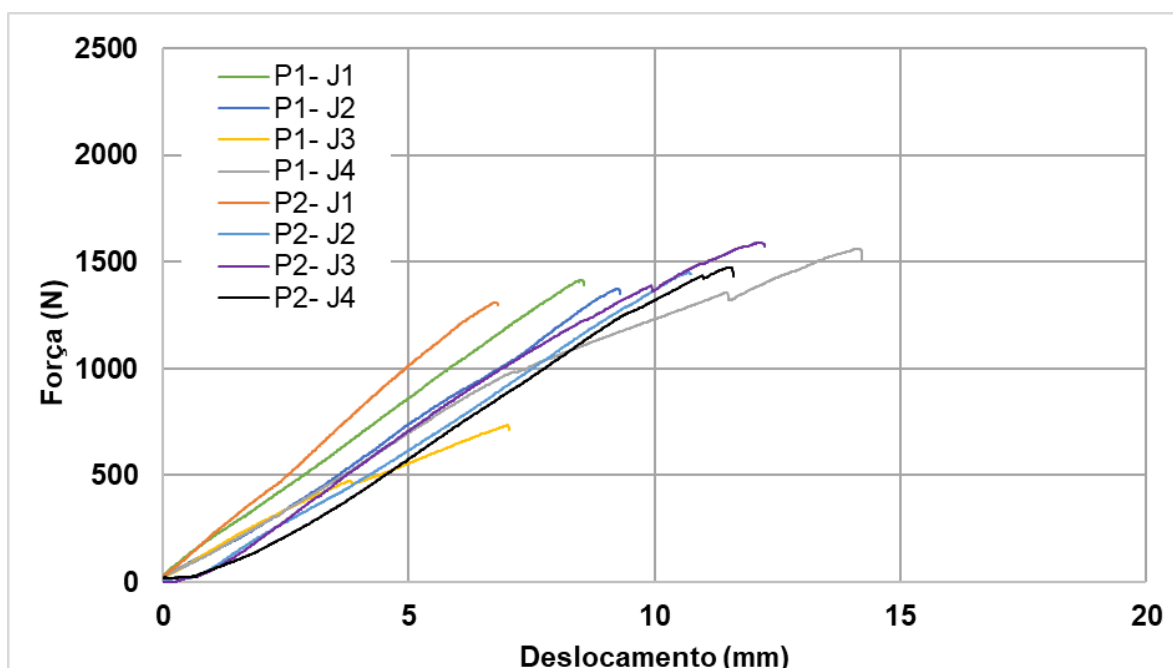
Fonte: Autor (2023).

Os resultados de flexão referentes ao corpo de prova P1-J2 assentado com o composto CPA-02b não foram realizados, devido a danos observados no corpo de prova.

Como pode ser observado no Quadro 81, a resistência à tração na flexão média na área bruta obtida para a amostra assentada com o composto CPA-01 foi 39,9% inferior ao valor obtido pela amostra assentada com o composto CPA-02b.

As curvas que relacionam a força aplicada e o deslocamento do cutelo da prensa durante o ensaio da alavanca para cada junta ensaiada para os prismas construídos com o bloco B10 e composto CPA-01, podem ser observadas na Figura 147. Normalmente, a ruptura observada ocorreu de maneira brusca, apresentando queda acentuada na força aplicada, logo após a carga máxima ser atingida.

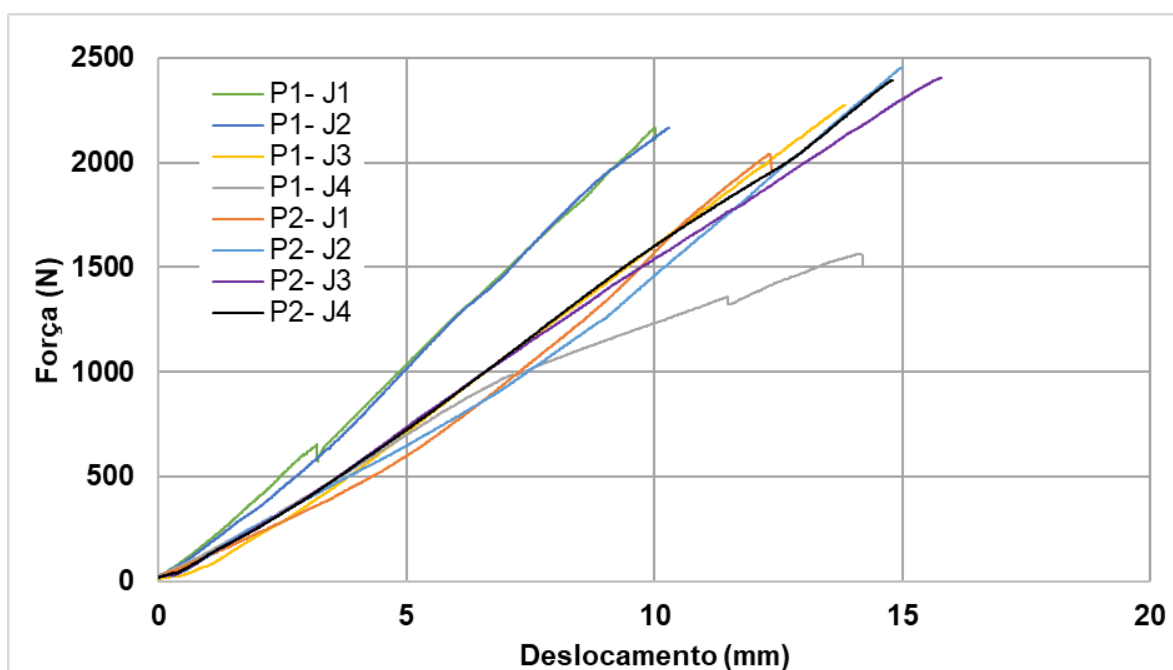
**Figura 147 - Curvas força-deslocamento do ensaio da alavanca (B10 - CPA-01)**



Fonte: Autor (2023).

As curvas que relacionam a força e o deslocamento obtidos no ensaio da alavanca para a amostra construída com bloco B10 e composto CPA-02b podem ser observadas na Figura 148. Normalmente, a ruptura observada ocorreu de maneira brusca, apresentando queda acentuada na força aplicada, logo após a carga máxima ser atingida.

**Figura 148 - Curvas força-deslocamento do ensaio da alavanca (B10 - CPA-02b)**



Fonte: Autor (2023).



Exemplo de ruptura observada para as amostras construídas com o bloco tipo B10 podem ser observadas nas Figura 149-a e Figura 149-b, respectivamente, para o composto CPA-01 e CPA-02b.

**Figura 149 - Rupturas observadas (bloco B10)**



Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 149-a, a principal forma de ruptura observada nos corpos de prova construídos com o composto CPA-01 ocorreu na interface entre bloco e composto polimérico. Para a amostra construída com o composto CPA-02b, aparentemente, a ruptura ocorreu parte no composto polimérico e parte na interface entre bloco e composto polimérico, como pode ser verificado na Figura 149-b.

No Quadro 82 é possível observar os resultados dos ensaios de flexão realizados nas amostras construídas com o bloco B20 para cada composto polimérico.



**Quadro 82 - Resistência à tração na flexão obtida no ensaio de alavanca com bloco B20**

CP	Resistência à t. na flexão - Área bruta (MPa)		Resistência à t. na flexão - Área líquida (MPa)	
	CPA-01	CPA-02b	CPA-01	CPA-02b
P1-J1	0,17	1,24	0,21	1,61
P1-J2	0,79	1,33	1,03	1,73
P1-J3	0,61	0,97	0,79	1,26
P1-J4	0,77	1,22	1,00	1,59
P2-J1	0,35	0,90	0,45	1,16
P2-J2	0,61	1,22	0,79	1,58
P2-J3	0,56	1,50	0,72	1,94
P2-J4	0,42	1,39	0,55	1,81
<b>Média</b>	0,54	1,22	0,69	1,58
<b>Desvio Padrão</b>	0,21	0,20	0,28	0,26
<b>C. V. (%)</b>	39,70	16,52	40,04	16,58
<b><math>f_{tak,est}</math></b>	0,32	0,83	0,41	1,08

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 82, a resistência à tração na flexão na área bruta obtida para a amostra assentada com o composto CPA-01 foi, aproximadamente, 55,7% inferior à apresentada pela amostra assentada com CPA-02b.

Ao se comparar os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão obtidos pelo método da alavanca e pelo método da norma brasileira é possível observar uma tendência de os resultados médios obtidos pelo método da alavanca serem superiores aos obtidos pelo método da norma brasileira. Uma das explicações para isso pode estar ligada ao fato de no ensaio da norma australiana as juntas serem ensaiadas individualmente, enquanto no ensaio da norma brasileira de flexão em 4 pontos, existem 5 fiadas de blocos e 4 juntas sendo ensaiadas em um único corpo de prova.

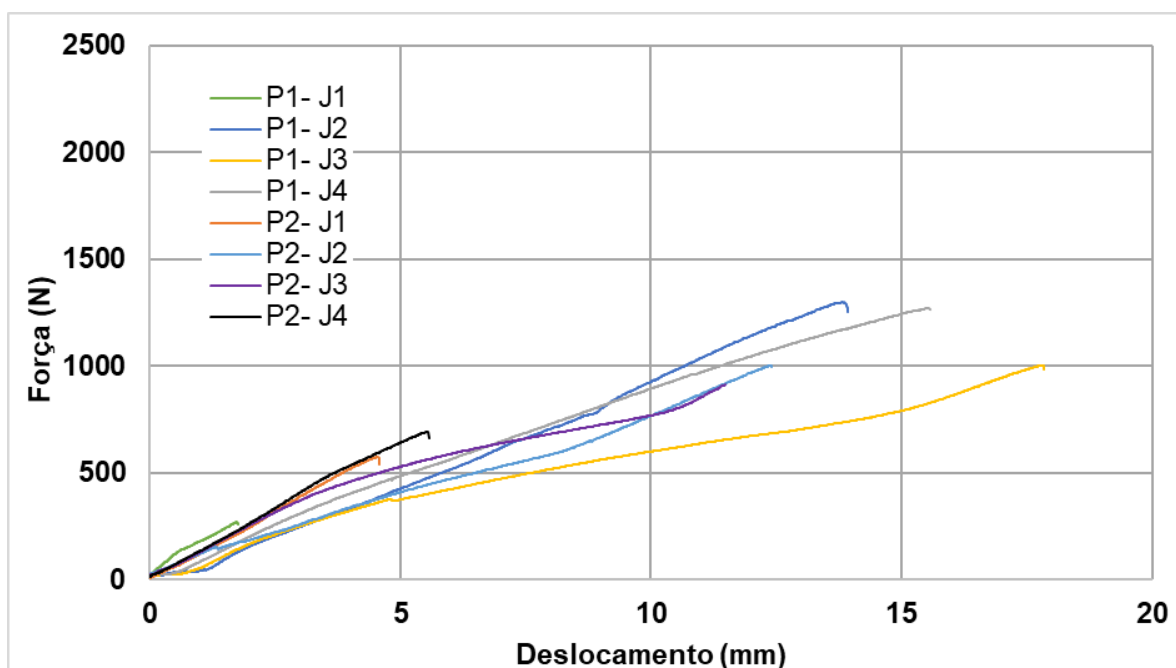
Segundo Grimm e Tucker (1985) para corpos de prova com um momento fletor uniforme a resistência da alvenaria está inversamente ligada ao comprimento do vão, pois conforme se aumenta o comprimento do vão, a quantidade de juntas aumenta e, conseqüentemente, é aumentada a probabilidade de haver uma junta fraca no vão. Portanto, a probabilidade de falha no ensaio da norma brasileira aumenta, pois em um único prisma existem 4 juntas de assentamento submetidas ao ensaio. No caso da norma australiana que as juntas são ensaiadas individualmente, os resultados mais baixos passam a ser diluídos na

média junto com os demais resultados, o que não necessariamente ocorre no caso da norma brasileira que testa várias juntas ao mesmo tempo em cada corpo de prova.

Choudhary (2015) executou ensaios comparando um método de alavanca com o método de flexão de prisma conforme a norma ASTM E518 em alvenaria de tijolos cerâmicos assentados com argamassa cimentícia de junta normal. A resistência média à tração na flexão obtida com o método da alavanca foi de 0,79 MPa, enquanto a resistência à tração na flexão obtida pelo método de flexão em prisma foi de 0,57 MPa. O coeficiente de variação obtido pelo autor nos ensaios de prisma foi de, aproximadamente, 51%, enquanto no ensaio de alavanca foi de, aproximadamente, 43%. Ou seja, os resultados obtidos pelo autor com a alavanca foram maiores do que os obtidos com o prisma, semelhante ao que foi observado no caso da presente pesquisa com alvenaria de junta fina. A maior parte dos valores de coeficiente de variação obtidos nessa pesquisa para alvenaria de junta fina foram inferiores aos obtidos pelo autor e, de maneira semelhante, a maior parte dos valores do coeficiente de variação obtidos no ensaio da norma brasileira foram superiores aos observados no ensaio de alavanca.

As curvas que relacionam a força e o deslocamento obtidos no ensaio da alavanca para a amostra construída com bloco B20 e composto CPA-01 podem ser observadas na Figura 150. Normalmente, a ruptura observada ocorreu de maneira brusca, apresentando queda acentuada na força aplicada, logo após a carga máxima ter sido atingida.

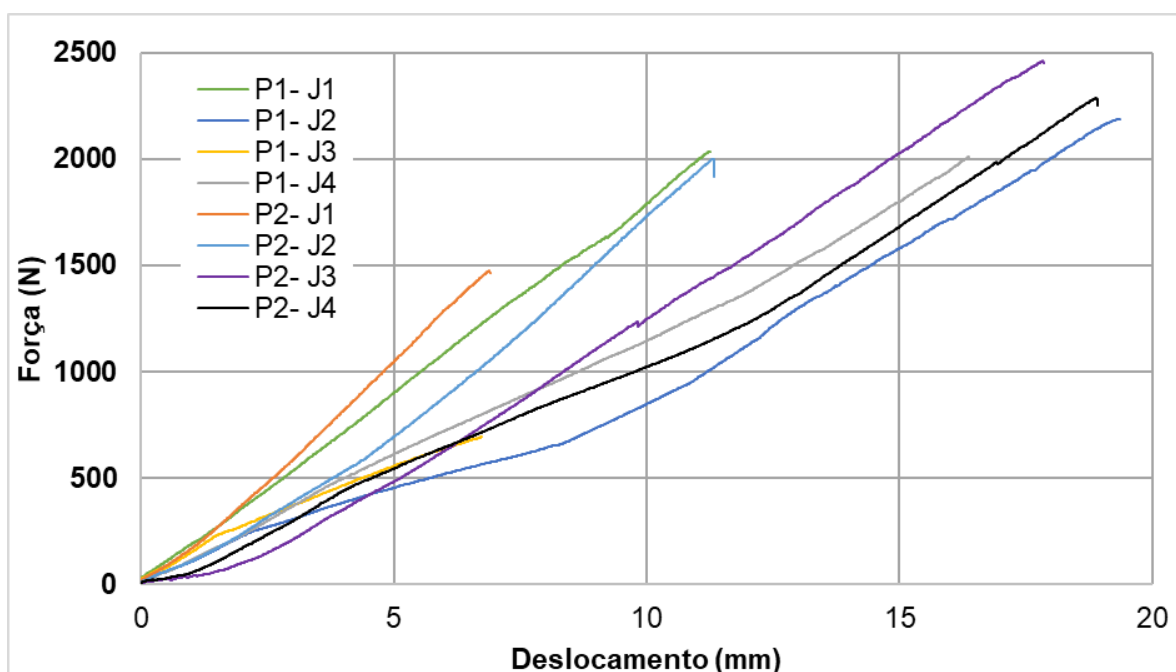
**Figura 150 - Curvas força-deslocamento do ensaio da alavanca (B20 - CPA-01)**



Fonte: Autor (2023).

As curvas que relacionam a força e o deslocamento obtidos no ensaio da alavanca para a amostra construída com bloco B20 e composto CPA-02b podem ser observadas na Figura 151. Normalmente, a ruptura observada ocorreu de maneira brusca, apresentando queda acentuada na força aplicada, logo após a carga máxima ser atingida.

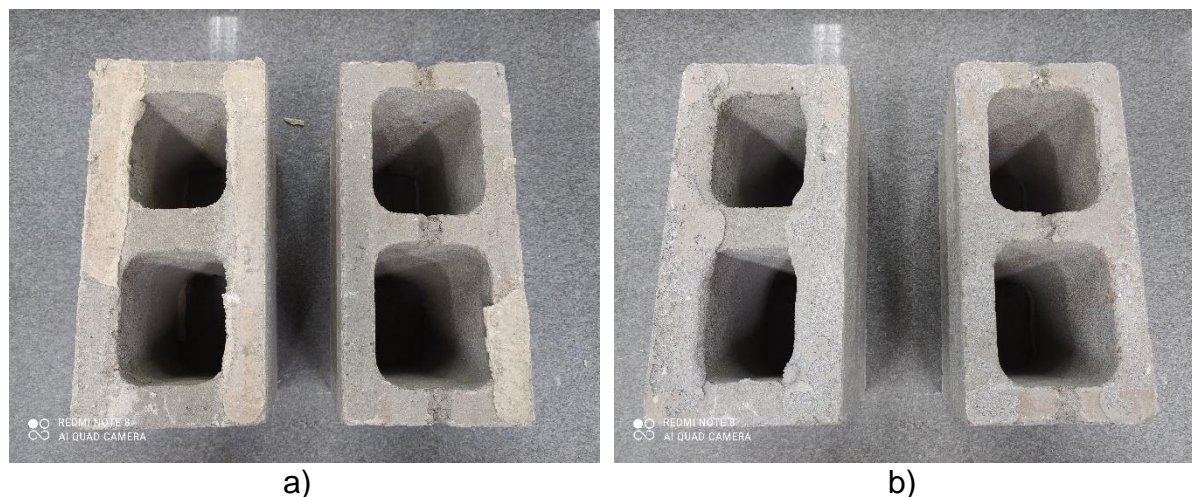
**Figura 151 - Curvas força-deslocamento do ensaio da alavanca (B20 - CPA-02b)**



Fonte: Autor (2023).

Exemplo de ruptura observada para as amostras construídas com o bloco tipo B20 podem ser visualizados nas Figura 152-a e Figura 152-b, respectivamente, para o composto CPA-01 e CPA-02b.

**Figura 152 - Rupturas observadas (bloco B20)**



Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 152-a, a principal forma de ruptura observada nos corpos de prova construídos com o composto CPA-01 foi na interface entre bloco e composto polimérico. Para a amostra construída com CPA-02b, a forma de ruptura observada foi parte no composto polimérico e parte na interface entre bloco e composto polimérico, como pode ser verificado na Figura 152-b.

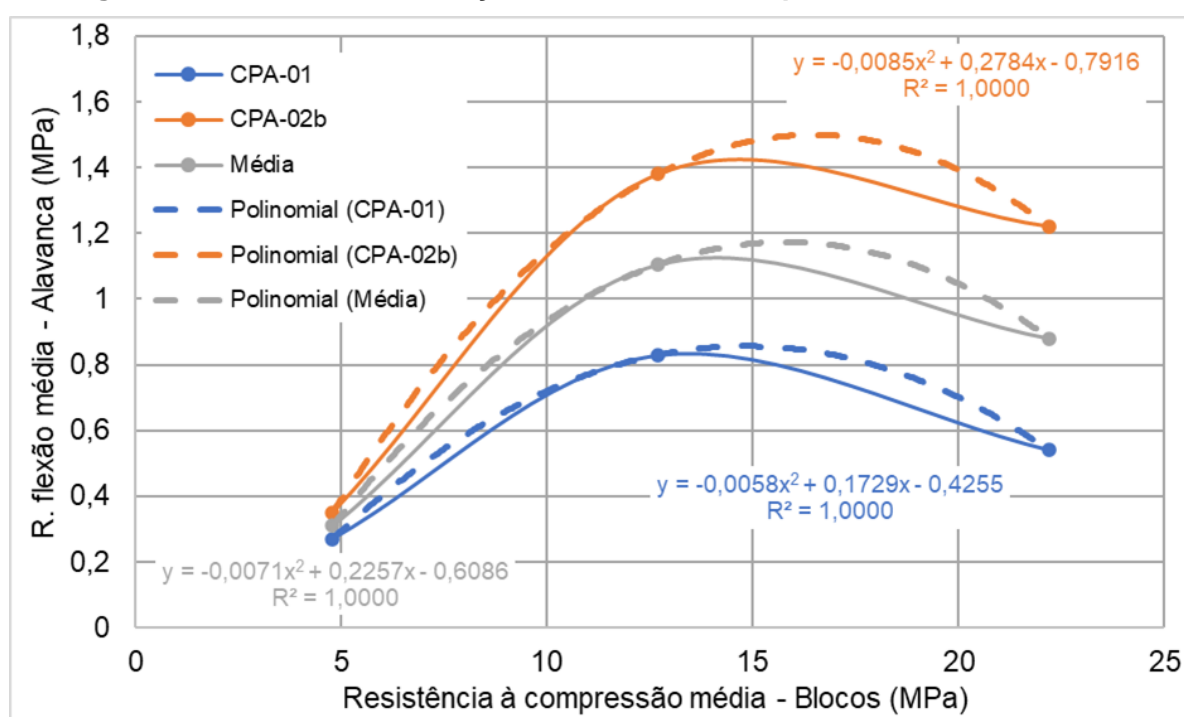
Os resultados observados nos ensaios de alavanca realizados com amostras de alvenaria assentada com composto polimérico foram superiores aos observados no trabalho de Oliveira (2014) que obteve resultados de resistência à tração na flexão média de 0,16 MPa e 0,16 MPa para duas amostras de alvenaria assentadas, respectivamente, com argamassa cimentícia convencional de resistência média à compressão de 6,93 e 3,52 MPa. Os blocos de concreto utilizados possuíam resistência média à compressão de 10,21 MPa. O coeficiente de variação observada para as duas amostras foi de, aproximadamente, 28 e 33%. Esse coeficiente de variação foi superior ao observado para a maioria das amostras utilizadas nessa pesquisa, com exceção da amostra assentada com o composto CPA-01 e bloco B20.

Os resultados obtidos por Pasquantonio et al. (2020) também foram inferiores aos obtidos nessa pesquisa. Os autores obtiveram valor médio de resistência à tração na flexão de 0,08 MPa. No caso, a amostra de bloco de concreto possuía escala reduzida e resistência média à compressão de 18,4 MPa, enquanto a argamassa cimentícia convencional empregadas em juntas de 10 mm de espessura, possuía resistência média à compressão de

20,8 MPa. O coeficiente de variação observado para a amostra foi de 29,5%, superando o coeficiente observado para a maior parte das amostras utilizadas nessa pesquisa.

Para facilitar a comparação dos resultados obtidos pelas diferentes amostras são apresentadas na Figura 153, as curvas que relacionam a resistência média à flexão obtida com as amostras construídas com cada composto polimérico, em função da resistência média à compressão do tipo de bloco utilizado em sua construção. Também é apresentada uma curva relacionando a média entre os resultados obtidos com cada composto polimérico, considerando um mesmo tipo de bloco.

**Figura 153 - Resistência à tração na flexão obtidas para diferentes amostras**



Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 153, o comportamento apresentado pelas amostras construídas com os dois compostos poliméricos foi semelhante. Nos dois casos, o maior valor de resistência à tração na flexão foi obtido com a amostra construída com o bloco tipo B10 e os mais baixos foram obtidos com o bloco B4. Apesar do comportamento ser semelhante, é possível perceber que a resistência média à flexão obtida com as amostras construídas com o composto CPA-02b foram superiores aos obtidos com o composto CPA-01, considerando um mesmo tipo de bloco. Esses resultados superiores foram observados para os 3 tipos de blocos de concreto utilizados. Os resultados obtidos pelos dois compostos poliméricos foram próximos, considerando a construção com o bloco B4. Isso pode estar ligado a forma de ruptura semelhante observada nessas amostras que foi caracterizada pela observação de danos nos blocos utilizados.

Outra informação que pode ser obtida a partir da Figura 153 é de que o comportamento apresentado pelas amostras construídas com o composto CPA-01 foi diferente do observado para o ensaio de flexão de 4 pontos. No caso do ensaio de 4 pontos foi observada uma leve redução da resistência obtida conforme se aumenta a resistência do bloco empregado. Isso não foi observado para o ensaio de flexão pelo método da alavanca.

Para compreender um pouco melhor o comportamento apresentado por cada amostra durante o carregamento, pode ser observado o Quadro 83, que apresenta o coeficiente angular. Basicamente, esse coeficiente representa a inclinação da curva força-deslocamento obtida para cada corpo de prova, no trecho de tensão compreendido entre 40 e 50% da força máxima aplicada.

**Quadro 83 - Coeficiente angular**

CP	Coeficiente angular (N/mm)					
	B4		B10		B20	
	CPA-01	CPA-02b	CPA-01	CPA-02b	CPA-01	CPA-02b
P1-J1	143,09	125,68	172,12	237,96	187,50	188,26
P1-J2	86,60	124,80	166,70	249,80	101,50	139,20
P1-J3	102,10	130,90	114,00	177,40	47,70	74,90
P1-J4	111,10	123,40	151,50	151,50	80,30	104,90
P2-J1	149,47	172,63	210,91	188,47	142,67	233,80
P2-J2	102,07	144,09	145,49	164,07	61,60	190,18
P2-J3	96,97	143,96	162,26	159,78	88,83	148,93
P2-J4	106,16	125,42	156,68	178,33	144,91	94,29
<b>Média</b>	112,20	136,36	159,94	188,42	106,88	146,81
<b>Desvio Padrão</b>	22,28	16,89	27,26	36,30	47,57	54,65
<b>C. V. (%)</b>	19,86	12,39	17,04	19,27	44,51	37,22

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 83, os maiores valores de coeficiente angular foram obtidos para as amostras construídas com a utilização do Bloco tipo B10, tanto para o composto CPA-01, quanto para o composto CPA-02b. Os resultados de resistência à tração na flexão obtidos pelo método da alavanca também foram maiores para esse tipo de bloco. Isso indica que essa amostra além de apresentar o maior resultado de resistência à tração na flexão, também apresentou a maior inclinação na curva força-deslocamento no trecho entre 40 e 50% da carga máxima.

Como pode ser observado no Quadro 83, o coeficiente angular obtido para as amostras construídas com o composto CPA-02b foi maior do que para as amostras construídas com CPA-01, considerando um mesmo tipo de bloco. Isso ocorreu para os três tipos de blocos utilizados. O coeficiente angular médio obtido para as amostras construídas com o composto CPA-01 foi aproximadamente 17,7%, 15,1% e 27,2% inferior ao resultado obtido para as amostras construídas com o composto CPA-02b, respectivamente, para os blocos tipo B4, B10, B20. Os valores de resistência à tração na flexão obtidos pelo método da alavanca também foram menores para as amostras construídas com o uso do composto CPA-01. Entretanto, aparentemente, a diferença percentual entre as amostras construídas com cada tipo de composto e um mesmo tipo de bloco é mais pronunciada no resultado da resistência à tração na flexão do que no coeficiente angular.

Para avaliar se o tipo de bloco e o tipo de composto polimérico apresentam influência significativa no resultado de resistência à tração na flexão pelo método da alavanca, foi realizada a análise de variância (ANOVA) com dois fatores, para um nível de confiança de 95%. Como resultado, foi encontrado que o tipo de bloco, tipo de composto e a interação entre bloco e composto exercem influência significativa nos resultados.

Para comparar de maneira específica a diferença entre as médias foi empregado o teste Tukey, com 95% de confiança. Os resultados são demonstrados no Quadro 84.

**Quadro 84 - Grupamento de letras - diferença de médias (Tukey)**

Fator considerado	Composto polimérico	Bloco de concreto	Média (MPa)	Grupos			
Tipo de composto	CPA-02b	-	0,97	A	-	-	-
	CPA-01		0,54	-	B	-	-
Tipo de Bloco	-	B10	1,09	C	-	-	-
		B20	0,88	-	D	-	-
		B4	0,31	-	-	E	-
Interação (bloco/composto)	CPA-02b	B10	1,38	F	-	-	-
	CPA-02b	B20	1,22	F	-	-	-
	CPA-01	B10	0,83	-	G	-	-
	CPA-01	B20	0,54	-	-	H	-
	CPA-02b	B4	0,35	-	-	H	I
	CPA-01	B4	0,27	-	-	-	I

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 84, analisando o tipo de composto utilizado, a diferença entre as médias foi considerada significativa. Analisando o tipo de bloco utilizado a



diferença entre as médias dos 3 tipos de blocos foram consideradas significantes. Analisando a interação entre bloco e compostos é possível perceber que o bloco B10 e B20 apresentaram médias equivalentes com a utilização do composto CPA-02b. Para o caso das amostras construídas com o bloco B4 e cada um dos compostos poliméricos, as médias foram consideradas equivalentes. As médias entre o composto CPA-01 com bloco B20 e CPA-02b com bloco B4 também foram consideradas equivalentes.

## 4.5 RESULTADOS DA QUINTA ETAPA – AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PARALELA E DA ISOTROPIA

Nessa etapa são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão paralela realizados em duas amostras construídas com o bloco tipo B10. Uma amostra foi construída com o composto CPA-01 e outra com o composto CPA-02b. A direção da aplicação da força nesse ensaio foi com sentido paralelo à junta horizontal de assentamento.

Os resultados dos ensaios de flexão paralela obtidos para cada uma das amostras podem ser observados no Quadro 85.

**Quadro 85 - Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão paralela**

CP	CPA-01			CPA-02b		
	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Ruptura observada	Carga máxima (kN)	Tensão (MPa)	Ruptura observada
1	9,71	0,40	3 fiadas romperam nas juntas verticais e 1 no bloco.	15,24	0,60	2 fiadas romperam nas juntas verticais e 2 nos blocos.
2	7,71	0,32	4 fiadas romperam nas juntas verticais.	17,05	0,67	2 fiadas romperam nas juntas verticais e 2 nos blocos.
3	9,53	0,39	3 fiadas romperam nas juntas verticais e 1 no bloco.	14,96	0,59	2 fiadas romperam nas juntas verticais e 2 nos blocos.
4	7,65	0,32	4 fiadas romperam nas juntas verticais.	10,25	0,41	3 fiadas romperam nas juntas verticais e 1 no bloco.
5	7,2	0,30	4 fiadas romperam nas juntas verticais.	10,25	0,42	3 fiadas romperam nas juntas verticais e 1 no bloco.
<b>Média</b>	8,36	0,35	-	13,55	0,54	-
<b>D. Pad.</b>	1,17	0,05	-	3,12	0,12	-
<b>CV (%)</b>	14,00	14,29	-	23,03	22,22	-

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 85, a amostra assentada com o composto CPA-01 apresentou resistência à tração na flexão paralela média, cerca de 35,2% menor do que a



amostra assentada com o composto CPA-02b. Portanto, considerando um mesmo tipo de bloco, a resistência à tração na flexão obtida com o composto CPA-02b foi maior do que a obtida com o composto CPA-01. Isso foi observado para os ensaios de tração na flexão realizados na direção paralela e perpendicular à junta horizontal de assentamento.

O valor do coeficiente de variação observado ficou próximo à faixa de variação observada nos ensaios de resistência à tração na flexão paralela em blocos vazados de concreto de Hamid e Drysdale (1988), mostrados no Quadro 10, para alvenaria convencional. Os autores observaram coeficiente de variação de até 22% nos ensaios realizados.

Ao se utilizar o procedimento previsto no anexo A da NBR 16868-3 (ABNT, 2020), para calcular a resistência característica das duas amostras, se obtém os valores de 0,26 MPa e 0,36 MPa, respectivamente, para a amostra assentada com o composto CPA-01 e CPA-02b.

O valor característico da resistência à tração na flexão paralela indicado no Eurocode 6 (CEN, 2021) para alvenaria de junta fina com utilização de blocos de concreto é de 0,30 MPa. Portanto, é possível constatar que apenas a amostra assentada com composto CPA-02b apresentou valor de resistência característica à flexão paralela superior ao valor indicado no Eurocode 6 (CEN, 2021). Entretanto, para o caso das duas amostras o valor médio foi superior a 0,30 MPa.

A resistência à tração na flexão paralela observada no trabalho de Marrocchino et al. (2009) para alvenaria de blocos de concreto (14 MPa), assentados com juntas finas de argamassa cimentícia modificada por polímeros foi de 1,19 MPa. Com a utilização de blocos de 20 MPa, os autores obtiveram valores de 1,78 MPa. Portanto, os valores médios de resistência à tração na flexão paralela observados para as duas amostras utilizadas nessa pesquisa foram inferiores aos obtidos pelos autores.

Um exemplo da forma de ruptura mais comum observado nos ensaios de resistência à tração na flexão paralela pode ser observado nas Figura 154-a e Figura 154-b, respectivamente, para corpos de prova assentados com o composto CPA-01 e CPA-02b.

**Figura 154 - Exemplos de rupturas observadas**

Fonte: Autor (2023). Legenda: Corpo de prova assentado com CPA-01; Corpo de prova assentado com CPA-02b.

Ao se comparar a forma de ruptura entre as duas amostras, é possível perceber uma maior tendência de ruptura nas juntas verticais do corpo de prova, produzindo esse formato de “escada” na região de ruptura, para a amostra assentada com o composto CPA-01 (Figura 154-a). Para o caso dos corpos de prova assentados com o composto CPA-02b (Figura 154-b), a tendência observada é de ocorrência de ruptura em parte nos blocos de concreto e, em parte, nas juntas verticais, com um formato mais retilíneo do que o observado para a outra amostra.

Embora parte da ruptura observada nos corpos de prova possa ter ocorrido nos blocos de concreto, ainda assim, pode-se dizer que a presença das juntas verticais continua exercendo grande influência nos resultados, pois em todos os corpos de prova foi identificada a presença de fissura no local da junta vertical, em maior ou menor grau de participação.

Após obter os resultados do ensaio de flexão paralela dessas amostras é possível fazer a comparação com os resultados obtidos nos ensaios de flexão perpendicular, em etapas anteriores. Essa comparação é feita através do coeficiente de resistência ortogonal ( $\mu$ ) para avaliar se o comportamento apresentado por esse tipo de alvenaria possui tendências ortotrópicas ou isotrópicas. Os valores do coeficiente de resistência ortogonal ( $\mu$ ) podem ser observados no Quadro 86. Esse coeficiente foi calculado considerando a resistência à tração na flexão média e característica obtida pelas amostras nas duas direções de ensaio.

**Quadro 86 - Coeficiente de resistência ortogonal**

Composto	Tipo de bloco	Resistência à tração na flexão média			Resistência à tração na flexão característica		
		Perpendicular (MPa)	Paralela (MPa)	$\mu$	Perpendicular (MPa)	Paralela (MPa)	$\mu$
CPA-01	B10	0,25	0,35	1,40	0,14	0,26	1,86
CPA-02b	B10	0,81	0,54	0,67	0,60	0,36	0,60

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 86, o coeficiente de resistência ortogonal obtido para as amostras construídas com o composto CPA-01 apresentou resultados de 1,40 e 1,86, respectivamente, para coeficiente calculado em relação ao valor médio e valor característico. Para o caso das amostras assentadas com o composto CPA-02b o coeficiente obtido foi de 0,67 para o valor médio e, de 0,60 para o valor característico.

Para o caso do composto CPA-01, os valores de resistência à tração na flexão paralela foram maiores do que os valores de resistência à tração na flexão perpendicular. Para o caso do composto CPA-02b, os valores de resistência à tração na flexão perpendicular foram superiores aos de resistência à tração na flexão paralela. Uma possível explicação para os resultados mais elevados na direção perpendicular na amostra assentada com CPA-02b é a diferença entre a forma de ruptura observada e as dimensões dos corpos de prova nas duas direções. Os corpos de prova ensaiados na direção perpendicular apresentaram ruptura na junta de assentamento horizontal devido à tração do composto ou descolamento da interface bloco/composto. Os corpos de prova ensaiados na direção paralela apresentaram ruptura em parte nos blocos e parte nas juntas de assentamento verticais. Portanto, é possível que o formato de corpo de prova utilizado no ensaio realizado na direção paralela, aliado à aderência com o composto polimérico, tenha provocado condições para que os esforços de tração observados nos blocos fossem superiores à sua resistência, levando o conjunto a ruptura em cargas inferiores às observadas nos ensaios realizados em direção perpendicular que somente romperam nas juntas de assentamento e não nos blocos.

Lembrando que, de acordo com Parsekian, Hamid e Drysdale (2014), esse valor costuma ser próximo a 2,0 na maioria das normas internacionais, mas no caso de a alvenaria ser grauteada, esse valor torna-se mais próximo de 1,0.

Ao analisar os valores do coeficiente de resistência ortogonal obtido para as duas amostras, com relação ao seu valor médio, os resultados estão mais próximos de 1 do que de 2. Portanto, esses resultados podem ser considerados um indício de que o comportamento apresentado por esse tipo de corpo de prova está um pouco mais próximo ao identificado para

a alvenaria grauteada do que para a alvenaria convencional. Dessa forma, existe uma tendência maior de isotropia para esses corpos de prova do que a identificada para a alvenaria convencional.

Ainda assim, ao se considerar o coeficiente calculado em função do valor característico das amostras, é possível observar que a amostra assentada com CPA-01 apresenta valor mais próximo a 2. Com base nesse resultado a tendência identificada é de comportamento semelhante ao identificado para alvenaria convencional, ou seja, ortotrópica. Para o caso do composto CPA-02b, quando analisados os valores característicos, também foi constatado coeficiente mais próximo de 1, indicando tendência de comportamento isotrópico.

O valor característico de resistência à tração na flexão paralela e perpendicular prevista no Eurocode 6 (CEN, 2021) para alvenaria de junta fina com bloco de concreto é, respectivamente, 0,30 MPa e 0,20 MPa. Considerando esses valores, o coeficiente de resistência ortogonal equivalente seria de, aproximadamente, 1,50. Portanto, comparando esse valor com o mostrado no Quadro 86, é possível identificar que o coeficiente obtido pela amostra assentada com o composto CPA-02b apresentou valor mais próximo a 1,0 do que os 1,50 previstos no Eurocode 6 (CEN, 2021), tanto para o coeficiente calculado em função dos valores característicos, quanto em função dos valores médios. Dessa forma, para o caso desse composto, o comportamento obtido foi mais próximo ao de uma alvenaria grauteada do que o próprio valor previsto no Eurocode 6 (CEN, 2021). Para o caso das amostras construídas com o composto CPA-01, é possível perceber que o valor do coeficiente calculado em função dos resultados médios ficou próximo ao valor previsto no Eurocode 6 (CEN, 2021). No entanto, para o caso do coeficiente calculado em função do valor característico o valor obtido foi mais próximo a 2,0 e, portanto, o comportamento pode ser considerado mais semelhante ao da alvenaria convencional.

O valor do coeficiente de resistência ortogonal obtido em função dos resultados médios nos ensaios de Marrocchino et al. (2009) para bloco de concreto com 14MPa de resistência à compressão e utilizando argamassa cimentícia modificada com polímero foi de 1,57. O valor do coeficiente de resistência ortogonal obtido com blocos de 20 MPa foi de 1,36. Comparando com esses valores obtidos pelos autores é possível perceber que as amostras construídas com o composto CPA-02b foram próximos de 1,0, porém um pouco inferiores. Portanto, existe evidência de que esses resultados apresentam tendência a isotropia, de maneira semelhante ao obtido para a alvenaria de junta fina com blocos de concreto assentados com argamassas cimentícias modificadas por polímeros. Os resultados obtidos com o composto CPA-01, em função dos valores médios, ficaram próximos aos obtidos pelos autores supracitados. Entretanto, os resultados em função dos valores característicos ficaram com valores

superiores aos dos autores, indicando maior tendência de comportamento semelhante à alvenaria convencional.

## 4.6 RESULTADOS DA SEXTA ETAPA – ESTUDO DO DESEMPENHO

Os resultados dos ensaios realizados para avaliar o comportamento de amostras de alvenaria perante alguns requisitos e critérios previstos da norma de desempenho das edificações NBR 15575-4 (ABNT, 20201) podem ser observados nesse item.

Foram utilizadas nesses ensaios duas amostras, sendo uma para cada composto polimérico. O bloco tipo B20 foi utilizado na construção dos corpos de prova assentados com o composto CPA-01. O bloco tipo B4 foi utilizado na construção dos corpos de prova assentados com o composto CPA-02b.

### 4.6.1 TÉRMICO

#### RESULTADOS – ENSAIO DE CHOQUE

Os resultados dos deslocamentos medidos durante a realização dos ensaios de choque térmico realizados para as duas amostras de alvenaria podem ser observados no Quadro 87. O critério de deslocamento máximo previsto na norma NBR 15575-4 (ABNT, 2021) também está apresentado ( $h/300$ ), para cada corpo de prova.

**Quadro 87 – Deslocamentos horizontais observados durante ensaio**

Ciclo	B20 - CPA-01				B4 - CPA-02b			
	CP-01		CP-02		CP-01		CP-02	
	$d_{h1}$ (mm)	$d_{h2}$ (mm)	$d_{h1}$ (mm)	$d_{h2}$ (mm)	$d_{h1}$ (mm)	$d_{h2}$ (mm)	$d_{h1}$ (mm)	$d_{h2}$ (mm)
1	-0,85	-0,06	-1,44	-0,99	-0,65	-0,57	-0,97	-0,58
2	-0,40	0,05	-0,40	0,00	-0,65	-0,45	-0,37	-0,06
3	-0,37	0,01	-0,44	-0,08	-0,57	-0,45	-0,32	-0,16
4	-0,21	0,18	-0,45	-0,13	-0,56	-0,46	-0,25	0,04
5	-0,28	0,09	-0,39	-0,07	-0,39	-0,29	-0,30	-0,20
6	-0,35	-0,02	-0,36	-0,06	-0,38	-0,30	-0,25	-0,13
7	-0,38	-0,06	-0,20	0,01	-0,38	-0,34	-0,27	-0,22
8	-0,35	-0,01	-0,29	-0,05	-0,41	-0,35	-0,22	0,04
9	-0,24	0,13	-0,31	-0,06	-0,36	-0,25	-0,30	-0,07
10	-0,35	-0,03	-0,28	-0,07	-0,36	-0,25	-0,26	-0,11
<b>h/300</b>	8,30 mm		8,39 mm		8,23 mm		8,22 mm	

Fonte: Autor (2023).

Os deslocamentos observados para todos os corpos de prova foram inferiores ao valor máximo previsto no critério da norma de desempenho. Portanto, as amostras atenderam a esse critério.

Durante a análise visual foi observada a formação de manchas de umidade no lado oposto da alvenaria. A formação de manchas de umidade do lado oposto dos corpos de prova não é um critério de verificação previsto para esse ensaio. No entanto, a presença de manchas de umidade no lado oposto dos corpos de prova nas duas amostras, pode significar que a utilização desse tipo de sistema de vedação vertical necessita da aplicação de revestimento, para contribuir com sua estanqueidade. Exemplo de formação de manchas de umidade nos corpos de prova pode ser verificado na Figura 155-a, para parede construída com bloco B4 e composto CPA-02b e na Figura 155-b, para parede construída com bloco B20 e composto CPA-01.

**Figura 155 - Corpos de prova após ensaio de choque térmico (B20 - CPA-01)**



a)



b)

Fonte: Autor (2023).

## **4.6.2** **DE PEÇAS SUSPENSAS**

### **RESULTADOS – ENSAIO DE SOLICITAÇÕES**

Os resultados dos ensaios de solicitações de peças suspensas realizados nas duas amostras de alvenaria construídas com blocos de concreto assentados com juntas finas de compostos poliméricos podem ser observados no Quadro 88. Nele são mostrados os deslocamentos horizontais observados no sistema de vedação vertical (paredes) e, também, os deslocamentos observados na mão francesa. As medidas com o paquímetro mostram o afastamento horizontal da mão francesa em relação à parede e, as medidas do relógio

comparador mostram os deslocamentos verticais na extremidade da mão francesa, próximo à região que recebe o carregamento. Os resultados são referentes à amostra de alvenaria construída com o bloco B4 e composto CPA-01 e, também, a amostra construída com o bloco B20 e o composto CPA-02b.

**Quadro 88 - Deslocamentos observados no ensaio**

Carga (kg)	B20 - CPA-01			B4 - CPA-02b		
	Deslocamentos (mm)			Deslocamentos (mm)		
	Parede	Mão francesa		Parede	Mão francesa	
		Relógio comparador	Paquímetro		Relógio comparador	Paquímetro
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	1,17	0,23	0,00	0,79	0,12
10	0,00	2,33	0,20	0,01	2,01	0,18
15	0,00	2,58	0,34	0,01	2,88	0,35
20	0,01	2,62	0,26	0,01	3,12	0,29
25	0,01	2,65	0,24	0,02	3,17	0,39
30	0,02	2,68	0,31	0,02	3,20	0,29
35	0,03	2,69	0,18	0,03	3,23	0,29
40	0,04	2,71	0,27	0,04	3,25	0,31
45	0,04	2,72	0,29	0,05	3,28	0,38
50	0,05	2,73	0,24	0,06	3,32	0,35
55	0,06	2,75	0,22	0,06	3,35	0,37
60	0,07	2,77	0,17	0,07	3,37	0,36
65	0,08	2,81	0,29	0,07	3,40	0,27
70	0,08	2,86	0,21	0,09	3,44	0,36
75	0,09	2,88	0,29	0,09	3,47	0,32
80	0,10	2,94	0,21	0,10	3,52	0,35
80 (24horas)	0,24	3,01	0,26	0,11	4,21	0,42

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 88, o maior deslocamento observado para o sistema de vedação vertical construído com o composto CPA-01 e bloco tipo B20 foi de 0,24 mm, após 24 horas de permanência da carga de 80 kg aplicada. Para o caso da amostra construída com a utilização do bloco B4 e composto CPA-02b a maior deformação observada no sistema de vedação vertical foi de 0,11 mm, também, após 24 horas de aplicação dos 80 kg. O critério para deformação instantânea para peças suspensas previsto na ABNT NBR

16868-4 (2021) é que a deformação seja igual ou inferior a  $h/500$ , sendo  $h$  altura da parede. Portanto, os limites máximos de deformação seriam de 4,98 e 4,93 mm, respectivamente, para o corpo de prova construído com bloco B20 e composto CPA-01 e construído com bloco B4 e composto CPA-02b. Como os valores máximos de deformação instantânea foram inferiores, os dois corpos de prova atenderam ao critério de deformação instantânea.

A deformação horizontal residual observada nos sistemas de vedação vertical, após 3 minutos da remoção da carga, foi de 0,15 e 0,05 mm, respectivamente, para o corpo de prova construído com bloco B20 e composto CPA-01 e, construído com bloco B4 e composto CPA-02b. O critério existente na norma supracitada para a deformação residual é de  $h/2500$ , correspondente a valores de, aproximadamente, 1,0 mm para as duas amostras. Como pode ser observado, as duas amostras apresentaram deformação residual inferior, atendendo a esse critério. Outro critério existente é a não ocorrência de falhas no sistema de vedação vertical que comprometam o estado limite de serviço. Como não foram observados danos após a execução dos ensaios, este critério também foi atendido.

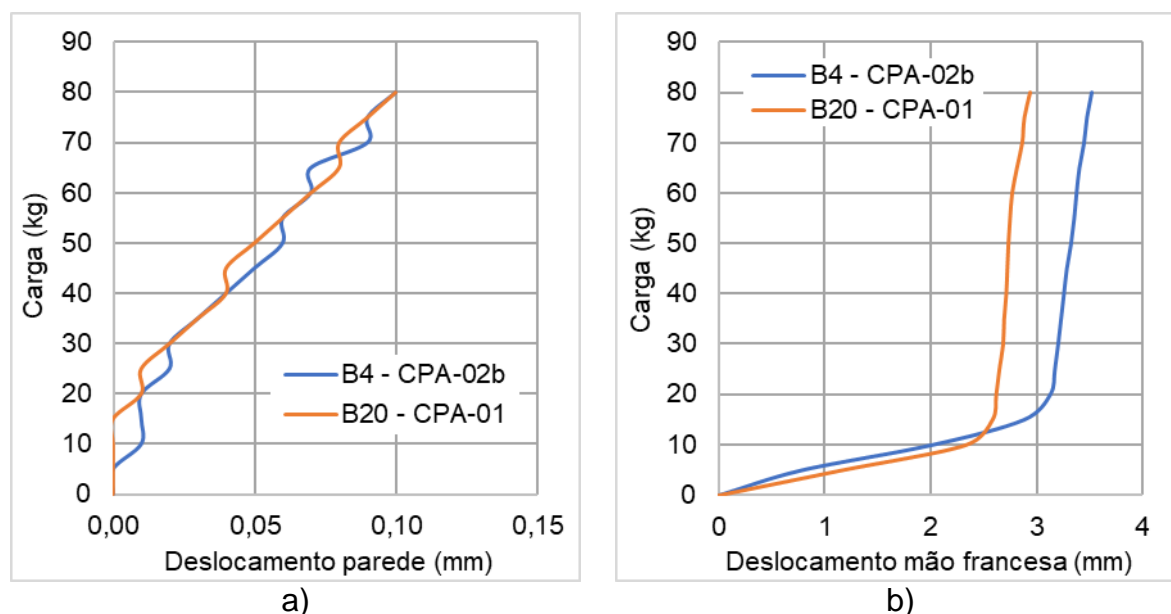
As medidas realizadas com o paquímetro apresentaram muita variação, como pode ser verificado no Quadro 88 e, portanto, não serão utilizadas na análise. Provavelmente, o fato de a medida ser realizada manualmente, apoiando-se a parte inferior do paquímetro e utilizando sua vareta de profundidade para fazer a medida podem ter causado essa variação. A inclinação do paquímetro no momento da medida, horizontal e vertical, pode ter sofrido variação, impedindo uma análise adequada dos pequenos deslocamentos ao serem medidos.

Os valores médios dos deslocamentos verticais da mão francesa, obtidos com os relógios comparadores, apresentaram valores máximos de 3,01 para a amostra construída com o bloco tipo B20 e composto CPA-01 e, 4,21 mm para a amostra construída com o bloco tipo B4 e composto CPA-02b. Esses valores máximos foram observados após 24 horas de aplicação dos 80 kg de peso.

Na Figura 156 podem ser observadas as curvas que relacionam a carga aplicada e os respectivos deslocamentos. São mostrados os deslocamentos horizontais do sistema de vedação vertical (Figura 156-a) e, também, a média dos deslocamentos verticais da mão francesa (Figura 156-b), obtidos com a utilização dos relógios comparadores.



**Figura 156 - carga e deslocamento observados no ensaio**



Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 156-b, a inclinação do trecho inicial da curva que relaciona a carga aplicada e o deslocamento foi diferente da mostrada no restante do carregamento. Provavelmente, essa diferença na inclinação inicial deve ser resultante da acomodação do sistema de fixação utilizado, que depois de solicitado, começa a apresentar outro comportamento. Como pode ser observado, o deslocamento da mão francesa foi inferior para a amostra de parede construída com o bloco B20 e composto CPA-01, em praticamente, todo o trecho de carregamento. Para os deslocamentos dos sistemas de vedação vertical, mostrados na Figura 156-a, pode ser verificado que existe um trecho inicial sem a presença de deslocamentos, porém, para o restante do carregamento, os dois sistemas de vedação vertical apresentaram curvas com inclinação semelhante.

### 4.6.3 CORPO DURO

#### RESULTADOS – ENSAIO DE IMPACTO DE

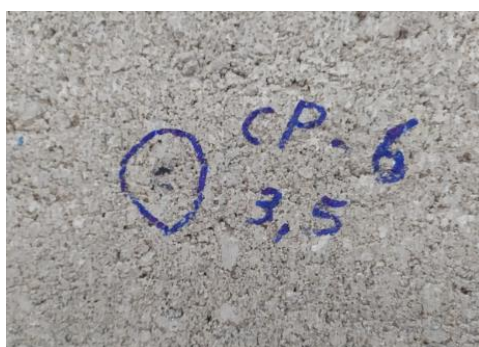
Os resultados obtidos nos ensaios de impacto de corpo duro são demonstrados na sequência. Durante a análise visual os principais defeitos observados após o impacto foram a formação de mossas no local, caracterizadas pelo aprofundamento na superfície do sistema de vedação vertical. Nas Figura 157-a e Figura 157-b podem ser observadas as mossas obtidas, respectivamente, para impactos de 3,5 e 20J para a amostra construída com bloco B20 e composto CPA-01. Nas Figura 157-c e Figura 157-d podem ser observadas as mossas obtidas, respectivamente, para impactos de 3,5 e 20J para a amostra construída com bloco B4 e composto CPA-02b.

**Figura 157 - Exemplos de danos após impacto**

a)



b)



c)



d)

Fonte: Autor (2023).

No Quadro 89 pode ser observado o diâmetro das mossas formadas no local de impacto das esferas de aço para as energias de 3,75J e 20J, para as duas amostras de alvenaria. O deslocamento horizontal no centro do sistema de vedação vertical também é demonstrado.

**Quadro 89 – Diâmetro das mossas e deslocamento horizontal**

Impacto	Diâmetro da mossa (mm)				Deslocamento horizontal (mm)			
	B20 - CPA-01		B4 - CPA-02b		B20 - CPA-01		B4 - CPA-02b	
	3,75 J	20 J	3,75 J	20 J	3,75 J	20 J	3,75 J	20 J
<b>1</b>	8,22	12,93	11,01	28,23	0,00	0,04	0,01	0,03
<b>2</b>	7,19	14,53	10,23	19,29	0,00	0,01	0,01	0,06
<b>3</b>	9,48	12,77	11,35	26,24	0,00	0,04	0,01	0,02
<b>4</b>	8,33	13,19	11,05	27,84	0,00	0,00	0,00	0,04
<b>5</b>	7,74	12,48	12,58	18,97	0,00	0,00	0,00	0,12
<b>6</b>	8,98	14,05	10,48	25,37	0,00	0,02	0,00	0,07
<b>7</b>	7,85	11,52	15,26	20,05	0,00	0,00	0,00	0,13
<b>8</b>	8,39	13,27	12,99	22,40	0,00	0,00	0,00	0,07
<b>9</b>	8,25	13,73	12,86	25,78	0,00	0,00	0,00	0,07
<b>10</b>	8,96	13,51	11,94	17,66	0,00	0,00	0,00	0,05
<b>Média</b>	8,34	13,20	11,98	23,18	0,00	0,01	0,00	0,07
<b>D. Pad.</b>	0,67	0,85	1,51	3,97	0,00	0,02	0,00	0,04
<b>C. V. (%)</b>	8,03	6,44	12,60	17,13	-	200,00	-	57,14

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 89, o diâmetro das mossas formadas na superfície da amostra de alvenaria construída com o bloco tipo B4 e o composto CPA-02b foi maior do que o observado para a alvenaria construída com o bloco B20 e composto CPA-01. Para a energia de 3,75J o diâmetro da mossa observado na amostra de alvenaria (B20 - CPA-01) foi aproximadamente 30,4% inferior ao resultado obtido pela amostra construída com os blocos tipo B4 e CPA-02b. Para a energia de 20J essa redução foi de aproximadamente 43,1%. Uma possível explicação para esse fenômeno é o fato de o bloco B20 ter uma maior resistência à compressão, que reflete em uma maior capacidade de resistir à penetração das esferas de aço durante os impactos. O diâmetro da mossa observado para a energia de 3,75 J foi cerca de 36,8% inferior do que o observado para a energia de 20 J para a amostra construída com o composto CPA01. Para o caso da amostra construída com o bloco tipo B4 e composto CPA-02b, foi observada uma redução de cerca de 48,3% no diâmetro da mossa obtido para a energia de 3,75 J em relação a energia de 20J.

O deslocamento horizontal médio observado para as duas amostras foi maior para a energia de 20J do que para a energia de 3,75J. Comparando-se os valores médios de deslocamento obtidos pelas duas amostras é possível perceber que para cada uma das energias, o deslocamento foi maior para a amostra construída com o B20 e composto CPA-

01. Uma possível explicação para esse resultado é o fato de a amostra construída com o bloco tipo B4 ter apresentado um maior diâmetro de massa, que indica uma maior deformação no local do impacto. Essa maior deformação no local do impacto pode indicar que uma menor quantidade de energia foi transmitida para o resto da parede, resultando em menor deslocamento. Entretanto, existem outros fatores que podem contribuir para a obtenção desses resultados.

No Quadro 90 podem ser observados os resultados das medições das profundidades das massas nos locais de impacto para as energias de 3,75 e 20J. A profundidade das massas foi medida com a utilização de um paquímetro de profundidade e de um relógio comparador, para as duas amostras de alvenaria.

**Quadro 90 - Profundidade das massas**

Impacto	Profundidade da massa - paquímetro (mm)				Profundidade da massa – relógio comparador (mm)			
	B20 - CPA-01		B4 - CPA-02b		B20 - CPA-01		B4 - CPA-02b	
	3,75 J	20 J	3,75 J	20 J	3,75 J	20 J	3,75 J	20 J
1	0,36	0,46	0,61	2,97	0,46	0,66	0,72	3,02
2	0,12	0,69	0,68	1,17	0,26	0,89	0,88	1,49
3	0,15	0,56	0,62	2,81	0,31	0,81	0,82	2,91
4	0,30	0,47	0,87	2,55	0,35	0,55	0,85	2,64
5	0,13	0,43	0,78	1,35	0,16	0,52	1,09	1,53
6	0,32	0,35	0,52	2,33	0,48	0,64	0,82	2,75
7	0,12	0,31	0,84	1,23	0,33	0,60	0,99	1,53
8	0,21	0,37	0,65	1,40	0,40	0,62	0,95	1,90
9	0,14	0,45	0,61	2,65	0,24	0,58	0,89	2,87
10	0,21	0,50	0,53	1,11	0,35	0,61	0,96	1,46
<b>Média</b>	0,21	0,46	0,67	1,96	0,33	0,65	0,90	2,21
<b>D. Pad.</b>	0,09	0,11	0,12	0,77	0,10	0,12	0,10	0,68
<b>C. V. (%)</b>	42,86	23,91	17,91	39,29	30,30	18,46	11,11	30,77

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado no Quadro 90, a profundidade média das massas medidas com o paquímetro de profundidade na amostra construída com o composto CPA-02b e bloco tipo B4 foi superior à profundidade verificada na amostra construída com bloco B20 e composto CPA-01. Para a energia de 3,75J a profundidade média observada na amostra construída com bloco tipo B20 e composto CPA-01 foi cerca de 68,7% inferior à observada

na amostra construída com o bloco B4 e composto CPA-02b. Para a energia de 20J, a profundidade da massa observada na amostra construída com bloco B20 e composto CPA-01 foi cerca de 76,5% inferior à amostra construída com o composto CPA-02b e bloco B4.

Como pode ser observado no Quadro 90, a profundidade da massa medida com o relógio comparador para a energia de 3,75J foi cerca de 63,3% inferior para a amostra construída com o composto CPA-01 e bloco tipo B20, com relação à amostra construída com o bloco tipo B4 e composto CPA-02b. Para a energia de 20J a profundidade da massa medida com o relógio comparador foi cerca de 70,6% inferior para amostra construída com o composto CPA-01 e bloco B20, em relação à amostra construída com o composto CPA-02b e bloco B20. A profundidade da massa medida com o relógio comparador para a energia de 3,75J na amostra construída com o bloco tipo B20 e composto CPA-01 foi cerca de 49,2% inferior à profundidade medida para a energia de 20J. Para a amostra construída com o bloco B4 e composto CPA-02b foi observada uma redução na profundidade da massa de cerca de 59,3%, ao se comparar a energia de 3,75J com a energia de 20J.

Os critérios da norma de desempenho ABNT NBR 15575-4 (2021) para o ensaio de impacto de corpo duro para as energias utilizadas podem ser observados no Quadro 91.

**Quadro 91 - Critérios para impacto de corpo duro (vedações verticais externas)**

<b>Impacto</b>	<b>Energia (J)</b>	<b>Critérios de desempenho</b>
Impacto externo (acesso externo do público)	3,75	Não ocorrência de falhas que comprometam o estado-limite de serviço. Não podem apresentar fissuras, escamações, delaminações ou qualquer tipo de dano, sendo permitidas massas localizadas para os impactos.
	20	Não ocorrência de ruína, caracterizada por ruptura ou traspassamento (estado-limite último).

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575-4 (2021).

Com base nos resultados obtidos é possível dizer que os critérios para as duas energias de impacto foram atingidos, pois os principais efeitos observados nos impactos foram a presença de massas para as duas energias. Em nenhum caso foi observado o traspassamento da esfera de aço ou a ruína do sistema de vedação vertical.

#### **4.6.4** **CORPO MOLE**

#### **RESULTADOS – ENSAIO DE IMPACTO DE**

Os resultados dos ensaios de impacto de corpo mole podem ser observados no Quadro 92.

Deve-se destacar que as paredes foram construídas sem revestimento, não há carga de pré-compressão aplicada (laje por exemplo) e que a restrição foi prevista somente no topo e base do sistema de vedação, mas não nas laterais. Essas condições são diferentes, ao que seria observado caso esse ensaio fosse realizado em obra e, portanto, muito mais crítica. Sugere-se que trabalhos futuros prevejam outras condições construtivas da parede.

**Quadro 92 – Resultados impacto de corpo mole**

Energia	Deslocamento (mm)							
	B20 - CPA-01		Critérios		B4 - CPA-02b		Critérios	
	Instan- tâneo	Residual	h/250	h/1250	Instan- tâneo	Residual	h/250	h/1250
<b>120</b>	-8,85	0,01	9,96	1,99	-4,15	0,79	9,87	1,97
<b>180</b>	-12,53	-0,05	-	-	-10,3	0,29	-	-
<b>240</b>	-16,33	0,38	9,96	1,99	-16,19	0,59	9,87	1,97

Fonte: Autor (2023).

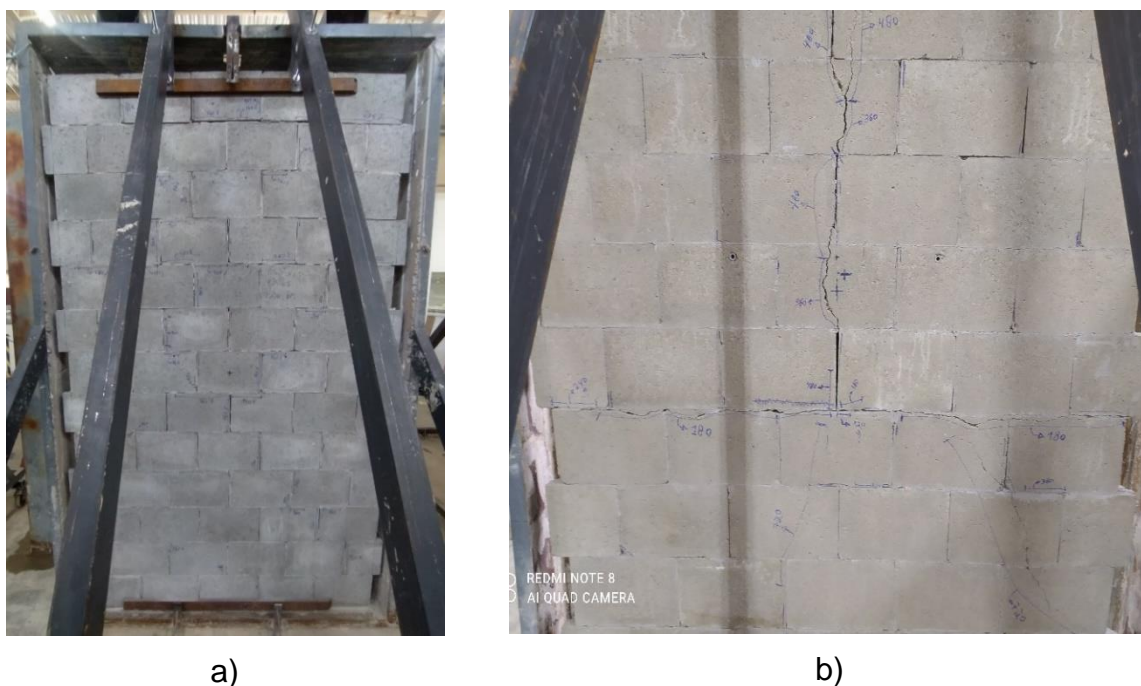
Os critérios de deslocamento previstos na norma NBR 15575-4 (ABNT, 2021) para vedação vertical com função estrutural são de que o deslocamento instantâneo deve ser inferior a  $h/250$  e o deslocamento residual deve ser inferior a  $h/1250$ . Sendo “h” a altura da parede. Esses critérios devem ser atendidos para a energia de 120 J, considerando impactos internos e, para 240 J, considerando impacto externo com acesso ao público, o que ocorre, normalmente, no andar térreo.

Comparando-se os valores de deslocamento mostrados no Quadro 92, para a energia de 120J, é possível dizer que ambos os sistemas de vedação atenderam ao critério da norma de desempenho, pois apresentaram valor inferior ao máximo permitido, tanto para o deslocamento instantâneo, quanto residual. Para a Energia de 240J, o deslocamento instantâneo observado foi superior ao critério da norma. Contudo, como já mencionado, os corpos de prova ensaiados não possuíam carga aplicada sobre o seu topo durante os ensaios, tão pouco, restrição lateral. Caso esses ensaios fossem realizados em obra, considerando a presença de carregamento sobre os corpos de prova, é possível que os valores de deslocamento seriam inferiores aos obtidos, podendo, talvez, ficarem dentro dos limites previstos para a energia de 240J. Além disso, caso tivesse sido aplicado revestimento sobre o sistema de vedação ensaiado, a tendência seria de redução dos deslocamentos. É também interessante comentar que, apesar dos deslocamentos laterais elevados, as paredes foram capazes de recuperar esses deslocamentos e retornar à sua posição inicial (deslocamento residual), o que mostra boa capacidade de acomodar deslocamentos (ainda que esses possam ser maiores que alvenarias com blocos semelhantes, mas com argamassa cimentícia tradicional).



Nas Figura 158-a e Figura 158-b podem ser observados os corpos de prova após o ensaio de impacto de corpo mole, respectivamente, para corpo de prova construído com bloco B20 e composto CPA-01 e, construído com bloco B4 e composto CPA-02b.

**Figura 158 - Corpos de prova após ensaios**



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 158-a pode ser observado o corpo de prova construído com o bloco B20 e composto CPA-01. Os primeiros danos observados foi o descolamento da junta horizontal da primeira fiada superior em alguns pontos, com as energias de 240 e 360J. Esse dano foi aumentando com o aumento da energia dos impactos. Para energias maiores, a partir de 480 J, foi observada a formação de danos em juntas de assentamento, em diferentes locais do corpo de prova. Entretanto, uma maior presença de danos foi observada na junta horizontal da 4ª fiada de cima para baixo. Para a energia de 960 J foi verificada a formação de danos em diferentes juntas horizontais e verticais.

Na Figura 158-b pode ser observado o corpo de prova construído com o bloco B4 e composto CPA-02b. Os primeiros danos observados ocorreram para a energia de 180J na região da quinta junta horizontal de assentamento, contando de baixo para cima. Parte das fissuras formadas ocorreram no bloco de concreto próximo à junta, e parte na própria junta de assentamento. Para as energias de 360 e 480J foi observada a formação de fissura vertical no centro da parede, ligando a fissura horizontal já formada anteriormente até o topo da parede. Para a energia de 720 J foi verificado o aumento das fissuras existentes e a formação

de duas novas fissuras partindo da fissura horizontal já formada, até as extremidades inferiores da parede.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi realizado com a pretensão de compreender o comportamento apresentado por alvenaria estrutural de blocos de concreto assentados com juntas finas de compostos poliméricos. O assentamento utilizado em todos os corpos de prova de alvenaria foi parcial, com composto aplicado somente sobre as paredes longitudinais dos blocos. A utilização de assentamento completo nas paredes longitudinais e transversais dos blocos pode contribuir para aumentar significativamente algumas das propriedades aqui observadas. Ensaio devem ser feitos para comprovar essa possibilidade.

Para isso, foram realizados diversos ensaios para avaliar o comportamento da alvenaria construída com a utilização de blocos de concreto com três níveis de resistência à compressão e dois compostos poliméricos provenientes de diferentes fabricantes. Para avaliar o comportamento à compressão foram realizados ensaios para determinação da resistência à compressão em prismas, pequenas paredes e paredes. Para avaliar o comportamento à flexão perpendicular à junta de assentamento, foram realizados ensaios de tração na flexão conforme previsto na norma brasileira NBR 16868-3 (ABNT, 2020) e, também, conforme o ensaio de alavanca previsto na norma australiana AS 3700 (2017). Além disso, foram realizados ensaios de flexão paralela, que permitem compreender se esse tipo de alvenaria apresenta comportamento isotrópico, diferente da alvenaria convencional. Para avaliar a influência da junta vertical foram realizados ensaios de compressão diagonal, que permitem, também, compreender as características dessa alvenaria no cisalhamento. Por fim, foram realizados ensaios da norma de desempenhos das edificações, que permitem descobrir se em condições mais próximas ao uso, como se comporta esse tipo de alvenaria na função de vedação vertical.

Em relação a cada um dos objetivos propostos, pode-se comentar as seguintes conclusões:

- Propor procedimentos para realização de ensaios específicos para caracterização dos compostos poliméricos de assentamento;
  - Com relação aos ensaios realizados para caracterização dos compostos poliméricos considera-se importante filtrar o material que vai ser utilizado no ensaio de espectroscopia, buscando evitar ou reduzir a interferência nos resultados provocada pela presença de agregados, cargas minerais e demais materiais presentes nos compostos poliméricos. Nesta pesquisa foi utilizada

uma técnica de filtragem assistida por acetona que levou a resultados adequados para a amostra em estado fresco, pois evitou que a presença de carbonato de cálcio causasse maior interferência na amostra, como ocorreu para o caso da amostra ensaiada em estado endurecido que não pôde ser filtrada. Outras técnicas devem ser estudadas no futuro para melhorar esse processo.

- O procedimento utilizado para avaliar a resistência à compressão dos compostos poliméricos apresentou um desempenho adequado. As fissuras por retração ocorridas em ensaios relatados na literatura foram consideravelmente reduzidas no procedimento aqui proposto, proporcionando amostras com coeficiente de variação relativamente baixa nos ensaios realizados. Mais estudos devem ser realizados para aprimorar ainda mais os procedimentos de ensaio.
- Ensaios futuros devem ser realizados para tentar demonstrar qual a resistência do composto polimérico empregado em contato direto com os blocos durante o assentamento. Ainda não está claro se a absorção dos blocos pode contribuir para acelerar o processo de ganho das propriedades mecânicas dos compostos poliméricos, ou prejudicar. Entende-se ser apropriado pesquisar esta influência em trabalhos futuros em programa experimental específico.
- Avaliar a resistência ao cisalhamento de amostras de alvenaria de blocos de concreto assentados com juntas finas de compostos poliméricos. Avaliar a influência do preenchimento da junta vertical na resistência ao cisalhamento da alvenaria de junta fina.
  - Com relação aos resultados do ensaio de compressão diagonal realizados para verificar a influência da presença da junta vertical, ficou claro que a presença da junta vertical contribui significativamente para o aumento da resistência ao cisalhamento da alvenaria. Sem o preenchimento da junta vertical foi observada uma redução de 60% na resistência ao cisalhamento. É recomendado, portanto, o preenchimento da junta vertical para a execução de alvenaria estrutural com juntas finas de compostos poliméricos.
  - A tensão de cisalhamento observada para as amostras assentadas com o composto CPA-01 foi cerca de 50% inferior à observada com a utilização do composto CPA-02b.

- A partir dos resultados dos ensaios obtidos nessa pesquisa, considerando as amostras construídas com o preenchimento da junta vertical com dois cordões de compostos poliméricos, é possível recomendar a adoção de um valor de 0,18 MPa para a resistência ao cisalhamento desse tipo de alvenaria, que corresponde ao valor característico encontrado para amostra assentada com o composto CPA-01, que apresentou resultados mais baixos. Entretanto, mais ensaios devem ser realizados para avaliar a influência de outros tipos de blocos e compostos poliméricos na resistência ao cisalhamento desse tipo de alvenaria.
- Verificar se algumas das equações previstas na NBR 16868-1 (ABNT, 2020) ou no Eurocode 6 (CEN, 2021), para estimar e descrever o comportamento de estruturas de alvenaria, podem ser empregadas para a alvenaria de junta fina utilizada neste estudo;
  - Para todos os corpos de prova de alvenaria ensaiados na compressão (prisma, pequenas paredes e paredes), a utilização de blocos com maior resistência à compressão levou a esperados incrementos na resistência à compressão da alvenaria. Por outro lado, a utilização de blocos de maior resistência à compressão não necessariamente garante aumento significativo do módulo de elasticidade observado nos corpos de prova de alvenaria utilizados nessa pesquisa. Provavelmente, a grande diferença entre o módulo dos compostos e dos blocos pode ter contribuído para esse resultado, ressaltando que o módulo de elasticidade do composto é consideravelmente menor que dos blocos e de argamassas cimentícias tradicionais.
  - Quanto ao comportamento à compressão, para o caso da alvenaria convencional, a resistência da alvenaria pode ser estimada como sendo 70% do valor da resistência característica à compressão do prisma. Para os resultados obtidos com a alvenaria de junta fina, essa mesma relação não é adequada para prever a resistência à compressão da alvenaria. Para alvenaria aqui estudada, essa relação foi inferior, para a maior parte dos casos, sendo que o menor valor obtido para essa relação foi de 50% para uma das amostras. Portanto, mais ensaios devem ser realizados com diferentes tipos de compostos poliméricos e variando as dimensões e características dos blocos de concreto para que um valor mais adequado para essa relação seja obtido.
  - A utilização da equação com base no Eurocode 6 (CEN, 2021) para estimar a resistência característica à compressão da alvenaria resultou em valores

próximos aos obtidos nos ensaios. Portanto, o emprego das equações baseadas no Eurocode 6 (CEN, 2021) parece ser adequado para estimar a resistência desse tipo de alvenaria. Recomenda-se, entretanto, que mais estudos sejam desenvolvidos para avaliar a utilização dessas expressões para estimar a resistência característica da alvenaria, tendo em vista que o formato e dimensões dos blocos empregados no Brasil podem ser diferentes dos existentes na Europa e adaptações podem ser necessárias. Variações nas propriedades dos blocos e compostos poliméricos, assim como nos procedimentos executivos de alvenaria e nos procedimentos de ensaio podem afetar esses resultados.

- Para a alvenaria tradicional de blocos de concreto, na faixa de resistência estudada, a NBR 16868-1 (ABNT, 2020) convencionou que o valor do módulo de elasticidade pode ser estimado como sendo 800 vezes a resistência característica à compressão do prisma. Para o caso da alvenaria de junta fina de compostos poliméricos essa relação não é adequada, pois todos os resultados ficaram abaixo desse valor. Foi observada a tendência de que esse valor será cada vez mais baixo conforme se aumenta a resistência à compressão do bloco utilizado. O módulo de elasticidade foi medido com valor da ordem de 200 vezes a resistência característica do prisma para a alvenaria construída com o bloco B20. Mais ensaios devem ser realizados para avaliar essa relação, contemplando diferentes tipos de blocos e compostos poliméricos.
- Com relação ao módulo de elasticidade, foi proposta a equação 25 que estima o módulo da alvenaria com base nos módulos de elasticidade dos blocos e compostos poliméricos, resultando em valores mais coerentes para estimar o módulo de elasticidade desse tipo de alvenaria do que as expressões normalmente utilizadas para alvenaria convencional, não levando em conta o valor do prisma.
- Comparar os resultados obtidos para caracterização das propriedades à flexão da alvenaria através dos métodos previstos na norma brasileira NBR 16868-3 (ABNT, 2020) e australiana AS 3700 (2017), para verificar qual é mais eficiente na previsão dessa propriedade;
  - Os resultados obtidos pelos ensaios realizados pelo método da alavanca foram superiores aos observados pelo método do ensaio de flexão em 4 pontos

previsto na norma brasileira. Os ensaios realizados com flexão de 4 pontos indicaram pouca variação na resistência à tração na flexão com o composto CPA-01 e os diferentes tipos de blocos, porém mostrando tendência de reduzir a resistência à tração na flexão conforme se aumenta a resistência do bloco. Entretanto, para o caso do ensaio de alavanca, foi observado que o composto CPA-01 obteve o pior resultado com o bloco B4, mostrando mudança no comportamento identificado no ensaio de flexão de 4 pontos que apresentou resultado mais baixo para o bloco B20. Em todas as amostras ensaiadas, o composto CPA-02b apresentou resultados superiores aos observados com o composto CPA-01, para um mesmo tipo de bloco. Isso foi observado tanto no ensaio da alavanca quanto no da NBR.

- A partir dos ensaios de tração na flexão perpendicular realizados, não foi observada a tendência de aumento da resistência à tração na flexão com a utilização de blocos de maior resistência à compressão. Esse fato havia sido observado por alguns pesquisadores para a alvenaria de junta fina assentada com argamassa cimentícia modificada por polímeros.
- Através da obtenção do coeficiente de resistência ortogonal, identificar se os elementos de alvenaria de junta fina apresentam comportamento isotrópico, como descrito por alguns pesquisadores;
  - Ao se comparar a resistência à tração na flexão perpendicular e paralela para obter o coeficiente de ortogonalidade da alvenaria, normalmente, a alvenaria convencional tende a apresentar coeficiente de ortogonalidade próximo a 2. Entretanto, os resultados observados para as amostras de alvenaria de junta fina de compostos poliméricos, apresentaram alguns resultados mais próximos de 1, semelhante ao que acontece na alvenaria grauteada, indicando que a alvenaria de junta fina de compostos poliméricos apresenta uma maior tendência a comportamento isotrópico do que a alvenaria convencional. Essa tendência foi mais evidente com a utilização do composto CPA-02b do que com o composto CPA-01. Mais ensaios devem ser realizados para caracterizar melhor essa propriedade.
- Verificar se a alvenaria estrutural de junta fina possui potencial para atender aos critérios da norma de desempenho das edificações para sistemas de vedações verticais com função estrutural.

- Foram realizados ensaios para avaliar o desempenho dos sistemas de vedação vertical formados por alvenaria de blocos de concreto assentados com juntas finas de compostos poliméricos. Os ensaios foram realizados sem a presença de revestimento sobre as paredes, o que configura uma situação mais crítica. Os ensaios foram realizados em duas amostras compostas por paredes assentadas com bloco B4 e composto CPA-02b e, composto CPA-01 e bloco B20. Para os ensaios de impacto de corpo duro e de carga suspensa foi identificado desempenho satisfatório para todos os corpos de prova.
- Para os ensaios de choque térmico foi verificado que o limite de deformação definido na norma foi atendido por todos os corpos de prova. Ainda assim, foi observada a passagem de água e consequente formação de manchas de umidade no lado oposto das paredes, indicando a falta de estanqueidade. Deve ser destacado que o ensaio foi realizado sem revestimento, configurando uma condição mais crítica do que na realidade. A aplicação de revestimento pode impedir a passagem de água, resolvendo esse problema.
- No ensaio de impacto de corpo mole, foi observado que todos os corpos de prova atenderam aos critérios de deformação para paredes estruturais internas, mas não para paredes estruturais externas. Deve ser salientado que a presença de camadas de revestimento e, também, a presença de peso sobre os corpos de prova, como acontece na obra com o apoio de uma laje, por exemplo, pode contribuir e muito para melhorar esses resultados.

Outras observações são possíveis a partir dos resultados desta pesquisa:

- Idade de cura desse tipo de alvenaria não pode ser de apenas 3 dias, como recomendado por alguns fabricantes, precisa de tempo maior com sugestão de padronizar a caracterização e controle aos 28 dias. É importante ressaltar que os compostos poliméricos secam ao ar, havendo necessidade de estudar se não existe a necessidade de retardar a execução do revestimento sobre as paredes para não prejudicar a secagem dos compostos, por exemplo, com no mínimo 14 dias.
- Apesar da junta ser mais fina, a alvenaria é mais deformável, sendo necessário compatibilizar com revestimento também deformável.

- Diferentes compostos poliméricos levam a resultados com diferenças significativas, reforçando a necessidade de obrigatoriedade da realização de ensaios de caracterização antes da execução de obras.
- Quanto ao processo construtivo, o uso de cunhas no processo de assentamento mostrou-se necessário. Mais informações sobre sua funcionalidade e utilização são descritos neste texto.
- Existem no mercado várias resistências de blocos disponíveis, porém apenas um tipo de composto poliméricos para cada fabricante. A partir da verificação de que a variação de resistência de blocos assentados com um mesmo composto polimérico não leva a aumentos significativos no módulo de elasticidade da alvenaria, sugere-se limitar o uso dessa alvenaria a blocos estruturais de resistência mais baixa, ao menos enquanto não se tem maiores desenvolvimentos da tecnologia dos compostos poliméricos.
- Na mesma linha da conclusão acima, sugere-se inicialmente limitar o desenvolvimento de norma brasileira a aplicações em casas e sobrados apenas, tendo em vista que o comportamento desse tipo de alvenaria para cargas de longa duração ainda não é conhecido. Estudos futuros contemplando a presença de deformações devido a retração e fluência desse tipo de alvenaria por períodos mais longos de tempo são interessantes.
- Com relação ao eventual desenvolvimento de norma brasileira, é necessário desenvolvimento de procedimentos padrões de ensaio para caracterização dos materiais e controle de obra, podendo serem aproveitados alguns dos propostos neste texto.

## 5.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Aqui são apresentados alguns tópicos adicionais que merecem reflexão a respeito da utilização de alvenaria de blocos de concreto assentados com juntas finas de compostos poliméricos.

- As propriedades dos compostos poliméricos evoluem da mesma maneira em regiões de clima muito quente ou frio, com alta ou baixa umidade?
- A aplicação de sistemas de revestimento nas idades iniciais sobre as paredes pode prejudicar ou contribuir com a evolução das propriedades mecânicas dos compostos poliméricos?

- A utilização de blocos com umidade, ou muito secos, durante o assentamento pode interferir na aderência com os compostos poliméricos?
- O tempo de cura indicado pelos fabricantes de 72 horas não é adequado, pois existem evidências de que a resistência à tração na flexão da alvenaria continua aumentando até 28 dias de idade. A tendência de aumento continua para idades mais avançadas?
- Qual a relação entre as propriedades mecânicas observadas em corpos de prova de compostos poliméricos externos (curados em laboratório) com as propriedades dos compostos aplicados na junta de assentamento? A absorção dos blocos e espessura mais fina do material na junta podem fazer com que o material aumente as propriedades mecânicas mais rapidamente?
- Qual é o comportamento da alvenaria de junta fina com compostos poliméricos com o passar do tempo, no que se refere a retração e a ação de cargas permanentes (fluência)? Será que com a aplicação de carga constante as deformações estabilizam facilmente?
- A utilização de graute para preenchimento dos vazados dos blocos é possível para esse tipo de alvenaria? Quais os cuidados necessários para essa aplicação?
- A redução ainda maior nas dimensões de corpos de prova empregados nos ensaios de resistência à compressão dos compostos poliméricos pode evitar completamente fissuras por retração? Será que adotar outro formato de corpo de prova ou procedimento de moldagem pode contribuir para reduzir os efeitos de retração?
- Qual o nível de deformação deve ser considerado aceitável para esse tipo de alvenaria considerando cargas de curta e longa duração?
- Como se comporta essa alvenaria com cargas concentradas?



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Gustavo Spina Gaudêncio de; SOUZA, Wander Burielo de. **Engenharia dos polímeros**: tipos de aditivos, propriedades e aplicações. São Paulo: Saraiva, 2015. 192 p.

American Society for Testing and Materials. **C1006/C1006M - 19**: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Masonry Units. West Conshohocken: Astm International, 2019.

\_\_\_\_\_. **ASTM D638-22**: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022.

\_\_\_\_\_. **ASTM D695-15**: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

\_\_\_\_\_. **ASTM D790-03**: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.

\_\_\_\_\_. **ASTM D790-17**: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

\_\_\_\_\_. **ASTM D3418-21**: Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.

\_\_\_\_\_. **ASTM D6370-99 (2019)**: Standard Test Method for Rubber—Compositional Analysis by Thermogravimetry (TGA), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

\_\_\_\_\_. **ASTM E178-21**: Dealing With Outlying Observations. West Conshohocken: Astm International, PA, 2021.

\_\_\_\_\_. **ASTM E1252-98 (2021)**: Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.

ANDRADE, Bruna Torres. **Análise das deformações em alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, utilizando argamassa cimentícia e composto polimérico para assentamento**. 2019. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. 5 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2016. 16 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2019. 12 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522-1**: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 10998**: Tinta de acabamento acrílica à base de solventes orgânicos. Rio de Janeiro: Abnt, 1987. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11675**: Divisórias leves internas moduladas - Verificação da resistência aos impactos. Rio de Janeiro: Abnt, 2016. 7 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12118**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Métodos de ensaio. 6 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 14 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2005. 13 p.

\_\_\_\_\_. **13281-2**: Argamassas inorgânicas – Requisitos e métodos de ensaios – Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2023. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 14992**: A.R. - Argamassa à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: Abnt, 2003. 16 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria - Parte 1: Requisitos. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2017. 26 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575-4**: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. 5 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 72 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2016. 2 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 16590-1**: Composto polimérico para assentamento em alvenaria de vedação - Prte 1: Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2017. 10 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 16590-2**: Composto polimérico para assentamento em alvenaria de vedação - Prte2: Métodos de ensaio. a ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2017. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 16868-1**: Alvenaria estrutural - Projeto. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR 16868-2**: Alvenaria estrutural – Execução e controle de obras. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR 16868-3**: Alvenaria estrutural - Métodos de ensaio. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

BRANCO, Felipe Rodrigues. **Uso de Argamassa Pronta Não-cimentícia para Assentamento de Alvenaria em um Edifício na Cidade de Santarém-PA**. 2015. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Processos Construtivos e Saneamento Urbano, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015. Disponível em: <http://ppcs.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2015/felipe.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2020.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 1052-2**: Methods of test for masonry - Part 2: Determination of flexural strength. London: Bsi Standards Publication, 2016. 11 p.

\_\_\_\_\_. **BS EN 771-4**: Specification for masonry units - Part 4: Autoclaved aerated concrete masonry units. London: Bsi Standards Publication, 2015. 42 p.

\_\_\_\_\_. **BS EN 1052-3**: Methods of test for masonry - Part 3: Determination of initial shear strength. London: Bsi, 2002. 16 p.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **S304-14**: Design of masonry structures. Ontario: Csa Group, 2014. 155 p.

CANEVAROLO JUNIOR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2006. 264 p.

CANEVAROLO JUNIOR, Sebastião V. **Polymer Science**: a textbook for engineers and technologists. Munich: Hanser Publications, 2020. 369 p.

CENTRO DE CARACTERIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS - CCDM. **Ensaio em Amostra Polimérica**: relatório de ensaio LCP22-000259 - rev.01. São Carlos: Sem Editora, 2023a. 8 p.

\_\_\_\_\_. **Análise de Caracterização de Amostra Polimérica**: relatório de ensaio LCP23-000228-rev.01. São Carlos: Sem Editora, 2023b. 7 p.

\_\_\_\_\_. **Análise de Caracterização de Amostra Polimérica**: relatório de ensaio LCP23-000229-rev.01. São Carlos: Sem Editora, 2023c. 7 p.

\_\_\_\_\_. **Ensaio em Amostras Com e Sem Cura**: relatório de ensaio LCP22-000219 - rev.01. São Carlos: Sem Editora, 2023d. 15 p.

\_\_\_\_\_. **Análise de Caracterização de Amostra Polimérica**: relatório de ensaio LCP23-000230-rev.01. São Carlos: Sem Editora, 2023e. 7 p.

CHOUDHARY, Rishav. **Bond Strength Measurements from a TAMU Balanced Bond Wrench in Comparison to Brick Prism ASTM E518 Beam Test**. 2015. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construction Management, Construction Science, Texas A & M University, McAllen, 2015.

COLVILLE, James; AMDE, Amde M. Polymer Modified Mortars in Brick Masonry Construction. **Research Transformed Into Practice**. Maryland, p. 396-408. jan. 1995.

COLVILLE, J., AMDE A.M. and Miltenberger. M. (1999). "Tensile bond strength of polymer modified mortar." *Journal of Materials in Civil Engineering* Vol.11, pp1-5.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EUROCODE 6**: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures (Final draft). Brussels: Cen, 2021. 137 p.

DONADELLO, Matheus; EHRENBRING, Hinoel Zamis; PACHECO, Fernanda; CHRIST, Roberto; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca. Análise da resistência à compressão de alvenarias de blocos cerâmicos assentados com argamassa cimentícia e composto polimérico. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 1-13, 2023. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620230001.1335>.

DRYSDALE, Robert G.; HAMID, Ahmad A.; BAKER, Lawrie R.. **Masonry structures: behavior and design**. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1994.

GOMES, Itamar Ribeiro. **Simulação numérica do ensaio de compressão de prismas de alvenaria pelo método dos elementos finitos com comportamento de interface**. 2001. 160 f. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

GOMES, Hugo André da Silva. **Influência do não preenchimento das juntas verticais no comportamento mecânico das paredes de alvenaria**. 2008. 50 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2008.

GRIMM, Clayford T.; TUCKER, Richard L.. Flexural Strength of Masonry Prisms Versus Wall Panels. **Journal Of Structural Engineering**, [S.L.], v. 111, n. 9, p. 2021-2032, set. 1985. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1985\)111:9\(2021\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1985)111:9(2021)).

HAMID, Ahmed A.; DRYSDALE, Robert G.. Flexural Tensile Strength of Concrete Block Masonry. **Journal Of Structural Engineering**, Cidade Desconhecida, v. 114, n. 1, p. 50-66, jan. 1988.

HENDRY, A. W.; SINHA, B. P.; DAVIES, S. R. **Design of masonry structures**. 3. ed. London: E & FN Spon, 2004. 279 p.

HUANG, Tao; GONG, Shuling. Preparation of Emulsifier-Free Styrene–Acrylic Emulsion via Reverse Iodine Transfer Polymerization. **Polymers**, [S.L.], v. 13, n. 19, p. 3348, 29 set. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym13193348>.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 13007-2: Ceramic tiles — Grouts and adhesives — Part 2: Test methods for adhesives**. 3 ed. Geneva: Iso Copyright Office, 2013. 26 p.

IZQUIERDO, Orieta Soto. **Influência do tipo de argamassamento e da utilização de peças de ajuste dimensional na resistência à compressão da alvenaria de blocos de concreto**. 2011. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

IZQUIERDO, Orieta Soto. **Estudo da interface bloco/graute em elementos de alvenaria estrutural**. 2015. 322 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

JUSTE, Andrea Elizabeth. **Estudo da resistência e da deformabilidade da alvenaria de blocos de concreto submetida a esforços de compressão**. 2001. 229 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

KANYETO, O.j.; FRIED, A.. Flexural behaviour of thin joint concrete blockwork: Experimental results. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 8, p.3639-3647, ago. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.059>.

LIMA, T. E. S.; AZEVEDO, A. R. G.; MARVILA, M. T.; ZANELATO, E. B.; PAES, A. L. C.; ALEXANDRE, J.; MONTEIRO, S. N. Study of Face Shell Bedding Concrete Blocks Prisms with Different Laying Mortar Strength. **Characterization Of Minerals, Metals, And Materials 2021**, [S.L.], p. 517-522, 2021. Springer International Publishing. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-65493-1\\_52](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-65493-1_52).

MACHADO, Luci D. Brocardo; MATOS, Jivaldo do Rosário. Análise térmica diferencial e calorimetria exploratória diferencial. In: CANEVAROLO JUNIOR, Sebastião V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2017. p. 229-261.

MARANHÃO, Flávio Leal; RESENDE, Mauricio Marques; JOHN, Vanderley Moacyr; BARROS, Mercia Maria Semensato Bottura de. The Bond Strength Behavior of Polymer-modified Mortars During a Wetting and Drying Process. **Materials Research**, [S.L.], v. 18, n. 6, p. 1354-1361, 24 nov. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.028915>.

MARROCCHINO, E.; FRIED, A.n.; KOULOURIS, A.; VACCARO, C.. **Micro-chemical/structural characterisation of thin layer masonry**: A correlation with engineering performance. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.582-594, jan. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.09.010>.

MATOS, Jivaldo do Rosário; MACHADO, Luci D. Brocardo. Análise térmica: termogravimetria. In: CANEVAROLO, Sebastião V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2017. p. 209-228.

MIRANDA, Larissa de Almeida. **Estudo do efeito do não preenchimento das juntas verticais e eficiência do graute na resistência da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos**. 2012. 206 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MOHAMAD, Gihad. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas blocos de concreto**. 1998. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MOREIRA, André Araujo Amato; VERMELHO, Lázaro Colodette; ZANI, Matheus Carreiro. Estudo da Argamassa Polimérica de Assentamento de Blocos e Tijolos Segundo Aspectos Técnicos, Econômicos, Mercadológicos e de Clima Organizacional. **Espacios**, Caracas, v. 38, n. 53, p. 14-29, jul. 2017. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a17v38n53/a17v38n53p14.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2020.

NAZIR, Shahid; DHANASEKAR, Manicka. A non-linear interface element model for thin layer high adhesive mortared masonry. **Computers & Structures**, [s.l.], v. 144, p. 23-39, nov. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.07.023>.

OLIVEIRA, Luciane Marcela Filizola de. **Estudo teórico e experimental do comportamento das interfaces verticais de paredes interconectadas de alvenaria experimental**. 2014. 271 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

PARSEKIAN, Guilherme Aris; HAMID, Ahmad A.; DRYSDALE, Robert G.. **Comportamento e Dimensionamento de Alvenaria Estrutural**. 2. ed. São Carlos: Edufscar, 2014. 625 p.

PASQUANTONIO, Rafael D.; PARSEKIAN, Guilherme Aris; FONSECA, Fernando S.; SHRIVE, Nigel G. Experimental and numerical characterization of the interface between concrete masonry block and mortar. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 13, n. 3, p. 578-592, jun. 2020. Artigo aceito para publicação.

PAUL FILHO, Farlei. **Estudo exploratório do comportamento mecânico de argamassas poliméricas e argamassas industrializadas ensacadas para assentamento de blocos de vedação**. 2016. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RAYMUNDO, Carolina A. C.; PARSEKIAN, Guilherme A.; RAYMUNDO, Henrique. **Utilização de argamassa polimérica com junta fina em alvenarias. 1º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos - Tecsic.** Campinas, p. 1-9. ago. 2017.

REIS, Aryane Carneiro dos. **Análise da eficiência da argamassa polimérica na produção de alvenarias.** 2018. 97 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

ROCHA, Rebeca Silva. **Avaliação e comparação das propriedades mecânicas de uma argamassa pronta não cimentícia para alvenaria com e sem função estrutural frente às argamassas convencionais.** 2012. 97 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2012. Disponível em: [http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1888/1/CM\\_COECI\\_2012\\_1\\_09.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1888/1/CM_COECI_2012_1_09.pdf). Acesso em: 21 nov. 2020.

SANTOS, Flávio Antônio dos. **Efeito do não-preenchimento de juntas verticais no desempenho de edifícios em alvenaria estrutural.** 2001. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SANTOS, Carol Ferreira Rezende. **Avaliação numérica da interação de paredes de alvenaria estrutural submetidas a ações verticais.** 2016. 187 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Produção Mensal 2019.** 2019. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1599144718.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2020.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Sustentabilidade: indicadores.** Indicadores. Disponível em: <http://snic.org.br/sustentabilidade-indicadores.php>. Acesso em: 21 nov. 2020.

SOUSA, Rui Miguel Almeida Vieira de. **Caracterização Experimental Mecânica e Análise Numérica de Elementos para Alvenaria com Isolamento Térmico Distribuído.** 2009. 222 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2009.

STANDARDS AUSTRALIAN LIMITED. **AS 3700: Masonry structures (Final draft).** Sydney: Sai Global Limited, 2017. 165 p.

STUART, Barbara H.. **Polymer Analysis.** Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2002.

THAMBOO, Julian Ajith; DHANASEKAR, Manicka. Behaviour of thin layer mortared concrete masonry under combined shear and compression. **Australian Journal Of Structural Engineering**, [s.l.], v. 17, n. 1, p.39-52, 2 jan. 2016.

THAMBOO, Julian Ajith; DHANASEKAR, Manicka. **Characterisation of thin layer polymer cement mortared concrete masonry bond.** **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 82, p.71-80, maio 2015.

THAMBOO, Julian Ajith; DHANASEKAR, M.; YAN, C. Thin bed masonry system: review and future prospects. In: THE INTERNACIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING, 2011, Sri Lanka, **Anais...** Kandy: Construction and Management, 2011.

THAMBOO, J.a.. Material characterisation of thin layer mortared clay masonry. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 230, n. 116932, p. 1-10, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116932>.

VERMELTFOORT, A. T.. SHEAR STRENGTH VARIATION DUE TO MORTAR STRENGTH VARIATION AND THE USE OF A TRIPLET SHEAR TEST SET-UP. **15th International Brick And Block Masonry Conference**. Florianópolis, p. 1-10. jun. 2012.

VILATÓ, Rolando Ramirez; FRANCO, Luiz Sérgio. Resistência ao cisalhamento da junta de argamassa na alvenaria estrutural. **50° Congresso Brasileiro do Concreto**. Salvador, Set. 2008.

XAVIER, S. Francis. Properties and Performance of Polymer Blends. In: UTRACKI, Leszek A.. **Polymer blends handbook**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. Cap. 12. p. 861-950.

WALLIMAN, Nicholas; BAICHE, Bousmaha; OGDEN, Raymond. **Thin-joint glued brickwork: Building in the British context**. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 22, n. 6, p.1081-1092, jun. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.008>.

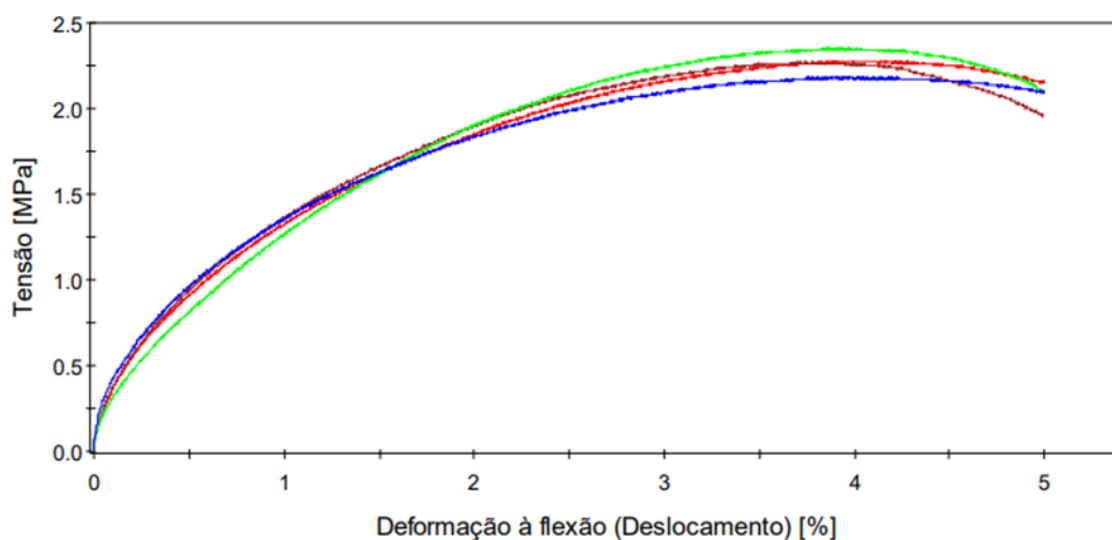
# ANEXO A

## Curvas e demais resultados dos ensaios de compostos poliméricos

### A.1 – Curvas tensão-deformação ensaio de flexão

Na Figura 159 pode ser observada a relação entre tensão e deformação à flexão obtidas para o composto CPA-01.

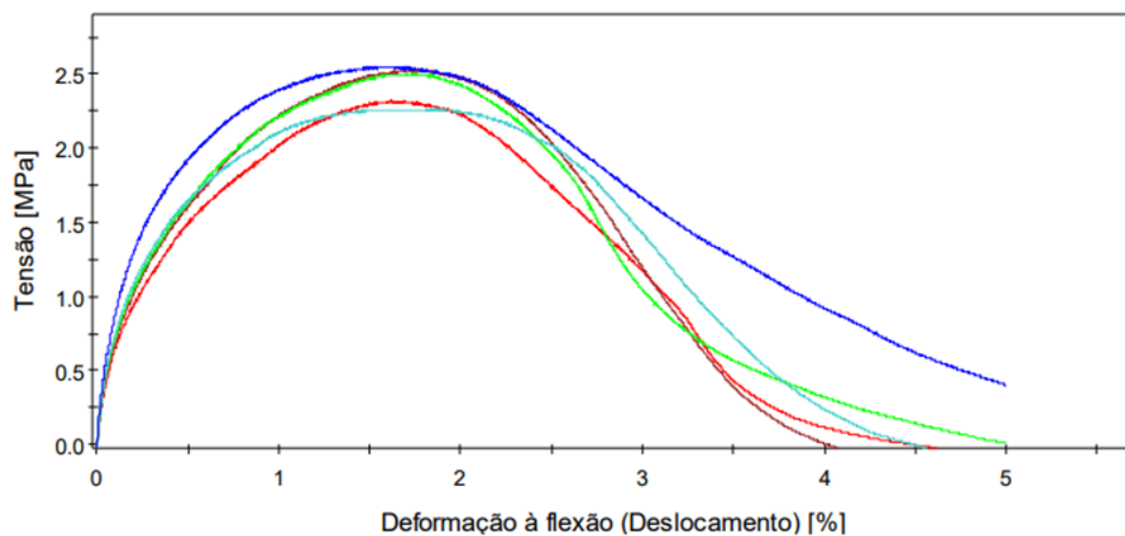
**Figura 159 - Curva tensão-deformação sob flexão - CPA-01**



Fonte: CCDM (2023d).

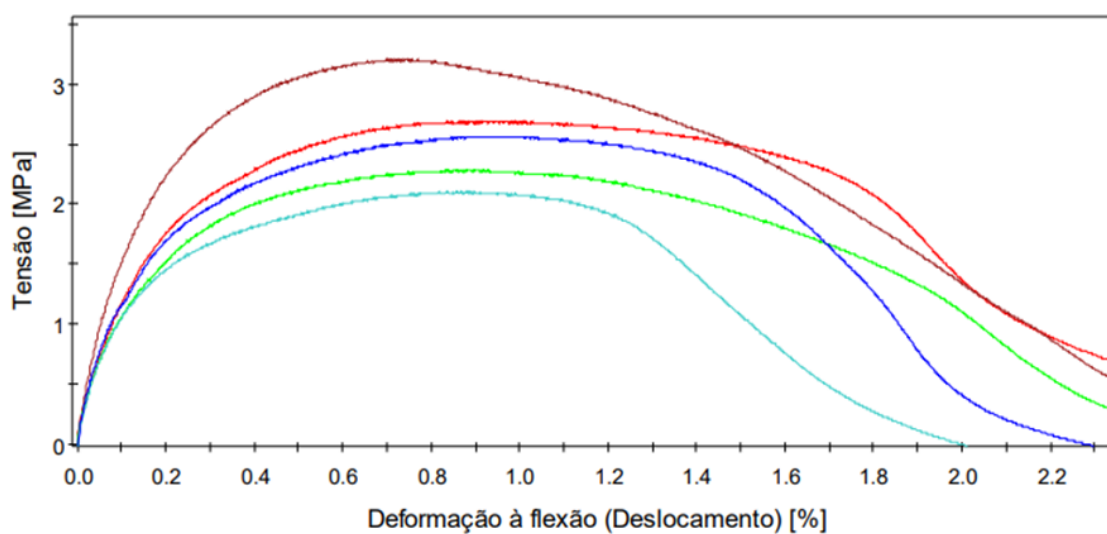
Na Figura 160 pode ser observada a relação entre tensão e deformação à flexão obtidas para o composto CPA-02a.



**Figura 160 - Curva tensão-deformação sob flexão - CPA-02a**

Fonte: CCDM (2023d).

Na Figura 161 pode ser observada a relação entre tensão e deformação à flexão obtida para o composto CPA-02b.

**Figura 161 - Curva tensão-deformação sob flexão - CPA-02b**

Fonte: CCDM (2023e).

No Quadro 93 podem ser observadas as medições realizadas nos corpos de prova.

Quadro 93 - Dimensões corpos de prova flexão

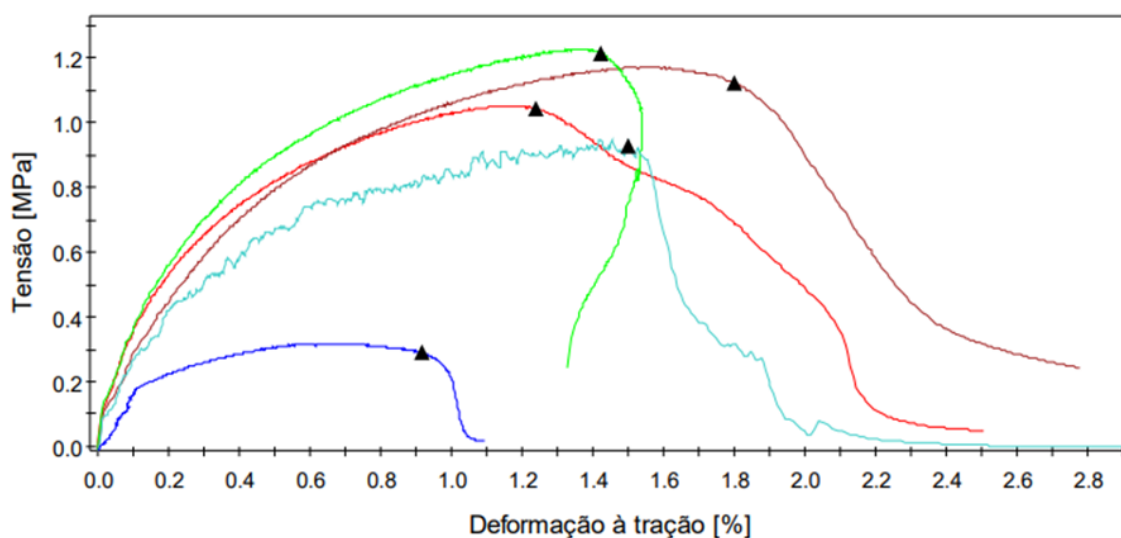
CP	CPA-01		CPA-02a		CPA-02b	
	Largura	Espessura	Largura	Espessura	Largura	Espessura
1	12,934	3,031	13,131	2,552	12,963	2,627
2	12,829	3,073	13,015	2,539	12,89	2,575
3	12,737	3,007	13,075	2,531	12,815	2,595
4	12,848	2,968	12,992	2,535	12,924	2,566
5	12,798	2,924	13,035	2,498	12,88	2,622
<b>Média</b>	12,83	3,00	13,05	2,53	12,89	2,60
<b>D. pad.</b>	0,07	0,05	0,05	0,02	0,05	0,02
<b>C. V. (%)</b>	0,51	1,70	0,38	0,71	0,38	0,92

Fonte: Adaptado de CCDM (2023).

## A.2 – Curvas tensão-deformação ensaio de tração

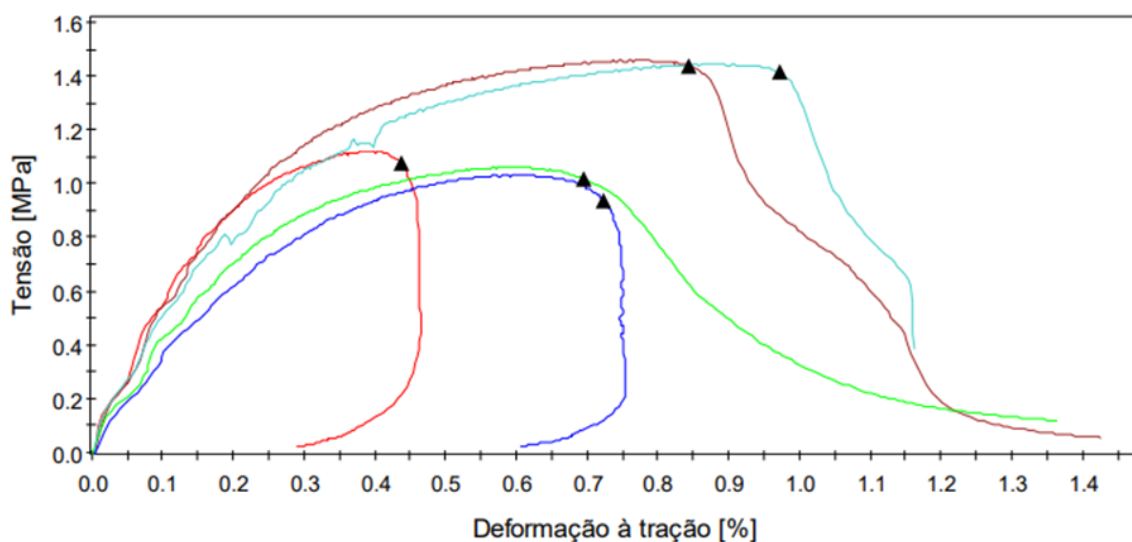
Na Figura 162 pode ser observada a relação entre tensão e deformação à flexão obtida para o composto CPA-01.

Figura 162 - Curva tensão-deformação sob tração - CPA-01



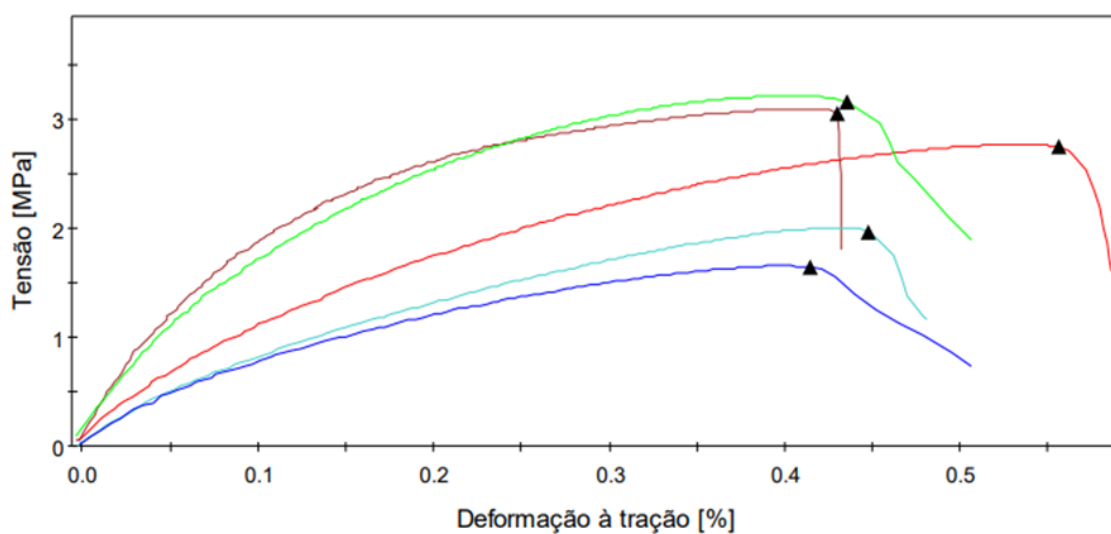
Fonte: CCDM (2023d).

Na Figura 163 pode ser observada a relação entre tensão e deformação à flexão obtida para o composto CPA-01.

**Figura 163 - Curva tensão-deformação sob tração - CPA-02a**

Fonte: CCDM (2023d).

Na Figura 164 pode ser observada a relação entre tensão e deformação à flexão obtida para o composto CPA-01.

**Figura 164 - Curva tensão-deformação sob tração - CPA-02b**

Fonte: CCDM (2023e).

No Quadro 94 podem ser observadas as medições realizadas nos corpos de prova.

**Quadro 94 - Dimensões dos corpos de prova tração**

CP	CPA-01		CPA-02a		CPA-02b	
	Largura	Espessura	Largura	Espessura	Largura	Espessura
<b>1</b>	13,203	2,738	13,131	2,562	13,222	2,627
<b>2</b>	13,138	2,674	13,207	2,507	13,488	2,535
<b>3</b>	13,35	2,664	13,338	2,598	13,469	2,458
<b>4</b>	13,424	2,713	13,378	2,491	13,555	2,476
<b>5</b>	13,399	2,614	13,18	2,539	13,251	2,432
<b>Média</b>	13,30	2,68	13,25	2,54	13,40	2,51
<b>D. Pad.</b>	0,13	0,05	0,11	0,04	0,15	0,08
<b>C. V. (%)</b>	0,95	1,79	0,80	1,69	1,12	3,11

Fonte: Adaptado de CCDM (2023).

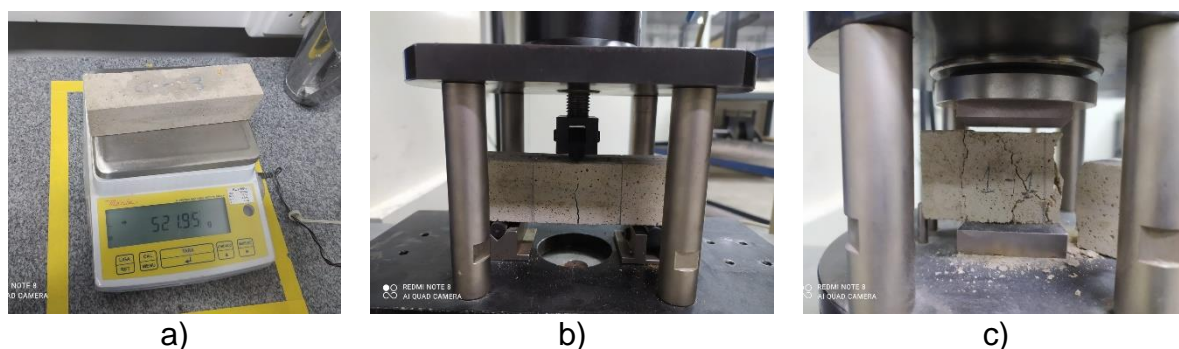
## ANEXO B

### Ensaio de caracterização de argamassa cimentícia

Nesse anexo são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização realizados em argamassas cimentícias utilizadas no assentamento da primeira fiada dos blocos de concreto em alguns ensaios. As argamassas são industrializadas e provenientes do fabricante Argafácil e possuem resistência à compressão nominal de 20 MPa. A quantidade de água foi adicionada até o material adquirir a consistência desejada pelo pedreiro, normalmente, com índice de consistência na ordem  $200 \pm 20$  mm, realizado conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016).

Os ensaios de caracterização foram realizados no material em estado endurecido, após 28 dias da data de sua moldagem, que foi realizada em formas prismáticas de 40x40x160 mm. Os ensaios realizados para caracterização foram a determinação da densidade de massa em estado endurecido, conforme a NBR 13280 (ABNT, 2005), e ensaio para determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005). Na Figura abaixo podem ser visualizadas imagens dos ensaios realizados.

**Figura 165 - Imagens dos ensaios feitos em argamassas cimentícias**



Fonte: Autor (2023). Legenda: a) Pesagem para determinação da densidade; b) Ensaio de tração na flexão; c) Ensaio de compressão.

Os resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas cimentícias são mostrados no Quadro 95, bem como o local em que as argamassas foram empregadas.

Quadro 95 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas cimentícias

Local em que foi empregada a argamassa cimentícia	Propriedade	Índice de consistência (mm)	Densidade de massa (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à flexão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
Paredes - (B4 - CPA-01)	Média	190,84	2026,80	4,10	18,39
	D. Pad.	0,39	3,66	0,42	0,55
	C. V. (%)	0,2	0,18	10,24	2,99
Paredes - (B4 - CPA-02a)	Média	207,67	2040,29	4,19	20,51
	D. Pad.	0,92	12,16	0,2	0,64
	C. V. (%)	0,44	0,6	4,77	3,12
Paredes - (B10 - CPA-01)	Média	63,81	676,88	4,92	7,70
	D. Pad.	110,01	1169,07	4,96	9,19
	C. V. (%)	172,4	172,71	100,81	119,35
Paredes - (B10 - CPA-02a)	Média	219,16	2018,14	3,94	17,58
	D. Pad.	2,04	10,28	0,27	0,68
	C. V. (%)	0,93	0,51	6,85	3,87
Paredes - (B20 - CPA-01)	Média	115,41	672,89	36,90	26,40
	D. Pad.	54,5	498,19	55,35	45,9
	C. V. (%)	47,22	74,04	150	173,86
Paredes - (B20 - CPA-02a)	Média	214,60	2033,08	4,02	20,61
	D. Pad.	0,55	3,41	0,2	0,31
	C. V. (%)	0,26	0,17	4,98	1,5
Pequena Parede - (Bloco B4 e B10 - CPA-01)	Média	215,81	2032,45	4,42	18,05
	D. Pad.	3,16	7,57	0,4	0,75
	C. V. (%)	1,46	0,37	9,05	4,16
Pequena Parede - (Bloco B4 - CPA-02a) e (Bloco B20 - CPA-01)	Média	197,33	2038,96	4,24	19,35
	D. Pad.	1,46	14,02	0,42	0,66
	C. V. (%)	0,74	0,69	9,91	3,41
Pequena Parede - (Bloco B10 e B20 - CPA-02a)	Média	205,62	2059,85	4,50	20,43
	D. Pad.	2,28	2,91	0,2	0,76
	C. V. (%)	1,11	0,14	4,44	3,72
Parede 01 desempenho - (B20 - CPA-01)	Média	210,37	1957,09	5,10	19,31
	D. Pad.	0,86	1,98	0,62	0,41
	C. V. (%)	0,41	0,1	12,16	2,12
Parede 02 desempenho - (B20 - CPA-01)	Média	-	2022,03	5,18	21,57
	D. Pad.	-	7,39	0,51	0,4
	C. V. (%)	-	0,37	9,85	1,85
Paredes desempenho - (B4 - CPA-02a)	Média	204,74	2027,82	5,10	19,05
	D. Pad.	1,71	8,75	0,62	0,56
	C. V. (%)	0,84	0,43	12,16	2,94

Fonte: Autor (2023).

## ANEXO C

### Quadro contendo valor do fator de forma

Os valores do coeficiente de forma a serem utilizados para os blocos podem ser observados no Quadro 96. Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas cimentícias são

**Quadro 96 - Coeficiente de forma**

Altura do bloco (mm)	Largura do bloco (mm)				
	50	100	150	200	≥ 250
40	0,8	0,7	-	-	-
50	0,85	0,75	0,7	-	-
65	0,95	0,85	0,75	0,7	0,65
100	1,15	1	0,9	0,8	0,75
150	1,3	1,2	1,1	1	0,95
200	1,45	1,35	1,25	1,15	1,1
≥ 250	1,55	1,45	1,35	1,25	1,15

Fonte: Adaptado de BS EN 772-1 (2000).

## ANEXO D

### Estimativa do módulo de elasticidade das pequenas paredes utilizando a equação 25

A comparação entre os valores de módulo de elasticidade obtidos no ensaio de compressão de pequenas paredes com os valores estimados pela equação 25 pode ser observada no Quadro 97, para as amostras construídas com o bloco B4.

**Quadro 97 - Módulo estimado das pequenas paredes construídas com bloco B4**

CP	Composto	$\delta_{cor}$	$E_{prm}$ (MPa)	$E_{ep}$ (MPa)	Erro (%)	Erro médio absoluto (%)
1	CPA-01	0,954	840	1289,84	53,55	41,89
2		0,959	1030	1347,56	30,83	
3		0,962	980	1384,74	41,30	
1	CPA-02a	0,967	1230	1179,97	-4,07	21,37
2		0,968	810	1196,12	47,67	
3		0,967	1050	1179,97	12,38	

Fonte: Autor (2023). Legenda:  $E_{pm}$  é o valor médio do módulo de elasticidade obtido para o prisma;  $E_{ep}$  é o valor estimado para o módulo do prisma utilizando a equação 25.

Como pode ser observado no Quadro 97, o erro médio observado para a estimativa do módulo de elasticidade utilizando a equação 25 foi de, aproximadamente, 42% e 21%, respectivamente para a amostra construída com o composto CPA-01 e CPA-02a.

A comparação entre os valores de módulo de elasticidade obtidos no ensaio de compressão de pequenas paredes com os valores estimados pela equação 25 pode ser observada no Quadro 98, para as amostras construídas com o bloco B10.



**Quadro 98 - Módulo estimado das pequenas paredes construídas com bloco B10**

CP	Composto	$\delta_{cor}$	$E_{prm}$ (MPa)	$E_{ep}$ (MPa)	Erro (%)	Erro médio absoluto (%)
1	CPA-01	0,963	1630	2170,89	33,18	21,55
2		0,953	1500	1887,87	25,86	
3		0,959	2170	2048,08	-5,62	
1	CPA-02a	0,973	3410	1918,33	-43,74	35,06
2		0,968	2210	1724,63	-21,96	
3		0,968	2850	1724,63	-39,49	

Fonte: Autor (2023). Legenda:  $E_{pm}$  é o valor médio do módulo de elasticidade obtido para o prisma;  $E_{ep}$  é o valor estimado para o módulo do prisma utilizando a equação 25.

Como pode ser observado no Quadro 98, o erro médio observado para a estimativa do módulo de elasticidade utilizando a equação 25 foi de, aproximadamente, 22% e 35%, respectivamente para a amostra construída com o composto CPA-01 e CPA-02a.

A comparação entre os valores de módulo de elasticidade obtidos no ensaio de compressão de pequenas paredes com os valores estimados pela equação 25 pode ser observada no Quadro 99, para as amostras construídas com o bloco B20.

**Quadro 99 - Módulo estimado das pequenas paredes construídas com bloco B20**

CP	Composto	$\delta_{cor}$	$E_{prm}$ (MPa)	$E_{ep}$ (MPa)	Erro (%)	Erro médio absoluto (%)
1	CPA-01	0,956	2600	2346,55	-9,75	15,41
2		0,964	2340	2701,11	15,43	
3		0,947	2590	2044,62	-21,06	
1	CPA-02a	0,970	1100	2116,94	92,45	52,83
3		0,966	1700	1924,69	13,22	

Fonte: Autor (2023). Legenda:  $E_{pm}$  é o valor médio do módulo de elasticidade obtido para o prisma;  $E_{ep}$  é o valor estimado para o módulo do prisma utilizando a equação 25. Nota: CP-02 com construído com CPA-02<sup>a</sup> não foi utilizado pois passou por um segundo carregamento no ensaio.

Como pode ser observado no Quadro 99, o erro médio observado para a estimativa do módulo de elasticidade utilizando a equação 25 foi de, aproximadamente, 15% e 53%, respectivamente para a amostra construída com o composto CPA-01 e CPA-02a.