

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

**Contribuições para Modelagem de Alvenaria em Blocos de
Concreto**

Rafael Dantas Pasquantonio

São Carlos
2019

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

Contribuições para Modelagem de Alvenaria em Blocos de
Concreto

Rafael Dantas Pasquantonio

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Estruturas e Geotecnia

Área de Concentração:
Estruturas e Geotecnia

Orientador: Prof Dr. Guilherme
Aris Parsekian

São Carlos
2019

Pasquantonio, Rafael Dantas

Contribuições para Modelagem de Alvenaria em Blocos de Concreto / Rafael Dantas Pasquantonio -- 2019. 376f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Guilherme Aris Parsekian

Banca Examinadora: Andre Luis Christoforo, José Luiz Pinheiro Melges, Armando Lopes Moreno Junior, Fernando Soares Fonseca

Bibliografia

1. Alvenaria estrutural. 2. Modelagem numérica. 3. Comportamento coesivo. I. Pasquantonio, Rafael Dantas. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325



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 Rafael Dantas Pasquantonio, realizada em 31/05/2019.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian (UFSCar)

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo (UFSCar)

Prof. Dr. José Luiz Pinheiro Melges (UNESP)

Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior (UNICAMP)

Prof. Dr. Fernando Soares Fonseca (BYU)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Dedicatória

*Dedico, não apenas esse trabalho mas todos esses anos de pesquisa
a Deus, à minha esposa Rosaine, aos meus pais Reynaldo e Iraide e
ao meu irmão Renan.*

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por me dar a certeza de onde estarei ao fim da caminhada desta vida. Mas também, pelo Seu cuidado, providência, amor, renovo, demonstrado a cada dia sobre a minha vida e da minha esposa durante todo o percurso que realizei no decorrer da pós-graduação.

À minha esposa, Rosaine, pelo seu amor, paciência e por se abnegar durante todos esses cinco anos que estamos juntos durante a minha trajetória acadêmica.

Aos meus pais, Reynaldo e Iraide, e ao meu irmão, Renan, por estarem ao meu lado desde o início desse processo de formação profissional aqui em São Carlos.

Aos meus sogros, Seu Jessé e Dona Rosangela, pelas orações e apoio durante a realização do mestrado e doutorado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian, pelos direcionamentos que me deu ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Fernando S. Fonseca que no período em que estive nos EUA realizando parte dessa pesquisa, se mostrou um companheiro, amigo dando suporte profissional e também pessoal durante os cinco meses que estive na Brigham Young University.

Ao amigo e Prof. Dr. Edson Denner Leonel, pelo auxílio durante o desenvolvimento dessa pesquisa me acalmando e mostrando que o processo é penoso mas o resultado é gratificante.

Ao Reverendo Cirilo e sua família, Jussilene (esposa), Cyro e Caio (filhos), pela amizade e pelo apoio nesses últimos anos desta pesquisa, dando suporte a mim e a minha esposa em diferentes momentos bem como se alegrando conosco em cada conquista.

Ao Reverendo William e sua esposa Caroline pela amizade e orações nesta fase final da elaboração da tese.

À Igreja Presbiteriana de São Carlos. Deus renovou as minhas forças durante essa longa, árdua e, por muitas vezes, exaustiva caminhada e sei que Ele ouviu as orações dessas pessoas.

"Até aqui nos ajudou o Senhor." 1Samuel 7:12

Epígrafe

*Toda luz que a razão irradia
Nós podemos nos livros achar.
Mas só Cristo nossa alma alumia,
Pois só ele dá calma e alegria,
E só Ele nos pode guiar
E só Ele nos pode guiar*

*Não busquemos apenas a glória
De alcançar quase todo saber,
Quer da ciência, quer da arte ou da história;
A razão é falaz e ilusória!
Sem Jesus nada pode valer!
Sem Jesus nada pode valer!*

Trecho da canção "O estudante e a Bíblia"

Resumo

A alvenaria é um sistema construtivo muito difundido ao redor mundo, com grandioso histórico de utilização na civilização. Com o avanço do conhecimento surge no campo da engenharia a técnica de resolução por meio dos métodos de elementos finitos. A partir do levantamento das pesquisas anteriores percebe-se que uma grande variedade de pesquisas que relacionam modelos experimentais de alvenaria com técnicas de resolução de elementos finitos em modelos numéricos a partir de software comerciais, como por exemplo, Abaqus. Fundamentado nesse contexto este trabalho tem por objetivo a caracterização dos elementos de alvenaria estrutural, e a obtenção dos parâmetros para modelagem de alvenaria estrutural de blocos de concreto e argamassa, em especial da interface entre os componentes. Foram realizados um conjunto de ensaios para caracterização dos elementos de alvenaria (ensaio de resistência à compressão e à tração de blocos, argamassa e graute) bem como caracterização da interface entre bloco e argamassa (bond wrench test, ensaio de cisalhamento da junta horizontal e compressão diagonal). A partir dos resultados experimentais foram elaborados modelos numéricos, utilizando software comercial Abaqus/2017, para representação do comportamento à compressão dos blocos, argamasas e graute. Além disso, foram criados modelos numéricos de prismas de dois e três blocos com e sem graute como uma maneira de aplicar os resultados obtidos a respeito dos componentes. Após a validação dos modelos numéricos de cada um dos componentes foram elaborados modelos numéricos para representação da interface entre bloco e argamassa. Nesta etapa foram estudados os ensaios de bond wrench test, ensaio de cisalhamento da junta horizontal e compressão diagonal. Foram alcançados parâmetros para representação do comportamento do plástico do bloco, argamassa e graute. Não obstante foram alcançados parâmetros para representação tangencial, normal e de dano da interface entre bloco e argamassa. Outro ponto de destaque da pesquisa é que os parâmetros referente ao comportamento tangencial, normal, e do dano foi possível utilizar os mesmos dados para representação dos modelos numéricos da representação da interface e apenas funcionando como parâmetro de calibração entre os diferentes modelos numéricos são os parâmetros do comportamento coesivo (K_n , K_s e K_t).

Palavras-chaves: alvenaria, blocos de concreto, modelagem numérica, interface, comportamento coesivo

Abstract

Masonry is a very widespread construction system around the world, with a great history of use in civilization. However, with the advancement of knowledge, the technique of resolution through the finite element methods arises in the field of engineering. Considering the survey of previous research, we can see that a great variety of researches that relate experimental masonry models with finite element solving techniques in commercial software models such as Abaqus. Based on this context, this work aims to characterize the structural masonry elements, and to obtain the parameters for modeling the structural masonry interface of concrete and mortar blocks. A set of tests was carried out to characterize the masonry elements (test of resistance to compression and stress of blocks, mortar and grout) as well as characterization of the interface between block and mortar (bond wrench test, horizontal joint shear test and compression diagonal). From the experimental results, numerical models were developed, using Abaqus / 2017 commercial software, to represent the compression behavior of blocks, mortars and grouts. In addition, numerical models of two- and three-block prisms with and without grout were developed as a way of applying the results obtained with respect to the components. After this stage of validation of the numerical models of each of the components, numerical models were developed to represent the interface between block and mortar. In this step the tests of bond wrench test, horizontal joint shear test and diagonal compression were studied. From this analysis, parameters were obtained to represent the plastic behavior of the block, mortar and grout. Nevertheless, parameters for tangential, normal and damage of the interface between block and mortar were reached. Another important point of the research is that the parameters related to the tangential, normal, and damage behavior were able to use the same data to represent the numerical models of the interface representation and only function as a calibration parameter between the different models are the parameters of cohesive behavior (K_n , K_s e K_t).

Keywords: *masonry, blocks, numerical modelling, interface, cohesive behavior*

Sumário

1	Introdução.....	24
1.1	Objetivos	25
1.2	Justificativa	25
1.3	Estrutura da Tese	26
2	Propriedades da Alvenaria Estrutural.....	28
2.1	Priestley e Hon (1985)	29
2.2	Leiva e Klingner (1994)	35
2.3	Elshafie et al (2002)	37
2.4	Moon et al (2003).....	39
2.5	Long et al (2005)	40
2.6	Mohammed et al (2011)	45
2.7	Lourenço et al (2005)	48
2.8	Barbosa (2008).....	54
2.9	Hughes (2010).....	59
2.10	Wierzbicki (2010)	63
2.11	Kaaki (2013).....	68
2.12	Banting e El-Dakhkhni (2014)	72
2.13	Bolhassani et al (2015).....	75
2.14	Moradabadi et al (2015)	80
2.15	Almeida et al(2016)	83
2.16	Basha e Kaushik (2016).....	87
2.17	Baraldi e Cecchi (2017)	89
2.18	Knox et al (2018)	94
2.19	Alotaibi e Galal (2018).....	97
2.20	Bedeir et al (2019)	98
3	Ensaio de Caracterização da Alvenaria	103
3.1	Bond Wrench – Alavanca de Aderência.....	103
3.1.1	Bond Wrench – AS3700/2017	106
3.2	Ensaio de Cisalhamento Direto da Junta Horizontal	110
3.2.1	Metodologia do Ensaio – EN1052-3/2007	112
3.3	Ensaio de Tração.....	118
3.3.1	Ensaio de Tração Indireta	120
3.4	Ensaio de Compressão Diagonal.....	122
3.4.1	Metodologia do Ensaio	123
4	Modelagem Numérica – Abordagem Geral.....	127
4.1	Tipos de Modelagem Numérica	127
4.2	Modelos Constitutivos para Análise Numérica	129
4.3	Mecanismos de Ruptura da Alvenaria.....	133

5	Programa Experimental – Procedimento	136
5.1	Ensaio de Bond Wrench e Ensaio da Junta Horizontal	138
5.2	Ensaio de compressão diagonal	140
5.3	Grauteamento das paredes	142
5.4	Preparação dos corpos de prova de argamassa.....	144
5.5	Preparação dos corpos de prova do graute	145
6	Programa Experimental – Apresentação dos Resultados	146
6.1	Ensaio de Tração Indireta dos Componentes	146
6.1.1	Unidades	146
6.1.2	Argamassa.....	149
6.1.3	Graute	152
6.2	Ensaio de Compressão dos Componentes	155
6.2.1	Unidades	155
6.2.2	Argamassa.....	158
6.2.3	Graute	158
6.3	Ensaio de Bond Wrench.....	160
6.4	Ensaio de Cisalhamento da junta Horizontal.....	164
6.5	Compressão Diagonal.....	169
7	Programa Experimental – Análise dos Resultados.....	175
7.1	Análise dos Resultados – Blocos.....	180
7.2	Análise Resultados – Ensaio de Cisalhamento da Junta Horizontal 184	
7.3	Análise dos Resultados – Bond Wrench	188
7.4	Análise dos Resultados – Compressão Diagonal	190
7.5	Considerações sobre os Ensaios.....	193
8	Modelagem Numérica com Validação a Partir do Programa Experimental 196	
8.1	Modelos Numéricos – Ensaio de Compressão dos Blocos	196
8.2	Modelos Numéricos – Ensaio de Compressão da Argamassa	205
8.3	Modelos Numéricos – Ensaio de Compressão do Graute	215
8.3.1	Dados de Entrada do Modelo e Geometria	215
8.3.2	Estudo das Malhas	219
8.3.3	Restrições do Modelo	221
8.3.4	Resultados.....	221
8.4	Modelos Numéricos – Ensaio de Compressão dos Prismas	224
8.4.1	Dados de Entrada de do Modelo	225
8.4.2	Geometria do Modelo.....	226
8.4.3	Dados de Interface.....	226
8.4.4	Estudo das Malhas	227
8.4.5	Condições de Vínculo do Modelo	228
8.4.6	Resultados.....	229
8.5	Bond Wrench – Modelo Numérico	238
8.5.1	Dados de Entrada de do Modelo	239

8.5.2	Geometria do Modelo.....	239
8.5.3	Dados de Interface.....	240
8.5.4	Estudo das Malhas	241
8.5.5	Condições de Vínculo do Modelo	242
8.5.6	Resultados.....	243
8.6	Modelos Numéricos - Ensaio do Cisalhamento da Junta Horizontal	244
8.6.1	Criação do Modelo.....	245
8.6.2	Calibração do Modelo – Pré Compressão 0,2MPa	247
8.6.3	Calibração do Modelo – Pré Compressão 0,6MPa	252
8.6.4	Calibração do Modelo – Pré Compressão 1,0MPa	255
8.6.5	Análise da Equação de Tensão de Cisalhamento	258
8.6.6	Calibração do Modelo – Considerando Tensão de Cisalhamento de Inicial no Comportamento do Dano.....	259
8.6.7	Calibração do Modelo – Modelo Numérico sem Argamassa ...	291
8.7	Modelos Numéricos – Ensaio de Compressão Diagonal.....	299
8.7.1	Criação do Modelo Parede Oca	299
8.7.2	Calibração do Modelo - considerando a mesma propriedade de contato considerada no ensaio de cisalhamento junta horizontal.....	301
8.7.3	Calibração do Modelo - considerando equação proposta por Lourenço et al (2005).....	303
8.7.4	Análise do Valor de Ks	305
8.7.5	Calibração do Modelo de Ensaio de Compressão Diagonal - Parede Totalmente Grauteada.....	312
8.8	Análise dos resultados.....	321
9	Considerações Finais	325
10	Referências Bibliográficas.....	329
11	Anexo A - Modelagem Numérica – Abaqus	338
11.1	Modelo CDP	338
11.1.1	Comportamento Mecânico	339
11.1.2	Armadura	342
11.1.3	Definição da Rigidez a Tração.....	342
11.1.4	Definição do Comportamento a Compressão.....	344
11.1.5	Definição de Dano e Rigidez Recuperada.....	345
11.1.6	Plasticidade do Concreto	346
11.1.7	Visualização da Direção das Fissuras	350
11.1.8	Elementos	350
11.2	Superfícies de Contato.....	351
11.2.1	Visão Geral da Aplicabilidade de Contato no Abaqus	352
11.2.2	Definindo Superfícies	352
11.2.3	Superfícies sobre Elementos Contínuos	353
11.2.4	Superfícies sobre Estruturas, Superfície e Elementos Rígidos	353
11.2.5	Superfícies Rígidas	354
11.3	Interação entre Superfícies	355
11.3.1	Comportamento Normal para Superfícies	355
11.3.2	Deslizamento entre Superfícies	357
11.3.3	Modelos de Atrito	357
11.3.4	Outras opções de Interação	360
11.3.4.1	Restrições Surface-Based.....	360

11.4	Definição de Contato no Abaqus/Standard	361
11.4.1	Interações de Contato	361
11.4.2	Superfícies Mestre e Sacrifício	362
11.4.3	Discretização do Contato.....	363
11.4.4	Small and Finite Sliding.....	363
11.4.5	Seleção de Elemento	364
11.4.6	Algoritmo de Contato.....	365
11.5	Propriedades de Contato.....	367
11.5.1	Tangential Behavior.....	367
11.5.2	Cohesive Behavior.....	369
11.5.3	Modelagem do Dano.....	372
11.5.3.1	Início do Dano.....	373
11.5.3.2	Evolução do Dano.....	375

Lista de Figuras

Figura 1 - Região de Análise sob Carregamento Lateral	30
Figura 2 - Comportamento das Paredes de contraventamento	30
Figura 3 - Dimensões e Detalhamento da Armadura.....	31
Figura 4 - Instrumentação do Corpo-de-Prova	32
Figura 5 - Ligação após o ultimo ciclo de carregamento	33
Figura 6 - Distribuição da Curvatura das Vigas	33
Figura 7 - Rótulas Plásticas nas Vigas	34
Figura 8 - Diagonal de Compressão	34
Figura 9 - Paredes para Ensaio	35
Figura 10 - Detalhamento da Armadura	36
Figura 11 - Padrão de Fissuras para o Tipo 1 e Tipo 2	37
Figura 12 - Corpos de Prova.....	38
Figura 13 - Edifício Ensaiado - Escala Real.....	39
Figura 14 - Esquema do Carregamento Aplicado.....	40
Figura 15 - Ruptura dos Blocos – Escala 1:2(a) e Escala 1:1(b).....	41
Figura 16 - Prismas com Blocos de 3/4.....	42
Figura 17 - Instrumentação dos Prismas – Escala 1:2(a) e Escala 1:1(b) .	42
Figura 18 - Tensão x Deformação - Prismas - Oco (a) e Grauteado (b).....	43
Figura 19 - Instrumentação das Paredes – Compressão Diagonal – Escala 1:2(a) e Escala 1:1(b)	44
Figura 20 - Tensão vs Deformação – Compressão Diagonal - Oco (a) e Grauteado (b)	44
Figura 21 - Corpos de Provas.....	46
Figura 22 - Relação entre tensão (a), módulo de elasticidade (b) com a escala dos corpos de prova	47
Figura 23 - Tensão vs Deformação – Prismas de três blocos.....	48
Figura 24 - Modelo Esquemático para Ensaio	49
Figura 25 - Relação entre a tensão normal e tensão de cisalhamento: A partir da regressão linear dos dados experimentais.....	50
Figura 26 - Comparação Gráficos Força x Deslocamento	53
Figura 27 - Modo de Falha dos Ensaios Experimentais (a) Numérico (b) ...	54
Figura 28 - Instrumentação para o ensaio de resistência à compressão dos blocos	56
Figura 29 - Curva Força vs Deslocamento - Comparação com Escala 1:1..	62
Figura 30 - Força vs Deslocamento – Idealizada – Escala 1:3	63
Figura 31 - Força vs Deslocamento – Idealizada – Escala 1:1	63
Figura 32 - Estrutura para execução do ensaio	66
Figura 33 - Força Lateral x Deslocamento - Histerese	67
Figura 34 - Tensão x Deformação - Oco	71
Figura 35 - Tensão x Deformação – Grauteado.....	71
Figura 36 - Corpos de Prova para o Ensaio.....	73
Figura 37 - Comparação entre o caminho das fissuras no primeiro andar das paredes 3 e 4	75
Figura 38 - Comportamento Típico Traction (Tração)-Separation (Separação) (a) e Modos de Fratura – Normal (b), Cisalhamento no plano (c) e Cisalhamento fora do plano (d)	77
Figura 39 - Condições de Contorno e de Deslocamento – Prisma (a), Corpo de Prova Cisalhamento (b) e Tração Diagonal (c)	80
Figura 40 - Representação da direção de carregamento investigado	85
Figura 41 - Experimental vs Criterios Estimativos para carregamento na direção de 90 graus.....	87

Figura 42 - Detalhes da Instrumentação e Preparação do Ensaio	87
Figura 43 - Curva Força Lateral vs Escorregamento (a) e Dissipação de Energia vs Escorregamento (b).....	89
Figura 44 - Representação do Plano Genérico de Interface Horizontal(a) e Vertical(b) - Sistema de Coordenadas Genéricas de forças e momentos da Interface	90
Figura 45 - Discretização da Interface(a) - Conjunto de Molas para Modelagem de uma Interface Genérica(b)	91
Figura 46 - Deslocamento Relativo da Interface	92
Figura 47 - Análise do Incremento para Avaliação da Resistência ao Cisalhamento da Interface nas duas Direções dos Planos.....	93
Figura 48 - Ruptura das Paredes	96
Figura 49 - Tensão de Cisalhamento x Escorregamento	97
Figura 50 - Ensaio de Paredes - Escala 1:3	99
Figura 51 - Força Lateral vs Deslocamento - Experimental A (Movimento de Empurrar a Parede) - Experimental B (Movimento de Puxar a Parede)- Modelo Inicial (a) e Modelo regular (Padrão) (b)	99
Figura 52 - Força Lateral vs Deslocamento - Experimental A (Movimento de Empurrar a Parede) - Experimental B (Movimento de Puxar a Parede)- Modelo Numérico	100
Figura 53 - Força Lateral vs Deslocamento - Experimental e Numérico - Histerese (a) e Meio Ciclo da Histerese (b)	101
Figura 54 - Primeiro Ensaio do Bond Wrench	104
Figura 55 - Segundo Estágio do Bond Wrench	105
Figura 56 - Modelo de Bond Wrench - AS3700/2017	106
Figura 57 - Planta da Bond Wrench	108
Figura 58 - Vista Lateral da Bond Wrench.....	109
Figura 59 - Tipos de Ruptura do Ensaio de Cisalhamento	112
Figura 60 - Tipologia de Ensaio de Cisalhamento Direto	114
Figura 61 - Apoios do corpo de prova	116
Figura 62 - Carregamento de Pré-Compressão	116
Figura 63 - Gráfico genérico $f_{voi} \times f_{pi}$	118
Figura 64 - Tipos de Ensaio de Tração para Concreto Simples.....	119
Figura 65 - Disposição do corpo de prova	121
Figura 66 - Exemplo de Ensaio de Tração Indireta	122
Figura 67 - Modelo de corpo de prova para ensaio de compressão diagonal	123
Figura 68 - Exemplo de Apoio de Carregamento	124
Figura 69 - Tipos de Modelagem Numérica	128
Figura 70 - Comportamento Uniaxial do Concreto para o Modelo CSC	130
Figura 71 - Superfície do Plano de Tensões para o Modelo CSC	131
Figura 72 - Modo de Ruptura pelo Critério de Mohr-Coulomb.....	132
Figura 73 - Modelo Constitutivo para Interface Proposto por Lourenço e Rots (1997)	133
Figura 74 - Comportamento Elasto - Perfeitamente Plástico	133
Figura 75 - Tipos Básicos de Mecanismos de Ruptura para Alvenaria	134
Figura 76 - Dispositivo para Construção dos Prismas.....	138
Figura 77 - Preparação do Corpo de Prova - Etapa 1	138
Figura 78 - Preparação do Corpo de Prova - Etapa 2	139
Figura 79 - Preparação do Corpo de Prova - Etapa 3	139
Figura 80 - Preparação do Corpo de Prova - Etapa 4	140

Figura 81 - Corpo de Prova - Ensaio de Cisalhamento da Junta e Bond Wrench	140
Figura 82 - Preparação do Corpo de Prova - Etapa 1	141
Figura 83 - Preparação do Corpo de Prova - Etapa 2	141
Figura 84 - Preparação do Corpo de Prova - Etapa 3	142
Figura 85 - Corpo de Prova - Compressão Diagonal	142
Figura 86 - Grauteamento - Etapa 1.....	143
Figura 87 - Grauteamento - Etapa 2.....	143
Figura 88 - Grauteamento - Etapa 3.....	144
Figura 89 - Corpos de Prova de Argamassa - Compressão(a), (b), (c) e Tração(d), (e), (f)	144
Figura 90 - Corpos de Prova - Graute - Compressão e Tração.....	145
Figura 91 - Exemplo Corpo de Prova de Tração Indireta - Antes do Ensaio	146
Figura 92 - Exemplo de Corpo de Prova de Tração Indireta - Após Ensaio	147
Figura 93 - Exemplo de Corpo de Prova de Compressão Diametral da Argamassa - Antes do Ensaio	149
Figura 94 - Exemplo de Corpo de Prova de Compressão Diametral da Argamassa - Após o Ensaio.....	149
Figura 95 - Exemplo de Corpo de Prova de Compressão Diametral do Graute - Antes do Ensaio	152
Figura 96- Exemplo de Corpo de Prova de Compressão Diametral do Graute - Após o Ensaio.....	152
Figura 97 - Ensaio de Compressão dos Blocos.....	155
Figura 98 - Ensaio de Compressão da Argamassa	158
Figura 99 - Ruptura da Argamassa.....	158
Figura 100 - Ensaio de Compressão do Graute	159
Figura 101 - Ruptura do Corpo de Prova	159
Figura 102 - Ensaio de Bond Wrench - Início.....	160
Figura 103 - Ensaio de Bond Wrench - Ruptura	161
Figura 104 - Ensaio de Cisalhamento da junta Horizontal – Corpo de Prova antes do ensaio (a), corpo de prova após o ensaio (b) e (c), instrumentação do corpo de prova e deslocamento do bloco intermediário (d), caminho das fissuras (e) e (f).....	164
Figura 105 - Compressão Diagonal - Antes do Ensaio	170
Figura 106 - Compressão Diagonal - Após a Ruptura.....	170
Figura 107 - Ruptura Típica	171
Figura 108 – Tensão x Deformação	187
Figura 109 – Distribuição de Tensão.....	202
Figura 110 – Distribuição de Deformação	202
Figura 111 - Distribuição do dano no bloco	203
Figura 112 - Exemplo de Bloco Testado	203
Figura 113 - Distribuição de Tensão	212
Figura 114 - Distribuição de Deformação.....	212
Figura 115 –Distribuição do Dano à Compressão	212
Figura 116 – Ruptura da Argamassa.....	213
Figura 117 - Partição do Modelo	219
Figura 118 - Representação da Diferença de Malha	220
Figura 119 - Representação da Malha do Graute	220
Figura 120 - Vinculação do Modelo.....	221
Figura 121 - Distribuição de Tensão	222

Figura 122 - Distribuição das Deformações.....	222
Figura 123 - Dano a Compressão Último Passo	222
Figura 124 - Distribuição de Dano a Tração	223
Figura 125 Malhas Utilizadas nos Prismas – Prisma de Dois Blocos Oco (a), Prisma de Dois Blocos Grauteado (b), Prisma de Três Blocos Oco (c) e Prisma de Três Blocos (d).....	227
Figura 126 - Condições de Vínculo dos Modelos – Prisma de Dois Blocos Oco (a), Prisma de Dois Blocos Grauteado (b), Prisma de Três Blocos Oco (c) e Prisma de Três Blocos (d).....	228
Figura 127 - Distribuição de Tensão	230
Figura 128 - Distribuição de Deformação.....	231
Figura 129 - Distribuição de Tensão	232
Figura 130 - Distribuição de Deformação.....	232
Figura 131 - Distribuição de Tensão	234
Figura 132 – Distribuição de Deformação	234
Figura 133 - Distribuição de Tensão	236
Figura 134 - Distribuição de Deformação.....	236
Figura 135 - Prisma de 3 Blocos para Ensaio de Bond Wrench	241
Figura 136 - Condições de Vínculo do Modelo.....	242
Figura 137 - Distribuição de Tensão	243
Figura 138 – Comparativo – Ruptura – Modelo Numérico (a) e Experimental (b).....	243
Figura 139 - Geometria do Modelo - Ensaio de Cisalhamento da Junta Horizontal.....	245
Figura 140 - Modelo com Chapa Rígida de Distribuição de Deslocamento	245
Figura 141 - Modelo com a Malha	246
Figura 142 – Deslocamento – Direção e Ponto de Aplicação.....	246
Figura 143 - Distribuição de Tensão	252
Figura 144 - Distribuição de Deformação.....	252
Figura 145 - Distribuição de Tensão	254
Figura 146 - Distribuição de Deformação.....	254
Figura 147 - Distribuição de Tensão de Cisalhamento na Interface	254
Figura 148 - Distribuição de Tensão	256
Figura 149 - Distribuição de Deformação.....	257
Figura 150 - Distribuição de Tensão de Cisalhamento.....	257
Figura 151 - Distribuição de Tensão – pré-compressão 0.2 MPa	288
Figura 152 - Distribuição de Deformação – pré-compressão 0.2MPa	288
Figura 153 - Distribuição de Tensão de Cisalhamento – pré-compressão 0.2MPa.....	288
Figura 154 - Distribuição de Tensão – pré-compressão 0.6 MPa	289
Figura 155 - Distribuição de Deformação – pré-compressão 0.6MPa	289
Figura 156 - Distribuição de Tensão de Cisalhamento – pré-compressão 0.6MPa.....	289
Figura 157 - Distribuição de Tensão – Tensão de pré-compressão 1.0MPa	289
Figura 158 - Distribuição de Deformação – Tensão de pré-compressão 1.0MPa.....	290
Figura 159 - Distribuição de Tensão de Cisalhamento – Tensão de pré- compressão 1.0MPa.....	290
Figura 160 - Distribuição de Tensão - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 0.2MPa	295

Figura 161 - Distribuição de Deformação - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 0.2MPa	295
Figura 162 - Distribuição de Cisalhamento - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 0.2MPa	295
Figura 163 - Distribuição de Tensão - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 0.6MPa	296
Figura 164 - Distribuição de Deformação - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 0.6MPa	296
Figura 165 - Distribuição de Cisalhamento - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 0.6MPa	296
Figura 166 - Distribuição de Tensão - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 1.0MPa	297
Figura 167 - Distribuição de Deformação - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 1.0MPa	297
Figura 168 - Distribuição de Cisalhamento - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 1.0MPa	297
Figura 169 - Criação do Modelo - Condições de Contorno (a) e Estudo de Malha (b).....	299
Figura 170 - Elementos de Interface - Junta Horizontal (a) e Vertical (b)	300
Figura 171 - Distribuição de Tensão (a) – Deformação (b) – Dano a Compressão (c) e Dano a Tração (d) – considerando deslocamento de 0.1154mm	304
Figura 172 - Distribuição de Tensão	311
Figura 173 - Distribuição de Deformação.....	312
Figura 174 - Distribuição de dano à compressão.....	312
Figura 175 - Distribuição de dano à tração	312
Figura 176 - <i>Modelo de Parede Grauteada</i>	313
Figura 177 - Distribuição de Tensão – $K_s=0,63\text{MPa/mm}$	315
Figura 178 - Distribuição de Deformação - $K_s=0,63\text{MPa/mm}$	315
Figura 179 - Distribuição de Dano à Compressão - $K_s=0,63\text{MPa/mm}$	315
Figura 180 - Distribuição de Tensão Tangencial – Direção X - $K_s=0,63\text{MPa/mm}$	316
Figura 181 - Distribuição de Tensão – $K_s=70\text{MPa/mm}$	317
Figura 182 - Distribuição de Deformação - $K_s=70\text{MPa/mm}$	317
Figura 183 - Distribuição de Dano à Compressão - $K_s=70\text{MPa/mm}$	318
Figura 184 - Distribuição de Dano à Tração - $K_s=70\text{MPa/mm}$	318
Figura 185 - Distribuição de Tensão Tangencial – Direção X - $K_s=70\text{MPa/mm}$	319
Figura 186 - Comparativo da Distribuição de Dano à Compressão - $K_s=0,63\text{MPa/mm}$ (a) - $K_s=70\text{MPa/mm}$ (b)	320
Figura 187 - Curva Tensão vs Deformação a Tração do Concreto sob Carregamento Uniaxial.....	339
Figura 188 - Curva Tensão vs Deformação a Compressão do Concreto sob Carregamento Uniaxial.....	340
Figura 189 - Ilustração da Deformação de Fissuração.....	343
Figura 190 - Interpretação Gráfica da Deformação Inelástica a Compressão	345
Figura 191 - Superfície de Escoamento dentro de planos desviantes, correspondentes a diferentes valores de K_c	348
Figura 192 - Superfície de Escoamento no Plano de Tensão.....	349
Figura 193 - <i>Superfícies de um Elemento de Placa ou Elemento Rígido...</i>	353
Figura 194 - Exemplo de Contato do Tipo NBS	354

Figura 195 - Superfícies Analíticas Rígidas.....	355
Figura 196 - Relação de contato Pressão-Clearance	356
Figura 197 - Comportamento ao Atrito das Superfícies	358
Figura 198 - Formulação Exponencial de Decaimento do Coeficiente de Atrito	359
Figura 199 - Superfície Mestre penetrando a Superfície Sacrifício	362
Figura 200 - Carregamento de no equivalente para uma pressão constante em duas dimensões - elementos de segunda ordem	364
Figura 201 - Algoritmo de Contato no Abaqus/Standard	366
Figura 202 - Regiões de Deslizamento para o modelo de atrito com um limite para tensão de cisalhamento	369
Figura 203 - Modelo de Dano - Tração x Separação	373

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Blocos de Concreto – Propriedade dos Materiais	41
Tabela 2 - Resistência à Compressão – Prisma	43
Tabela 3 – Resistência à Compressão Diagonal	44
Tabela 4 – Propriedades Mecânicas – Blocos Cerâmicos	46
Tabela 5 – Resistência à Compressão de Prismas de Três Blocos	46
Tabela 6 - Resumo dos Resultados.....	50
Tabela 7 - Comparação entre Resultados Experimentais e Numéricos	52
Tabela 8 – Resistência à Compressão	55
Tabela 9 - Resistência à compressão e tração dos blocos	55
Tabela 10 - Resistência à compressão e tração dos corpos de prova de concreto	55
Tabela 11 - Parâmetros obtidos nos ensaios com blocos vazados e corpos de prova do grupo G3	56
Tabela 12 - Resistência à compressão dos blocos, argamassas e prismas.	57
Tabela 13 - Resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade do concreto que constitui os blocos dos prismas.	57
Tabela 14 - Resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração.....	57
Tabela 15 - Propriedades mecânicas a partir dos ensaios com prismas e corpos de prova de concreto e argamassa	58
Tabela 16 - Propriedades mecânicas da argamassa - obtidas no ensaio de corpo de prova e diretamente na junta do prisma -, do bloco e do prisma.	58
Tabela 17 - Resistência à compressão dos blocos, argamassa, prismas e miniparedes	58
Tabela 18 - Resistência à tração, módulo de elasticidade e coeficiente de poisson do concreto e argamassa	59
Tabela 19 - Resistência à compressão dos blocos	60
Tabela 20 - Resistência à tração dos blocos	60
Tabela 21 - Tensão de Cisalhamento	61
Tabela 22 - Comparação entre as resistências dos corpos de provas Escala 1:1 e Escala 1:3	62
Tabela 23 - Comparação entre as rigidez dos corpos de provas Escala 1:1 e Escala 1:3.....	62
Tabela 24 - Comparação entre as ductilidades dos corpos de provas Escala 1:1 e Escala 1:3	63
Tabela 25 - Resistência à compressão dos blocos	64
Tabela 26 - Resistência à compressão dos grautes.....	65
Tabela 27 – Informações Gerais das Amostras – Paredes.....	65

Tabela 28 - Resistência à compressão dos blocos de escala 1:3	69
Tabela 29 - Resistência a compressão da argamassa Tipo S	69
Tabela 30 - Resistência a compressão do graute Tipo N	69
Tabela 31 - Resistência a compressão do graute Tipo S	70
Tabela 32 - Amostras dos Ensaio de Kaaki (2013)	70
Tabela 33 - Resultados da Compressão Diagonal	72
Tabela 34 - Resistência dos Principais Materiais/Elementos	73
Tabela 35 - Informações das Paredes de Alvenaria Armada - Condições de Contorno	74
Tabela 36 - Rigidez Teórica e Experimental das Paredes	74
Tabela 37 - Propriedades Elásticas e Plásticas(CDP) do Alvenaria	78
Tabela 38 - Comportamento Plástico a Compressão e Tração da Alvenaria	78
Tabela 39 - Propriedades de Interface	79
Tabela 40 - Coeficiente de Variação de Ensaio	81
Tabela 41 - Caracterização das Variáveis de Entrada dos Materiais e a Função de Distribuição	83
Tabela 42 - Parâmetros de Resistência para diferentes tipos de interface	85
Tabela 43 - Tipos de Paredes Testadas	88
Tabela 44 - Propriedades dos Materiais	88
Tabela 45 - Parâmetros para Caracterização da Interface	92
Tabela 46 - Resultados dos Prismas	94
Tabela 47 - Resultado dos Blocos	95
Tabela 48 - Força aplicada de acordo com E519 (a) - Força aplicada diagonalmente a parede (b)	95
Tabela 49 - Resultado Compressão Diagonal	96
Tabela 50 - Resistência Média de Compressão da Argmassa (MPa)	111
Tabela 51 - Recomendações para Máquina de Ensaio	114
Tabela 52 - Dimensões dos Blocos para o Ensaio de Cisalhamento Direto	114
Tabela 53 - Resumo dos Ensaio	137
Tabela 54 - Cálculo de Resistência Característica a Tração do Bloco	148
Tabela 55 - Cálculo de Resistência Característica a Tração da Argmassa	151
Tabela 56 - Cálculo da Resistência Característica a Tração do Graute ...	154
Tabela 57 - Cálculo da Resistência a Característica a Compressão dos Blocos	157
Tabela 58 - Módulo de Elasticidade Longitudinal dos Blocos	157
Tabela 59 - Resultados - Bond Wrench	163
Tabela 60 - Resumo dos Resultados - Ensaio de Cisalhamento da Junta Horizontal	168
Tabela 61 - Cálculo do Módulo de Elasticidade Transversal para Paredes	174
Tabela 62 - Resistência à Compressão das Unidades, Argmassa e Graute	176
Tabela 63 - Resistência à Tração dos Blocos	177
Tabela 64 - Resistência à Tração - Argmassa	178
Tabela 65 - Resistência à Tração - Graute	178
Tabela 66 - Tensão de Cisalhamento e Rigidez da Interface(análise gráfica)	179
Tabela 67 - Cálculo do Valor de K_n e K_s	179
Tabela 68 - Resistência à tração na flexão da argmassa	179
Tabela 69 - Compressão Diagonal - Tensão de cisalhamento e Módulo de elasticidade transversal - Parede oca e grauteada	180

Tabela 70 - Comparação entre Resistência à Compressão Obtidos da Literatura com Resultado dos Ensaios – Escalas 1:1, 1:2 e 1:3	181
Tabela 71 - Comparação entre Resistência à Compressão Obtidos da Literatura com Resultado dos Ensaios – Escala 1:2	182
Tabela 72 - Comparação entre Resistência à Compressão Obtidos da Literatura com Resultado dos Ensaios – Escala 1:1	182
Tabela 73 - Comparação entre Módulo de Elasticidade Longitudinal dos Blocos Obtidos da Literatura com Resultado dos Ensaios – Escala 1:1	183
Tabela 74 – Comparação entre Resistência à Tração Obtidos da Literatura com Resultado dos Ensaios – Escala 1:1	184
Tabela 75 - Comparação entre Coeficiente de Atrito e Tensão de Cisalhamento Inicial Obtidos da Literatura com Resultado dos Ensaios – Escala 1:1.....	185
Tabela 76 – Parâmetros para Ajuste de Escala	186
Tabela 77 – Valores de coeficiente de rigidez considerando cada nível de tensão de pré-compressão.....	186
Tabela 78 - Comparativo entre os valores de coeficiente de rigidez ao cisalhamento e normal.....	187
Tabela 79 – Comparativo entre as resistências à flexão da argamassa ...	189
Tabela 80 – Comparativo entre as tensões de cisalhamento – Parede Oca	191
Tabela 81 – Comparativo entre as tensões de cisalhamento – Parede Grauteada.....	192
Tabela 82 - Modelo CDP - Parâmetros de Plasticidade	199
Tabela 83 - Base de Dados de Deformação Inelástica e Tensão de Compressão	200
Tabela 84 - Coordenadas para Localização do Bloco no Abaqus - o eixo do bloco será o ponto médio da largura e do comprimento	202
Tabela 85 - Comparativo da Tensão Máxima e respectiva Deformação e Módulo de Elasticidade.....	204
Tabela 86 – Comparativo – Tensão de ruptura e deformação última - Modelos Numéricos e Experimental	213
Tabela 87 - Propriedades Elásticas do Graute.....	217
Tabela 88 - Dados da Plasticidade do Concreto	217
Tabela 89 - Dados Comportamento a Compressão – Trecho Inelástico ...	217
Tabela 90 - Dados Comportamento a Tração - trecho Inelástico	218
Tabela 91 - Parâmetro de Dano a Compressão.....	218
Tabela 92 - Parâmetros de Dano a Tração	219
Tabela 93 - Comparação entre as melhores aproximações	224
Tabela 94 - Dados de Entrada para Fase Elástica.....	225
Tabela 95 - Parâmetros de Plasticidade do Bloco e Graute	225
Tabela 96 - Parâmetros de Plasticidade da Argamassa.....	225
Tabela 97 - Dimensões dos Blocos Inteiros de Concreto, Pasquantonio ..	226
Tabela 98 - Eficiência Prisma – Bloco.....	232
Tabela 99 - Comparativo de Tensões e Deformações - Modelos Numérico e Experimental	238
Tabela 100 - Dados de Entrada para Fase Elástica	239
Tabela 101 - Dados de Plasticidade do Bloco.....	239
Tabela 102 – Dados de Plasticidade da Argamassa	239
Tabela 103 - Dimensões dos Blocos Inteiros de Concreto, Pasquantonio .	240
Tabela 104 - Propriedades de Contato	247
Tabela 105 - Parâmetros de Rigidez	247

Tabela 106 - Informações para o Cálculo dos Parâmetros de Rigidez	248
Tabela 107 - Análise Comparativa do Pico	251
Tabela 108 - Propriedades de Interface - Comportamento Coesivo e Dano	251
Tabela 109 - Análise Comparativa	253
Tabela 110 - Análise Comparativa	256
Tabela 111 - Resumo dos Resultados Experimentais e Numéricos	258
Tabela 112 - Análise Comparativa entre os Parâmetros	259
Tabela 113 - Rigidez ao Cisalhamento	264
Tabela 114 - Comparativo dos resultados para cada nível de pré compressão.....	264
Tabela 115 - Comparativo dos resultados para cada nível de pré compressão.....	272
Tabela 116 - Comparativo dos resultados para cada nível de pré compressão.....	276
Tabela 117 - Comparativo dos resultados para cada nível de pré compressão.....	280
Tabela 118 - Resumo dos Dados referente ao comportamento elástico modelo de ensaio de cisalhamento da junta horizontal	282
Tabela 119 - Parâmetro K_s por meio da equação da Linha de Tendência	284
Tabela 120 - Compração entre os Modelos Numéricos e Experimental – $K_s=0,62\text{MPa/mm}$	291
Tabela 121 - Propriedades de Contato	291
Tabela 122 - Análise Comparativa dos Valores Experimentais e Modelos Numéricos Com e Sem Argamassa	298
Tabela 123 - Propriedades de Contato	300
Tabela 124 – Resultados da ruptura dos corpos de prova.....	301
Tabela 125 - Comparação entre os valores de força última, deslocamento último e módulo de elasticidade secante - Experimental e Numérico.....	306
Tabela 126 - Comparação entre os valores de forças últimas - Experimental, Numérico e Analítico	309
Tabela 127 - Comparação entre os valores de deslocamento último - Experimental, Numérico e Analítico	309
Tabela 128 - Comparação entre os valores de módulo de elasticidade secante - Experimental, Numérico e Analítico.....	310
Tabela 129 – Comparativo entre os força máxima e deslocamento último entre os modelos experimentais e os modelos numéricos.....	320
Tabela 130 – Dados de Saída	351

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Tensão vs Deformação - Tração Indireta.....	147
Gráfico 2 - Curva Tensão vs Deformação - Tração Indireta.....	150
Gráfico 3 – Força vs Deslocamento – Blocos de Concreto	156
Gráfico 4 - Curvas Tensão vs Deformação- Ensaio de Compressão - Argamassa - 28 dias.....	158
Gráfico 5 – Força vs Deslocamento - Graute	159
Gráfico 6 - Tensão de Cisalhamento x Deformação - Pré - Compressão de $0,2\text{MPa}$	166
Gráfico 7 - Tensão de Cisalhamento x Deformação - Pré - Compressão de $0,6\text{MPa}$	167

Gráfico 8 - Tensão de Cisalhamento x Deformação - Pré - Compressão de 1,0 MPa.....	167
Gráfico 9 - Tensão de Cisalhamento Média x Tensão de Pré Compressão	169
Gráfico 10 - Tensão vs Deformação - Oco	172
Gráfico 11 - Tensão vs Deformação - Grauteada.....	172
Gráfico 12 - Tensão de Cisalhamento vs Tensão de pré-compressão	179
Gráfico 13 - Curvas Força vs Deslocamento dos Blocos.....	197
Gráfico 14 - Curva Tensão vs Deslocamento BC5.....	197
Gráfico 15 - Trecho Elástico - Tensão Elástica 15MPa	198
Gráfico 16 - Trecho Elástico - Tensão Elástica 16MPa	198
Gráfico 17 - Trecho Elástico - Tensão Elástica 17,35MPa	199
Gráfico 18 - Curva Deformação Inelástica vs Parâmetro de Dano a Compressão	201
Gráfico 19 - Tensão x Deformação do Bloco - Comparativo entre Experimental e Numérico	204
Gráfico 20 - Tensão vs Deformação do Bloco - Comparativo entre Experimental e Numérico 2.....	205
Gráfico 21 - Tensão vs Deformação - Argamassa - Modelo Experimental	206
Gráfico 22 - Tensão vs Deformação - Argamassa - Modelo Numérico.....	207
Gráfico 23 - Comparativo - Tensão vs Deformação - Modelo experimental e numérico	207
Gráfico 24 - Tensão vs Deformação - Modelo Numérico e experimental - Processo de Validação.....	208
Gráfico 25 - Comparativo - Tensão vs Deformação - Argamassa - Considerando Enumérico = 2000MPa.....	209
Gráfico 26 - Comparativo - Tensão vs Deformação - Modelo Numérico e Experimental - Considerando Enumérico =1500MPa	210
Gráfico 27 - Comparativo - Tensão vs Deformação - Argamassa - Modelo Numérico e Experimental - Método Arc - Length - Considerando Enumérico =1053MPa	211
Gráfico 28 - Comparativo - Tensão vs Deformação - Modelo Numérico e Experimental.....	213
Gráfico 29 - Comparativo - Tensão vs Deformação - Modelo Numérico (Tentativa 8) e Experimental.....	214
Gráfico 30 - Força vs Deslocamento - Compressão - Graute	215
Gráfico 31 - Tensão vs Deformação - Tração - Graute	216
Gráfico 32 - Comparativo - Tensão vs Deformação - Modelo Numérico e Experimental	223
Gráfico 33 - Comparativo - Tensão vs Deformação - Modelo Numérico e Experimental.....	224
Gráfico 34 - Tensão vs Deformação - Prismas 2 Blocos sem Graute.....	231
Gráfico 35 - Tensão vs Deformação - Prismas de Dois Blocos sem Graute	233
Gráfico 36 - Tensão vs Deformação - Prismas de Três Blocos - Sem Graute	235
Gráfico 37 - Comparativo - Tensão vs Deformação - Prismas de Três Blocos Grauteados - Modelo Numérico e Experimental	237
Gráfico 38 - Comparação - Tensão de Cisalhamento vs Deformação - pré-compressão 0.2MPa.....	249
Gráfico 39 - Análise das Curvas Tensão x Deformação - Modelos Numéricos	249

Gráfico 40 – Comparação entre Tensão de Cisalhamento x Deformação – Modelos Numéricos e Experimental – pré-compressão 0.2MPa	250
Gráfico 41 - Comparação entre Tensão de Cisalhamento x Deformação – Modelos Numéricos e Experimental – pré-compressão 0.2MPa – $K_s=$ 1MPa/mm	251
Gráfico 42 - Comparação entre Tensão de Cisalhamento x Deformação – Modelos Numéricos e Experimental – pré-compressão 0.6MPa	253
Gráfico 43- Comparação entre Tensão de Cisalhamento x Deformação – Modelos Numéricos e Experimental – pré-compressão 1.0MPa	256
Gráfico 44 - tensão de Cisalhamento x tensão de pré-compressão - Experimental(Azul) e Numérico (Vermelho)	259
Gráfico 45 - Tensão de Cisalhamento x Deslizamento - Tensão de Pré Compressão 0.2 MPa	261
Gráfico 46 - Tensão de Cisalhamento vs Deslizamento - Tensão de Pré Compressão 0.6 MPa	262
Gráfico 47 - Tensão de Cisalhamento vs Deslizamento - Tensão de Pré Compressão 1.0 MPa	263
Gráfico 48 – Comparação – Curvas Experimentais e Curva Numérica – Tensão de Pré compressão 0.2MPa - $k_s=0.37\text{MPa/mm}$	265
Gráfico 49 - Comparação Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de pré-compressão de 0.6MPa - $k_s=0.33\text{MPa/mm}$	266
Gráfico 50 - Comparação Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de Pré compressão 1.0MPa - $k_s=0.57\text{MPa/mm}$	267
Gráfico 51 - Comparação Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de Pré compressão 0.2MPa - $K_s=0.37\text{MPa/mm}$	269
Gráfico 52 - Comparação Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de Pré compressão 0.6MPa - $k_s=0.37\text{MPa/mm}$	270
Gráfico 53- Comparação Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de Pré compressão 1.0 MPa - $k_s=0.37\text{MPa/mm}$	271
Gráfico 54 - Comparação – Curvas Experimentais e Curva Numérica – Tensão de Pré compressão 0.2MPa - $k_s=0.57\text{MPa/mm}$	273
Gráfico 55 - Comparação – Curvas Experimentais e Curva Numérica – Tensão de Pré compressão 0.6MPa - $k_s=0.57\text{MPa/mm}$	274
Gráfico 56 - Comparação – Curvas Experimentais e Curva Numérica – Tensão de Pré compressão 1.0MPa - $k_s=0.57\text{MPa/mm}$	275
Gráfico 57 - Comparação – Curvas Experimentais e Curva Numérica – Tensão de Pré compressão 0.2MPa - $k_s=1.0\text{MPa/mm}$	277
Gráfico 58 - Comparação – Curvas Experimentais e Curva Numérica – Tensão de Pré compressão 0.6MPa - $k_s=1.0\text{MPa/mm}$	278
Gráfico 59 - Comparação – Curvas Experimentais e Curva Numérica – Tensão de Pré compressão 1.0MPa - $k_s=1.0\text{MPa/mm}$	279
Gráfico 60 – Curva tensão de cisalhamento x deslizamento – $K_s=0.37\text{MPa/mm}$	280
Gráfico 61 - Curva tensão de cisalhamento x deslizamento – $K_s=0.57\text{MPa/mm}$	281
Gráfico 62 - Curva tensão de cisalhamento x deslizamento – $K_s=1.00$ MPa/mm	281
Gráfico 63 - Tensão de Cisalhamento x K_s – pré-compressão 0.2 MPa ...	283
Gráfico 64 - Tensão de Cisalhamento x K_s – pré-compressão 0.6 MPa ...	283
Gráfico 65 - Tensão de Cisalhamento x K_s – pré-compressão 1.0 MPa ...	284
Gráfico 66 – Comparação entre Modelo Numérico e Experimental – pré-compressão 0.2MPa – $K_s=0.62\text{MPa/mm}$	285

Gráfico 67 - Comparação entre Modelo Numérico e Experimental – pré-compressão 0.6MPa – $K_s=0.62\text{MPa/mm}$	286
Gráfico 68 - Comparação entre Modelo Numérico e Experimental – pré-compressão 1.0 MPa – $K_s=0.62\text{MPa/mm}$	287
Gráfico 69 - Tensão de Cisalhamento vs Deslizamento - Modelo com Argamassa.....	292
Gráfico 70 - Tensão de Cisalhamento vs Deslizamento - Modelo com Argamassa.....	293
Gráfico 71 - Comparação entre Tensão de Cisalhamento vs Deslizamento – pré-compressão 0.2MPa	293
Gráfico 72 - Comparação entre Tensão de Cisalhamento vs Deslizamento – pré-compressão 0.6MPa	293
Gráfico 73 - Comparação entre Tensão de Cisalhamento vs Deslizamento – pré-compressão 1.0MPa	294
Gráfico 74 - Compressão Diagonal Parede Oca - Força x Deslocamento..	301
Gráfico 75 – Comparação Experimental e Numérico - Força vs Deslocamento - $K_s=0.63\text{MPa/mm}$	302
Gráfico 76 - Comparação Experimental e Numérico - Força vs Deslocamento - $K_s=117\text{MPa/mm}$	304
Gráfico 77 - Análise K_s - Força vs Deslocamento	306
Gráfico 78 - Força Última x K_s	307
Gráfico 79 - Deslocamento Último x K_s	307
Gráfico 80 - Módulo de Elasticidade Secante x K_s	308
Gráfico 81 - Comparação Experimental e Numérico - Força vs Deslocamento - $K_s=70\text{MPa/mm}$	311
Gráfico 82 – Força vs Deslocamento – Modelo Numérico ($K_s=0.63\text{MPa/mm}$) e Modelos Experimentais	314
Gráfico 83 - Força vs Deslocamento – Modelo Numérico ($K_s=70\text{MPa/mm}$) e Modelos Experimentais.....	316

1 Introdução

A alvenaria é um sistema construtivo muito difundido ao redor mundo, com grandioso histórico de utilização na civilização. Porém, estudos aprofundados sobre seu uso estrutural, principalmente sobre detalhes específicos, são pouco encontrados quando se considera sua extensa aplicação. O desenvolvimento técnico-científico na área só é percebido a partir da metade do século XX. Boa parte desse desenvolvimento é restrita a aspectos abrangentes sobre a resistência à compressão de unidades, prismas e paredes.

Apesar de o Brasil ter um histórico recente de desenvolvimento de conhecimentos sobre o assunto, a maior parte dos estudos provém de outros países, o que às vezes dificulta a aplicação total e segura desse acervo em nosso país. Alguns processos como mão-de-obra e fabricação das unidades diferem de um local para outro e isso pode interferir no resultado final apresentado nos elementos de alvenaria, como paredes, por exemplo.

Muito se estudou a respeito da interação entre unidades da alvenaria. Temos como exemplo a pesquisa realizada por Barbosa (2005), que avaliou a retração da alvenaria em blocos de concreto, Santos (2014), que estudou a influência das propriedades elásticas da interface bloco-argamassa na rigidez das paredes, Izquierdo (2015), que estudou a interface bloco-graute em elementos de alvenaria estrutural, Barbosa (2000), Madia (2012), que estudaram a interação de paredes de alvenaria estrutural com vigas de concreto armado, Capuzzo Neto (2000), Maluf (2007), Lopes (2014), que estudaram o comportamento das paredes de alvenaria estrutural submetida a ações verticais e Silva (2014), que realizou um estudo analisando a distribuição das ações verticais entre parede de alvenaria estrutural utilizando modelos experimentais e numéricos.

Além de estudos a respeito da interação entre paredes bem como do seu comportamento a diferentes esforços, existem também pesquisas que abordaram os estudos de elementos estruturais como, por exemplo, vigas. Trabalhos foram desenvolvidos a fim de estudar o comportamento a flexão de vigas (Landini (2001) e Contadini (2014)) e também o comportamento ao cisalhamento de vigas (Landini (2001) e Pasquantonio (2015)) e Fortes

(2017) realizou extenso estudo sobre propriedades de alvenaria estrutural com blocos de concreto de alta resistência.

Com isso pode-se notar que há uma diversidade de pesquisas brasileiras recentes desenvolvidas a respeito de alvenaria estrutural, que têm por objetivo o aprimoramento nas especificações e teorias para dimensionamento atualmente existentes.

No entanto, observando o histórico de pesquisas a respeito desse sistema construtivo, nota-se uma lacuna sobre estudo detalhado a respeito da ligação entre alguns elementos estruturais, como por exemplo, a ligação entre viga e parede.

No entanto, com o aprofundamento do nível de detalhamento de modelos numéricos para simular o comportamento da alvenaria, existem ainda lacunas a serem respondidas. Em especial para o foco deste trabalho, destaca-se a dispersão de parâmetros adotados na modelagem de alvenaria estrutural com bloco de concreto, quando se considera o comportamento da interface e comportamento pós-pico.

Esta pesquisa visa estudar os parâmetros acima a partir de ensaios realizados em alvenaria de blocos de concreto em escala reduzida, da implementação de modelos refinados desses ensaios, da comparação com a literatura e da análise dos resultados.

1.1 Objetivos

Esse trabalho visa:

- Caracterização dos elementos de alvenaria estrutural de escala reduzida 1:2;
- Obter parâmetros para modelagem da interface de alvenaria estrutural de blocos de concreto em escala 1:2.

1.2 Justificativa

Edifícios altos em Alvenaria Estrutural são muito comuns na construção civil nacional. A solução para concepção desses edifícios não é trivial, sendo, quase que na totalidade das vezes, necessário conceber elementos de alvenaria associados em modelos de pórticos ou outros, para se conseguir um resultado viável. Em contrapartida, as recomendações de normas e as encontradas na literatura nacional são simplistas, não permitindo avaliar

com precisão, economia e segurança o comportamento dessas estruturas. Muitas dúvidas existem sobre nessa área.

Buscando a viabilizar o estudo mais detalhado do comportamento da alvenaria e por consequência uma melhoria no dimensionamento de edifícios altos e atrelando a isso redução de custos experimentais são as bases para motivação desse trabalho.

Os resultados aqui destacados podem servir de base para vários trabalhos futuros na linha acima descrita.

1.3 Estrutura da Tese

A tese foi dividida em onze capítulos da seguinte forma:

- Capítulo 1 apresenta-se um breve panorama sobre o tema de alvenaria estrutural, e também o objetivo da pesquisa, a justificativa e a estrutura da tese.
- No capítulo 2 foi realizado um extenso levantamento bibliográfico de 20 pesquisas sobre alvenaria estrutural envolvendo trabalhos experimentais e modelagem numérica;
- No capítulo 3 foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os tipos de ensaios que auxiliariam no estudo de interface entre bloco e argamassa;
- No capítulo 4 é descrito os tipos de modelagem numérica que é possível realizar considerando o software que foi utilizado nesta pesquisa, o Abaqus/2017;
- Já os capítulos 5 e 6 apresentam, respectivamente, o procedimento dos ensaios realizados e os resultados alcançados por meio desses testes;
- No capítulo 7 apresenta-se uma análise dos resultados obtidos nos ensaios a partir do levantamento de dados, para cada um dos ensaios, considerando resultados que a literatura oferece para cada informação obtida;
- No capítulo 8 foi realizado o processo de validação dos ensaios, bem como a obtenção de parâmetros para representação da interface bloco e argamassa;
- No capítulo 9 são apresentadas as considerações finais e no capítulo 10 são listadas as referências bibliográficas utilizadas nesse trabalho;

- Por fim, o anexo apresenta uma tradução de partes do manual do Abaqus para a melhor compreensão sobre o comportamento, representação e criação de interface no software.

2 Propriedades da Alvenaria Estrutural

Neste capítulo apresenta-se uma diversidade de trabalhos que vão desde ao estudo sobre o comportamento de paredes de contraventamento até um estudo de modelagem numérica baseados em elementos finitos. Antes de apresentar um resumo desses trabalho é apresentado a seguir a divisão dos assuntos que serão abordados neste tópico:

- a) **Pesquisas estritamente sobre ensaios experimentais** - a partir desses trabalhos foi levantado o comportamento da alvenaria, bem como, quais ensaios seriam relevantes para caracterização do material;
 - a. Priestley e Hon (1985);
 - b. Leiva e Klingner (1994);
 - c. Elshafie et al (2002);
 - d. Moon et al (2003);
 - e. Almeida et al (2016).
- b) **Pesquisas estritamente sobre modelos numéricos em alvenaria estrutural** - a partir do levantamento de pesquisas que abordam esse tema se buscou uma melhor compreensão qual a melhor maneira para se criar os modelos e também detectar quais lacunas que esses trabalho não contemplaram para que, assim, e buscar com o estudo desenvolvido preencher algumas dessas lacunas;
 - a. Moradabadi et al (2015);
 - b. Bedeir et al (2019).
- c) **Pesquisas sobre a utilização de blocos em alvenaria de Escala Reduzida** - com base nesse levantamento bibliográfico se buscou localizar a alvenaria estrutural de escala reduzida no âmbito da pesquisa e a partir daí avançar nos conhecimentos a respeito desse assunto e por consequência avançar nessa área que tem muito a agregar nas pesquisas como será apresentado mais adiante;
 - a. Long et al (2005);
 - b. Hughes (2010);
 - c. Wierzbicki (2010);

- d. Mohammed et al (2011);
- e. Kaaki (2013);
- f. Basha e Kaushik (2016);
- g. Knox et al (2017);
- h. Alotaibi e Galal (2018);
- i. Bedeir et al (2019).

d) **Pesquisas que apresentam estudos experimentais com modelagem numérica** – objetivo do levantamento de trabalho que apresentam essa abordagem é compreender como é realizada e quais parâmetros são considerado para validação de modelos numéricos, bem como, descobrir quais parâmetros são extraídos dos ensaios experimentais e quais são utilizados para calibração/validação dos modelos numéricos.

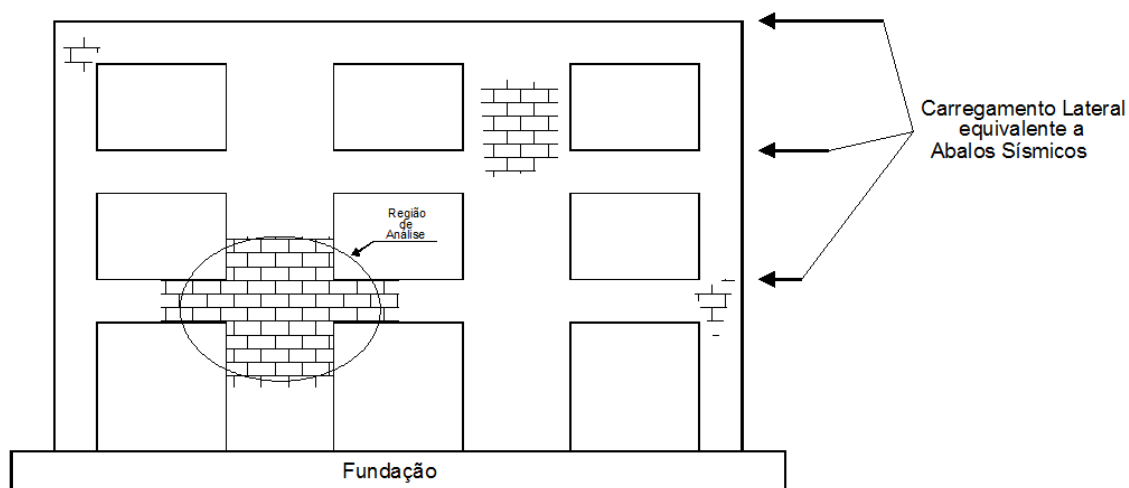
- a. Lourenço et al (2005);
- b. Barbosa (2008);
- c. Bolhassani et al (2015);
- d. Baraldi e Cecchi (2017);
- e. Bedeir et al (2019).

Vale destacar o levantamento bibliográfico apresentado neste capítulo estará em ordem cronológica do mais antigo até o mais recente.

2.1 Priestley e Hon (1985)

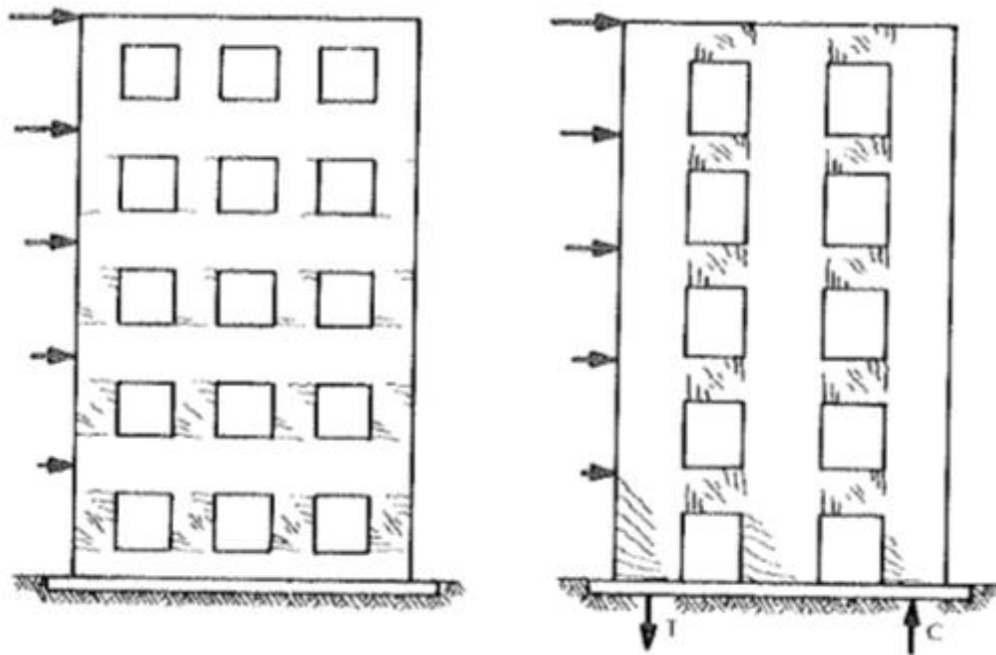
Os autores Priestley e Hon estudaram paredes de contraventamento quando submetido a ações horizontais equivalentes a movimentos sísmicos. De maneira mais pontual, os autores estudaram a região entre aberturas nas paredes de contraventamento, conforme a figura 1. O objetivo de se estudar essa região especificadamente, segundo os autores, se deve ao fato de que a maior parte das fissuras encontrada em paredes de contraventamento é localizada entre as aberturas (portas e janelas), como ilustra a figura 2. Devido a isso, se estudou uma alternativa que garantisse a ductilidade dessa região, ou seja, o grau de resistência a esforços de momento dessas regiões.

Figura 1 - Região de Análise sob Carregamento Lateral



Fonte: Priestley e Hon (1985) - Adaptada

Figura 2 - Comportamento das Paredes de contraventamento



Fonte: Priestley e Hon (1985)

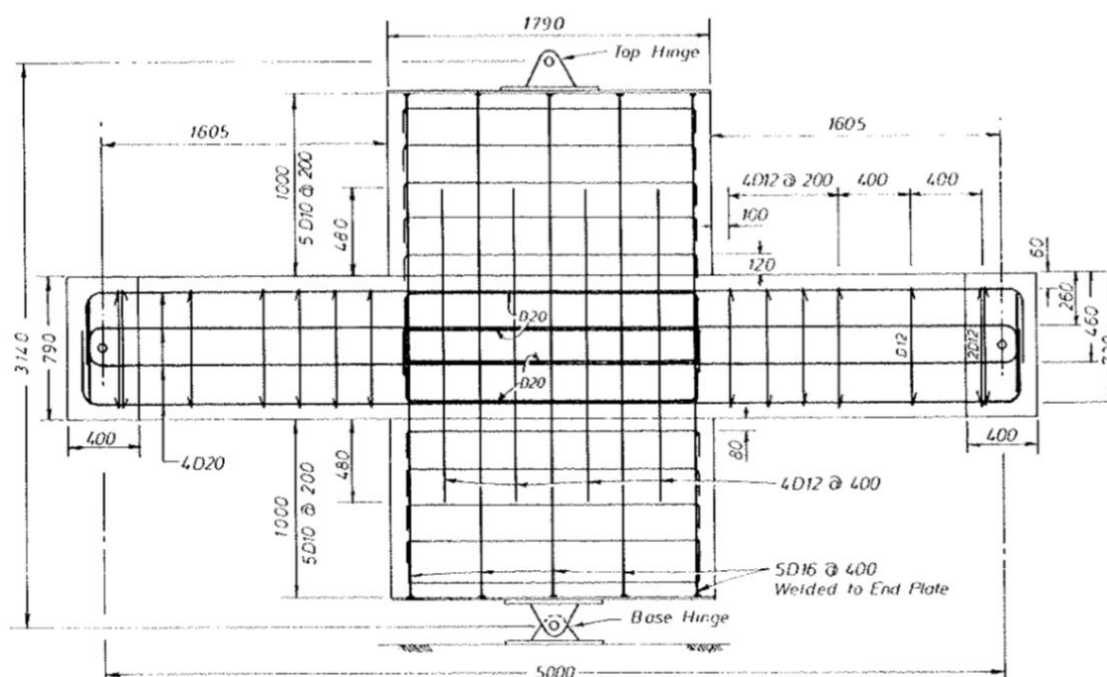
Para elaboração do modelo para análise, os autores consideraram a formação de rótulas plásticas e dentre os modelos de formação de rótulas adotaram o tipo viga fraca-pilar rígido. Além disso, foram apresentados alguns critérios para o dimensionamento dos elementos que compõe a região de análise.

Com base nisso e considerando a ser realizado em ligação viga-pilar/parede, vale destacar as duas hipóteses que os autores consideraram para o cálculo da articulação da região entre vigas e colunas:

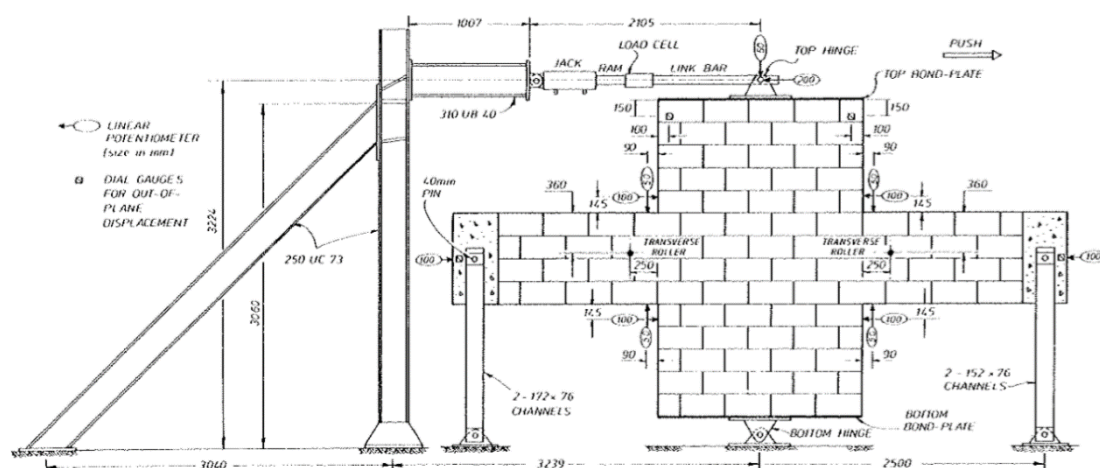
- a) a largura da articulação (paralela ao eixo da viga) precisa ser suficiente para permitir a troca necessária entre o esforço da armadura da viga através da articulação desenvolvida pela ligação;
- b) as dimensões e a armadura da articulação precisam ser adequadas para transferir as forças cortantes desenvolvida na articulação.

Após o levantamento das considerações e hipóteses levantadas pelos autores, foi construído um corpo-de-prova cujas dimensões eram escala real. Além disso, o ensaio foi realizado com carregamento cíclico, afim de simular o uma situação de terremoto. A figura 3 mostra as dimensões do corpo de prova, bem como o detalhamento da armadura utilizada. Enquanto a figura 3 apresenta o desenho esquemático de como será o ensaio, bem como a instrumentação utilizada. Não obstante, o carregamento teórico último esperado para esse corpo-de-prova era de 121KN.

Figura 3 - Dimensões e Detalhamento da Armadura



Fonte: Priestley e Hon (1985)

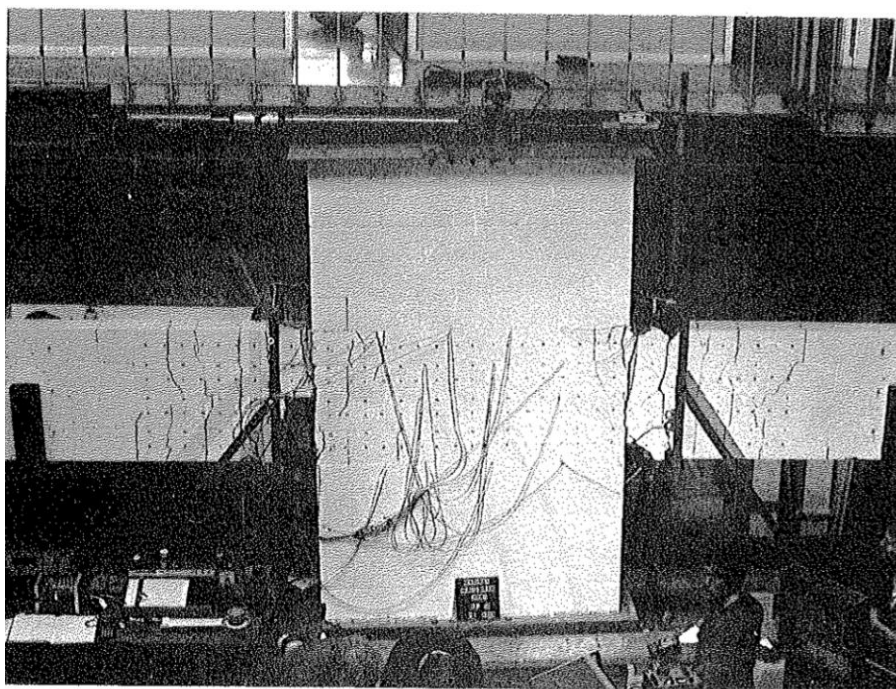
Figura 4 - Instrumentação do Corpo-de-Prova

Fonte: Priestley e Hon (1985)

A figura 4 ilustra o esquema dos ensaios realizados. A rótula inferior foi conectada a uma superfície rígida no solo enquanto que a rótula superior serviu para aplicação do carregamento. O carregamento foi aplicado dentro de uma série de ciclos de deslocamentos com um aumento gradual dos deslocamentos considerando níveis de ductilidade. Para se iniciar o ensaio se considerou um ciclo elástico em que se aplicou um carregamento referente a 69% do carregamento teórico último.

Após a instrumentação dos corpos-de-prova foi observado pelos autores que durante o primeiro ciclo do ensaio, que consistia em um carregamento de 69% do carregamento último, ocorreu o surgimento de fissuras simétricas nas vigas e onde essas fissuras se iniciaram na parte superior da articulação, no entanto nessa fase de carregamento não se observou fissuras nos pilares. No último ciclo aplicado de carregamento foi observado que ocorreu uma degradação da região de compressão que ocorreu no final do último ciclo. Devido a essa ruína na região de compressão, ocorreu a exposição da armadura das vigas e nos pilares ocorreram fissuras muito pequenas na região da articulação. A figura 5 mostra a ligação após o último ciclo.

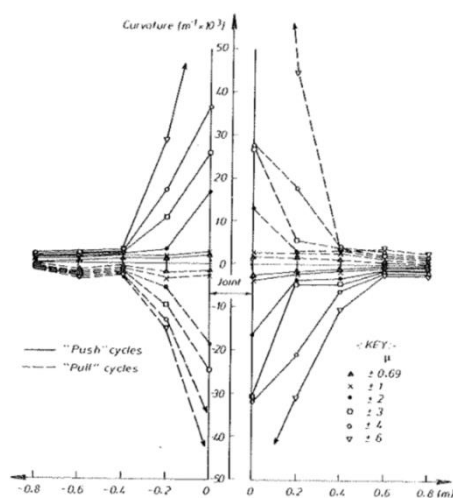
Figura 5 - Ligação após o ultimo ciclo de carregamento



Fonte: Priestley e Hon (1985)

Outro ponto analisado pelos autores foi a distribuição de curvaturas das vigas. A curvatura das vigas foi calculada considerando a deformação encontrada na face superior das vigas. Além disso, essa distribuição das curvaturas depende dos níveis de ductilidade adotado. A figura 6 apresenta um gráfico em que ilustra as diferentes distribuições de curvatura por deslocamento para diferentes níveis de ductilidade.

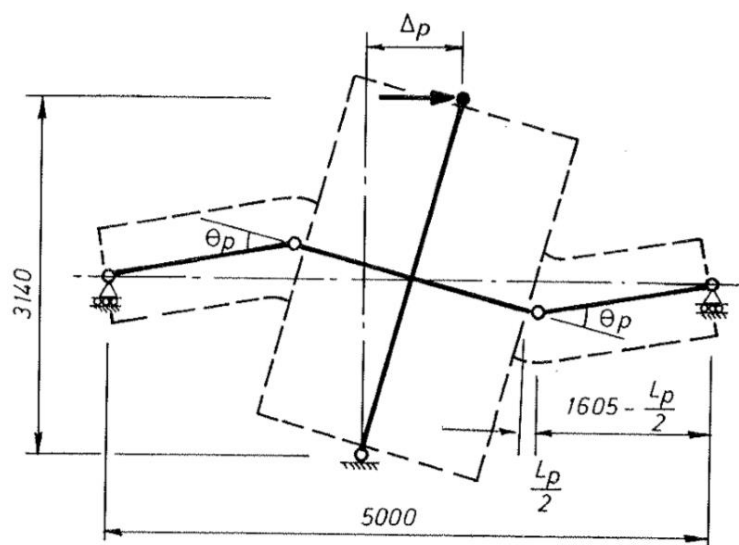
Figura 6 - Distribuição da Curvatura das Vigas



Fonte: Priestley e Hon (1985)

Considerando a deformação plástica dos ensaios, os autores observaram a formação de rótulas plásticas na viga como ilustra a figura 7.

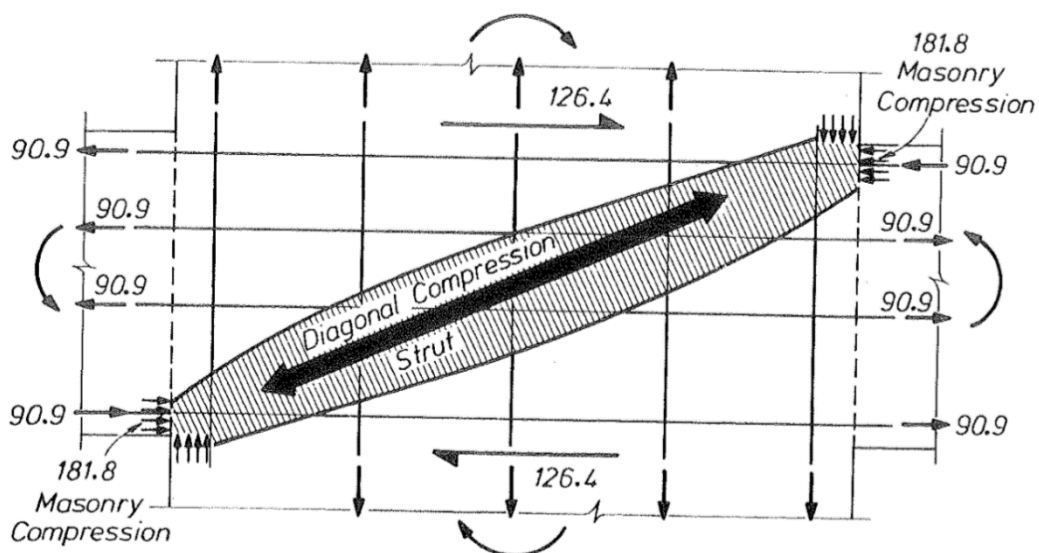
Figura 7 - Rótulas Plásticas nas Vigas



Fonte: Priestley e Hon (1985)

Quanto ao comportamento da ligação, os autores observaram a formação de uma diagonal de compressão de alvenaria que ocasionou a transferência de força cortante. A figura 8 ilustra o comportamento da ligação.

Figura 8 - Diagonal de Compressão



Onde:

Masonry Compression – Alvenaria comprimida;

Diagonal Compression – Biela

Strut - Tirante

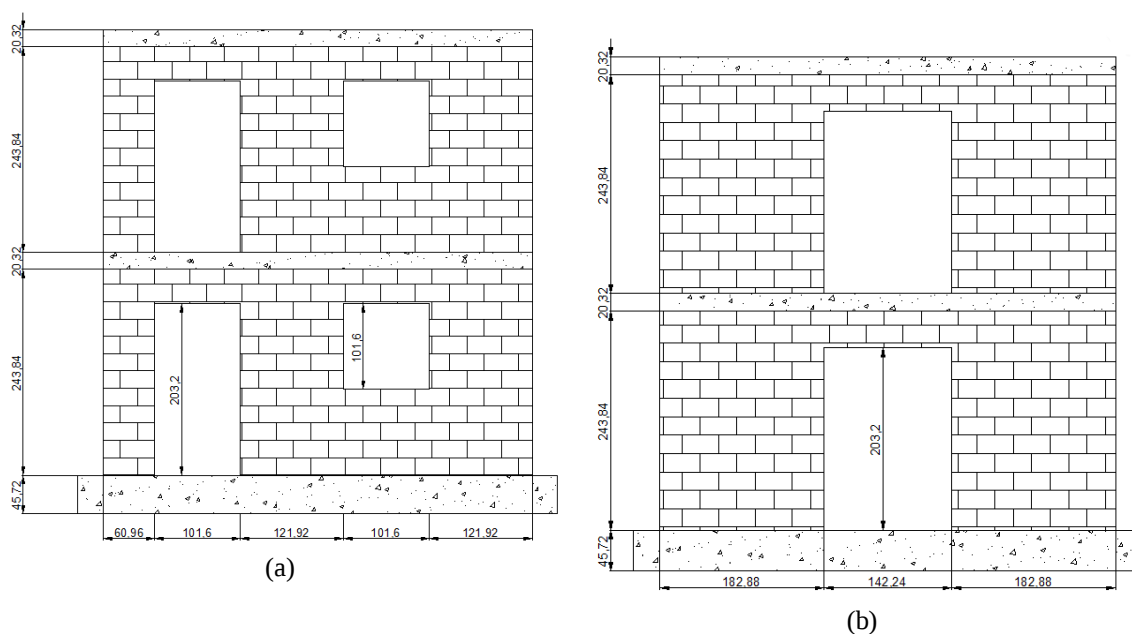
Fonte: Priestley e Hon (1985)

A conclusão dos autores sobre a análise do comportamento da ligação foi que a ductilidade foi maior que o limite teórico de deformação última a compressão que era de 0,25%. A leitura das deformações da armadura horizontal da articulação indicou que a força cortante foi transmitida na ligação pela formação de bielas.

2.2 Leiva e Klingner (1994)

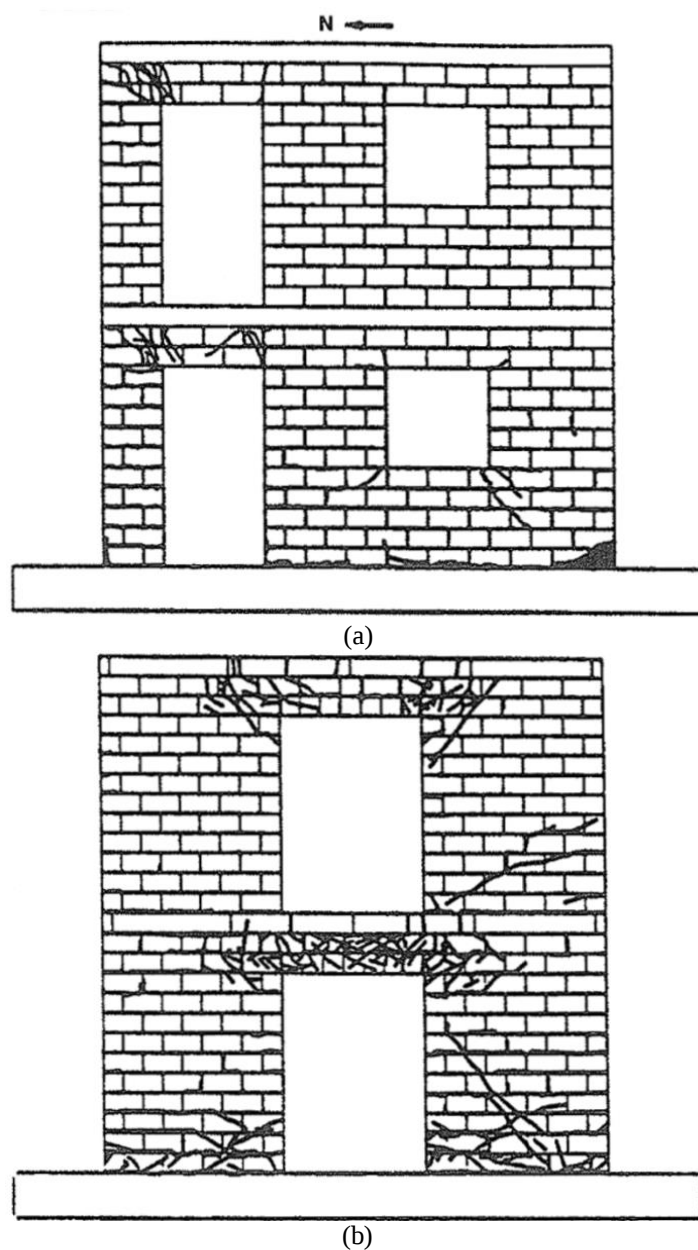
Nesse artigo, os autores Leiva e Klingner buscaram estudar a resistência a ações sísmicas de uma parede de dois pavimentos com aberturas. A parede foi construída utilizando alvenaria armada de blocos de concreto. A figura 9 apresenta os tipos de paredes a serem ensaiadas enquanto que a figura 10 ilustra o detalhamento da armadura utilizado para cada tipo de parede.

Figura 9 - Paredes para Ensaio



Fonte: Leiva Klingner (1994) – Adaptada

Figura 11 - Padrão de Fissuras para o Tipo 1 e Tipo 2



Fonte: Leiva e Klingner (1994)

Com base no resultados dos ensaios os autores propuseram que as paredes de alvenaria armada quando submetidas a carregamento sísmicos, terá um comportamento a favor da segurança quando considerar o acoplamento das paredes.

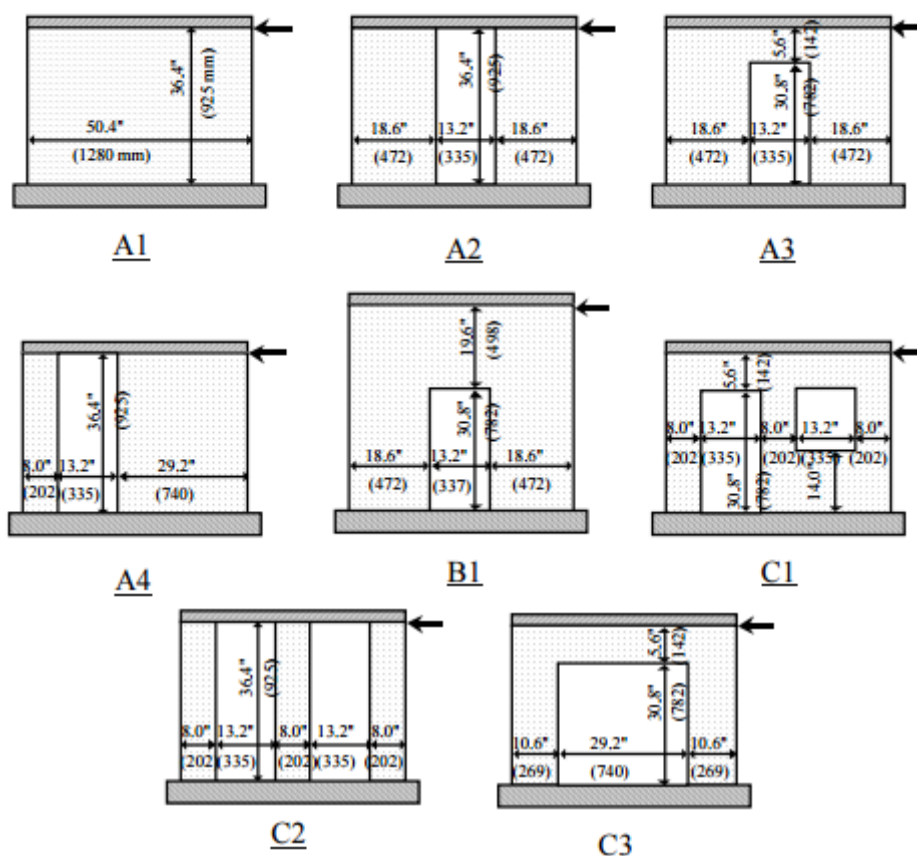
2.3 Elshafie et al (2002)

Nesse artigo, os autores analisaram paredes térreas com aberturas de diferentes tamanhos e posições. Apesar de paredes térreas não terem a

mesma complexidade da de múltiplos pavimentos, as vantagens de utilizar esse tipo de parede foi facilitar a interpretação dos resultados.

As paredes ensaiadas sob carga lateral no plano (Figura 12) foram projetadas para se comportar de um modo dúctil e o modo de falha por formação de rótulas plásticas nas extremidades do membro.

Figura 12 - Corpos de Prova



Fonte: Elshafie et al (2002)

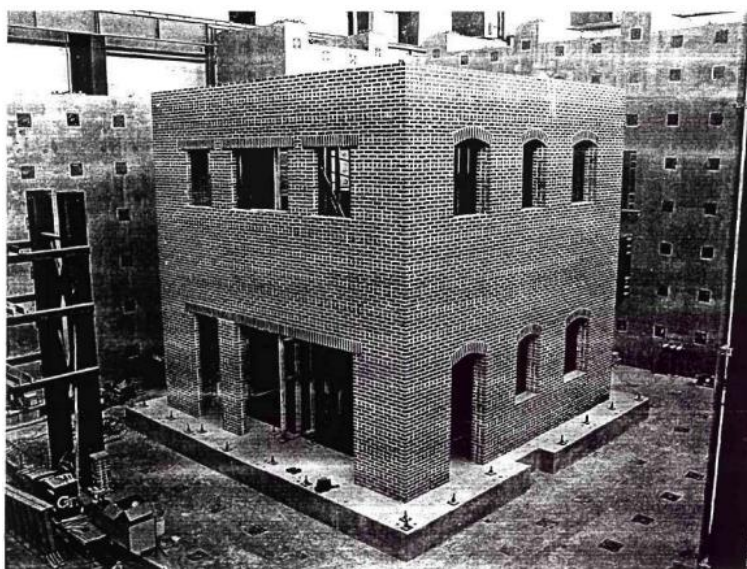
As conclusões que os autores chegaram foram as seguintes:

- O modelo de plástico da articulação fornece uma ferramenta analítica simples e precisa para prever mecanismo de falha, capacidade de carga lateral, e as forças internas na fase final para paredes de cisalhamento dominado por flexão com aberturas;
- As diferentes aberturas de paredes fizeram com que houvesse uma redução proporcional da rigidez;
- Com base nos resultados deste estudo, foi proposto um modelo simples para prever a rigidez de pós-fissura das paredes com aberturas.

2.4 Moon et al (2003)

Como parte de um projeto desenvolvido por Mid-America Earthquake Center, os autores desenvolveram uma pesquisa que continha uma construção em escala real (figura 13) de um edifício de dois andares que foram ensaiados em Georgia Tech.

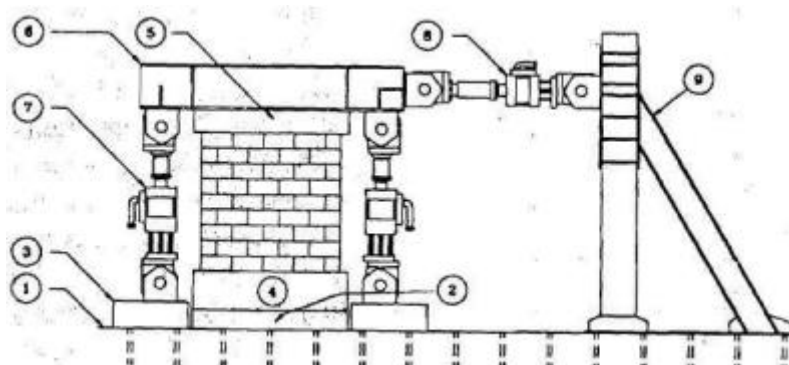
Figura 13 - Edifício Ensaiado - Escala Real



Fonte: Moon et al(2003)

O objetivo do autor era a verificação de um modelo analítico atual bem como desenvolver através de testes dos componentes (testes como distribuição de força cortante, efeito da torção, entre outros) proposto pelo Mid-America Earthquake Center. Além disso, a pesquisa tinha como objetivo avaliar a eficácia de técnicas que se utilizam de armaduras com fibras poliméricas (FRP) e pré-tensão.

O ensaio foi realizado aplicando uma força lateral cíclica (figura 14) que foi embasada pelos resultados de um projeto realizado paralelamente que tinha objetivo de realizar um teste dinâmico de uma estrutura similar, porém em escala reduzida de 1:2.

Figura 14 - Esquema do Carregamento Aplicado

Fonte: Moon et al(2003)

Uma série de ensaios foi realizada sobre uma estrutura prévia para validar os modelos analíticos e obter características do desempenho como, por exemplo, rigidez inicial, alteração da rigidez e progressão dos danos.

Após esses ensaios, houve outra sequência de ensaios que foi destinada a determinação do efeito de uma série de técnicas de reabilitação sobre o desempenho global do edifício e acabou levando a um teste final da estrutura totalmente reabilitada.

Análise elástica de estruturas não armadas pode fornecer algumas sugestões sobre a importância dos efeitos tridimensionais, tais como efeitos de flange e comportamento de torção, bem como alguns caracteres estruturais básicos, tais como frequências naturais elásticas e modos de vibração.

No entanto, se alcançou pouca informação sobre o comportamento sísmico de estruturas não armada, uma vez que este comportamento é dominado por não linearidade.

2.5 Long et al (2005)

Nessa pesquisa, os autores realizaram um estudo preliminar sobre blocos de concreto de escala 1:2 comparando com blocos de escala 1:1. Para esse estudo foram realizados ensaios de caracterização dos blocos de escala reduzida, como por exemplo, dimensionamento, densidade, absorção, resistência a compressão considerando a área líquida, ensaio de tração indireta, além de ensaio de compressão em prismas grauteadas e também teste de compressão diagonal.

Vale destacar que a rigor a relação entre as larguras entre os dois blocos, que de acordo com os autores é com base nessa dimensão que é

calculada a escala do bloco, é de 0,474, ou seja, a largura do bloco de escala 1:2 é 47,4% da largura do bloco de escala 1:1.

A tabela 1, a seguir, apresenta os valores médios de algumas das propriedades que foram ensaiadas e a figura 15 apresenta os modos de falha das unidades de acordo com a escala.

Tabela 1 – Blocos de Concreto – Propriedade dos Materiais

Propriedades	Escala 1:2		Escala 1:1	
	Média	CV(%)	Média	CV(%)
Densidade (kg/m ³)	2277	1,5	2166	0,2
Absorção (kg/m ³)	115,8	4,4	139,8	1,1
Resistencia à Compressão - Área Líquida (MPa)	29,2	5,4	24,4	11,4
Resistencia à Tração (MPa)	2,35	30,1	2,48	3,9

Fonte: Long et al (2005) - Adaptada

Figura 15 – Ruptura dos Blocos – Escala 1:2(a) e Escala 1:1(b)



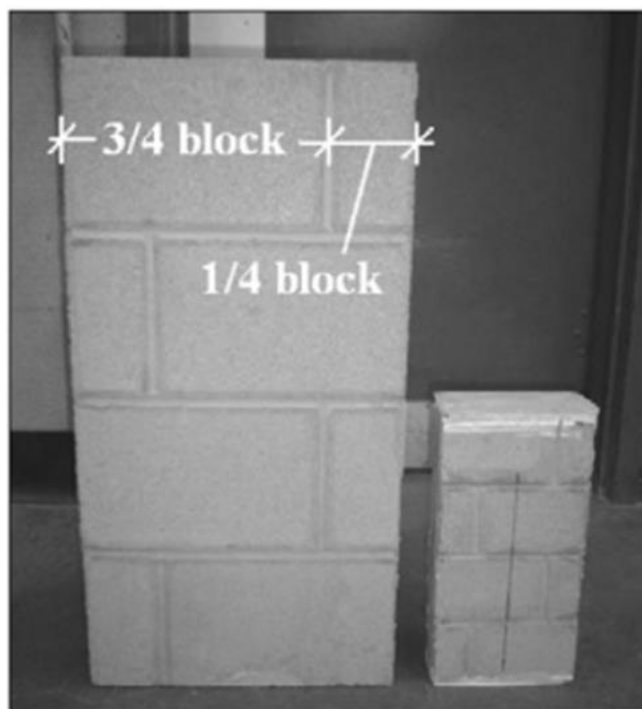
(a)



(b)

Fonte: Long et al (2005) - Adaptada

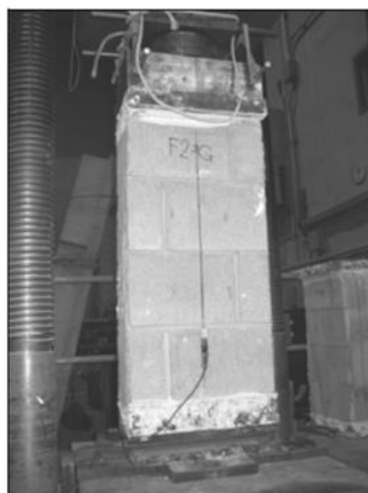
Após a caracterização das unidades, foram construídos prismas de 4 blocos, conforme figura 16, bem como as paredinhas que seriam utilizadas para o ensaio de compressão diagonal. A figura 17.a apresenta os prismas e a figura 17.b apresenta os prismas devidamente instrumentados para o ensaio.

Figura 16 – Prismas com Blocos de 3/4

Fonte: Long et al (2005) - Adaptada

Figura 17 – Instrumentação dos Prismas – Escala 1:2(a) e Escala 1:1(b)

(a)



(b)

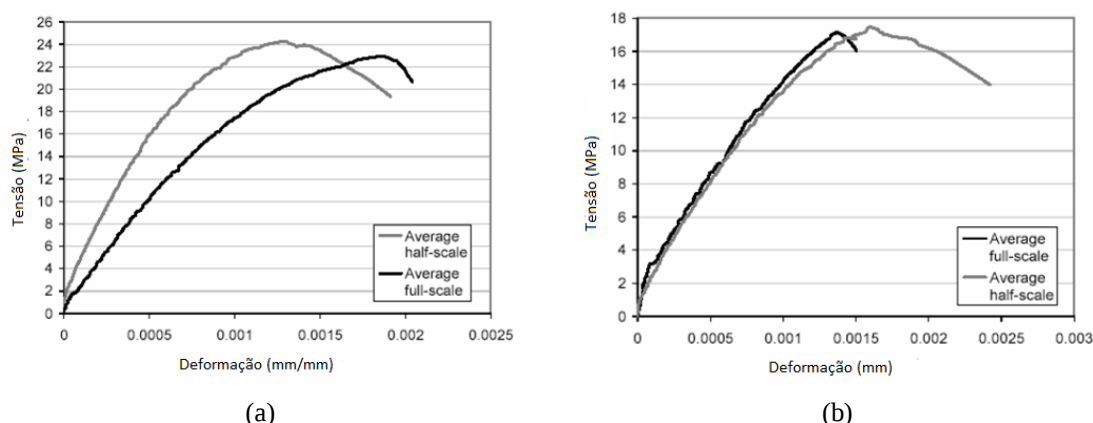
Fonte: Long et al (2005) - Adaptada

Os resultados obtidos a partir de compressão axial são apresentados na tabela 2. As áreas utilizadas para o cálculo da resistência a compressão dos prismas ocos foram considerado área efetiva da argamassa e para prismas grauteados foi considerado área total do bloco. Além disso, os autores apresentaram curva de tensão vs deformação dos prismas oco e grauteada de ambas as escalas que são apresentados na figura 18.

Tabela 2 - Resistência à Compressão – Prisma

Amostra	Oco				Grauteado			
	Escala 1:2		Escala 1:1		Escala 1:0		Escala 1:1	
	P(kN)	f_{pk} (MPa)	P(kN)	f_{pk} (MPa)	P(kN)	f_{pk} (MPa)	P(kN)	f_{pk} (MPa)
1	140,2	23,4	728	24,4	262,3	15,4	1259,7	16,7
2	137	22,9	635	21,3	292,3	17,2	1136,8	15,1
3	158,1	26,4	693,8	23,2	334,8	19,7	1471,2	19,6
Média	145,1	24,2	685,6	23	296,5	17,4	1289,2	17,1
CV (%)	7,8		6,9		12,3		13,1	

Fonte: Long et al (2005) - Adaptada

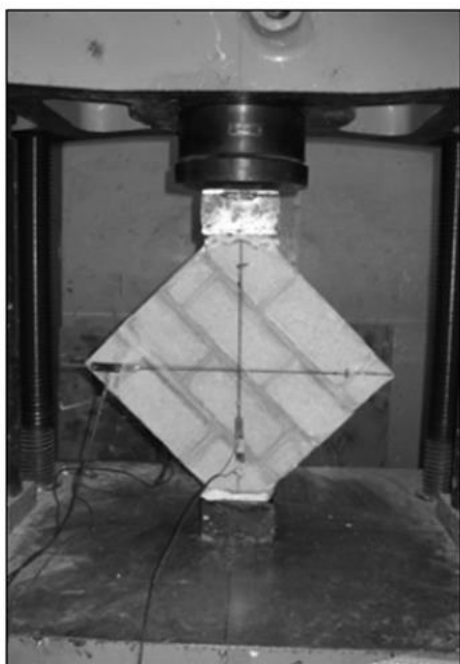
Figura 18 - Tensão x Deformação - Prismas - Oco (a) e Grauteado (b)

Fonte: Long et al (2005) - Adaptada

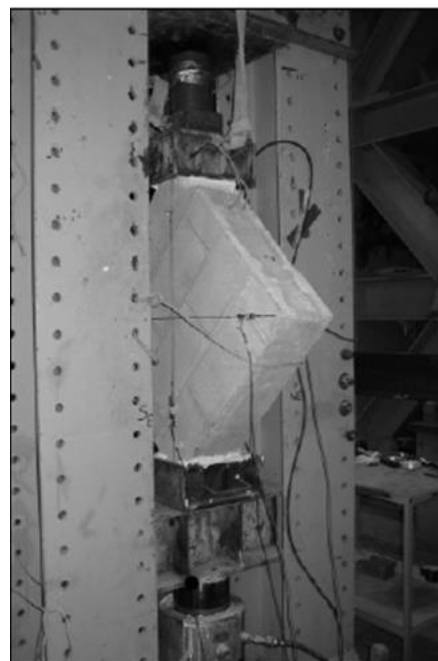
É possível notar, com base na figura 18.a, que a curva média do prisma oco referente a escala 1:2 apresenta um comportamento mais rígido em relação ao prisma oco referente a escala 1:1. No entanto, ao analisar o comportamento dos prismas grauteados, figura 18.b, o comportamento das curvas foram muito semelhantes antes de alcançar a tensão máxima e a diferença entre as curvas se observa logo após a tensão de pico.

Quanto ao ensaio de compressão diagonal, os autores construíram corpos de prova de acordo com a figura 19 (as paredinhas, assim como nos ensaios de compressão dos prismas, foram construídos paredinhas ocas e grauteadas). E os resultados desses ensaios são apresentados na tabela 3 e a figura 20 apresenta a análise dos prismas, os autores apresentam em seu trabalho gráficos de tensão vs deformação dos corpos de prova oco e grauteado.

Figura 19 – Instrumentação das Paredes – Compressão Diagonal – Escala 1:2(a) e Escala 1:1(b)



(a)



(b)

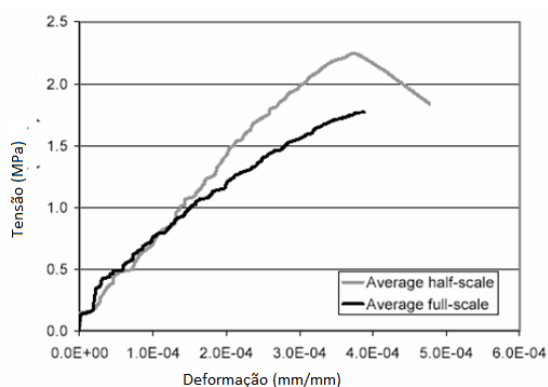
Fonte: Long et al (2005) - Adaptada

Tabela 3 – Resistência à Compressão Diagonal

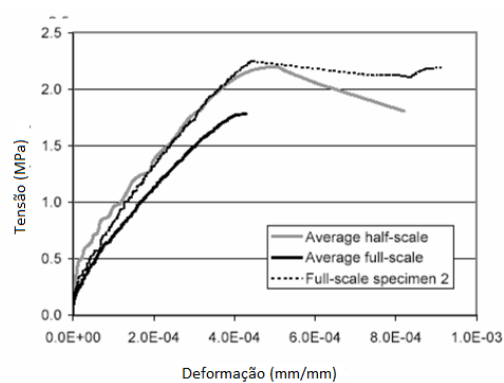
Amostra	Oco				Grauteado			
	Escala 1:2		Escala 1:1		Escala 1:2		Escala 1:1	
	P(kN)	f'd (MPa)	P(kN)	f'd (MPa)	P(kN)	f'd (MPa)	P(kN)	f'd (MPa)
1	49,6	2,04	205,2	1,75	105,3	2,21	309,2	1,45
2	51,4	2,12	187,4	1,6	107,5	2,26	479,4	2,25
3	62,4	2,57	229,5	1,96	101,5	2,13	349,9	1,64
Média	54,4	2,24	207,4	1,77	104,8	2,2	379,5	1,78
CV (%)	12,7		10,2		2,9		23,4	

Fonte: Long et al (2005) - Adaptada

Figura 20 - Tensão vs Deformação – Compressão Diagonal - Oco (a) e Grauteado (b)



(a)



(b)

Fonte: Long et al (2005) - Adaptada

Assim como nos prismas, as curvas de comportamento são semelhantes si, ou seja, ao analisar as curvas de paredes ocas nota-se uma rigidez maior na escala 1:2 do que na escala 1:1. Já para o comportamento das curvas grauteadas nota-se uma semelhança significativa entre as escalas 1:2 e 1:1. Além disso, para destacar essa semelhança, os autores plotaram a curva de tensão vs deformação de um corpo de prova na escala 1:1 muito semelhante à curva média de escala 1:2.

Algumas das contribuições desse trabalho são:

- 1) A partir dos resultados, conclui-se que a unidade de alvenaria de concreto de escala 1:2 apresentado é um bom modelo da unidade de escala 1:1;
- 2) Tanto a resistência e curva tensão vs deformação apresentam boa aproximação, particularmente as amostras grauteadas;
- 3) Esses resultados, segundo os autores, apoiam viabilidade a modelagem de alvenaria, como por exemplo, modelos de parede sujeitas a carga no plano, utilizando unidades de escala 1:2 como modelo direto.

2.6 Mohammed et al (2011)

Nesse artigo os autores realizam um estudo analisando o grau de influência de três escalas (1:2, 1:4 e 1:6) em relação a escala real no comportamento a compressão de alvenaria de blocos cerâmicos. Os parâmetros considerados para estudo das escalas foram as seguintes:

- a) Resistência à compressão;
- b) Módulo de elasticidade longitudinal;

Os resultados referentes a resistência a compressão e módulo de elasticidade médio dos blocos cerâmicos são apresentados na tabela 4 juntamente com os respectivos coeficientes de variação.

Tabela 4 – Propriedades Mecânicas – Blocos Cerâmicos

Tipo de de Ensaio	Escala 1:1	Escala 1:2	Escala 1:4	Escala 1:6
Resistência à Compressão (MPa)	29,2	30,6	41,9	47,4
CV (%)	14,3	8,4	9,7	32,7
Módulo de Elasticidade (MPa)	11500	-	-	-
CV (%)	31	-	-	-
Coefficiente de Poisson	0,06	-	-	-
CV (%)	48,1	-	-	-

Fonte: Mohamed et al (2011) - Adaptada

A figura 21 apresenta um exemplo de prisma que será estudado em cada escala. Além disso, para cada escala foram construídos 4 corpos de prova.

Figura 21 – Corpos de Provas

Fonte: Mohamed et al (2011)

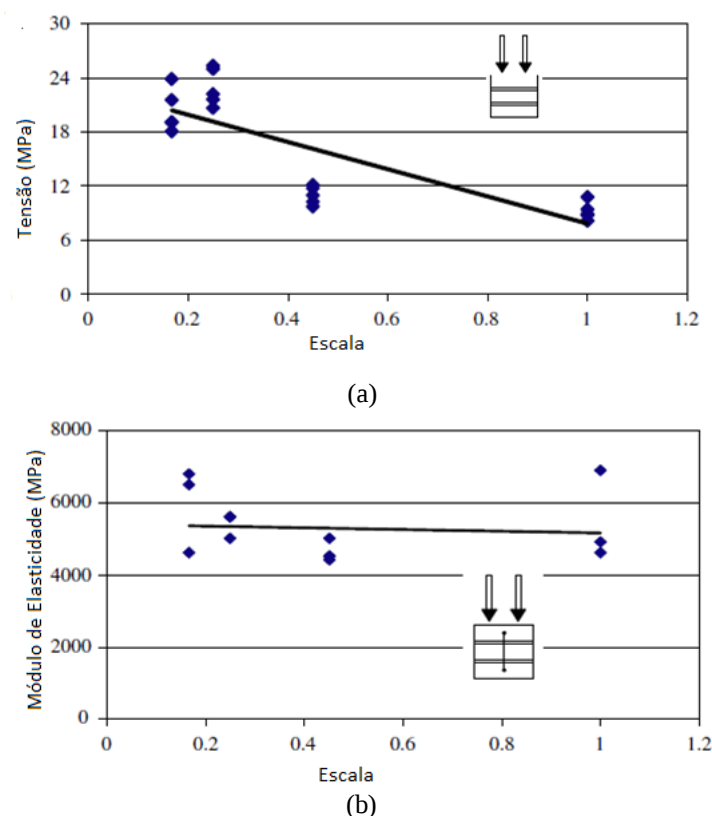
Para os prismas de três blocos foram consideradas mesmas propriedades mecânicas para análise das escalas. Entretanto, nesta fase os autores incorporaram a análise gráficos que representam a influência da escala tanto na resistência a compressão bem como ao módulo de elasticidade dos prismas, conforme tabela 5.

Tabela 5 – Resistência à Compressão de Prsimas de Três Blocos

Escala	Tipo de Argamassa	Espessura da Junta (mm)	Resistência à Compressão (MPa)	CV(%)	Módulo de Elasticidade (MPa)	CV(%)	Resistência Argamassa - Cubo (MPa)
1:1	MP-iii	10	9,2	10,8	5500	22,6	4,6
1:2	M95-iii	5	11	9,1	5200	26,9	4,9
1:4	"	2,5	23	9,1	5400	6,6	4,7
1:6	"	1,6	20,3	11,6	6000	20,1	4,7

Fonte: Mohamed et al (2011) - Adaptada

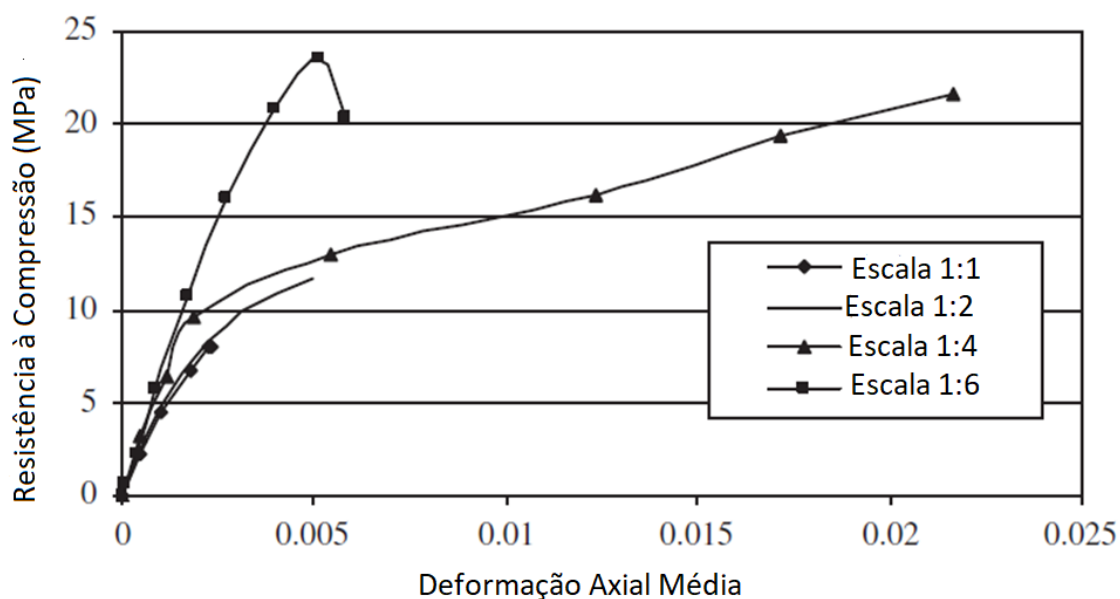
Figura 22 – Relação entre tensão (a), módulo de elasticidade (b) com a escala dos corpos de prova



Fonte: Mohamed et al (2011) - Adaptada

Com base nos gráficos das figuras 22.a e 22.b é possível notar que a influência da escala é maior quando é analisado a resistência a compressão dos prismas, uma vez que há um aumento da resistência ao se diminuir a escala do corpo de prova. Entretanto, quando se analisa o módulo de elasticidade em relação a escala é possível notar que não há grande influência da escala nesse parâmetro, uma vez que os valores apresentaram uma boa aproximação entre eles independente da escala.

Porém o autor destaca que apesar da proximidade dos valores o comportamento da curva tensão vs deformação dos prismas de cada escala é bem distinto, conforme figura 23.

Figura 23 - Tensão vs Deformação – Prismas de três blocos

Fonte: Mohamed et al (2011) - Adaptada

É possível observar a partir da figura 23, que o comportamento da curva do prisma de escala natural e escala 1:2 é semelhante, no entanto o prisma de escala 1:4 apresenta uma deformação muito maior em relação aos demais prismas enquanto que o prisma de escala 1:6 apresenta um comportamento muito rígido em comparação com o de escala natural.

As principais considerações em relação a esse artigo são:

- 4) Os resultados dos testes em diferentes escalas que a resistência a compressão do prisma é maior na escala 1:1 do que nas escalas 1:4 e 1:6, porém não do que na escala 1:2. Além disso o mesmo fato ocorreu quando foi analisado as unidades e com isso evidencia a influência da resistência das unidades na resistência dos prismas;
- 5) Quanto ao módulo de elasticidade dos prismas, foi encontrado para as quatro escalas valores muito próximos e sendo assim não se observou a influência da escala nesse parâmetro.

2.7 Lourenço et al (2005)

O trabalho desenvolvido por Lourenço et al (2005) tinha como objetivo estudar paredes de pedra com junta seca e carregamento no plano combinado. A razão de se estudar esse assunto é que devido a importância histórica das construções de junta seca ou menos argamassa na alvenaria

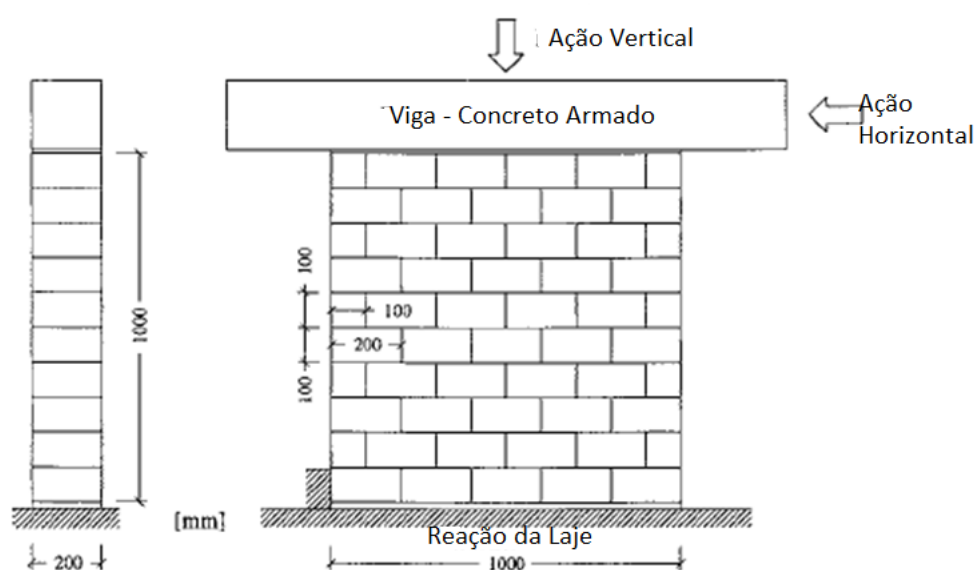
existente em todo o mundo. Os autores afirmam que devido a presença parcial da argamassa, ou até mesmo sem argamassa, o comportamento dessas construções torna a junta de alvenaria como junta seca.

A análise de construções com junta seca, visando sua avaliação estrutural e restauração, exige uma compreensão adequada do comportamento mecânico deste tipo de junta. A investigação do trabalho de Lourenço et al (2005), orientado pela caracterização do comportamento estrutural da junta seca no plano das paredes, contribuiu para estes objetivos.

Devido à complexidade dos fenômenos mecânicos envolvidos em sua resposta, a análise estrutural de construções de juntas secas constitui um desafio mesmo para as ferramentas numéricas mais sofisticadas.

Nesse trabalho foi apresentado um estudo comparativo entre sete paredes que foram ensaiadas com modelos numéricos e também com um modelo analítico. O trabalho experimental relatado neste trabalho consistiu em um conjunto de sete paredes submetidas ao nível de pré-compressão vertical, variando entre $0,15$ e $1,25 N/mm^2$, o que é considerado representativo das baixas tensões verticais devido às cargas gravitacionais normalmente encontradas em estruturas antigas maciças. A figura 24 apresenta um modelo esquemático, com a posição dos carregamentos, dimensões dos blocos e também a seção transversal da parede.

Figura 24 - Modelo Esquemático para Ensaio



Fonte: Lourenço et al (2005) - Adaptada

A seguir é apresentado, na tabela 6, um resumo do carregamento último alcançado no ensaio com a respectiva carga de pré-compressão.

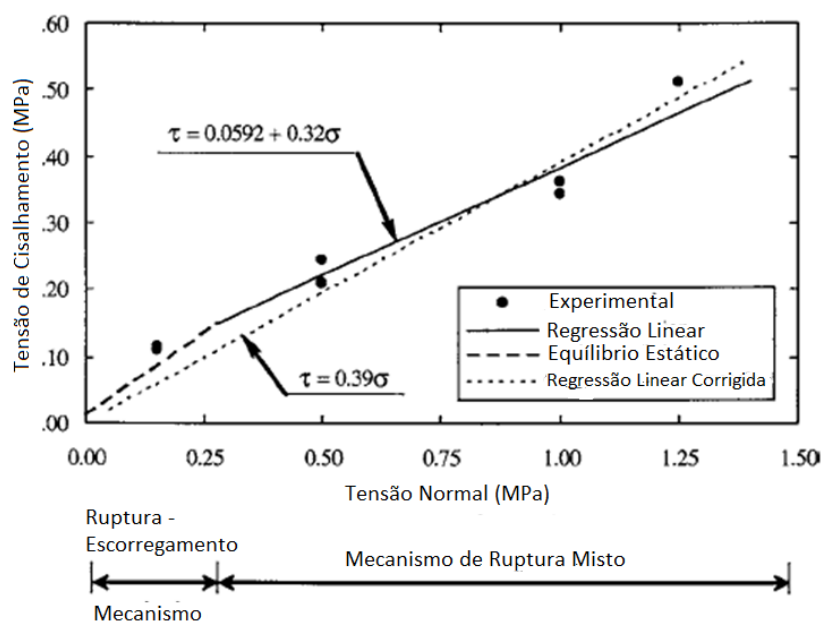
Tabela 6 - Resumo dos Resultados

Parede	Carregamento Vertical (kN)	Carregamento Ultimo Horizontal(kN)
SW.30.1	30	22
SW.30.2		23
SW.100.1	100	42
SW.100.2		49
SW.200.1	200	72
SW.200.2		69
SW250.1	250	102

Fonte: Lourenço et al (2005) - Adaptada

Ainda considerando a análise dos dados experimentais, os autores realizaram uma análise estatística dos resultados obtidos e conforme a figura 25 é possível notar uma correlação significativa entre os dados experimentais com a equação obtida a partir da regressão linear. Segundo os autores essa correlação pode ser considerada significativa uma vez que se obteve uma equação que relaciona tensão normal e cisalhamento e $\tau = 0.0592 + 0.32 * \sigma$ com uma correlação igual a $R^2 = 0,98$.

Figura 25 - Relação entre a tensão normal e tensão de cisalhamento: A partir da regressão linear dos dados experimentais



Fonte: Lourenço et al (2005) - Adaptada

Após essa análise, se iniciou o processo de modelagem numérica dessas paredes ensaiadas para se analisar paredes de alvenaria de pedra, para se discutir e obter um melhor entendimento dos resultados experimentais. Para análise numérica foi utilizada o modelo de interface de multisuperfície proposto por Lourenço e Rots (1997). Este modelo é totalmente baseado na teoria de plasticidade e assume que as unidades de pedra se comportam de forma elástica enquanto que o comportamento inelástico é concentrado nas articulações (a chamada estratégia de micromodelagem). Para a simulação numérica, as unidades de pedra foram modeladas usando elementos contínuo de plano de tensão com 8 nós e também se utilizou integração Gaussiana e, para as juntas, se utilizou elementos com zero espessura, seis nós, elementos de interface linear com integração Lobatto. As condições de contorno e procedimento de aplicação de carregamento foram definidos de acordo com o programa experimental.

Quanto aos parâmetros elásticos, uma das rigidezes das unidades e fixa, a rigidez das juntas podem ser obtidas a partir dos dados experimentais de medir o deslocamento vertical durante a aplicação do carregamento vertical. Dada a falta de dados experimentais disponíveis para juntas de alvenaria de pedra seca, esta característica é indiretamente considerada aqui adotando a rigidez articular medida experimentalmente em cada modelo de parede, em função da carga vertical aplicada à parede.

Para se representar de maneira mais significativa é necessário inserir dois tipos de rigidez que são as rigidezes normal (k_n) e tangencial (k_s). A rigidez normal da junta pode ser facilmente calculada considerando a parede como uma série de duas molas verticais, onde uma representa a unidade de pedra e a outra representando a junta. A equação utilizada pelos autores para cada uma das rigidezes são apresentadas a seguir:

$$k_n = \frac{1}{h * \left(\frac{1}{E_{parede}} - \frac{1}{E_{unidade}} \right)}$$

$$k_s = \frac{k_n}{2 * (1 + \nu)}$$

Onde:

h - altura da unidade

E_{parede} - Modulo de Elasticidade da Parede

$E_{unidade}$ - Modulo de Elasticidade da Unidade

ν - Coeficiente de Poisson

Vale destacar que, segundo Lourenço et al (2005), a rigidez ao cisalhamento, pode ser calculado diretamente a partir da rigidez normal, assumindo que a teoria da elasticidade pode ser diretamente aplicada.

Quanto aos parâmetros inelásticos foi considerado a resistência a tração e coesão igual a zero, a razão de se utilizar esses valores devido a se utilizar a junta seca das unidades de pedra. O comportamento a tração utilizado foi caracterizado por Ramos (2002), onde se obteve a resistência a tração de 3,7MPa e a energia de fraturamento igual 0,11 Nmm/mm^2 . Para simular o comportamento ao cisalhamento das juntas entre as pedras considerou-se como coeficiente de atrito (ϕ) igual 0.62 e o ângulo de dilatação (ψ) igual zero, esses dados foram retirados de Lourenço e Ramos (2004). A resistência a compressão (uniaxial) de 57 N/mm^2 que foi retirado de Oliveira (2003).

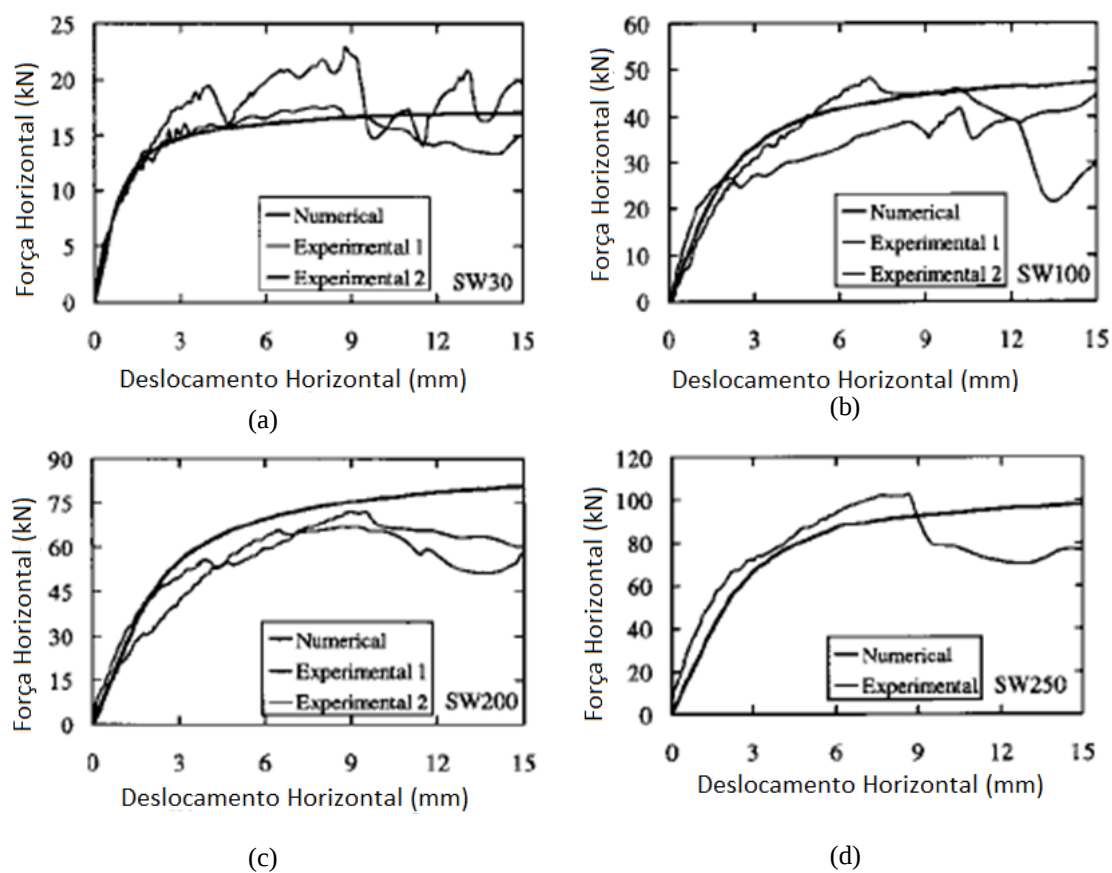
Com base nesses dados foram criados modelos para representarem as paredes ensaiadas. A tabela 7 apresenta um quadro comparativo entre os resultados experimentais e numéricos. Vale destacar que os dados experimentais foram utilizados para efeito de comparacao e foi calculdado a media dos valores para a mesma carga de pre-compressão com exceção da parede SW.250.

Tabela 7 - Comparação entre Resultados Experimentais e Numéricos

Parede	Experimental (kN)	Numérico (kN)	Relacao
SW.30	22,4	17	0,76
SW.100	45	47,5	1,06
SW.200	70,3	81,4	1,16
SW.250	102,7	98	0,95

Fonte: Lourenço et al (2005) - Adaptada

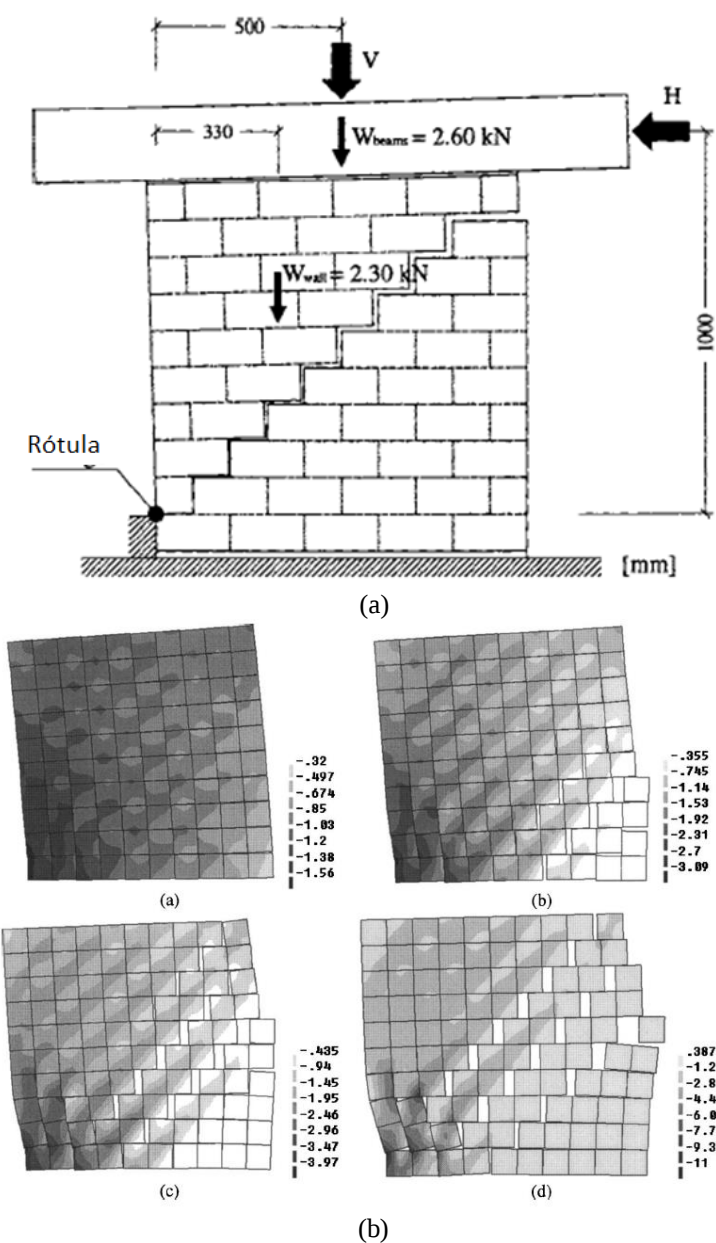
Além do quadro comparativo, da tabela 7, a seguir é apresentado (figura 26) uma comparação entre os gráficos de força vs deslocamento dos ensaios experimentais com o gráfico de força vs deslocamento dos modelos numéricos.

Figura 26 - Comparação Gráficos Força x Deslocamento

Fonte: Lourenço et al (2005) - Adaptada

Além dessa comparação, os autores apresentaram uma outra forma de comparar os resultados numéricos com os dados experimentais a partir da abertura de fissuras que pode-se observar ao comparar os ensaios. A figura 27.a e 27.b apresentam as fissuras tanto do modelo numérico bem como dos ensaios experimentais.

Figura 27 - Modo de Falha dos Ensaios Experimentais (a) Numérico (b)



Fonte: Lourenço et al (2005) - Adaptada

2.8 Barbosa (2008)

Barbosa (2008) estudou a resistência e a deformabilidade de blocos vazados, prismas e paredes e suas correlações com as propriedades mecânicas dos materiais constituintes.

O autor de maneira geral estabelece correlações entre as propriedades mecânicas do bloco de concreto e corpo de prova do material que constitui o bloco. As propriedades correlacionadas foram:

- a) Resistência à compressão;
- b) Resistência à tração;

c) Módulo de elasticidade.

A correlação desses valores é realizada a partir da discussão da geometria dos elementos.

As tabelas 8 a 10 a seguir apresenta um resumo dos resultados e as correlações das propriedades mecânicas (resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade) dos blocos vazados de concreto e o corpo de prova de concreto que compõe o bloco. Vale destacar que a resistência à compressão do bloco é considerando na área líquida do bloco.

Tabela 8 – Resistência à Compressão

	Bloco	CV	CP de concreto	CV	Bloco/CP
G1	12,7	4,3	13,4	6,1	0,95
G2	26,5	4,1	22,1	4,9	1,20
G3	28,4	3,1	26,0	2,2	1,09
G4	30,5	0,2	30,9	6,2	0,99
GA	22,6	4,9	20,4	4,7	1,11
GB	25,1	9,5	23,6	3,0	1,06
GC	27,1	2,1	24,2	9,2	1,12

Fonte: Barbosa (2008) - Adaptada

Tabela 9 - Resistencia à compressão e tração dos blocos

	Bloco	CV	Bloco - Tração	CV	Bloco tração/Bloco
G1	12,7	4,3	0,8	10,3	0,063
G2	26,5	4,1	1,7	4,8	0,064
G3	28,4	3,1	1,8	7,1	0,063
G4	30,5	0,2	2,0	9,8	0,066
GA	22,6	4,9	1,6	7,9	0,071
GB	25,1	9,5	1,5	12,7	0,060
GC	27,1	2,1	1,6	6,5	0,059

Fonte: Barbosa (2008) - Adaptada

Tabela 10 - Resistencia à compressão e tração dos corpos de prova de concreto

	CP Compressão	CV	CP - Tração	CV	CP tração/CP compressão
G1	13,4	6,1	1,5	5,5	0,112
G2	22,1	4,9	2,3	12,6	0,104
G3	26,0	2,2	2,6	10,9	0,100
G4	30,9	6,2	2,8	11,3	0,091
GA	20,4	4,7	2,0	10,2	0,098
GB	23,6	3,0	2,2	14,9	0,093
GC	24,2	9,2	2,8	0,1	0,116

Fonte: Barbosa (2008) - Adaptada

De acordo com o autor os valores de correlação entre os parâmetros mecânicos de compressão e tração foram satisfatórios. No capítulo 8, é realizado um compilado de todos os valores juntamente com os valores obtidos nos ensaios realizados durante essa pesquisa.

Além disso, o autor apresenta uma análise que correlaciona o módulo de elasticidade do corpo de prova de concreto com os módulos de elasticidade aparente dos grupos de bloco concreto. O autor utiliza o termo módulo de elasticidade aparente porque foi o medido a deformação em quatros pontos distintos do bloco, conforme pode ser visualizado na figura 28 a seguir.

Figura 28 - Instrumentação para o ensaio de resistência à compressão dos blocos



Fonte: Barbosa (2008) - Adaptada

Para essa análise o autor utilizou apenas o grupo G3 para correlação entre os módulos. A tabela 11, apresenta os parâmetros obtidos a partir do grupo G3. Vale destacar que a deformação apresenta na tabela é referente a 30% da resistência máxima do bloco.

Tabela 11 - Parâmetros obtidos nos ensaios com blocos vazados e corpos de prova do grupo G3

f_c	f_b	e (por mil)	$E_{b,ap}$	E_c	$E_{b,ap}/E_c$
26	28,4	A	0,0266	23787	1,35
		B	0,0283		1,27
		C	0,0316		1,09
		D	0,0206		1,75

Fonte: Barbosa (2008) - Adaptada

Após a correlação entre os corpos de prova de concreto e os blocos vazados, foi realizada uma correlação entre os parâmetros de propriedade mecânica dos blocos com os prismas (constituídos por três blocos). As tabelas 12 a 14, apresenta as correlações realizadas pelo autor. Vale destacar que as correlações aqui apresentadas levam em consideração todos os materiais que compõe o prisma, ou seja, bloco e argamassa.

Tabela 12 - Resistência à compressão dos blocos, argamassas e prismas.

Grupo	fp	CV	fa	CV	fb	fc	CV	fp/fb	fa/fb
P1	17,8	3,7	7,5	14,1	20,0	18,6	4,4	0,890	0,686
P2	18,2	1,9	9,4	10,5	24,5	22,8	3,5	0,743	0,683
P3	21,5	4,8	15,5	2,3	26,8	24,9	4,0	0,802	1,11
P4	30,1	3,9	22,2	7,0	38,9	36,2	5,7	0,774	1,09

Fonte: Barbosa (2008) - Adaptada

Tabela 13 - Resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade do concreto que constitui os blocos dos prismas.

Grupo	fc	cv	Ec	fct	cv	fct/fc
BP1	18,6	4,4	17449	1,7	12,0	0,091
BP2	22,8	3,5	20595	2,2	10,1	0,096
BP3	24,9	4,0	22175	2,4	9,3	0,096
BP4	36,2	5,7	27104	3,1	10,8	0,086

Fonte: Barbosa (2008) - Adaptada

Tabela 14 - Resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração

Grupo	fa	cv	fat	cv	Ea	cv	poisson	fat/fa
AP1	7,5	14,1	0,9	13,8	8085	12,3	0,13	0,120
AP2	9,4	10,5	1,1	8,3	9745	5,0	0,13	0,117
AP3	15,5	2,3	1,8	11,7	13195	4,8	0,13	0,116
AP4	22,2	7,0	2,6	4,8	16672	7,5	0,13	0,117

Fonte: Barbosa (2008) - Adaptada

Além das correlações apresentadas nas tabelas anteriores, foi analisado, ainda sobre o comportamento dos prismas, a distribuição de deformações nos prismas, lembrando que os primas estudado foram construídos com três blocos. Para essa análise foram considerados os seguintes quesitos:

- a) A deformação no prisma foi obtida em três pontos distintos;
- b) Módulo de elasticidade do concreto de produção dos blocos vazados, da argamassa, e do bloco central do prisma;

- c) Assim como nas propriedades mecânicas do bloco, foi calculado o módulo de elasticidade do prisma considerando 30% do valor máximo de tensão;

A tabela 15, apresenta as propriedades mecânicas obtidas a partir dos ensaios com prismas e corpos de prova de concreto e argamassa. Já a tabela 16, as propriedades mecânicas da argamassa (que foram obtidas no ensaio de corpo de prova e diretamente na junta do prisma), do bloco e do prisma e descreve o comportamento do gráfico de cada um desses elementos.

Tabela 15 - Propriedades mecânicas a partir dos ensaios com prismas e corpos de prova de concreto e argamassa

fp	Ec	Ea	Ep,ap		e ult
21,5	22175	13195	A	16432	2636
			B	19166	2569
			D	21239	1615

Fonte: Barbosa (2008) - Adaptada

Tabela 16 - Propriedades mecânicas da argamassa - obtidas no ensaio de corpo de prova e diretamente na junta do prisma -, do bloco e do prisma.

Elemento	fc,elem	Eelem	poisson eleme	e ult	Comportamento
Corpo de Prova	15,5	13195	0,15	2044	dúctil
Junta do Prisma	-	7041	-	10764	trilinear
Bloco Central	27,6	37928	0,84	1296	-
Prisma	21,5	19166	0,39	2569	dúctil

Fonte: Barbosa (2008) - Adaptada

Continuando na análise de correlações, foi estudado as propriedades mecânicas (resistência à compressão e tração) dos elementos que compõem as miniparedes, conforme figura 28. A tabela 17 apresenta as correlações referentes a resistência à compressão e a tabela 18 apresenta com a resistência à tração.

Tabela 17 - Resistência à compressão dos blocos, argamassa, prismas e miniparedes

Grupo	fpar	cv	fp	cv	fa	cv	fb	cv	fpar/fp
PAR1	15,5	11,7	19,3	11,1	10,4	6,9	24,9	15,2	0,803
PAR2	16,5	6,5	20,5	11,4	18,1	6,8	23,7	16	0,805

Fonte: Barbosa (2008) - Adaptada

Tabela 18 - Resistência à tração, módulo de elasticidade e coeficiente de poisson do concreto e argamassa

Grupo	fct	cv	Ec	cv	fat	cv	Ea	cv	poisson concreto	poisson argamassa
PAR1	2,1	10,6	21174	2,1	1,2	4,3	9402	5,0	0,20	0,12
PAR2	2,1	7,6	22447	9,7	1,6	9,1	17553	4,4	0,20	0,15

Fonte: Barbosa (2008) - Adaptada

Algumas conclusões do autor que serão consideradas nesta pesquisa:

- 1) Quando atingida a tensão correspondente a $0,7f_b$, o bloco apresenta deformações acentuadas;
- 2) A distribuição de deformação nos blocos vazados não se apresenta de maneira uniforme, uma vez que, ao variar a posição de medição da deformação se encontrou valores relativamente diferentes para o mesmo blocos;
- 3) Quanto ao comportamento dos prismas,
- 4) Quanto ao comportamento das miniparedes, observou-se que apesar de um aumento significativo da resistência da argamassa, a resistência das paredes não varia na mesma proporção. O mesmo ocorre em relação à resistência dos prismas, o que indica, segundo Barbosa (2008), a baixa influência da argamassa (em comparação com a resistência dos blocos de concreto) na capacidade portante das estruturas de alvenaria.

2.9 Hughes (2010)

Hughes (2010), estudou em sua tese o comportamento de paredes de cisalhamento e seus componentes, utilizando na construção blocos de escala reduzida 1:3. Sendo que o principal objetivo de seu trabalho era comparar e correlacionar com paredes de escala 1:1. De acordo com o autor, o estudo foi dividido em três fases que são:

- a) Focou em estudar os elementos que comporiam as paredes, ou seja, bloco, argamassa, graute e armadura;
- b) Fazer testes com diferentes configurações dos blocos de escala 1:3 e então comparar e correlacionar com as mesmas configurações utilizando blocos de escala 1:1;

- c) E por último analisar o comportamento de suas paredes de alvenaria armada e comparar com as paredes de escala 1:1 que foram testadas anteriormente.

Assim como no trabalho de Wierzbicki (2010) em que os blocos foram construídos, Hughes (2010) utilizou a mesma metodologia. A tabela 19 apresenta os valores de resistência a compressão dos blocos em escala 1:3 e a comparação com dois conjuntos de resultados. Ao se comparar os resultados é evidente que os valores de resistência dos blocos de escala 1:3 são muito maiores do que os de escala 1:1. A inconsistência dos valores é justificada pelo autor considerando que a confecção dos blocos que serão utilizados nos experimentos foi utilizado um valor muito maior de ingredientes em comparação com a quantidade utilizada para confecção dos blocos modelo.

Tabela 19 - Resistência à compressão dos blocos

Grupo	Escala 1:3	Escala 1:1 - Long 2006	Escala 1:1 - Shedid 2006
1	56,5	26,7	25,32
2	53,4	21,3	23,69
3	57,6	25,1	25,41
4	55,2		
5	51,1		
Resistência Média	54,8	24,4	24,8
CV	4,7	11,4	3,89

Fonte: Hughes (2010) - Adaptada

Além dos testes de resistência a compressão, tabela 19, foi realizado testes de resistência à tração comparados com os valores dos mesmos autores, conforme a tabela 20.

Tabela 20 - Resistência à tração dos blocos

Grupo	Escala 1:3	Escala 1:1 - Long 2006	1:3/1:1
1	2,01	2,48	0,88
2	1,86	2,55	
3	2,48		
4	2,57		
Resistência Média	2,2	2,5	
CV	15,5		

Fonte: Hughes (2010) - Adaptada

A fase dois da pesquisa consistia em estudar esforços específicos, considerando os blocos de escala 1:3 e comparar com os respectivos resultados dos blocos de escala 1:1. Hughes (2010), fez testes em prismas para avaliar o comportamento a compressão (no entanto esses resultados não serão aqui apresentados) e também o comportamento ao cisalhamento da junta a partir do seguinte elemento.

Com objetivo de fundamentar a tese, será apresentado apenas a análise realizado por Hughes (2010) do esforço ao cisalhamento. Hughes (2010) foram construídos dois conjuntos de amostras e os resultados desse ensaio são apresentados na tabela 21.

Tabela 21 - Tensão de Cisalhamento

Amostra	Grupo 1	Grupo 2
1	0,577	0,219
2	0,508	0,289
3	0,554	0,335
4	0,439	0,346
5		0,277
Média	0,519	0,293
CV	11,7	17,3

Fonte: Hughes (2010) - Adaptada

A diferença entre o grupo 1 e 2 é a resistência da argamassa, onde o grupo 1 tem uma resistência igual 15Mpa e da do grupo é igual 31MPa. Hughes (2010) conclue que com aumento da resistência da argamassa ocorre uma redução proporcional a tensão de cisalhamento, ou seja, no caso do autor houve um aumento de 52% na resistência da argamassa e por consequência a tensão de cisalhamento reduziu aproximadamente 44%.

Na fase 3, o autor faz uma extensa análise das paredes de cisalhamento com os blocos de escala 1:3 e considera os seguintes parâmetros para comparação entre as escalas:

- a) Força máxima, conforme tabela 22;
- b) Degradação da rigidez, conforme tabela 23;
- c) Gráfico força vs deslocamento, conforme figuras 29, 30 e 31;
- d) Ductilidade, conforme tabela 24;

Tabela 22 - Comparação entre as resistências dos corpos de provas Escala 1:1 e Escala 1:3

Valores	Escala 1:1	Escala 1:3 - Experimental	Escala 1:3 - Teórico
Deslocamento Vertical (mm)	11	4,5	3,67
Força Vertical (kN)	174	13,3	19,3
Deslocamento Horizontal (mm)	24	18,7	8
Força Horizontal (kN)	242	27,7	26,9

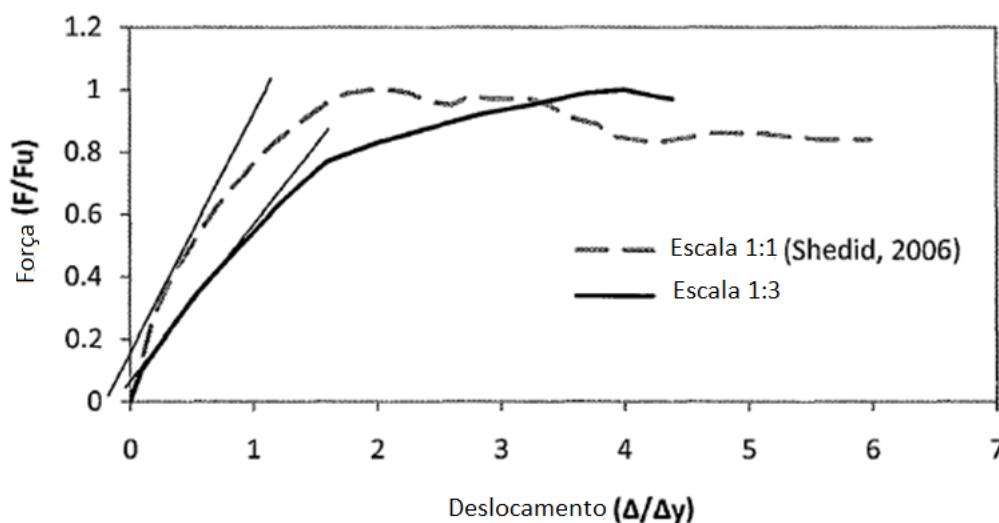
Fonte: Hughes (2010) - Adaptada

Tabela 23 - Comparação entre as rigidez dos corpos de provas Escala 1:1 e Escala 1:3

Valores	Escala 1:1	Escala 1:3 - Experimental	Escala 1:3 - Teórico
Rigidez Inicial (kN/mm)	67,6	26,3	22,5
Rigidez ao Escoamento (kN/mm)	16,4	3,37	5,47
Rigidez Última (kN/mm)	10,5	1,55	3,5

Fonte: Hughes (2010) - Adaptada

Figura 29 - Curva Força vs Deslocamento - Comparação com Escala 1:1



Fonte: Hughes (2010) - Adaptada

Tabela 24 - Comparação entre as ductilidades dos corpos de provas Escala 1:1 e Escala 1:3

Valores	Escala 1:1	Escala 1:3 - Experimental	Escala 1:3 - Teórico
Deslocoamento Vertical (mm)	11	4,5	3,67
Força Vertical (kN)	174	13,3	19,3
Deslocamento Horizontal (mm)	24	18,7	8
Força Horizontal (kN)	242	27,7	26,9
Dh/Dv	2,2	4,2	2,2

Fonte: Hughes (2010) - Adaptada

Figura 30 - Força vs Deslocamento – Idealizada – Escala 1:3

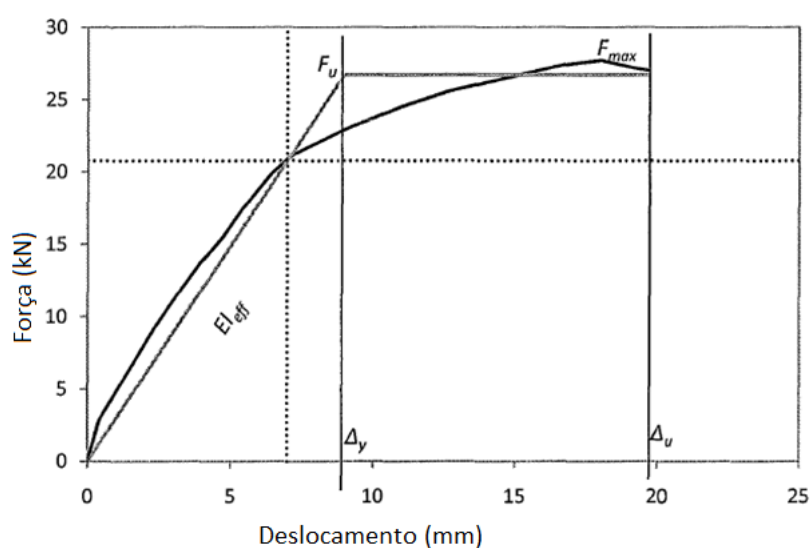
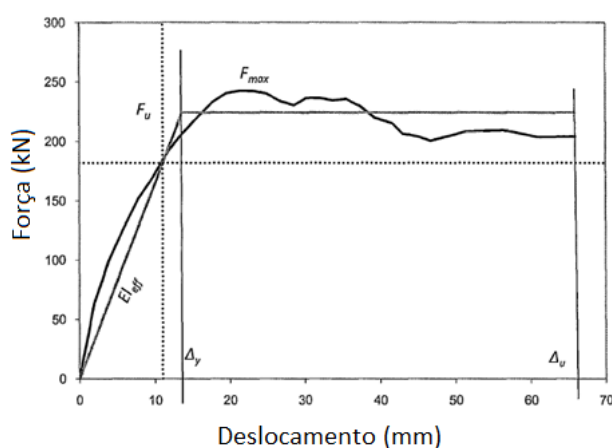


Figura 31 - Força vs Deslocamento – Idealizada – Escala 1:1



Fonte: Hughes (2010) - Adaptada

2.10 Wierzbicki (2010)

Wierzbicki (2010), em sua tese de doutorado estudou o comportamento de paredes com blocos de concreto de escala 1:3 sujeitas ao esforço

de cisalhamento e flexão e totalmente grauteadas. O comportamento ao cisalhamento estudado foi considerando paredes de dois andares. Para esse estudo, o autor construiu todos os blocos que foram utilizados nos experimentos, bem como realizou a caracterização dos elementos que foram utilizados, além dos blocos, foi caracterizado argamassa e graute. A tabela 25 apresenta os resultados obtidos relacionados a esses elementos.

Tabela 25 - Resistência à compressão dos blocos

Grupo	Resistência à compressão
1	56,5
2	53,4
3	57,6
4	55,2
5	51,1
Resistencia Média	54,8
CV	4,7

Fonte: Wierzbicki (2010) - Adaptada

Ao contrário dos demais autores, Wierzbicki (2010) a argamassa utilizada não foi industrializada mas se seguiu um traço e com base nesse traço foram contruídos 51 corpos de prova de argamassa que foram ensaiados para diferentes períodos de cura. A partir desse conjunto de resultados, foi obtido a resistência média a compressão da argamassa igual a 29.5 Mpa e o coeficiente de variação de 9.1%.

Seguindo a mesma metodologia da argamassa, o graute foi produzido, também, a partir de um traço. Foram construídos 15 corpos de prova que foram divididos em cinco grupos, conforme a tabela 26 a seguir:

Tabela 26 - Resistência à compressão dos grautes

Grupo	Carregamento de Ruptura	Resistencia á compressão	Média por Grupo	Média Geral	CV
G1-1	177928	22,65	21,4	18,9	15,4
G1-2	156799	19,96			
G1-3	169031,6	21,52			
G2-1	128997,8	16,42	16,7		
G2-2	131221,9	16,71			
G2-3	133446	16,99			
G3-1	136782,1	17,42	16,4		
G3-2	122325,5	15,57			
G3-3	127885,8	16,28			
G4-1	187936,4	23,93	18,8		
G4-2	131221,9	16,71			
G4-3	124549,6	15,86			
G5-1	152350,8	19,4	21,2		
G5-2	164583,4	20,96			
G5-3	182376,2	23,22			

Fonte: Wierzbicki (2010) - Adaptada

Além disso, o autor construiu prismas, no entanto, a resistência a compressão bem como o módulo de elasticidade não serão inseridos nesse trabalho por foram construídos prismas com 4 blocos de altura.

Antes da apresentação do resultado bem como o comportamento das paredes é importante apresentar as dimensões dessas paredes e também a quantidade de paredes que será utilizadas para se estudar cada um dos esforços proposto pelo autor. A tabela 28 e a 29 apresentam essas dimensões.

Tabela 27 – Informações Gerais das Amostras – Paredes

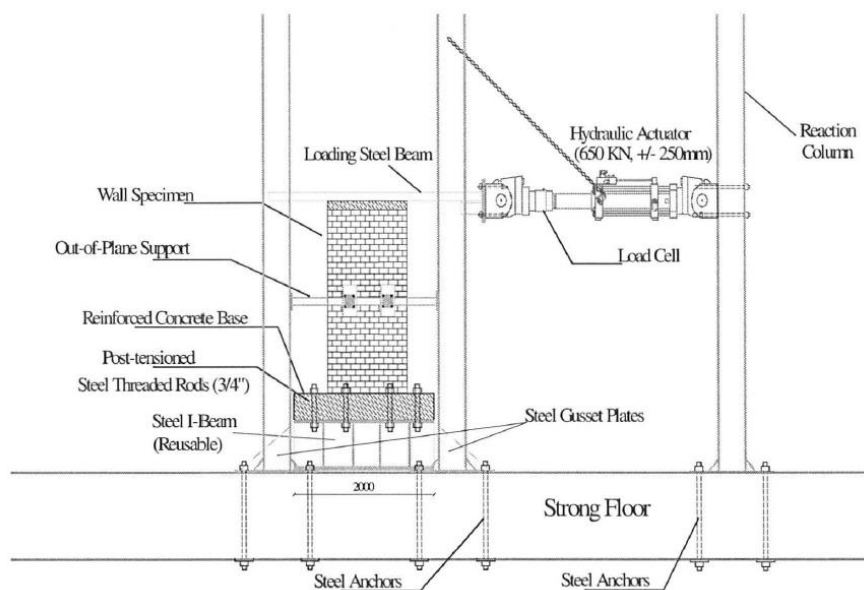
Amostra	Comprimento Total (L) (mm)	Altura (H) (mm)	Relação H/L	Taxa de Armadura Vertical (%)	Ruptura Esperada
Parede 1	1132	2200	1,94	0,565	Flexão
Parede 2	865	2208	2,55	0,575	
Parede 3	1532	2240	1,46	0,662	
Parede 4	1980	2230	1,11	0,575	

Fonte: Wierzbicki (2010) - Adaptada

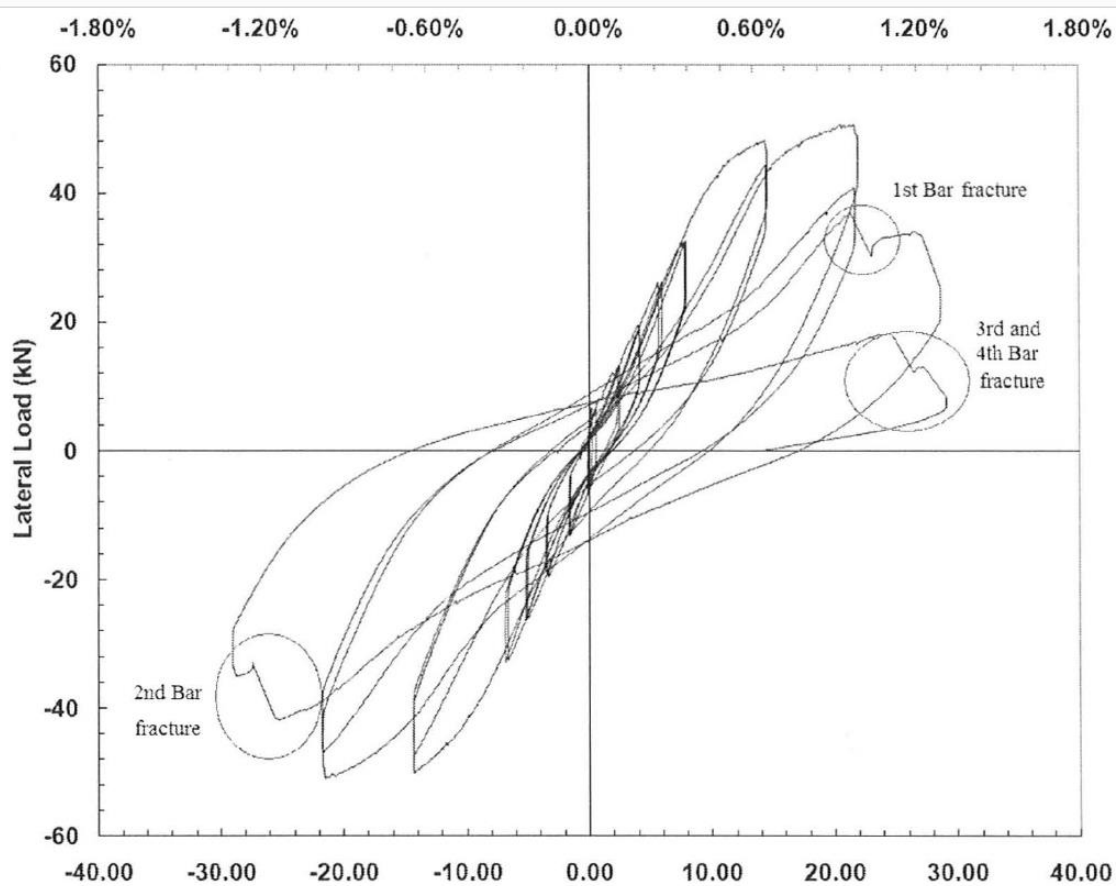
Em todas as paredes se considerou um carregamento cíclico atuando no canto superior das paredes, conforme figura 32 a seguir. O carregamento foi aplicado de forma gradativa considerando em cada ciclo um aumento da força aplicada baseado na força prevista de ruptura. A figura 33 apresen-

ta o gráfico de histerese da parede 1, quanto a resistência das paredes todas elas ultrapassaram o valor de força teórica.

Figura 32 – Estrutura para execução do ensaio



Fonte: Wierzbicki (2010) - Adaptada

Figura 33 – Força Lateral x Deslocamento - Histerese

Fonte: Wierzbicki (2010) - Adaptada

Algumas considerações sobre o trabalho:

- 1) Acredito que para uma melhor caracterização dos materiais seria interessante a apresentar os valores de deformação ultima, um gráfico de tensão vs deformação dos materiais bem como o cálculo do módulo de elasticidade dos materiais. Uma vez que o autor apresentou esses parâmetros para o prisma também calculou o módulo de elasticidade para esse mesmo elemento.
- 2) Acredito que poderia ter criado uma tabela apresentando os valores de força máxima aguardado durante o ensaio;
- 3) Acredito que esse trabalho, assim como outros que são apresentados nesta revisão, fundamentam que a utilização de blocos de concreto em escala reduzida seja qual for magnitude de redução, corrobora para o estudo e análise painés de alvenaria e com isso aprimorar o dimensionamento desses elementos.

2.11 Kaaki (2013)

Nessa dissertação, a autora Tamara Kaaki, estudou o comportamento e a resistência de prismas e painéis de alvenaria submetidos à compressão. Para construção das amostras tanto de prisma como dos painéis foram utilizados blocos de escala 1:3.

Para o estudo com comportamento dos prisma Kaaki (2013), construiu um conjunto de 47 prismas que foram divididos de acordo com os seguintes parâmetros a serem considerados na análise proposta. Os parâmetros analisados foram:

- a) Direção do carregamento – paralelo e perpendicular a junta de argamassa;
- b) Três tipos de prismas – prisma com 3, 4 e 5 fiadas;
- c) Grauteamento – não grauteado, parcialmente grauteado, totalmente grauteado;
- d) Argamassa – foi considerado dois tipos de argamassa, tipo N (5MPa) e tipo S (15MPa);
- e) O assentamento dos prismas foi considerado argamassa em toda a face do bloco;
- f) Espessura da argamassa foi de 5mm.

Para o estudo dos painéis, foram construídos 27 painéis quadrados, também utilizando blocos de escala 1:3. Assim como nos prismas, esse conjunto de painéis foi subdividido de acordo com os parâmetros a serem avaliados. Os parâmetros para os painéis são apresentados a seguir:

- a) Direção do carregamento – horizontal e vertical (ASTM C1314) e diagonal (ASTM E519);
- b) Dimensões do painel – todos os painéis foram construídos considerando três blocos inteiro de comprimento e seis fiadas de altura;
- c) Grauteamento – não grauteado, parcialmente grauteado, totalmente grauteado;
- d) Quanto ao tipo de argamassa foi utilizada a mesma argamassa utilizada nos prismas;
- e) O assentamento de cada fiada foi considerando argamassa em todo o perímetro da face superior do painel;

Além disso, foram realizados ensaios complementares para caracterização dos materiais utilizados. A caracterização foi feita partir dos seguintes ensaios:

- a) Blocos – ensaio de dimensionamento, absorção, e resistência à compressão uniaxial.
- b) Argamassa e Graute – ensaio de compressão uniaxial.

A seguir é apresentado os resultados alcançados pela autora, tabelas 28 a 31 e a tabela 32 apresenta a tipologia do ensaio.

Tabela 28 - Resistência à compressão dos blocos de escala 1:3

Grupo	Área(mm ²)	Força Máxima (kN)	fb	fb,m	Desvio Padrão	CV
FR-4	4142,46	81,4	19,7	19,2	1,2	6,2
FR-5	4106,97	74,2	18,1			
FR-6	4119,1	82,3	20,0			
FL-4	4244,53	52,6	12,4	14,1	1,6	11,3
FL-5	4251,1	62	14,6			
FL-6	4238,67	65,1	15,4			

Fonte: Kaaki (2013) - Adaptada

Tabela 29 - Resistência a compressão da argamassa Tipo S

Grupo	Número de Amostras por Grupo	fa,m	CV
1	3	8,6	0,9
2	6	6,5	11,5
3	3	6,7	10,5
4	6	6,5	11,1

Fonte: Kaaki (2013) - Adaptada

Tabela 30 - Resistência a compressão do graute Tipo N

Grupo	Número de Amostras por Grupo	fa,m	CV
2	3	5,6	2,2
3		5,6	4,5
4		6,3	5,6
5		5,7	3,2
6		4,6	4
7		5	12,1

Fonte: Kaaki (2013) - Adaptada

Tabela 31 - Resistência a compressão do graute Tipo S

Grupo	Número de Amostras por Grupo	fa,m	CV
1	3	8,6	3,1
2		5,4	10,5
3		6,5	16,9

Fonte: Kaaki (2013) - Adaptada

Tabela 32 – Amostras dos Ensaio de Kaaki (2013)

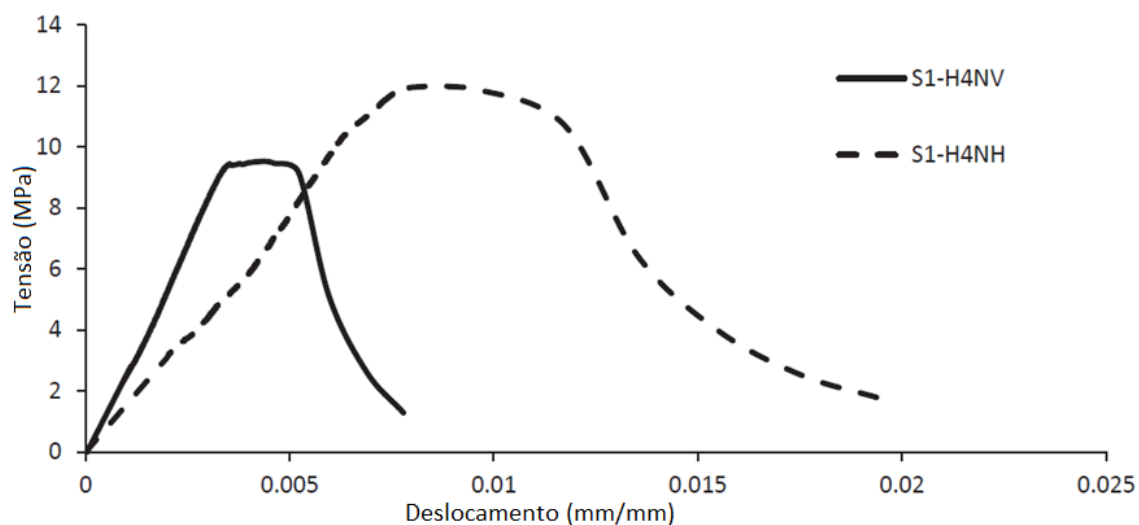
Amostra	Orientação do Carregamento	Grauteamento	Resistência da Argamassa (MPa)	Força de Ruptura (N)	Resistência média a compressão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
S1-H4NV	Vertical	Oco	3,8	32112	7,8	11,2
S1-P4NV		Parcial	3,8	40762	6,9	15
S1-F4NV		Total	5,8	51261	6,6	4,8
S1-H3NV		Oco	3,8	34138	8,3	-
S1-F3NV		Total	5,6	53192	6,9	9,8
S1-H5NV		Oco	3,8	38150	9,3	-
S1-F5NV		Total	5,6	60837	7,8	12,7
S1-H4NV		Oco	6,5	40014	9,7	-
S1-P4SV		Parcial	8,6	50376	8,5	-
S1-F4SV		Total	8,6	59939	7,7	14,3
S1-F4SVW		Total	6,7	50013	6,4	-
S1-H4NH	Horizontal	Oco	5,2	67005	10,6	12,5
S1-P4NH		Parcial	5,6	58539	9,2	-
S1-F4NH		Total	5,3	127884	7,2	7,6
S1-F4NHW		Total	5,3	104501	5,9	5
S1-H4SH		Oco	8,6	74232	11,7	-
S1-P4SH		Parcial	8,6	74110	11,7	-
S1-F4SH		Total	8,6	143540	8,1	-
S1-F4SHW		Total	6,7	67306	3,8	-
S2-HNV	Vertical	Oco	4	49780	5,3	10
S2-PNV		Parcial		67790	4	9
S2-FNV		Total		65860	3,2	5,6
S2-HNH	Horizontal	Oco		48940	5,2	-
S2-PNH		Parcial		59114	3,5	-
S2-FNH		Total		62664	3	-

Fonte: Kaaki (2013) - Adaptada

Com base nesses resultados autora apresenta, graficamente, o comportamento do prisma de 4 blocos oco e grauteado. O gráfico de tensão vs deformação, figuras 34 e 35, apresenta de maneira evidente que o comportamento linear do material até praticamente a tensão de pico. A autora

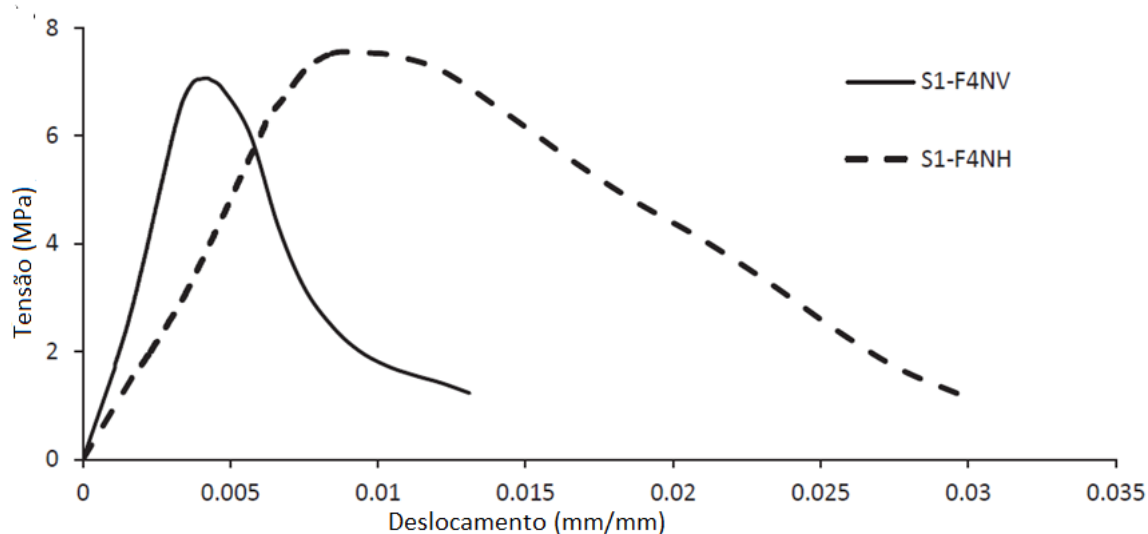
afirma que nos ensaios foi possível notar que o comportamento linear se manté até 80 a 90% da carga última do ensaio.

Figura 34 - Tensão x Deformação - Oco



Fonte: Kaaki (2013) - Adaptada

Figura 35 - Tensão x Deofmrção – Grauteado



Fonte: Kaaki (2013) - Adaptada

A autora realiza dentro desse conjunto de resultados apresentado na tabela 34, diversas comparações que para essa pesquisa não são tão relevantes. No entanto, no que diz a respeito aos painéis por ela estudado é importante apresentar os resultados do ensaio de compressão diagonal. A tabela 34 apresenta esses resultados.

Tabela 33 – Resultados da Compressão Diagonal

Grupo	Número de Amostra por Grupo	Graute	Resistencia da Argamassa	Área	Força Máxima	Resistencia tração diagonal
S2-HND	2	Não	5,5	13,797	7220	0,37
S2-PND		Parcial		22,500	19413	0,61
S2-FND		Total		26,754	30652	0,81
S2-HND	2	Não	6,5	13,797	7362	0,38
S2-PND		Parcial		22,500	24329	0,76
S2-FND		Total		26,754	37568	0,99

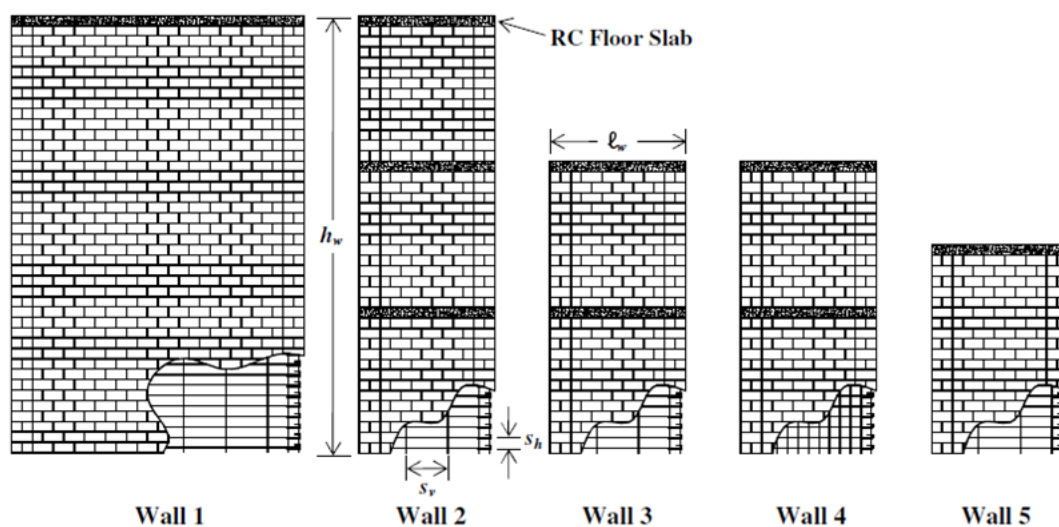
Fonte: Kaaki (2013) - Adaptada

As conclusões que autora alcançou que são pertinentes a esta pesquisa:

- 1) Prismas carregados verticalmente exibiam lascas na face e fissuras verticais através do septo central e das paredes do bloco;
- 2) Com o aumento da resistência a compressão da argamassa, a resistência dos prismas também aumenta, independente da direção do carregamento e da porcentagem de grauteamento;
- 3) Painéis carregamento na direção diagonal exibem uma falha em forma de degrau através da junta de argamassa
- 4) A tensão de tração diagonal aumenta de acordo com a porcentagem de grauteamento realizado no painel.

2.12 Banting e El-Dakhakhni (2014)

Banting e El-Dakhakhni (2014), apresentam nesse artigo os resultados referentes ao estudo do desempenho de paredes de alvenaria armada sujeitas a ação sísmica com elementos de contorno. Para isso foram construídas cinco paredes de alvenaria armada, conforme figura 36, utilizando blocos de escala reduzida 1:2.

Figura 36 – Corpos de Prova para o Ensaio

Fonte: Banting e El-Dakhakhni (2014) - Adaptada

Tabela 34 - Resistência dos Principais Materiais/Elementos

Teste do Material	Valor (MPa)	CV(%)
Resistência à Compressão Argamassa - Tipo S	16,6	16,2
Resistencia à Compressão Blocos - Escala 1:2	26,5	13,2
Resistência à Compressão do Graute	18,5	17,1
Resistência à Compressão do Prisma - 4 Fiadas	14,9	13,7
Resistência da Armadura	582,5	1,3

Fonte: Banting e El-Dakhakhni (2014) - Adaptada

As paredes detalhadas para representar construções típicas de baixa a média elevação, variavam de acordo com sua altura, comprimento e proporção de armadura vertical, conforme tabela 35 e a tabela 34 resistência dos elementos e materiais utilizados.

Tabela 35 – Informações das Paredes de Alvenaria Armada – Condições de Contorno

Parâmetro	Parede 1	Parede 2	Parede 3	Parede 4	Parede 5
hw(mm)	3990	3990	2660	2660	1900
lw(mm)	2655	1235	1235	1235	1235
Ar	1,5	3,23	2,15	2,15	1,54
Pa(MPa)			0,89		
ro v (%)	0,51	0,69	0,69	1,17	0,69
sv (mm)		380		95	380
ro h (mm)	0,3			0,6	
s h (mm)			95		
c teórico (mm)	408	188	188	338	188
c/lb teórico	2,2	1,02	1,02	1,83	1,02
c/lw teórico		0,15		0,27	0,15
Qy teórico (kN)	232,4	71,5	107,3	133,9	149
Qu teórico (kN)	298,2	91,1	136,6	172,2	189,6

Fonte: Banting e El-Dakhakhni (2014) - Adaptada

Os resultados dos testes são relatados, na tabela 36, em termos de parâmetros de projeto sísmico baseados na força, como a resistência da parede, características de rigidez e ductilidade, bem como parâmetros de projeto sísmico baseados em deslocamento e desempenho para a próxima geração de códigos sísmicos na América do Norte. Além disso, a figura 37 apresenta a comparação entre as fissuras de duas paredes.

Tabela 36 - Rigidez Teórica e Experimental das Paredes

Parâmetro	Parede 1	Parede 2	Parede 3	Parede 4	Parede 5
Rigidez Teórica (kN/mm)					
Kg	65,8	10,4	31,3	31,3	72,1
Ks	218,7	104,6	156,8	156,8	219,6
Kf	94,1	11,6	39,1	39,1	107,4
Ky - Equação Literatura 1	17	2,7	8,1	8,1	18,6
Ky - Equação Literatura 2	43,3	6,9	20,6	20,6	47,5
Ky - Equação Literatura 3	22,7	3,6	10,8	10,8	24,9
Rigidez Experimental (kN/mm)					
Kge	132,7	14,2	30,4	46,5	65,2
Kcre	13,9	2,6	4,2	5,4	14,7
Kye	31,9	4,6	12,9	13,6	24,7
mi delta i	6,4	6,6	4,8	4	5,7

Fonte: Banting e El-Dakhakhni (2014) - Adaptada

Figura 37 - Comparação entre o caminho das fissuras no primeiro andar das paredes 3 e 4



Fonte: Banting e El-Dakhakhni (2014) - Adaptada

Em geral, o desempenho das paredes indica que o detalhamento do elemento de limite selecionado é um meio satisfatório do projetista de abordar a necessidade de proporções $c = l_w$ mais baixas e níveis mais altos de curvatura, conforme indicado pelo MSJC.

2.13 Bolhassani et al (2015)

A alvenaria é um dos materiais estrutural ainda em uso por uma vasta variedade de construção. Alvenaria tem sido continuamente empregado para diferentes propósitos construtivos. Nestas últimas décadas existe uma atenção dos engenheiros que foram dedicadas para novos métodos de análise da alvenaria estrutural. Considerando a alvenaria como um material heterogêneo pode se melhorar os resultados comparado com a modelagem homogênea.

O trabalho foi baseado nos MEF desenvolvidos por Minaie (2009) para paredes parcialmente grauteadas utilizando o modelo CDP para graute e unidades no Abaqus. Apesar de que o modelo possa duplicar o ajuste da resposta de deslocamento de carga cíclica aos resultados experimentais, o mecanismo de falha da parede não foi devidamente capturado.

Um modelo mais detalhado e combinando fissuras *smeared* e discreto foi com sucesso usado por Koutromanos et al () para simular o comportamento inelástico em pórticos de concreto armado preenchido de alvenaria e

capturar o mecanismo de ruptura de paredes parcialmente grauteadas sob o carregamento sísmico e *quasi-static* cíclico reverso. O modelo computacional capturou com detalhes o mecanismo da ruptura e deslocamento em curvas de histereses de um pórtico preenchido ensaiado sobre shake tabela.

Num geral a captura da resposta da alvenaria de forma mais realista requer um modelo numérico de elementos de interface. Uma opção possível é utilizar os elementos de interface para juntas e modelos adequados para unidades de alvenaria, graute e argamassa. Os elementos de contato foram utilizados como uma descontinuidade dos vazios usando o comportamento *cohesive surface-based*.

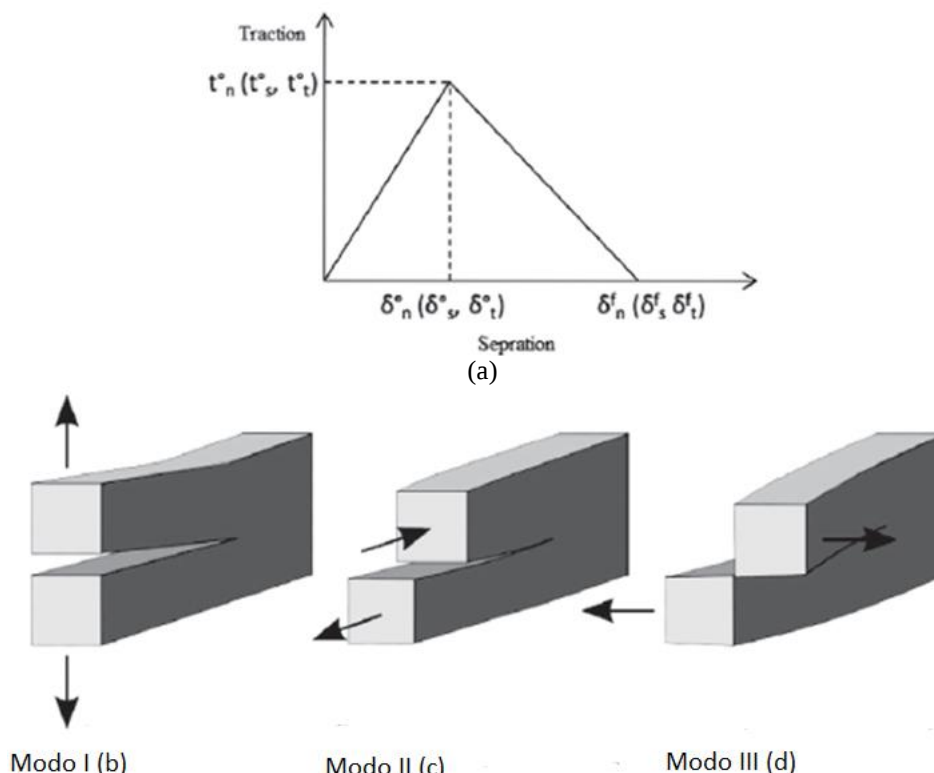
Para simular a resposta não linear das unidades de alvenaria e do graute, o modelo CDP disponível no Abaqus foi utilizado. O modelo CDP representa a resposta a resistência uniaxial de compressão e tração e caracterizada por *Damaged Plasticity*.

Geralmente, as interações coesivas são em função de separação de deslocamento entre as faces de fissuras em potencial. O comportamento constitutivo de elementos coesivo pode ser definido de três maneiras no Abaqus, que são as seguintes:

- a) Uniaxial Stress-Based
- b) Continuum Based
- c) Modelo constitutivo Traction-Separation

O modelo constitutivo *Traction-Separation* pode ser também utilizado quando uma "cola" é muito fina e para um propósito prático pode ser considerado como material de espessura zero. Antes do dano, o comportamento coesivo *Traction-Separation* segue uma lei linear e uma degradação progressiva da rigidez da junta leva a ruptura da mesma. A figura 38.a, a seguir, apresenta uma resposta típica de *Traction-Separation*.

Figura 38 - Comportamento Típico Traction (Tração)-Separation (Separação) (a) e Modos de Fratura – Normal (b), Cisalhamento no plano (c) e Cisalhamento fora do plano (d)



Fonte: Bolhassani et al (2015) - Adaptada

Na parte elástica, o vetor de tensão consiste de um vetor normal, t_n , e dois componentes de cisalhamento t_s e t_t . Estes componentes representam os modos de fratura I, II e III como mostrado na figura 38, (b), (c) e (d). Também neste modelo δ_n^* , δ_s^* e δ_t^* representam a separação inicial correspondente causada por normal pura, tensões de cisalhamento no plano e fora do plano, respectivamente. Estes valores podem ser calculados usando a rigidez e a resistência de cada modo de fratura.

A segunda parte da resposta *traction-separation* mostra a propagação do dano da aderência que pode ser determinada de diferentes formas. A evolução do dano neste modelo decreve a degradação da rigidez coesiva. Para este propósito, a máxima separação no fim do gráfico pode ser especificado utilizando a energia de fratura total ou a separação efetiva pós dano da ruptura, ou seja, δ_n^f , δ_s^f e δ_t^f .

Todas as propriedades utilizadas pelos autores estão apresentadas nas tabelas 38, 39 e 40.

Tabela 37 - Propriedades Elásticas e Plásticas(CDP) do Alvenaria

Propriedades Elásticas		
Modulo de Elasticidade	33700	Mpa
Coeficiente de Poisson	0,2	
Propriedades Plásticas - Drucker-Prager		
Angulo de Dilatancia	34	graus
Excentricidade	0,1	
fb0/fc0	1,16	
K	0,67	
Viscosidade	0,001	

Fonte: Bolhassani et al (2015) - Adaptada

Tabela 38 - Comportamento Plástico a Compressão e Tração da Alvenaria

Comportamento a Compressão		Comportamento a Tração	
Tensão	Deformação Inelástica	Tensão	Deformação Inelástica
17,4	0	1,5	0
20,7	0,0003	1,15	0,00029
21,6	0,0005	0,83	0,00044
20,9	0,001	0,3	0,00092
19,6	0,0015	0,1	0,003
15,1	0,0029	0,06	0,0045
10,3	0,0045	0,05	0,0053
2	0,0099		

Fonte: Bolhassani et al (2015) - Adaptada

Tabela 39 - Propriedades de Interface

Compor- tamento Tangencial	Comporta- mento Normal	Comportamento Coesivo - Comportamento Tração- Separação - Coeficiente de Rigidez(N/mm)			Damage Initiation(Mpa)			Damage Evolution
Coeficien- te de Atri- to	Hard Con- tact	Knn	Kss	Ktt	Nor- mal	Cisalha- mento I	Cisalha- mento II	Deslocamento Plásti- co(mm)
0,78		14000	14000	0	23,7	0,6	0	2,3

Fonte: Bolhassani et al (2015) - Adaptada

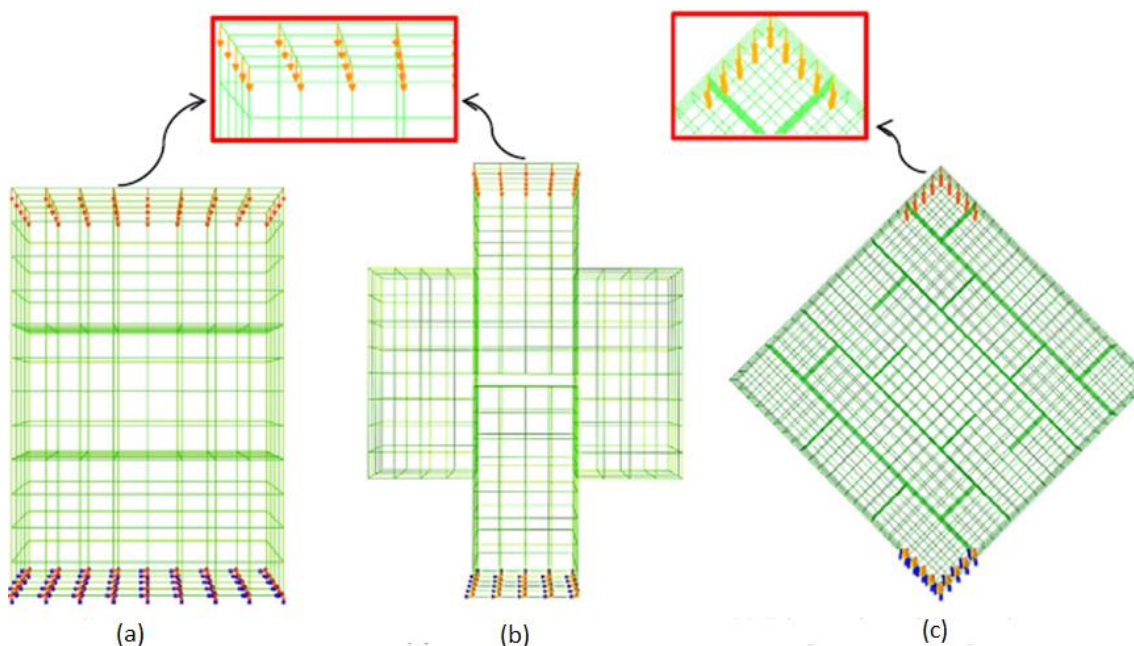
As características de plasticidade do material precisa de diferentes testes experimentais que estão ao longo do escopo da pesquisa. Na ausência de tais dados, os parâmetros de plasticidade foram determinados indiretamente por tentativa e erro no processo de calibração e pelo uso de valores comuns recomendados na literatura.

A argamassa é a única fonte de resistência de aderência contra as forças de cisalhamento ao longo das juntas verticais. Portanto a resistência a compressão da argamassa tipo S foi utilizada para representar o comportamento coesivo dos corpos de prova oco no modo I (normal). Contudo, para os corpos de prova gruteados a resistência a compressão do grute foi utilizado para o modo normal da fratura, veja tabela 3. Para simplificar, o modelo de *traction-separation* foi considerada a mesma rigidez normal e ao cisalhamento para as duas direções.

Os valores de deslocamento plástico, que foram empregados na degradação da resistência da argamassa, os valores foram calculados baseados na máxima separação do deslocamento da ponta da tração diagonal para alvenaria não gruteada como discutido anteriormente. Além do mais, a máxima separação considerou o mesmo para deslocamento plástico da diagonal do corpo de prova, calculado baseado no deslocamento relativo para 10% da resistência da curva de suave dos modelos ensaiados. Foi suposto que o *Hard Contact* se refere a uma interação sem qualquer amortecimento, em outras palavras, não ocorre a penetração das superfícies que podem ocorrer no modelo. Também, o coeficiente de atrito mais comum dos blocos de concreto está entre os intervalos de 0,6 a 0,8, em que o melhor ajuste foi capturado usando 0,78 neste estudo.

A malha do elemento finito e as condições de contorno são apresentadas na figura 39. As unidades foram modeladas utilizando uma malha cúbica de 50mm. Todos os modelos foram testados sob o controle de deslocamento por meio da aplicação de deslocamento no topo dos corpos de prova.

Figura 39 - Condições de Contorno e de Deslocamento – Prisma (a), Corpo de Prova Cisalhamento (b) e Tração Diagonal (c)



Fonte: Bolhassani et al (2015) - Adaptada

O modelo proposto pode ser utilizado facilmente para modelar paredes de alvenaria sem graute ou parcialmente grauteadas.

2.14 Moradabadi et al (2015)

O artigo intitulado "*A semi-random field finite element method to predict the maximum eccentric compressive load for masonry prisms*" apresenta um estudo a respeito de um aprimoramento na determinação do comportamento mecânico da alvenaria, uma vez que é de extrema importância para determinar a segurança das estruturas históricas de alvenaria e também para o cálculo das novas construções em alvenaria.

No entanto, existe um grau de incerteza na determinação das propriedades que constituem a alvenaria que são obtidos a partir de resultados experimentais, que é bastante elevada quando as propriedades do composto (alvenaria) são estimadas a partir das propriedades dos componentes.

Com o objetivo de superar estas limitações, Moradabadi et al (2015) apresenta uma nova metodologia para prever o carregamento máximo a compressão de prismas de alvenaria e para isso o artigo apresenta uma proposta de metodologia e os resultados detalhados.

De acordo com Brencich e Felice (2009), apesar da grande quantidade de resultados experimentais de alvenaria e do grande número de abordagens teóricas disponíveis atualmente sobre a estimativa da resistência a compressão da alvenaria, o comportamento da alvenaria ainda não é totalmente compreendido. De acordo com Ahmad e Ambrose (1986), tradicionalmente a resistência a compressão da alvenaria pode ser determinada através de duas abordagens que são expressão analítica, ou através de ensaios de prismas de 2 a 5 fiadas ou de paredinhas.

Os resultados a partir do ensaios experimentais tendem a ter comportamentos bastante variados devido a condição dos ensaios, variabilidade do material (tanto da unidade como da argamassa), e mão de obra. A seguir a tabela 41 apresenta resultado de dois trabalhos citados pelos autores que comprovam a variabilidade dos ensaios de resistência a compressão e módulo de elasticidade.

Tabela 40 - Coeficiente de Variação de Ensaios

Autores	Coeficiente de Variação - Resistência a Compressão	Coeficiente de Variação - Módulo de Elasticidade
Kaushik et al (2007)	0,23	0,34
Brencich e Felice(2009)	0,3	0,4

Fonte: Moradabadi et al (2015) - Adaptada

Com o objetivo de se obter uma maior precisão no valor da resistência a compressão da alvenaria tem se adotado modelos numéricos não-lineares. Segundo Moradabadi et al (2015) que para uma melhor estimativa é necessário aumentar a precisão da resistência da alvenaria, que poderia influenciar na segurança e no custo de estruturas relevantes.

No trabalho dos autores se utilizou o Método de Elementos Finitos Semi Aleatório, e também foi adotado uma metodologia probabilística para

determinar o carregamento máximo a compressão para dois tipos de prismas de alvenaria. Para simplificar o modelo, o conceito de semi aleatoriedade foi aplicada, a cada bloco e a camada de argamassa foi caracterizada como materiais diferentes. Os parâmetros de plasticidade aplicados na lei constitutiva dos materiais foram calibrados com resultados dos testes experimentais, os dados dos prismas foram obtidos anteriormente. Partindo desses resultados foi realizada a análise estocástica, e o carregamento máximo de compressão para cada prisma foi determinado de acordo com os resultados da análise probabilística.

Os testes foram realizados com carregamentos excêntricos (três ensaios para cada tipo) foram realizados 240 dias depois da construção dos corpos de provas, permitindo dessa maneira uma melhor precisão dos resultados numéricos.

No trabalho de Moradabadi et al(2015) o X_i são as propriedades do material, ou seja, módulo de elasticidade, coeficiente de poisson, tensão de escoamento, entre outras propriedades. Além disso o índice i define o tipo de prisma em que $i = 1$ são prismas de blocos ceramicos e $i = 2$, para blocos vazados de concreto, e $Y_{in}(com n = 1)$ e o carregamento máximo de compressão do modelo. Com base dessas informações os autores se utilizaram das seguintes propriedades do material, conforme tabela 42. Vale destacar que foram apresentadas neste texto as propriedades de blocos de concreto e também da argamassa.

Tabela 41 - Caracterização das Variáveis de Entrada dos Materiais e a Função de Distribuição

Blocos de Concreto			
Parâmetro	Média	Distribuição	Unidade
Módulo de Elasticidade	9200	Normal	MPa
Coeficiente de Poisson	0,2	Determinística	
Tensão de ruptura do concreto	35,7	Normal	MPa
Tensão de ruptura de tracao	6,5	Normal	MPa
Argamassa			
Parâmetro	Média	Distribuição	Unidade
Modulo de Elasticidade	313	Normal	MPa
Coeficiente de Poisson	0,15	Deterministica	
Tensão de ruptura do concreto	7,0	Normal	MPa
Tensão de ruptura de tracao	3,6	Normal	MPa

Fonte: Moradabadi et al (2015) - Adaptada

2.15 Almeida et al(2016)

Alvenaria era uma das principais técnicas usadas nas construções das estruturas antigas e ainda é usada amplamente utilizada nas novas construções. Estas técnicas visam satisfazer exigências mais elevadas em termos de capacidade de carga e aumentar a resposta de ductilidade de elementos de alvenaria.

Um número considerável de técnicas de fortalecimento são baseadas atualmente em aplicação de sobreposição de reforço. Os resultados obtidos foram utilizados para obter leis constitutivas ortotrópica da interface baseada no critério de falha Mohr Hiperbólico e critério de falha de Mohr-Coulomb.

As sobreposições de reforço adicionais podem ser aplicadas à alvenaria existente com o objetivo de melhorar seu comportamento estrutural. Essa técnica tem uma importância especial em áreas de alta atividade sísmica, como cumprir com os termos da norma regulamentadora de resistência ao carregamento horizontal, em particular ações sísmicas. De acordo com Deghani et al (2013) afirma que a técnica de Compósitos de Cimentí-

cios Deformação de Endurecimento (SHCC) baseado no sistema de fortalecimento pode induzir ao aumento da capacidade de cisalhamento da alvenaria, para melhorar deformabilidade e para aprimoramento da capacidade de dissipação de energia durante o carregamento cíclico.

Segundo Valuzzi et al (2002), Prakash e Alagusundaramoorthy (2008) e Bruedern et al (2009), a resposta mecânica da interface é diferente entre os materiais sujeito para carregamento no plano é um importante tópico para o cálculo das novas construções e para reabilitação de estruturas. Apesar do arranjo distinto de carregamento foi tentando, introduzindo uma distribuição de tensão de cisalhamento pura da junta e praticamente impossível.

A caracterização do comportamento ao cisalhamento das juntas de argamassa de acordo a norma EN1052-3 é realizada através da realização de testes em prismas de três blocos. O modo de falha apresenta uma clara tendência a ocorrência de *stepped crack*, que pode causar rotações não planejadas, conforme apresentada por Lourenço et al (2004).

A avaliação numérica apresentada por Hofmann et al (1990) apresenta uma configuração do modelo de Hofmann et al (1990), conforme figura 40, conduziu para uma melhor aproximação de uma distribuição uniforme de tensão de cisalhamento ao longo da junta do que outros modelos.

Uma alternativa para o modelo de teste de cisalhamento proposto por Vasconcelos e Lourenço (2009) também usa corpos de prova com duas unidades conforme a figura 40. Além disso, duas finas superfícies de teflon são posicionados entre o prato de aço e o corpo de prova para minimizar efeitos de flexão através do atrito.

Os valores de dois parâmetros de resistência, coesão c ou f_{v0} como descrito pela EN1052-3, e a tangente do ângulo de atrito $\mu = \tan \varphi$, para diferentes tipos de interface obtidos pelos prismas de dois e três blocos como apresentados na tabela 42

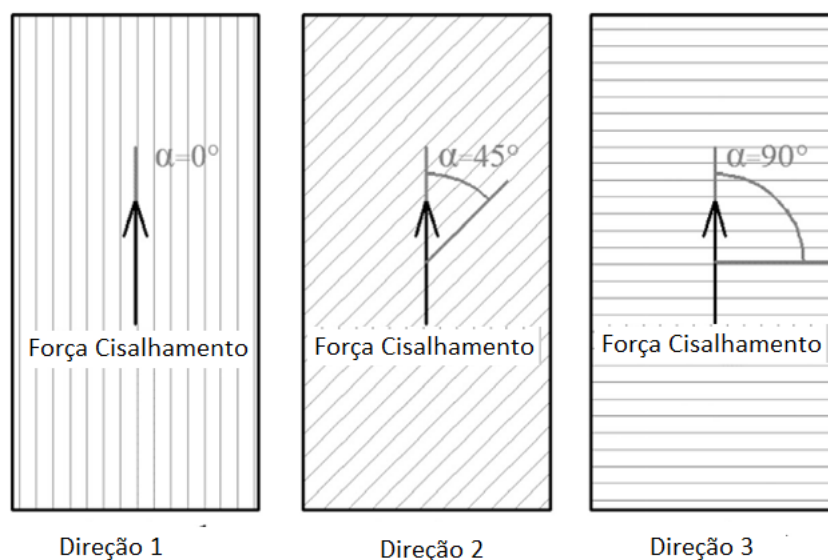
Tabela 42 - Parâmetros de Resistência para diferentes tipos de interface

Autores	Tipo de Ensaio	Interface	$c(f_{v0})$ – MPa	μ
Lourenço et al(2004)	Prisma de três blocos	Bloco de Concreto/Micro-Concreto	1,39	1,03
Gabor et al(2006)		Bloco Cermico/Argamassa de Cimento	1,60	0,90
Alecci et al(2013)		Bloco Cerâmico/Argamassa de Cimento	0,53	-
Vasconcelos e Lourenço(2013)	Prisma de dois blocos	Granito/Argamassa de cal	0,36	0,63
Abdou et al(2006)		Bloco Cerâmicos/Argamassa de Cimento	1,61	1,05

Fonte: Almeida et al (2016) – Adaptado

A resistência a adesão entre a argamassa e bloco cerâmico foi avaliada por meio do teste de arrancamento seguindo a norma EN1015-12. Após o nivelamento inicial do equipamento, o aumento da força de tração aplicada no corpo-de-prova uma taxa de 40N/s. Baseado no resultado de 16 testes, obteve-se uma média de resistência a coesão de 0.6MPa com um coeficiente de variação igual a 14%.

A fim de considerar as características ortotrópica da superfície dos blocos cerâmicos, com um padrão de nervura em um direção, três orientações de carregamento foram investigadas para avaliar o comportamento ao cisalhamento da interface e a direção do carregamento segue a superfície do bloco cerâmico (0, 45 e 90, conforme figura 40).

Figura 40 - Representação da direção de carregamento investigado

Fonte: Almeida et al (2016) – Adaptado

A iniciação e propagação das fissuras ao cisalhamento ao longo do plano da interface foi assegurado por meio de dois entalhes executados ao longo das faces do corpo de prova.

A avaliação dos resultados gerais foram realizados considerando os valores médios. Os valores residuais da tensão tangencial foram consideradas iguais para tensão tangencial obtida quando a resposta *Slope Tangential Stress-Slip* alcançou um valor mínimo comum entre todos os corpos de prova testado, como descrito subsequentemente. As equações que foram utilizadas para calcular a tensão vertical, tensão tangencial de pico, e tensão tangencial residual, vale destacar que por meio dessas equações os autores calcularam os valores médios de resistência.

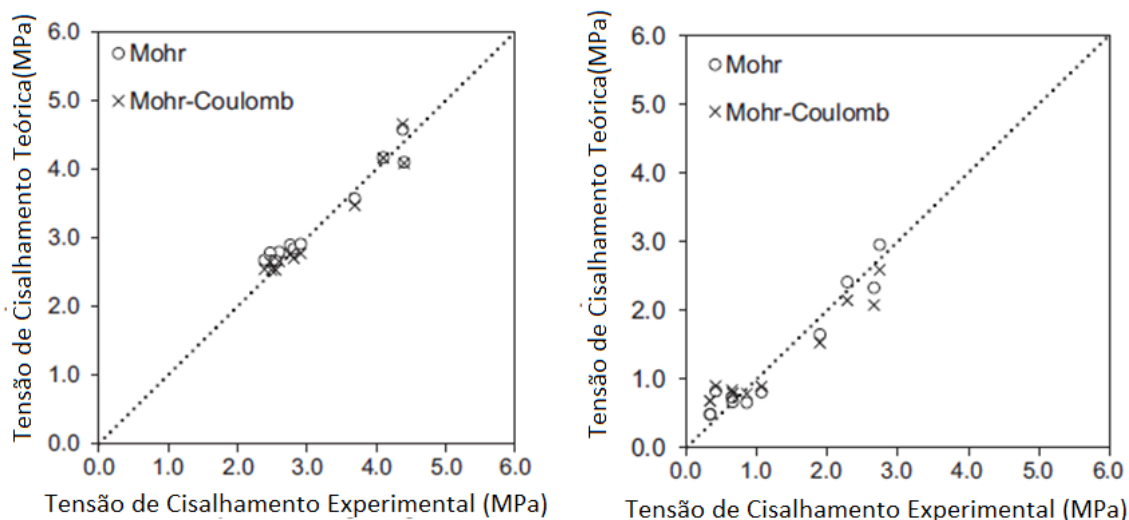
$$\sigma = \frac{N}{A_{eff}}$$

$$\tau_p = \frac{T_p}{A_{eff}}$$

$$\tau_r = \frac{T_r}{A_{eff}}$$

Em geral, ambos critérios apresentaram boa correlação com os resultados experimentais, apesar de que o critério de Mohr pode ser melhor para descrever o comportamento da interface e também da região de tração, de acordo com a figura 41. Não obstante, o critério torna evidente que a possibilidade de caracterizar ainda mais a interface de cisalhamento a resposta *Stress-Slip* nas regiões de tração seria benefício para definição dos parâmetros em cada caso. Contudo o padrão de teste teria de ser adaptado afim de permitir a combinação de carregamento esforços de tração e cisalhamento durante o ensaio.

Figura 41 - Experimental vs Criterios Estimativos para carregamento na direção de 90 graus

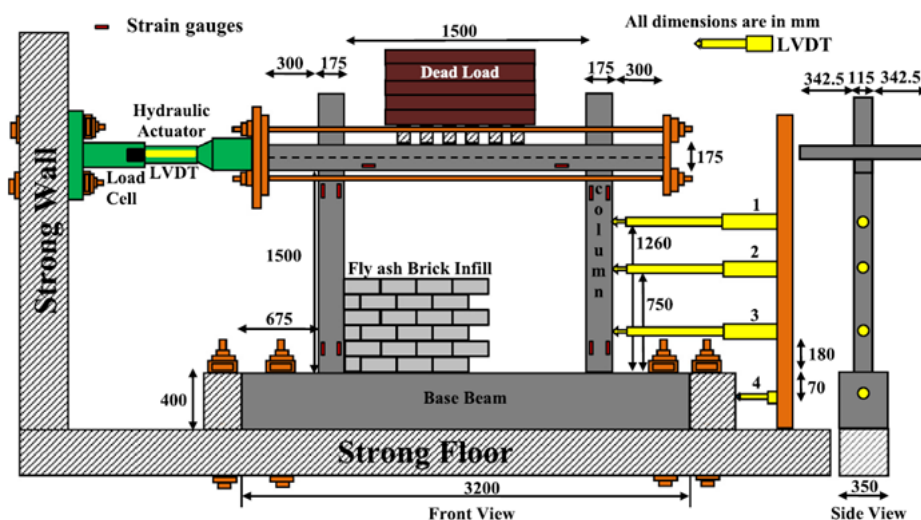


Fonte: Almeida et al (2016) – Adaptado

2.16 Basha e Kaushik (2016)

Basha e Kaushik (2016), em seu artigo apresentam o comportamento de onze pórtico de concreto armado (RC) preenchidas com alvenaria de meia-escala e uma única escala sob carregamento lateral lento em plano cíclico, e esse conjunto de paredes foram estudadas em dois estágios, a figura 42 apresenta um a ilustração dessas paredes.

Figura 42 - Detalhes da Instrumentação e Preparação do Ensaio



Fonte: Basha e Kaushik (2016) – Adaptado

Os resultados obtidos no primeiro estágio (oito quadros), de acordo com os autores, mostraram que os pórticos preenchidos com blocos, tanto de escala 1:1 quanto 1:2, apresentaram maior resistência, rigidez e dissipação de energia do que os pórticos não preenchidos.

Na maioria dos casos, do primeiro estágio, os pilares falharam devido ao cisalhamento, embora a alvenaria usada fosse bastante fraca. A fim de atrasar a falha de cisalhamento nos pilares, o projeto de cisalhamento foi aprimorado de acordo com os padrões sísmicos existentes, e os testes foram repetidos em três estruturas melhoradas no segundo estágio.

A descrição das paredes estudadas pelos autores são apresentadas na tabela 44, é importante que o resultados que serão apresentados aqui são apenas das paredes de 5 a 8. Além disso, as propriedades dos materiais utilizados estão apresentados na tabela 45 a seguir.

Tabela 43 - Tipos de Paredes Testadas

Amostra	Tipo de Pórtico
1	Não preenchido com Alvenaria - Dúctil
2	Não preenchido com Alvenaria - Não Dúctil
3	Preenchido com Blocos de Escala 1:1 - Dúctil
4	Preenchido com Blocos de Escala 1:1 - Não Dúctil
5	Pórtico Reforçado - Preenchido com Blocos de Escala 1:1 - Dúctil
6	Pórtico Reforçado - Preenchido com Blocos de Escala 1:1 - Não Dúctil
7	Preenchido com Blocos de Escala 1:2 - Dúctil
8	Preenchido com Blocos de Escala 1:2 - Não Dúctil

Fonte: Basha e Kaushik (2016) – Adaptado

Tabela 44 - Propriedades dos Materiais

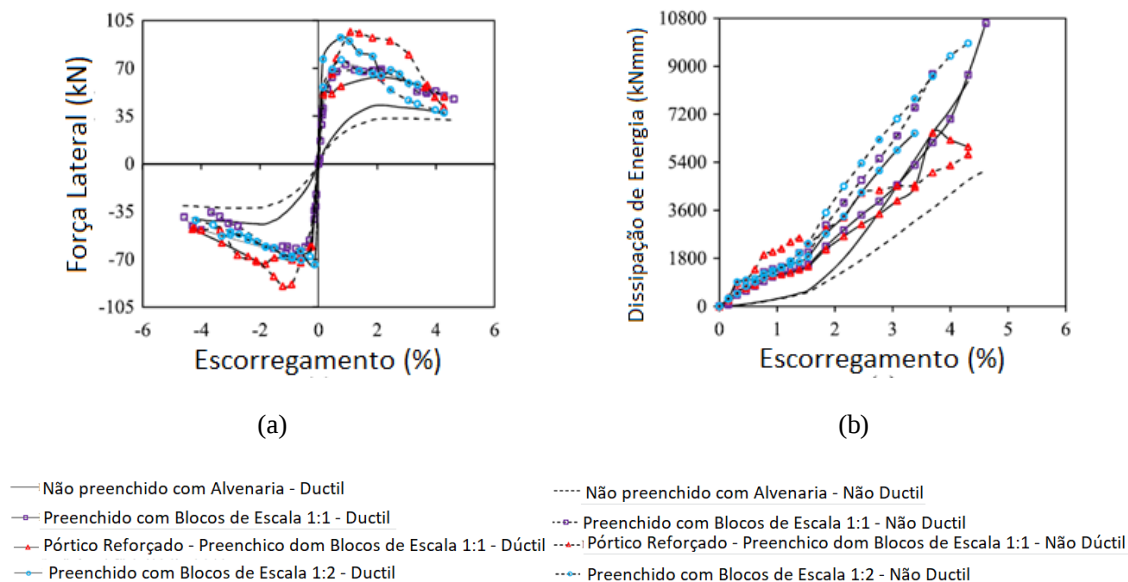
Material	Propriedades	Unidades	Escala 1:1	Escala 1:2
	Dimensões	mm	230 x 110 x 75	110 x 55 x 38
Bloco Cerâmico	Resistência à Compressão		5,7	7,3
	Módulo de Elasticidade		3900	4960
	Resistência à Tração		0,54	1
Argamassa	Resistência à Compressão		17,3	17,3
	Módulo de Elasticidade		7400	7400
	Resistência à Flexão	MPa	3,78	3,78
	Resistência à Tração		1,2	1,2
Prisma	Resistência à Compressão		3,9	4,6
	Módulo de Elasticidade		2700	2800
Paredinha	Resistência ao Cisalhamento		0,14	9,14
	Módulo de Elasticidade Transversal		730	730

Fonte: Basha e Kaushik (2016) – Adaptado

Quanto aos resultados das paredes de 5 a 8, é possível perceber muita semelhança no comportamento das paredes bem como na energia de dissipação, conforme pode ser visto na figura 43 que apresenta o gráfico de

força x deslocamento das paredes e também o comportamento da energia de dissipação das amostras.

Figura 43 – Curva Força Lateral vs Escorregamento (a) e Dissipação de Energia vs Escorregamento (b)



Fonte: Basha e Kaushik (2016) – Adaptado

Algumas considerações a respeito do trabalho:

- 1) O comportamento das paredes não apresenta influência devido a diferença de escala quanto ao comportamento de esforços de cisalhamento;
- 2) Quanto a caracterização dos materiais, os autores se atentaram para uma maior detalhamento dos parâmetros.
- 3) Esse artigo se mostra importante no campo dessa pesquisa, uma vez que apresenta que o efeito da escala não apresenta uma influência no comportamento do modelo.
- 4) Com base nos dados desse trabalho bem como de outros aqui apresentados é possível obter uma correlação entre os valores para diferentes escalas.

2.17 Baraldi e Cecchi (2017)

Nesse trabalho, o comportamento não linear das interfaces é assumido para ser governado pelo critério simples de Mohr-Coulomb, caracterizado pela coesão c e o coeficiente de atrito $\mu = \tan \varphi$. A equação a seguir apresen-

ta como esses parâmetros se relacionam para obtenção da tensão de cisalhamento.

$$|\sigma_s| \leq c - \sigma_n * \tan \varphi$$

Onde:

σ_s - a tensão de cisalhamento genérica sobre a interface com uma direção do plano genérico ($\sigma_s^2 = \sigma_{s,1}^2 + \sigma_{s,2}^2$).

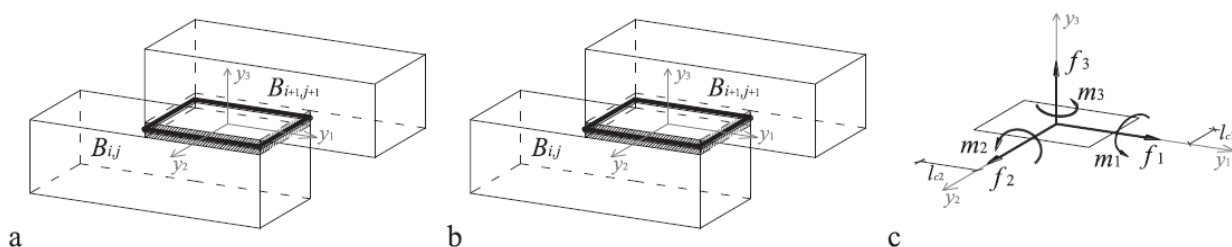
Vale destacar que os valores negativo para tensões normal de compressão. Além disso, a tensão normal precisa ser menor que a resistência a tração, $\bar{\sigma}_t$, se apresenta:

$$\sigma_n \leq \bar{\sigma}_t$$

Por exemplo, interfaces secas não suportam tração e tem a coesão negligenciadas, onde as juntas de argamassa são caracterizadas pela resistência admissível a tração ($\bar{\sigma}_t$) que pode ser determinada por meio de testes experimentais, por meio da norma EN1015-11:2007. Em qualquer caso, os tipos de interface seca ou argamassada são caracterizadas pelo comportamento a atrito e resistência a compressão ilimitada e assumida.

Considerando uma interface genérica horizontal e vertical (figura 44.a e 44.b) e assumindo um sistema de coordenada, $y_1 y_2 y_3$, com o plano $y_1 y_2$ coincidente com a interface *mid-plane* e y_3 ortogonal ao plano, forças e momentos exercidos por dois blocos adjacentes no centro da interface que são: força normal $f_3 e_3 = f_n e_3$, força de cisalhamento $f_1 e_1, f_2 e_2$, momentos fletores $m_1 e_1, m_2 e_2$ e torção $m_3 e_3$, conforme a figura 44c.

Figura 44 - Representação do Plano Genérico de Interface Horizontal(a) e Vertical(b) - Sistema de Coordenadas Genéricas de forças e momentos da Interface

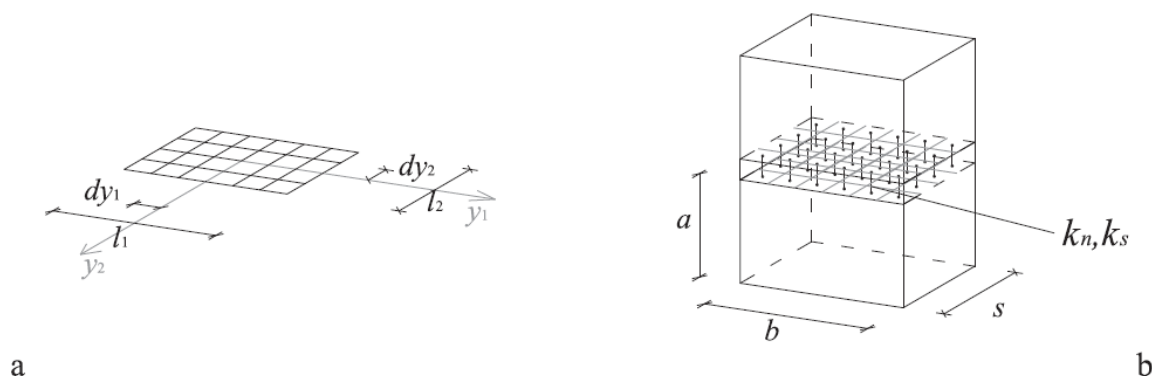


Fonte: Baraldi e Cecchi (2017) – Adaptado

Com o propósito de obter uma interface baseado nas equações 7 e 8 mas relacionado as ações da interface, um modelo simples de interface e introduzido, a área de interface é subdividida em porções retangulares e um

conjunto de molas atuando sobre cada sub-elemento central e definido (figuras 45.a e 45.b)

Figura 45 - Discretização da Interface(a) - Conjunto de Molas para Modelagem de uma Interface Genérica(b)



Fonte: Baraldi e Cecchi (2017) – Adaptado

Cada mola é caracterizada por uma rigidez normal(k_n) e rigidez ao cisalhamento(k_s) e o critério de Mohr-Coulomb e sem tração ou critério de resistência a tração são adotados para restrição a força normal e cisalhamento transmitido por cada mola. No caso de juntas de argamassa, k_n e k_s , depende do módulo de elasticidade da argamassa e coeficiente de Poisson (E_m, v_m) e a espessura da junta (e), onde no caso de juntas secas, o valor de rigidez normal pode ser ajustado igual a um grande valor fictício para evitar a compactação entre blocos adjacentes. A equação utilizada para calcular a rigidez normal e rigidez ao cisalhamento são apresentadas a seguir.

$$k_n = \frac{E_m}{e}$$

$$k_s = \frac{E_m}{[2 \cdot (1 + v_m)]}$$

O principal propósito dos autores com este modelo era avaliar numericamente o comportamento da interface e a sua resistência, discutindo as distribuições de tensões normal e cisalhamento atuando sobre a interface considerada.

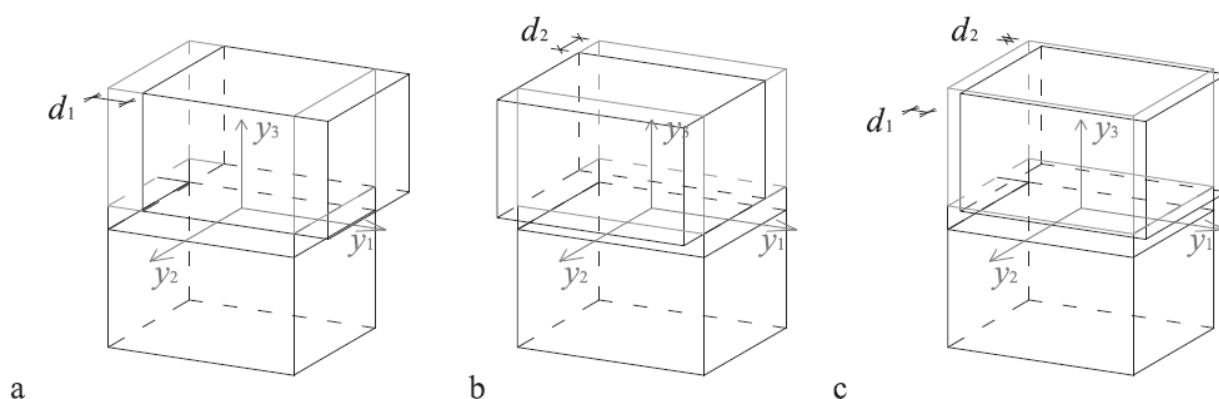
A junta seca da interface entre dois blocos rígidos foi estudado por Bustamante (2003) foi aqui considerada (Figura 45.b). As propriedades de interface utilizada neste modelo são apresentadas na tabela 45 a seguir:

Tabela 45 - Parâmetros para Caracterização da Interface

Parâmetro	Valor	Unidade
Rigidez Normal	2,4	MPa/mm
Rigidez ao Cisalhamento	1	MPa/mm
Módulo de Elasticidade	2,4	MPa
Coefficiente de Poisson	0,2	
Coefficiente de Atrito	0,7	

Fonte: Baraldi e Cecchi (2017) – Adaptado

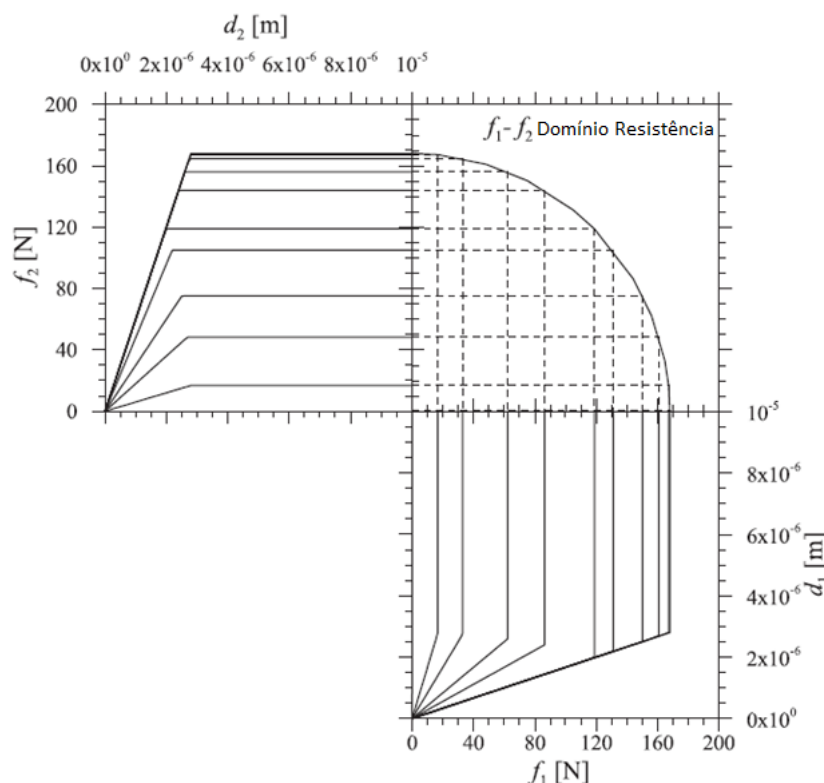
A resistência ao cisalhamento da interface é estudada pela adoção baseada no modelo simples de mola sobre subdivisão de interface e molas elásticas perfeitamente plásticas. Esta condição representa uma distribuição uniforme das tensões normal e de cisalhamento sobre toda a interface. Além disso, é preciso pontuar que neste caso o número de subdivisão da área de interface não afeta os resultados. A figura 46 apresenta a direção e o sentido dos vários incrementos que foram aplicados para se analisar o comportamento ao cisalhamento, essa variação foi aplicado no plano y_1y_2 , isso foi realizado, de acordo com os autores, para obtenção de uma resistência ao cisalhamento da interface ao longo das direções do plano.

Figura 46 - Deslocamento Relativo da Interface

Fonte: Baraldi e Cecchi (2017) – Adaptado

Com base nesses estudos, os autores obtiveram um gráfico, figura 47, que possibilita verificar a tensão de cisalhamento em cada uma das direções dos planos, ou seja, y_1 e y_2 bem como a combinação das tensões de cada um dos planos.

Figura 47 - Análise do Incremento para Avaliação da Resistência ao Cisalhamento da Interface nas duas Direções dos Planos



Fonte: Baraldi e Cecchi (2017) – Adaptado

Sendo assim, os autores observaram que a resistência ao cisalhamento depende apenas do coeficiente de atrito e da força normal aplicada, então o valor corresponde ao longo da direção do plano genérico e obedece a seguinte equação:

$$f_{s,u} = -\mu \cdot f_3$$

Além disso, os autores notaram que se for analisada apenas uma das duas direções isoladamente é possível observar um comportamento linear e crescente da força em relação ao deslocamento. No entanto, ao se analisar o comportamento do plano propriamente dito, ou seja, deslocamento relativo ao plano y_1y_2 , nota-se que o domínio de resistência é representado por um círculo, que segue a equação a seguir.

$$f_1^2 + f_2^2 \leq f_{s,u}^2$$

Levando em consideração a coesão e a resistência a tração, a resistência ao cisalhamento da interface é definido por meio do critério de resistência de Mohr-Coulomb, conforme a equação:

$$f_1^2 + f_2^2 \leq [\mu \cdot (f_t - f_n)]^2$$

Vale destacar que apesar da existência dessas duas maneiras de se representar analiticamente a resistência ao cisalhamento no plano, diversos testes sem qualquer aproximação de domínio em que vários autores, de acordo com Orduna e Lourenço(2005), utilizam a seguinte equação analítica.

$$\left(\frac{f_1}{f_{s,u}}\right)^2 + \left(\frac{f_2}{f_{s,u}}\right)^2 \leq 1$$

2.18 Knox et al (2018)

Os autores nesse artigo tinham como objetivo apresentar uma comparação entre blocos de escala real com blocos de escala 1:2. A comparação entre as escalas foi realizada utilizando prismas para investigação de propriedades de compressão (assim como Mohamed et al (2011)) e painéis de parede para análise de propriedades provenientes do cisalhamento. Vale destacar que para esse estudo foram utilizados blocos cerâmicos.

Segundo os autores os efeitos da escala nos blocos podem ser investigados para as seguintes propriedades:

- a) Resistência à compressão;
- b) Módulo de elasticidade longitudinal e transversal;
- c) Resistência à tração diagonal.

Em um primeiro momento é apresentado, em forma de gráficos e tabelas, a comparação entre a resistência a compressão e também o módulo de elasticidade longitudinal dos prismas, conforme tabelas 46 e 47.

Tabela 46 – Resultados dos Prismas

	Resistência à Compressão (MPa)		Módulo de Elasticidade (MPa)	
	Escala 1:1	Escala 1:2	Escala 1:1	Escala 1:2
Média	6,4	8	1931	1817
Mediana	5,8	8,1	2075	1939
Máximo	8,7	10,8	2304	2288
Mínimo	4,5	6,4	1389	1181
Quartil Inferior	5,4	6,9	1637	1582
Quartil Superior	7,6	8,1	2207	2054
Desvio Padrão	1,7	1,6	386	410
CV (%)	26,1	19,8	20	22,5

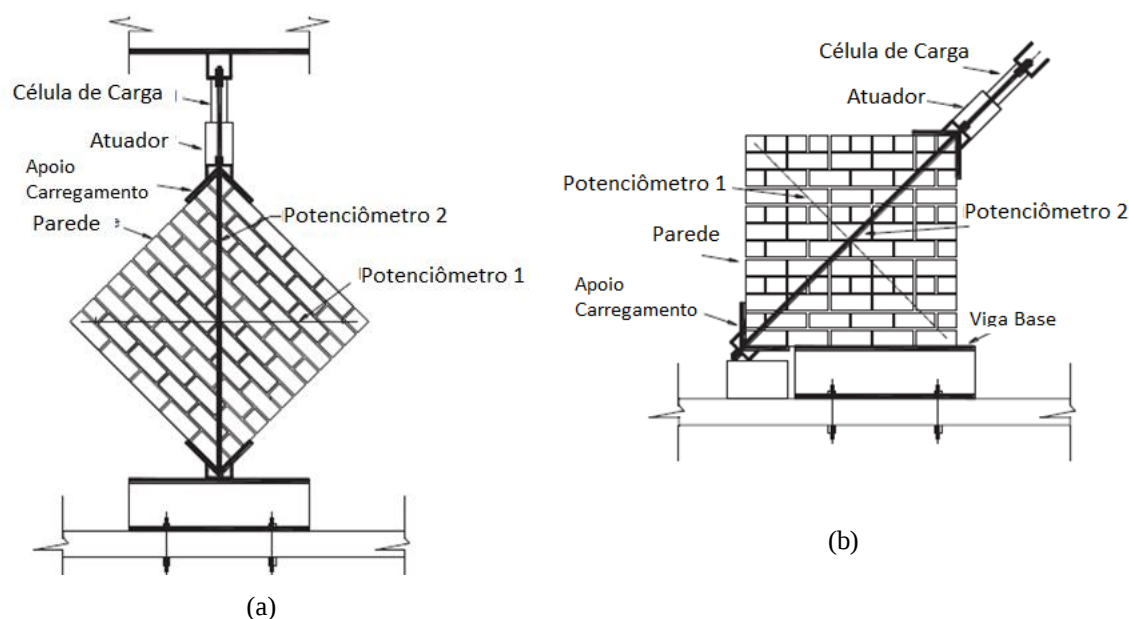
Fonte: Knox et al (2018) – Adaptado

Tabela 47 - Resultado dos Blocos

	Resistência à Compressão (MPa)	
	Escala 1:1	Escala 1:2
Média	13,1	17,7
Mediana	12,9	16,9
Máximo	14,8	26,6
Mínimo	11,9	11,9
Quartil Inferior	12,3	15,5
Quartil Superior	13,7	18,2
Desvio Padrão	1,3	4,9
CV (%)	10,0	28,0

Fonte: Knox et al (2018) – Adaptado

Além disso, os autores investigaram também propriedades cisalhantes através do estudo de compressão diagonal em painéis, conforme figura 48.a e 48.b.

Tabela 48 - Força aplicada de acordo com E519 (a) - Força aplicada diagonalmente a parede (b)

Fonte: Knox et al (2018) – Adaptado

A figura 48.a, apresenta o teste de compressão diagonal seguindo o modelo de aplicação de força especificado pela norma ASTM E519. Enquanto que a figura 48.b, apresenta força sendo aplicada diagonalmente ao corpo de prova.

Para efeito de análise dos valores, foi calculado o módulo de elasticidade transversal de duas maneiras distintas. A primeira equação considerada foi a especificada pela ASTM E 519 e segunda equação considerada foi

proveniente da resistência dos materiais. A tabela 49 apresenta um comparativo dos valores.

$$G = 0,707 * \frac{P}{A_n * \gamma}$$

$$G = \frac{E}{1 + \nu}$$

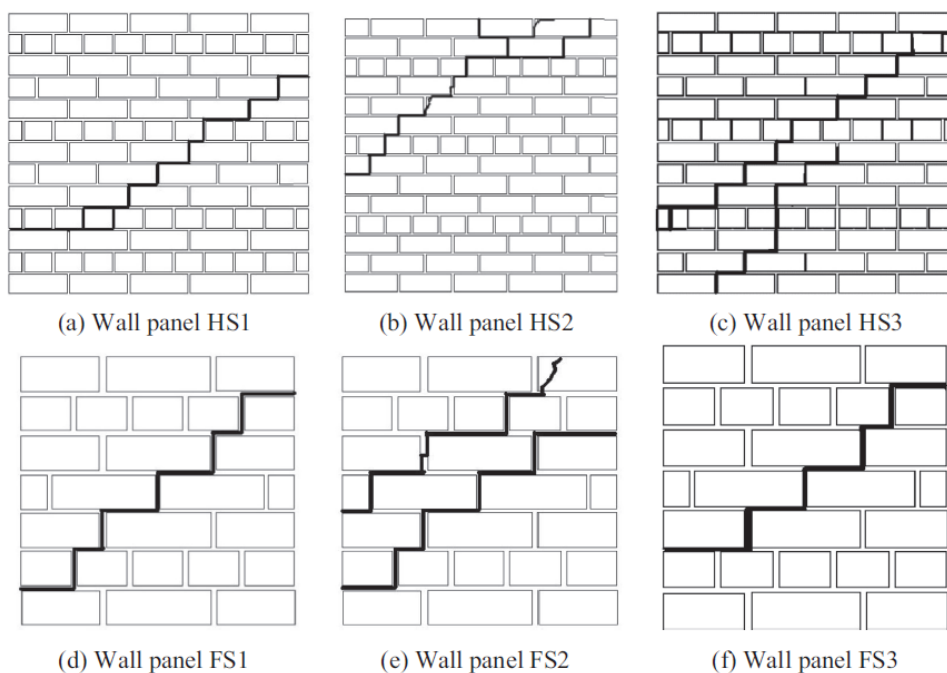
Tabela 49 - Resultado Compressão Diagonal

Corpo de Prova	P _{máx} (kN)	F _{máx} (kN)	Tensão de Cisalhamento Máximo (MPa)	γ	G (Gpa)	G (Gpa) - E519	E (Gpa)
HS1	30,9	21,8	0,159	0,1283	0,54	0,124	1,4
HS2	75,9	53,7	0,389	0,1016	0,7	0,383	1,8
HS3	79,7	56,3	0,408	0,0605	0,99	0,674	2,5
FS1	13,8	9,7	0,07	0,568	0,11	0,012	0,3
FS2	51,7	36,6	0,265	0,1228	0,32	0,216	0,8
FS3	33,3	23,5	0,171	0,1581	0,31	0,108	0,8
Média (HS)	62,2	43,9	0,3	0,1	0,7	0,4	1,3
CV (HS) (%)	43,7	43,7	43,5	35,3	30,7	69,9	29,3
Média (FS)	42,5	30,1	0,2	0,1	0,3	0,2	0,8
CV (FS) (%)	30,6	30,8	30,5	17,8	2,2	47,1	1,8

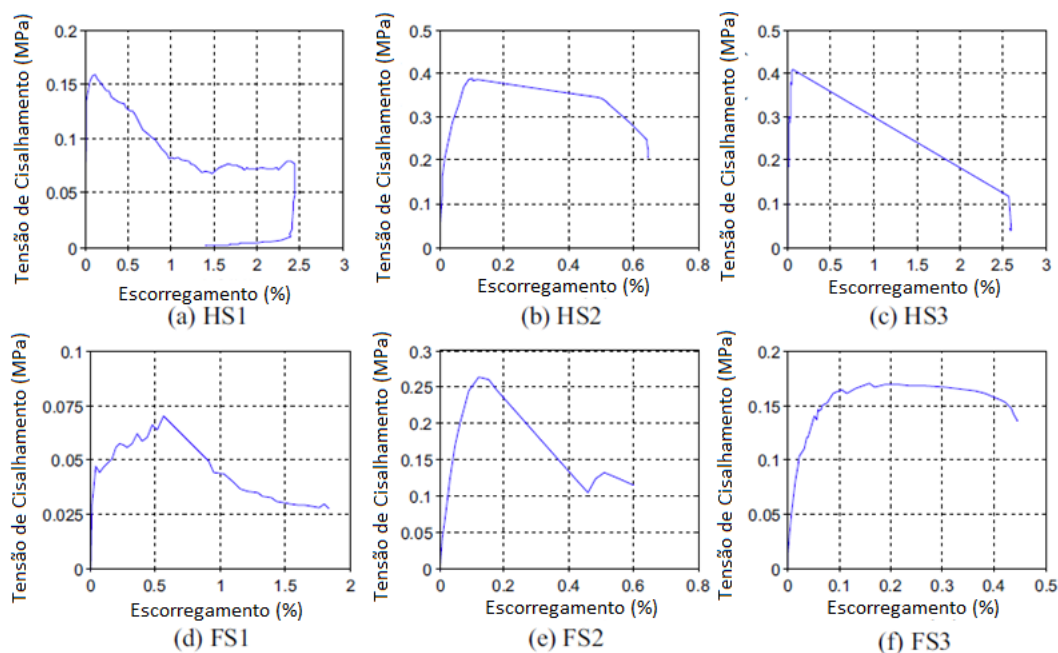
Fonte: Knox (2017) – Adaptado

Além disso, foram analisadas as fissuras dos corpos de prova, as figuras 48 e 49 apresentam a análise realizado pelos autores.

Figura 48 – Ruptura das Paredes



Fonte: Knox (2017) – Adaptado

Figura 49 - Tensão de Cisalhamento x Escorregamento

Fonte: Knox (2017) – Adaptado

As contribuições a serem destacadas desse trabalho são:

- 1) Verificou-se que os efeitos da escala têm um nível variável de influência dependendo do modo de falha do elemento de alvenaria.
- 2) Essas variações não são significativas quando está sendo verificado propriedades referentes a compressão (resistência a compressão e módulo de elasticidade longitudinal);
- 3) Os resultados do teste do painel de parede mostraram que há uma influência na resistência à tração diagonal e no módulo de cisalhamento, e, portanto, deve ser levado em consideração ao testar alvenaria não armada.

2.19 Alotaibi e Galal (2018)

Alotaibi e Galal (2018) apresentam um estudo a respeito uso de fibra de carbono para reforço em pilares construído com blocos de concreto. A razão pela qual esse artigo é inserido na revisão bibliográfica sobre blocos de escala reduzida é que o trabalho utilizou para construção dos pilares blocos de concreto de escala reduzida 1:2. Foram testados 28 pilares de blocos de concreto que foram todos totalmente grauteados.

Segundo os autores, a resistência a compressão dos blocos alcançada nos ensaios foi de 21.73 MPa com um coeficiente de variação de 9.4%. A argamassa utilizada foi do tipo S que alcançaram uma resistência média de 12.4 MPa, com um coeficiente de variação de 4.3%. Já o graute utilizado apresentava uma resistência média de 15 MPa, porém não foi informado o coeficiente de variação do ensaio do material.

Além disso, foram construídos três prismas não armados construído com dez blocos de altura para se obter uma resistência média a compressão da alvenaria grauteada e partindo desse conjunto de corpos de prova o valor médio da resistência foi de 10.94 MPa com um coeficiente de variação de 1.7%.

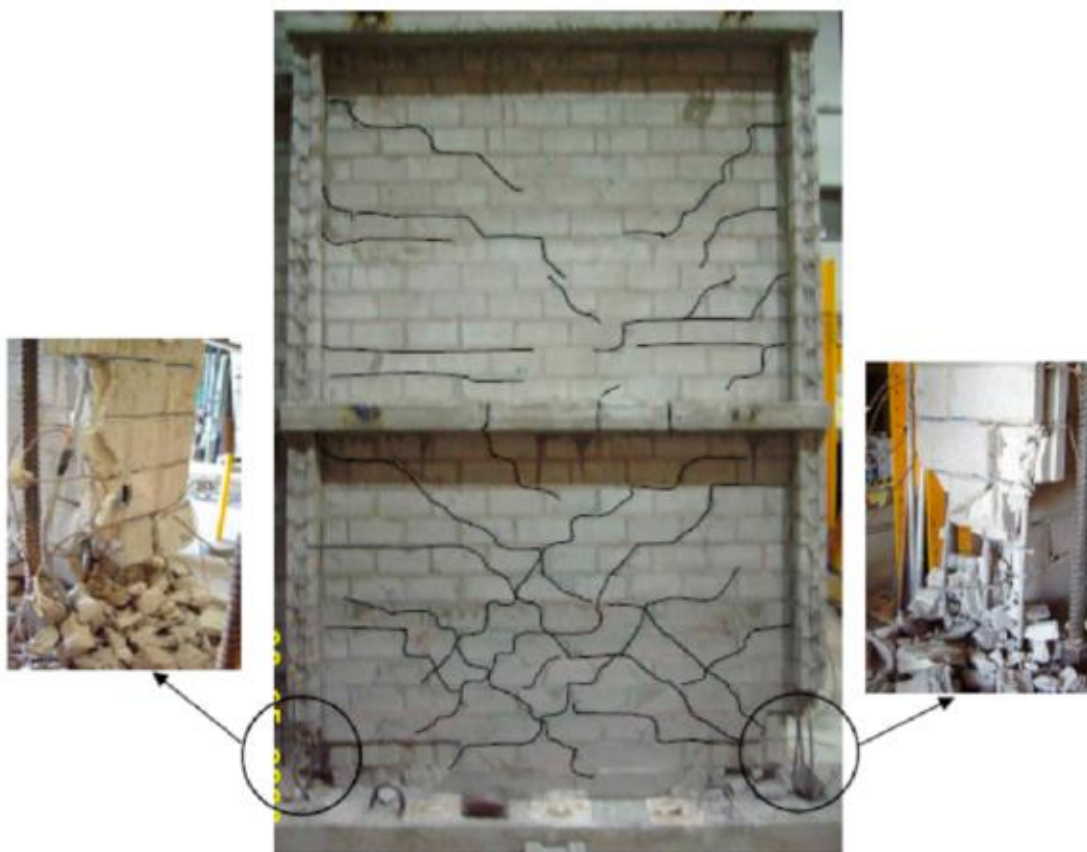
Algumas considerações sobre o trabalho:

- 1) A partir dos resultados apresentados pelos autores é possível notar que o fato de se utilizar blocos de escala reduzida não comprometeu o resultado final do artigo;
- 2) Assim como em outros trabalhos científicos de alvenaria, não é apresentada uma caracterização que apresente o módulo de elasticidade dos materiais (bloco, argamassa, graute e prisma) que estão sendo utilizados para construção das amostras, foi apresentado apenas o módulo de elasticidade da armadura e das fibras de reforço.

Assim como no caso das paredes é apresentado um detalhamento minuciosos dos resultados dos corpos de prova, apresentando comparação entre diagramas de força vs deslocamento, degradação da rigidez, análise de deformação da armadura bem como da fibra de carbono.

2.20 Bedeir et al (2019)

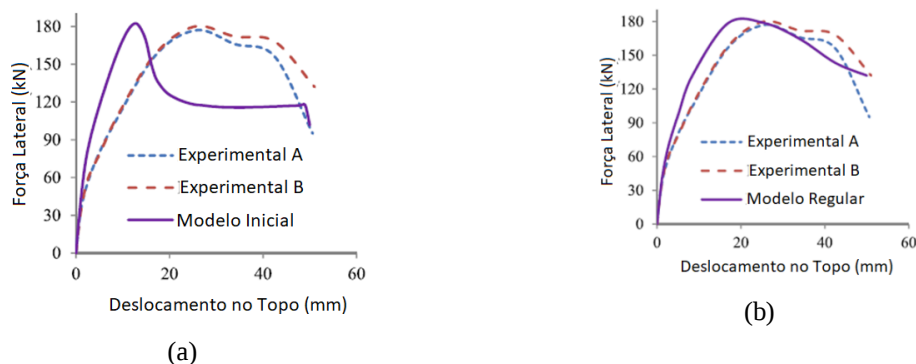
Neste trabalho, os autores apresentam o resultado de modelagem numérica de painéis de dois andares de alvenaria armada de blocos de concreto (escala 1:3) sujeitos ao carregamento lateral cíclico até a ruptura, conforme figura 50.

Figura 50 – Ensaio de Paredes – Escala 1:3

Fonte: Bedeir et al (2019) – Adaptado

Os resultados de dez paredes individuais testadas experimentalmente foram utilizados para verificar a abordagem de modelagem utilizada para gerar o modelo de construção. Os modelos foram capazes de capturar com precisão a resposta de paredes individuais e do edifício testado, conforme a figura 51 a seguir.

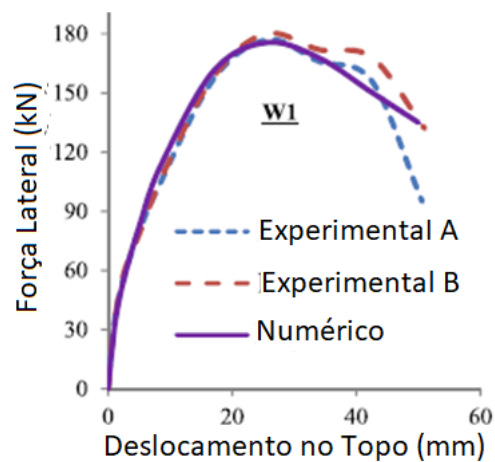
Figura 51 – Força Lateral vs Deslocamento – Experimental A (Movimento de Empurrar a Parede) – Experimental B (Movimento de Puxar a Parede)- Modelo Inicial (a) e Modelo regular (Padrão) (b)



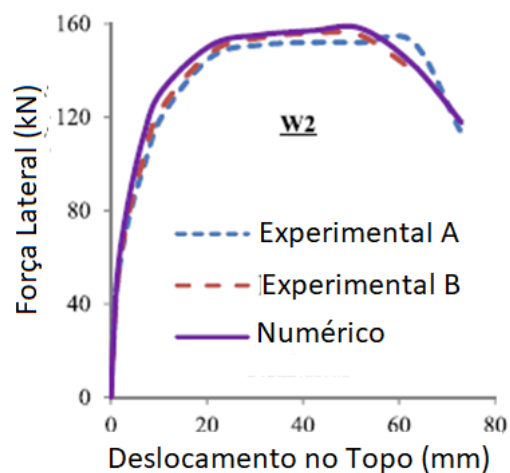
Fonte: Bedeir et al (2019) – Adaptado

Além disso, os autores apresentam a calibração de seis paredes que apresentaram um comportamento semelhante ao apresentado na figura 52.b, conforme figura 51.

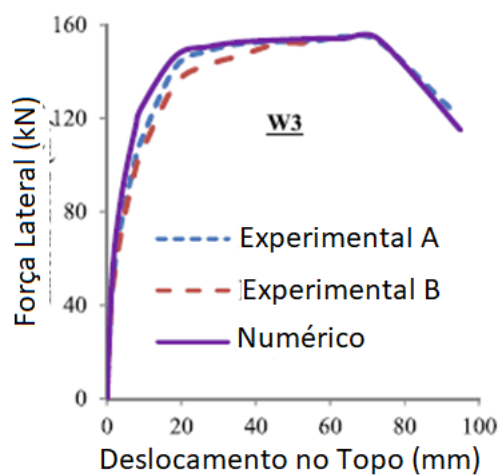
Figura 52 – Força Lateral vs Deslocamento – Experimental A (Movimento de Empurrar a Parede) – Experimental B (Movimento de Puxar a Parede)- Modelo Numérico



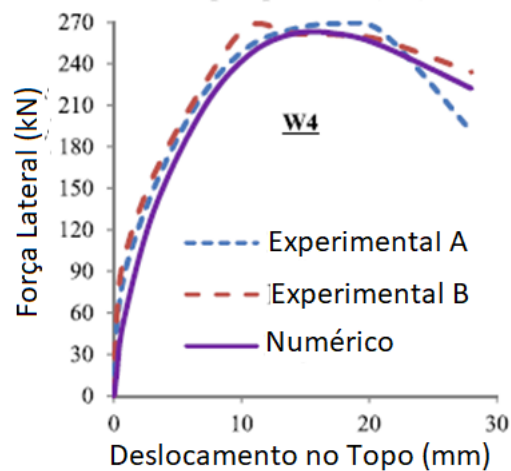
(a)



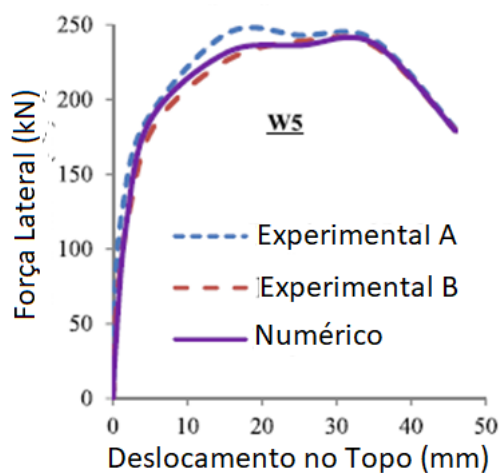
(b)



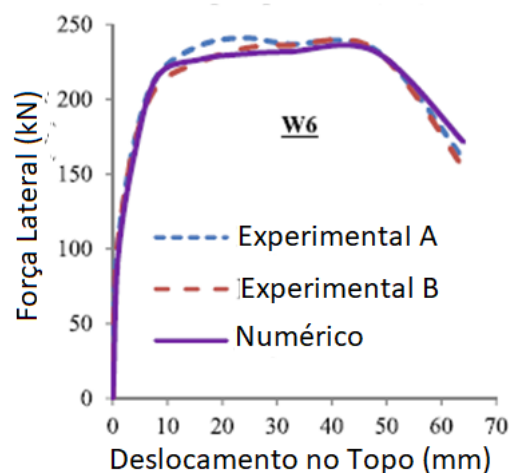
(c)



(d)



(e)

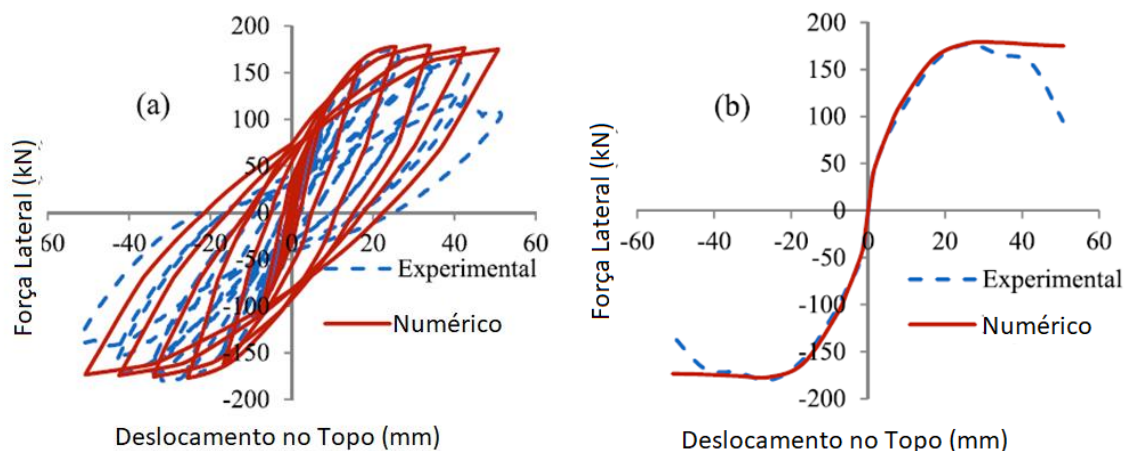


(f)

Fonte: Bedeir et al (2019) – Adaptado

Após essa validação, foram realizados teste de maneira que as paredes foram submetidas a ações cilclícas e os resultados dessa modelagem são apresentados na figura 53.

Figura 53 – Força Lateral vs Deslocamento – Experimental e Numérico - Histerese (a) e Meio Ciclo da Histerese (b)



Fonte: Bedeir et al (2019) – Adaptado

As principais contribuições do trabalho são:

- 1) O estudo apresentou uma abordagem realista para modelagem de estruturas sob cargas laterais, que leva em conta o comportamento global do edifício e a interação entre seus componentes, uma vez que, o erro máximo obtido em todos os modelos de parede para carga útil, carga máxima e deformação na carga máxima foi de 9,3%, 3,9% e 8,8%, respectivamente.

- 2) As paredes que foram testadas cobriram uma ampla gama de proporções de parede e configurações que tornavam a técnica mais confiável.
- 3) Todas as paredes foram ligadas considerando a ligação entre elas utilizando laje como diafragma rígido no topo das paredes;

3 Ensaios de Caracterização da Alvenaria

O objetivo deste capítulo é descrever a metodologia dos ensaios que foram utilizados para obter uma representação mais realista da alvenaria. Além disso, apresentar a importância desses ensaios com base em uma breve revisão bibliográfica que apresenta alguns trabalhos em que o cerne do trabalho foi a análise desses ensaios. Após análise de alguns autores como Oliveira (2014), Bolhassani (2015), Santos (2016) foi possível detectar que a grande dificuldade de representação do comportamento da alvenaria se apresenta na representação da região da interface entre as unidades de bloco com a argamassa.

Uma maneira encontrada na literatura foi a proposição de simplificação do modelo proposta por Lourenço (1996) em que o autor apresenta modelos de micro-modelagem simplificada que consiste basicamente em considerar a não existência da argamassa entre as faces dos blocos conforme foi apresentado no item “Tipos de Modelagem Numérica” desta pesquisa. No entanto, neste tipo de modelagem ainda é necessário representar a região de interface entre os blocos e para isso é necessário realizar ensaios de aderência e de cisalhamento dessas regiões. Para ensaios de aderência a literatura apresenta o ensaio de Bond Wrench que será melhor detalhado a seguir, já para ensaios de cisalhamento é necessário a realização de ensaios de cisalhamento da junta horizontal e também da junta vertical.

Nos itens a seguir são apresentadas as definições bem como a metodologia de cada um desses ensaios de acordo com a(s) norma (s) que regulamentam(m).

3.1 Bond Wrench – Alavanca de Aderência

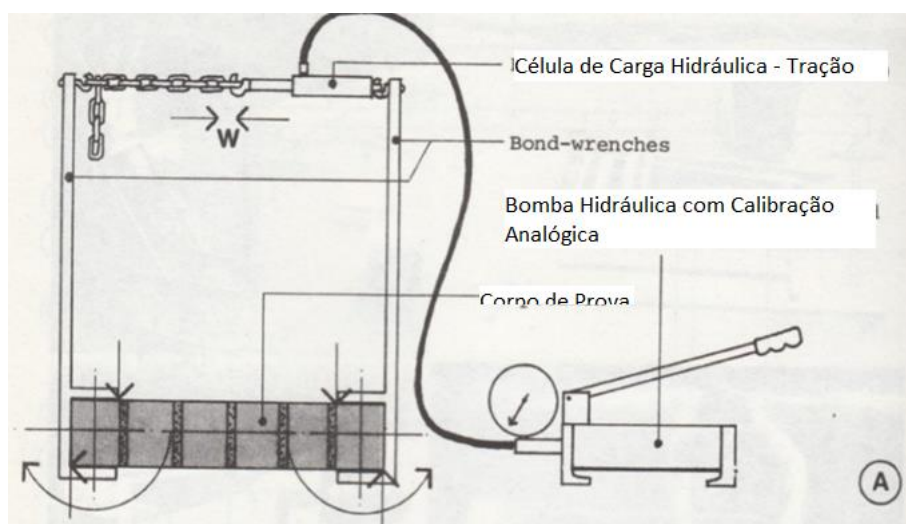
A definição do termo “Bond” se refere a interface entre a argamassa e o bloco e a criação dessa interface ocorre de acordo com Khalaf (2005) a partir da penetração da argamassa e dos produtos da hidratação como por exemplo sílica-calcária hidratada, dentro dos poros e vazios da superfície dos blocos. Khalaf (2005) informa ainda que a quantidade de cal que foi utilizada na argamassa deve ser levada em consideração para se determinar a resistência da aderência.

De acordo com Samarasinghe et al (1997) ensaios de aderência precisam produzir informações mais confiáveis sobre aderência, e o resultado dos coeficientes de variação dos testes, de acordo com os autores, devem estar dentro de um intervalo padrão que é encontrado nos ensaios de alvenaria.

Na literatura é possível encontrar duas normatizações para os ensaios de aderência que são a norma australiana AS3700/2017 e a norma americana ASTM C1072, ambas trazem especificações sobre o ensaio de aderência intitulado Bond Wrench. De acordo com a norma australiana AS3700/2017 o ensaio Bond Wrench é um teste utilizado para determinar o valor da resistência a aderência das juntas horizontais quando submetidas a flexão, já a norma ASTM C1072 informa no escopo que este método de ensaio cobre as determinações de tensão de aderência flexão de alvenaria não armada por meio de ensaios físicos de cada junta dos prismas de alvenaria.

É possível inferir com base nos autores Samarasinghe et al (1997) que o modelo de ensaio do Bond Wrench proposto pela norma australiana é um método de ensaio que tem se tornado popular e essa popularidade se deve a configuração do aparelho que foi mais aceita a figura 54 apresenta o primeiro ensaio de bond wrench realizado.

Figura 54 – Primeiro Ensaio do Bond Wrench

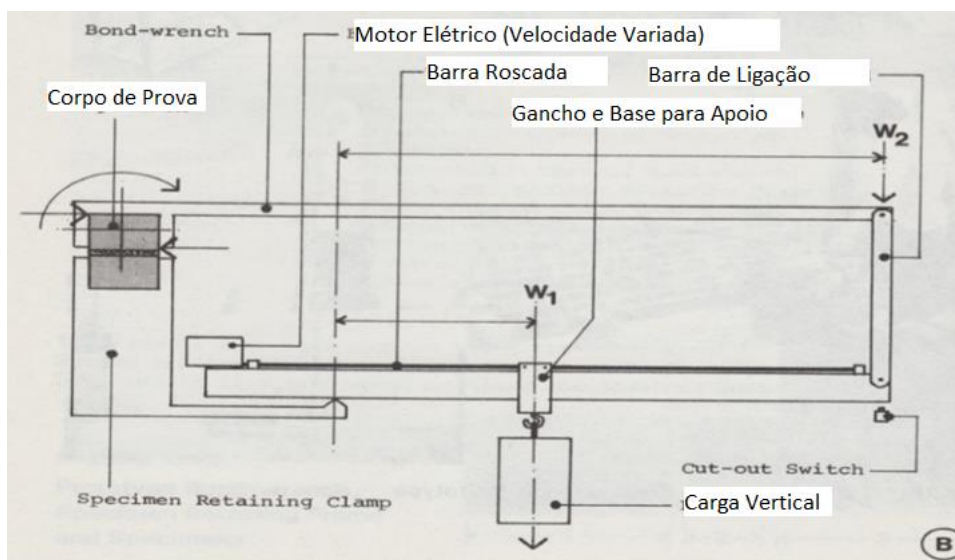


Fonte: Hughes et al (1980) – Adaptado

É possível notar na figura 54 primeiramente que o corpo de prova era posicionado horizontalmente e que era preciso de duas chaves (wrench) para a realização do ensaio, uma vez que se posicionava uma célula de car-

ga na haste da chave que serviria para medir a tensão de tração que estava sendo emitida pela bomba hidráulica, enquanto que na cabeça das duas chaves era posicionado o corpo de prova. De acordo com Choudhary (2015) esse primeiro estágio é uma variação do ensaio de aderência denominado Bond Beam. Já a figura 55 a seguir apresenta o segundo estágio do Bond Wrench.

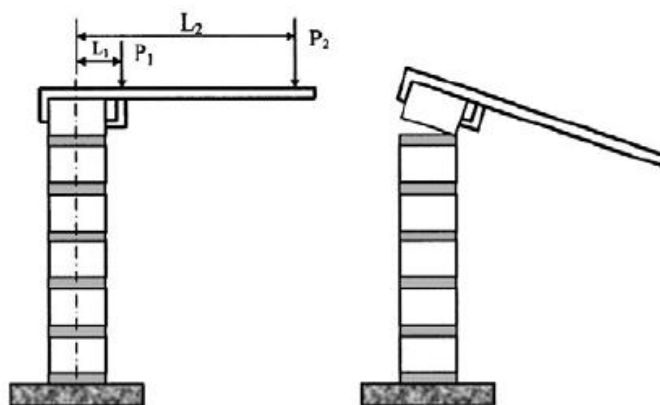
Figura 55 - Segundo Estágio do Bond Wrench



Fonte: Hughes (1980) – Adaptado

O segundo estágio do Bond Wrench é possível observar que o corpo de prova ficava encaixado em uma base e cabeça da chave encaixava na face superior do corpo de prova. Além disso o carregamento não é aplicado da mesma maneira que apresentada no primeiro estágio do Bond Wrench. Nesta segunda fase o carregamento aplicado a partir de pesos que são posicionados perpendicularmente a uma barra rosca.

Atualmente é possível encontrar diferentes chaves de aderência que foram desenvolvidas, mas que não modificaram a estrutura básica do modelo original da chave. De maneira a geral a Bond Wrench consiste em um gancho com uma haste, conforme a figura 56, o gancho é fixado na parte superior do corpo de prova e na ponta da haste é aplicada a força que causará o momento no topo do corpo de prova. E esse momento aplicado no topo do corpo de prova será resistido em sua totalidade pela interface entre os elementos bloco e argamassa.

Figura 56 - Modelo de Bond Wrench - AS3700/2017

Fonte: AS3700/2001 – Adaptado

3.1.1 Bond Wrench – AS3700/2017

Como mencionado anteriormente este ensaio tem como objetivo a determinação do valor da resistência a aderência das juntas horizontais quando a alvenaria é submetida a esforços de flexão.

A primeira especificação que a norma apresenta é a respeito do número de blocos que podem constituir o corpo de prova que para este ensaio deve ser no mínimo igual a seis blocos por corpo de prova, conforme especificado no D2 da norma australiana.

Quanto a preparação dos corpos de prova é preciso ser construído de acordo com os itens a seguir:

- a) Podem ser construídos corpos de prova como pequenos pilares desde que:
 - a. Posicionar o primeiro bloco sobre uma superfície lisa e limpa;
 - b. Lançar argamassa em toda a face horizontal do bloco;
 - c. Aguardar 30 segundos antes de colocar o bloco da próxima fiada sobre a junta horizontal;
 - d. Repetir os passos b) e c) até se alcançar a altura desejada;
 - e. Retirar a argamassa excedente com uma haste de maneira que o corpo de prova não sofra perturbação.

Em situações onde será realizado o ensaio com corpos de prova que serão grauteados a norma apresenta como deverá ser feito preenchimento dos furos:

- 1) Limpar os furos, pois devido a expansão da argamassa é possível que se tenha uma parte dessa expansão na superfície interna do furo;
- 2) Preencher os furos com graute e adensa-los por camada durante e para finalizar o grauteamento deve-se grautear até uma altura de 25 mm acima da face superior do corpo de prova;
- 3) Uma hora depois do preenchimento, remova o graute em excesso acima do nível superior da superfície do prisma.

Para o processo de cura desses corpos de prova deve-se embrulhar totalmente em uma única folha a prova de vapor e deixar descansar até ser transportado para o ensaio.

Quanto a idade dos corpos de prova para o ensaio, deve-se contar 7 (sete) dias após a construção dos corpos de prova. Além disso, quando os corpos de prova forem grauteados deve-se realizar o ensaio 28 dias após o grauteamento.

No que tange o transporte dos corpos de prova, o item D5 da norma prescreve que este deverá ser realizado 24 horas antes da realização do ensaio.

Vale destacar que todas as prescrições aqui apresentadas devem ser atendidas para ensaios de aderência por meio do método Beam Test ou Bond Wrench.

O item D6 é dividido em cinco itens que são as seguintes:

- 1) Aspectos gerais – consiste basicamente na descrição do que será prescrito nos demais itens;
- 2) Instrumento de Ensaio – neste tópico é apresentado a Bond Wrench, bem como algumas especificações e definições a seu respeito, como por exemplo,
- 3) Calibração – apresenta quais parâmetros que possibilitam a calibração da Bond Wrench;

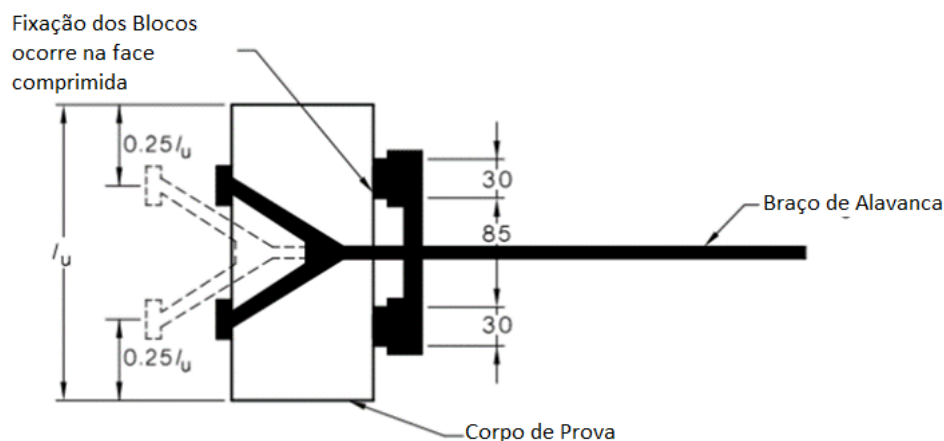
- 4) Procedimento do Ensaio – este item é dividido em outros dois que são:
 - a. Método do recipiente suspenso
 - b. Método da máquina de ensaio
- 5) Cálculo da tensão de flexão do corpo de prova.

O item 2 norma australiana apresenta alguns detalhes sobre quais itens que uma Bond Wrench deve ter:

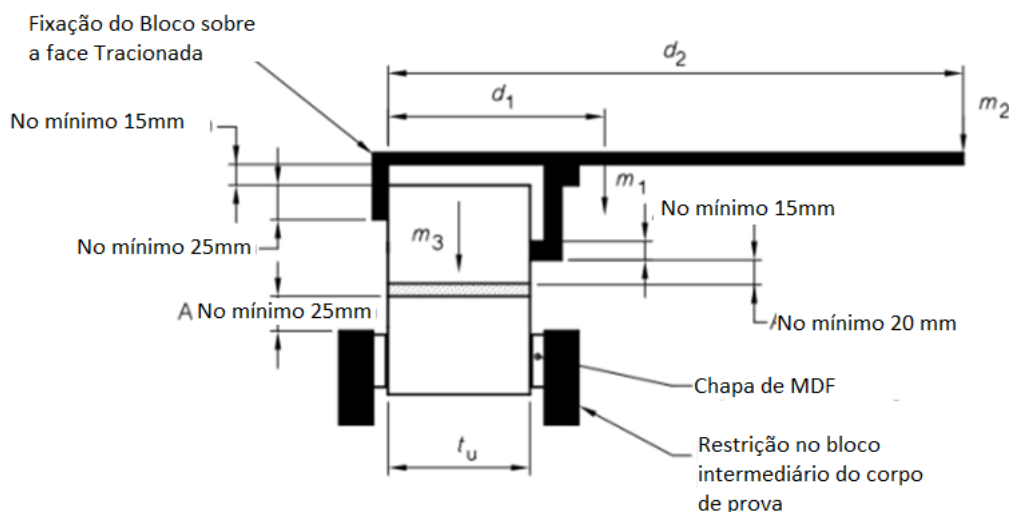
- a) Uma chave aplica momento fletor na junta que é testada no corpo de prova;
- b) Uma armação de retenção na qual o corpo de prova é apertado;
- c) Uma maneira de aplicação e medição de carga para que se possa determinar a capacidade de flexão com uma precisão de 0,1MPa.

A seguir, as figuras 57 e 58 apresentam a chave utilizada no ensaio em planta e em vista, respectivamente.

Figura 57 - Planta da Bond Wrench



Fonte: AS3700/2001 – Adaptado

Figura 58 - Vista Lateral da Bond Wrench

Fonte: AS3700/2001 – Adaptado

Com base nas figuras 57 e 58 é possível notar que a chave tem quatro pontos que fixados no bloco (figura 57) e observando a figura 58 é possível perceber que o momento fletor será resistido pela junta a ser testada.

O item 3 que se refere a calibração apresenta os parâmetros que devem ser calibrados que são os seguintes;

- M1 – a massa da chave de aderência com aproximação de +- 25g;
- D1 – é a distância entre a massa m1 e face interna do grampo superior que prende a face externa do bloco – o nível de precisão é de +- 2mm;
- D2 – é a distância entre a massa m2 e face interna do grampo superior que prende a face externa do bloco - o nível de precisão é de +- 2mm.

O item 5 apresenta a equação que determina a resistência a flexão do corpo de prova. A equação X.1 segue:

$$f_{sp} = \left(\frac{M_{sp}}{Z_d} \right) - \left(\frac{F_{sp}}{A_d} \right)$$

Onde:

f_{sp} - Resistência flexão do corpo de prova, em Mpa

M_{sp} - Momento fletor sobre o centroide da área da junta ruptura, em Nmm. A equação que representa este momento é: $M_{sp} = 9,81 * m_2 * (d_2 - (t_u/2)) + 9,81 * m_1 * (d_1 - (t_u/2))$

Z_d - Módulo de resistência a flexão de cálculo da seção transversal cuja a área é A_d ;

F_{sp} - Força de compressão sobre a área confinada da junta testada, em N. A equação que representa esta força é: $F_{sp} = 9,81 * (m_1 + m_2 + m_3)$

A_d - Área da seção transversal de cálculo do elemento

m_1, m_2 e m_3 - As massas dos componentes usadas para testar a resistência a flexão, em kg;

d_1 - É a distância entre a massa m_1 e face interna do grampo superior que prende a face externa do bloco em milímetros;

d_2 - É a distância entre a massa m_2 e face interna do grampo superior que prende a face externa do bloco, em milímetros.

t_u - Espessura do bloco

3.2 Ensaio de Cisalhamento Direto da Junta Horizontal

Assim como o ensaio de Bond Wrench é utilizado para se determinar a resistência flexão de aderência entre junta horizontal e bloco é preciso também estudar o comportamento da junta horizontal quanto ao deslizamento em relação ao bloco. Desta maneira neste item será apresentada definição, importância e metodologia para se estudar o comportamento ao cisalhamento das juntas horizontais.

De maneira geral NBR15961-1/2011 apresenta duas prescrições para dimensionamento a esforços de cisalhamento em alvenaria. Um em que se estuda o cisalhamento entre seções transversais de elementos lineares, como por exemplo, as vigas. Neste tipo de cisalhamento o comportamento em muitos casos pode se assemelhar as vigas de concreto armado de acordo com Landini(2001), Sarhat e Sherwood (2007) e Pasquantonio (2015).

No entanto é possível encontrar nos elementos estruturais de alvenaria uma outra forma de cisalhamento que ocorre na direção longitudinal de

elementos como paredes. De acordo com NBR15961-1/2011 o valor de resistência a este tipo de cisalhamento apresenta um valor constante que depende da resistência da argamassa e pode ser acrescido de uma parcela da tensão normal devido a presença de ações permanentes sobre essas paredes. Essa recomendação se encontra na norma no item 6.2.5.6 e é apresentado de acordo com a tabela 51 a seguir.

Tabela 50 - Resistência Média de Compressão da Argamassa (MPa)

Resistência Média da Compressão da Argamassa (MPa)		
1,5 a 3,4	3,5 a 7,0	Acima de 7,0
$0,10 + 0,5 \cdot \sigma \leq 1,0$	$0,10 + 0,5 \cdot \sigma \leq 1,4$	$0,10 + 0,5 \cdot \sigma \leq 1,7$

Fonte: NBR 15961-1/2011 – Adaptado

Além da norma brasileira, outras normas internacionais apresentam que a verificação ao cisalhamento em paredes é resistida pela argamassa e que a resistência dessa é acrescida de um valor dependendo da existência de uma tensão normal devido a presença de ações permanentes sobre este elemento estrutural.

A norma australiana AS3700/2017 no item 3.3.4 diz que a resistência ao cisalhamento de na direção longitudinal deve ser igual 0,35MPa, independente se o elemento que está sendo dimensionado será armado ou não.

Já a norma americana ACI530-05/ASCE 5-05/TMS 402-05 apresenta especificações diferentes para alvenaria não armada e armada. As recomendações para alvenaria não armada são encontradas no item 2.2.5 da norma

Com base nas prescrições das normas é possível perceber que o valor de resistência característica ao cisalhamento na direção longitudinal das paredes apresenta um valor que foi definido por ensaio de cisalhamento da junta horizontal.

Alguns autores apresentam estudos sobre este ensaio como por exemplo, Araújo (2002) que apresenta em sua dissertação uma metodologia para avaliar a resistência de aderência ao cisalhamento de prismas de alvenaria estrutural, Drysdale et al(1999) que realizou testes em prismas para analisar a resistência ao cisalhamento das juntas horizontais, e tam-

bém Vermelfoort (2012) que realizou estudos da resistência ao cisalhamento no mesmo tipo de junta.

Esses autores tinham como objetivo estudar e analisar o comportamento das juntas horizontais, uma vez que, o caminho das fissuras de elementos estruturais em alvenaria estrutural. Por essa razão pensando em análise numérica o valor de resistência das juntas horizontais é de extrema importância para uma representação mais verossímil do comportamento da alvenaria.

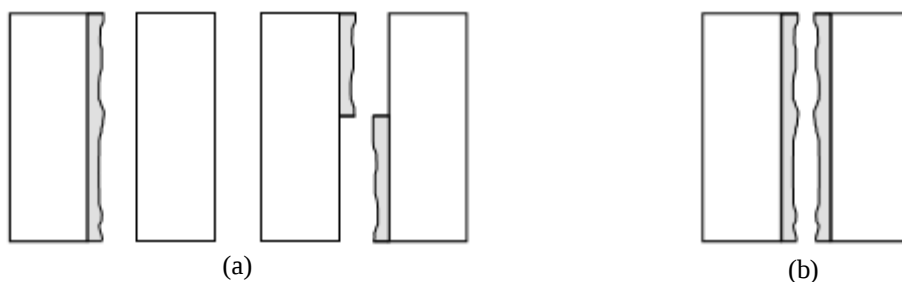
3.2.1 Metodologia do Ensaio – EN1052-3/2007

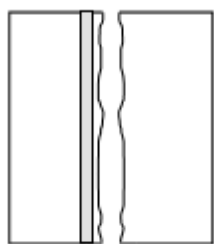
Com base nos diversos autores(Araújo (2002), Oliveira (2014), Drysdale et al (1999), e Vermelfoort (2012)) que realizaram este ensaio grande parte deles utilizaram a metodologia de ensaio apresentada, atualmente, pela norma europeia EN1052-3/2007 intitulada como *Methods of Test for Masonty – Part 3: Determination of Initial Shear Strength*. Por essa razão neste trabalho será também utilizada a mesma metodologia prescrita pela norma europeia.

De acordo com a norma a resistência inicial ao cisalhamento da alvenaria tem como origem o ensaio de pequenos corpos de prova de alvenaria que são ensaiados até a ruptura. Além disso, os corpos de prova são ensaiados ao cisalhamento considerando o ensaio de quatro pontos de carregamentos com uma carga de pré-compressão normal a junta horizontal. De acordo com isso, o ensaio tem-se a seguinte a configuração.

Além disso, a ruptura dos corpos de prova podem ser quatro formas diferentes conforme a figura 59 apresenta.

Figura 59 - Tipos de Ruptura do Ensaio de Cisalhamento





(c)



(d)

Fonte: EM 1052-3/2007 – Adaptado

De acordo com figura 59 é possível observar que:

- a) **Ruptura 1 (R1)** – Figura 59.a – é possível que a ruptura nesse caso ocorreu devido a falha na região de aderência entre o bloco e argamassa (59.a.1) ou devido a divisão da argamassa em duas partes (59.a.2). A razão de a figura 59.a está dividida em duas representações é que para ambos os casos, ou seja, tanto o descolamento total da argamassa quanto para o descolamento parcial a falha para essas duas situações ocorrer devido a falha na aderência bloco/argamassa.
- b) **Ruptura 2 (R2)** – Figura 59.b – neste tipo de ruptura ocorre a falha na argamassa;
- c) **Ruptura 3 (R3)** – Figura 59.c – neste tipo de ruptura, a falha ocorre no bloco, onde é possível observar na imagem que fragmentos dos blocos estão ainda aderidos na argamassa;
- d) **Ruptura (R4)** – figura 59.d – neste tipo de ruptura ocorre a ruptura por fendilhamento dos blocos que constituem o corpo de prova;

O valor da resistência inicial ao cisalhamento das juntas horizontais é obtido a partir da regressão linear da curva tensão x deformação para tensão normal igual zero.

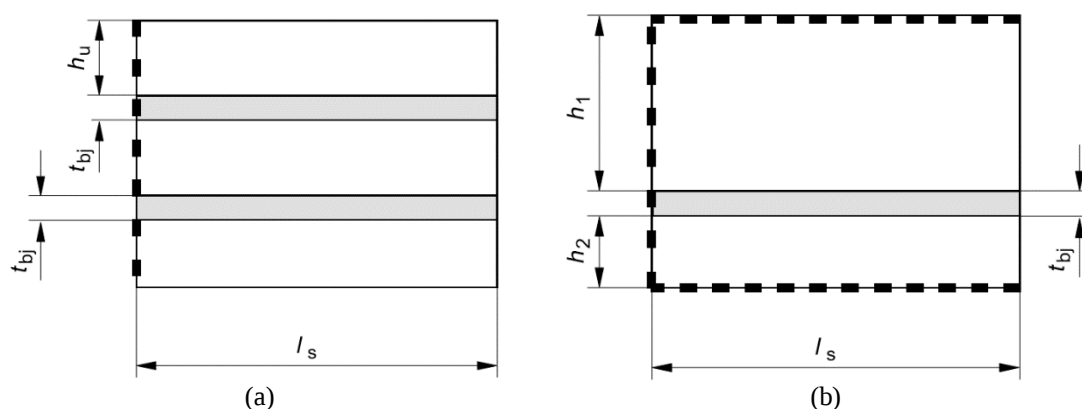
Quanto ao instrumento de ensaio é necessário usar uma prensa que aplique carregamento cisalhante no corpo de prova e ao mesmo tempo uma carga de pré-compressão. Vale destacar que a norma apresenta algumas considerações sobre o mínimo necessário para que uma prensa possa ser usada para a realização deste ensaio. As recomendações se encontram na tabela 51.

Tabela 51 - Recomendações para Máquina de Ensaio

Repetibilidade máxima admissível das forças em percentagem da força indicada	Erro médio máximo admissível das forças em percentagem da força indicada	Erro máximo admissível de força zero como percentagem da força máxima de alcance
2	2	0,4

Fonte: EN 1052-3/2007 – Adaptado

Quanto a montagem dos corpos de prova, eles podem ser montados de duas maneiras distintas, um tipo de ensaio denominado como tipo A consiste em um prisma de três blocos. Enquanto que o segundo tipo de ensaio denominado como tipo B, apresenta uma configuração de prisma em que se pode ter blocos com alturas diferentes. No entanto a partir da análise dos autores anteriormente citados notou que a tipologia de prisma tipo A é a mais utilizada na literatura e por essa razão será utilizada nesta pesquisa. A figura 60 apresenta os dois tipos de prismas que são permitidos pela EN1052-3 para a realização do ensaio. Além disso é apresentado, na tabela 53, as dimensões dos corpos de prova do prisma tipo A.

Figura 60 - Tipologia de Ensaio de Cisalhamento Direto

Fonte: EN 1052-3/2007 – Adaptado

Tabela 52 - Dimensões dos Blocos para o Ensaio de Cisalhamento Direto

Dimensões dos Blocos		
$l_u(mm)$	$h_u(mm)$	$l_s(mm)$
≤ 300	≤ 200	$l_s = l_u$
> 300		$l_s = 300$

Fonte: EN 1052-3/2007 – Adaptado

Ainda sobre a montagem dos corpos de prova, é necessário preparar no mínimo 9 (nove) corpos de prova para o ensaio. Quanto a execução do prisma deve-se seguir os seguintes passos:

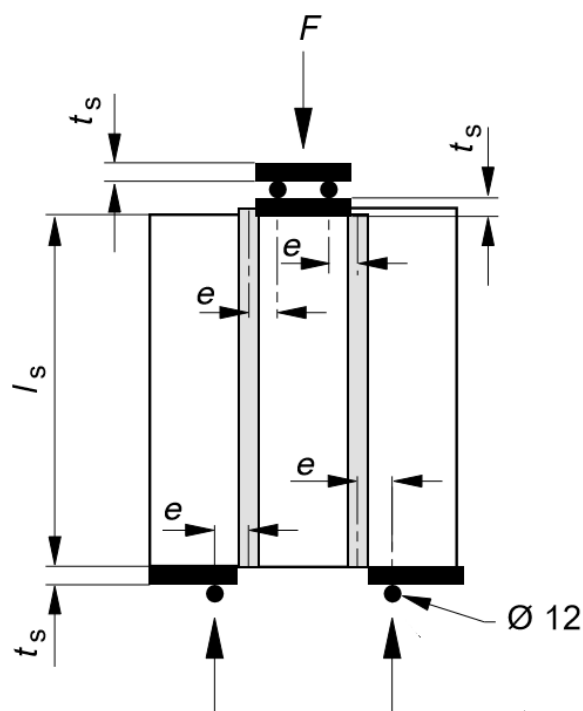
- a) Posicionar o primeiro bloco sobre uma superfície limpa;
- b) Colocar argamassa em toda face dos blocos respeitando a espessura de 10mm;
- c) Posicionar o segundo bloco sobre a argamassa, feito isso deve-se verificar o nível e o alinhamento vertical do prisma;
- d) Repetir os procedimentos b) e c) por mais uma vez, a fim de se obter um corpo de prova de três blocos.

Assim que finalizar a construção dos corpos de prova deve-se aplicar um carregamento distribuídos em toda a face superior de pré-compressão em cada prisma no valor de tensão entre $2 * 10^{-3} N/mm^2$ e $5 * 10^{-3} N/mm^2$. E então deve ser colocado para curar e mantidos inalterados até o ensaio. Para situações onde se colocou cal na argamassa deve evitar que os corpos de prova sequem no período de cura por se cobrir os corpos de prova com folhas de polietileno.

Quanto a idade dos corpos de prova deve-se aguardar 28 ± 1 dias para realização do ensaio, a menos que para argamassa especificada a base de cal, e também deve-se determinar a resistência a compressão da argamassa na mesma data do ensaio do prisma.

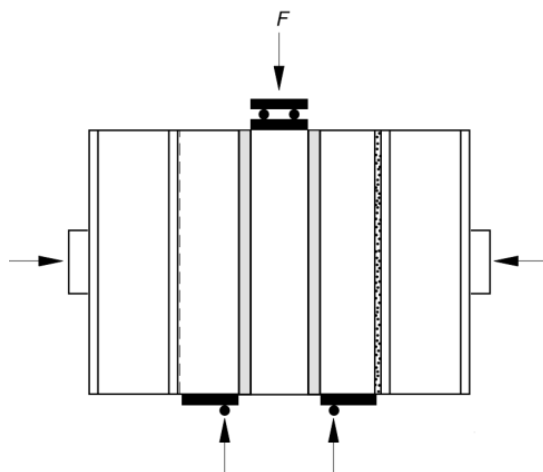
Ao alcançar a idade de 28 os corpos de prova devem ser ensaiados de acordo com o item 8 da norma europeia de acordo com a figura 61 a seguir:

Além dos apoios apresentados na figura 61 é necessário aplicar um carregamento de pré-compressão perpendicular a força F aplicada no corpo de prova. Para se aplicar este carregamento é necessário posicionar uma placa de madeira, softboard ou de gesso no prisma conforme a figura 62.

Figura 61 - Apoios do corpo de prova**Legenda**

- - Rolete utilizado para apoio do corpo de prova na máquina de ensaio com diâmetro de 12mm
- Peças de aços com espessura mínima de 12mm
- e - Distância entre o eixo da argamassa e o eixo da barra de apoio;
- t_s - Espessura da chapa de apoio do corpo de prova;

Fonte: EN 1052-3/2007 – Adaptado

Figura 62 - Carregamento de Pré-Compressão

Fonte: EN 1052-3/2007 – Adaptado

Como dito anteriormente deve se construir nove corpos de prova para determinação da resistência inicial ao cisalhamento da junta horizontal. A razão de se construir essa quantidade de corpos de prova é devido a variação de pré-compressão que deve ser realizada durante o ensaio, isto é, de-

ve-se realizar o ensaio para três carregamentos de pré-compressão e para cada pré-compressão deve-se ensaiar três prismas e com isso totaliza-se nove corpos de prova que são estabelecidos.

Para blocos que apresentam resistência a compressão maior que 10 N/mm^2 , deve-se utilizar os seguintes valores de pré-compressão:

- a) $0,2 \text{ N/mm}^2$
- b) $0,6 \text{ N/mm}^2$
- c) $1,0 \text{ N/mm}^2$

Enquanto que para blocos com resistência a compressão menor que 10 N/mm^2 , se utiliza os seguintes valores:

- a) $0,1 \text{ N/mm}^2$
- b) $0,3 \text{ N/mm}^2$
- c) $0,5 \text{ N/mm}^2$

Em suma, os valores de pré-compressão para blocos com resistência menor que 10 N/mm^2 equivale à metade do carregamento utilizado para aqueles com resistência a compressão maior que 10 N/mm^2 .

O valor da força F aplicada para tensão de cisalhamento deverá estar em uma taxa entre $0,1 \text{ (N/mm}^2\text{)}/\text{min}$ e $0,4 \text{ (N/mm}^2\text{)}/\text{min}$.

Durante todo o procedimento de ensaio deve-se conseguir os seguintes parâmetros:

- a) Seção transversal dos corpos de prova com uma precisão de 1%;
- b) O valor último da força F ;
- c) O valor do carregamento de pré compressão F_p ;
- d) Analisar o tipo de ruptura;
 - a. Em situações que se encontrar a ruptura R4, a norma sugere que se realize outros ensaios com outros corpos de prova para que se obtenha as rupturas por cisalhamento dos R1, R2 ou R3

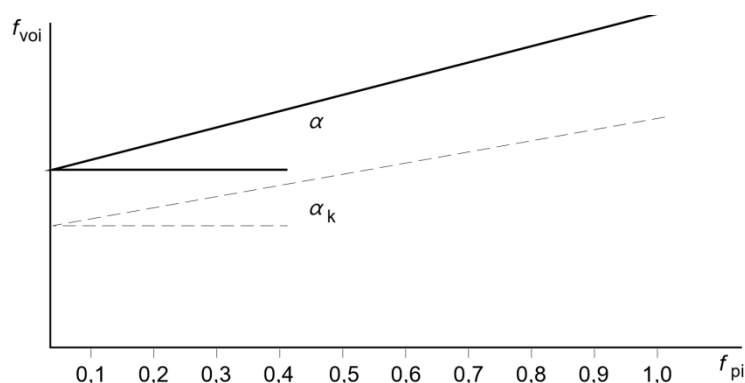
Para avaliar os resultados obtidos durante o ensaio é necessário calcular os valores de resistência ao cisalhamento e de pré compressão, respectivamente de acordo com as equações a seguir:

$$f_{voi} = \frac{F_{i,m\acute{a}x}}{2 * A_i}$$

$$f_{pi} = \frac{F_{pi}}{A_i}$$

Após o cálculo das resistências ao cisalhamento bem como da resistência devido a pré-compressão deverá se plotar um gráfico $f_{voi} \times f_{pi}$, conforme figura 63. A partir do gráfico é possível obter o valor de resistência inicial ao cisalhamento(f_{vo}) é o ponto onde a reta intercepta o eixo vertical. Além disso, a inclinação da reta nos fornece o ângulo de atrito interno(α).

Figura 63 – Gráfico genérico $f_{voi} \times f_{pi}$



Fonte: EN 1052-3/2007 – Adaptado

Os valores característicos da resistência inicial ao cisalhamento($f_{vo,k}$) e do ângulo interno de atrito(α_k) equivale a 80% do valor obtido no gráfico da figura 63.

3.3 Ensaio de Tração

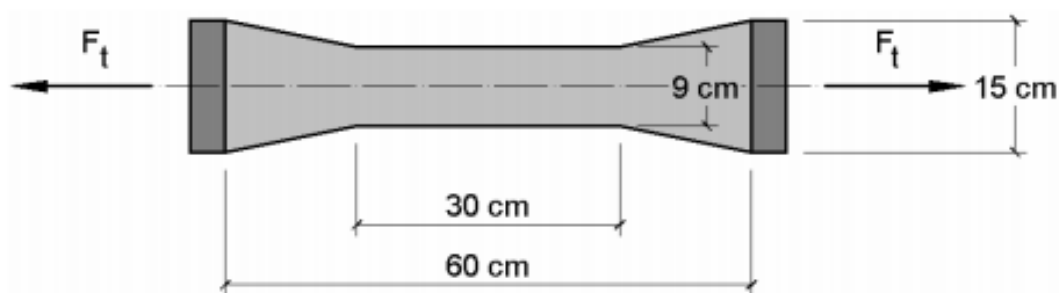
Além dos ensaios para se obter o melhor comportamento quanto a aderência do bloco com a argamassa é necessária a compreensão do comportamento a tração do concreto por meio de gráficos de tensão versus deformação, uma vez que, haverá regiões nos modelos numéricos que apresentaram esforços de tração.

A partir da resistência a tração do material é que se pode inferir a respeito, por exemplo, das regiões que apresentaram fissuras nos elementos estruturais como afirma Fusco (2008) que a partir do instante que se ultrapassa o valor limite de resistência a tração do concreto é que surgem as primeiras fissuras no elemento estrutural.

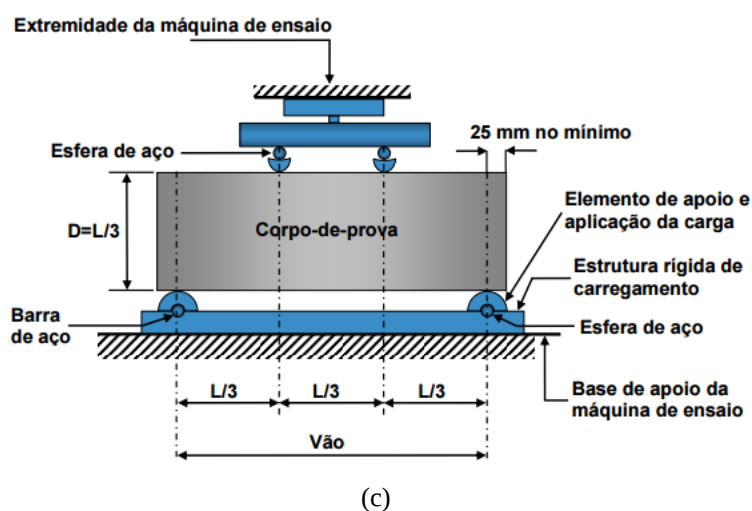
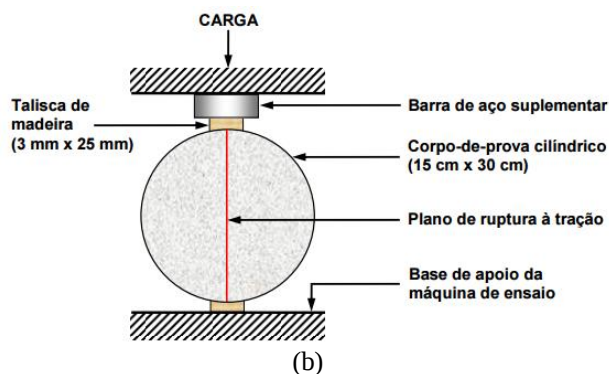
Quanto a maneira de se descrever o comportamento da resistência a tração do concreto é possível encontrar três maneiras de se averiguar a resistência a tração que são as seguintes:

- a) **Ensaio de Tração Direta** que consiste na aplicação de uma força axial de tração no corpo de prova de concreto simples, conforme figura 64.a;
- b) **Ensaio de Tração na Compressão Diametral (Ensaio de Tração Indireta)**, este ensaio é o mais utilizado devido a sua simplicidade de preparação e execução do ensaio, o ensaio consiste em posicionar um corpo de prova cilíndrico é colocado com eixo longitudinal entre os pratos da máquina de ensaio, e o contato entre o corpo de prova e os pratos deve ocorrer somente ao longo de suas geratrizes, conforme figura 64.b;
- c) **Ensaio de Tração na Flexão**, ao contrário do ensaio de compressão diametral que se utiliza de corpo de prova cilíndricos, neste ensaio o corpo de prova tem seção prismática e é submetido a flexão, ou seja, se utiliza a técnica de ensaio de quatro pontos em que o carregamento é aplicado de maneira que se divide o corpo de prova em três partes iguais, conforme figura 64.c.

Figura 64 - Tipos de Ensaio de Tração para Concreto Simples



(a)



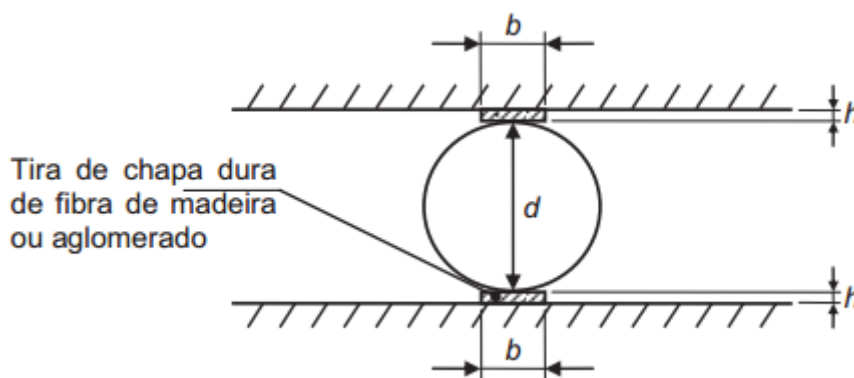
Fonte: Carvalho (2012) – Adaptado

A seguir é apresentado o procedimento de ensaio de tração indireta para se determinar a resistência a tração na alvenaria.

3.3.1 Ensaio de Tração Indireta

Em um primeiro momento apresentado como é realizado o ensaio de compressão diametral em corpo de prova de concreto. E após essa breve explicação apresentará a norma americana que aborda o ensaio de resistência à tração por meio de compressão diametral.

O ensaio de compressão diametral foi criado por Lobo Carneiro em 1943, consiste, basicamente, em aplicar uma carga de compressão paralela a seção transversal do corpo de prova cilíndrico, cuja as seções são as mesmas do corpo de prova utilizado para ensaio de compressão. A figura 65 apresenta como é realizado o ensaio de compressão diametral em corpos de prova de concreto.

Figura 65 - Disposição do corpo de prova

Fonte: Libânio et al (2004) – Adaptado

De acordo com a NBR7222/2010 a resistência a tração por compressão diametral é obtida por meio da equação a seguir.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * F}{\pi * d * l}$$

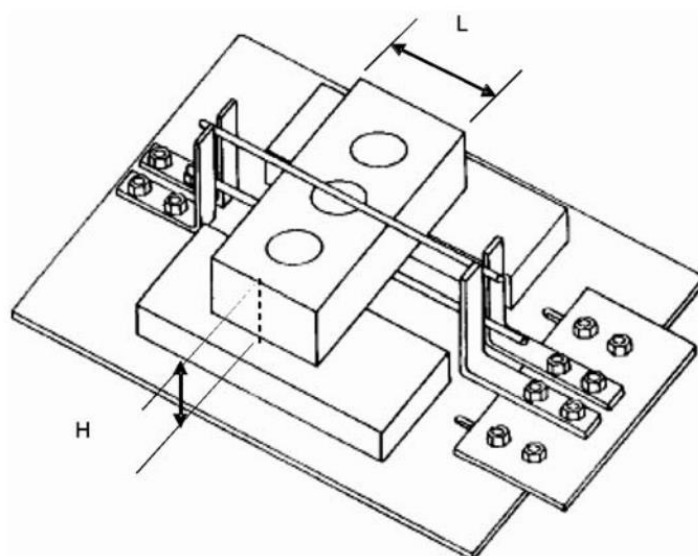
Vale destacar que de acordo com a NBR 7222/2010 o valor de $f_{ct,sp}$, deve ser expresso com três algarismos significativos e unidade dessa resistência é MPa.

Com base nessa metodologia de ensaio é que se desenvolveu o ensaio de tração indireta para blocos de concreto. Para realização deste ensaio posiciona-se de maneira que face longitudinal seja perpendicular ao carregamento que será aplicado.

Segundo Barbosa (2008) não há normalização nacional que regulamente o ensaio de tração indireta em blocos de concreto. Por essa razão, assim como no ensaio de resistência a aderência, será apresentado a metodologia de ensaio prescrita por normas internacionais que para este ensaio será adotado a norma americana ASTM C1006/2013.

Ao contrário dos ensaios de resistência a aderência que consistia em uma série passos para construção dos corpos de prova, bem como da execução do ensaio. O ensaio de resistência à tração indireta se mostra mais simples.

Com base na ASTM C1006/2013, deve-se posicionar o bloco de acordo com a figura 66 e o carregamento sem impacto sobre o bloco e contínuo não maior que 8900 N/min. A norma traz uma nota que para se obter tal taxa de carregamento é equivalente a uma taxa de deslocamento de 12,7mm/min.

Figura 66 - Exemplo de Ensaio de Tração Indireta

Fonte: ASTM C1003/2013 – Adaptado

O valor da resistência a tração é obtido através da equação a seguir:

$$f_t = \frac{2 * P}{\pi * L * H}$$

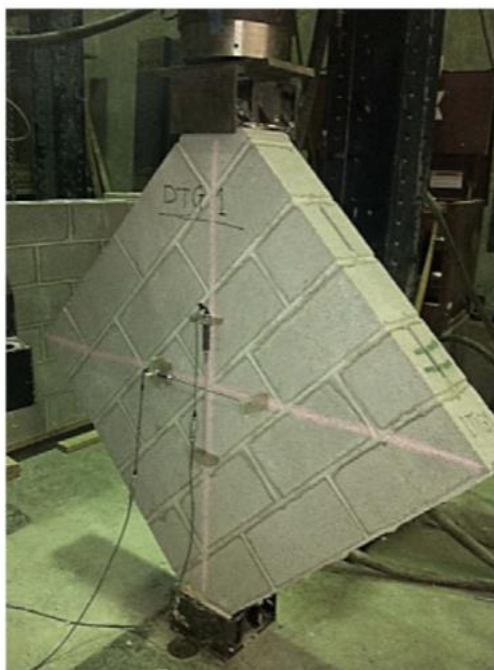
Onde a resistência a tração é dada em kPa.

3.4 Ensaio de Compressão Diagonal

O ensaio de compressão diagonal na alvenaria estrutural é utilizado para determinar a resistência ao cisalhamento da interação entre o bloco e a argamassa. A norma brasileira de alvenaria de blocos de concreto (15961-2/2011) não apresenta uma metodologia de ensaio para se obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento por compressão diagonal. Entretanto ao analisar a literatura referente ao assunto é possível encontrar vários autores, como por exemplo, Ghanem et al (1994), Oliveira (2001), Araújo (2002), Nascimento Neto (2003), Bolhassani (2015), utilizaram a norma americana ASTM E519 intitulada *Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages* do ano de 2002.

De maneira geral o ensaio é utilizado, segundo ASTM E 519-02, determinar a resistência a tração diagonal ou a resistência ao cisalhamento de paredinhas quadradas de lado 1200mm. A figura 67 apresenta um corpo de prova momentos antes de se realizar o ensaio.

Figura 67 - Modelo de corpo de prova para ensaio de compressão diagonal



Fonte: Bolhassani et al (2015) – Adaptado

3.4.1 Metodologia do Ensaio

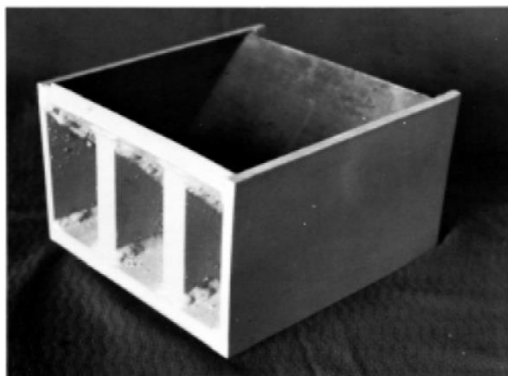
Este ensaio, segundo ASTM E519-02, foi desenvolvido para medir de maneira mais precisa a resistência a tração diagonal da alvenaria em comparação com outros ensaios. As dimensões do corpo de prova foram selecionadas afim de se obter o menor dos corpos de prova que seria mais representativo de um conjunto de paredes com dimensões usuais. Além de se obter um corpo de prova mais representativo levou-se em consideração a viabilidade de execução dos ensaios em laboratórios.

Quanto aos equipamentos que são utilizados para a execução deste ensaio, a norma prescreve apenas dois equipamentos que são:

- a) Máquina de Ensaio: esta máquina deverá ter a capacidade suficiente para transmitir os esforços de compressão ao corpo de prova há uma taxa que permita obter pelos menos 10 leituras de tensão e deformação do corpo de prova. Além disso, a norma recomenda que o vão livre entre a máquina de ensaio e base onde será posicionada o corpo de prova deva ter pelo menos 2130mm;
- b) Apoios de Carregamento: serão necessários dois apoios de carregamento, conforme figura 68. Estes apoios serão utilizados

para transferir aplicar a força proveniente da máquina de ensaio;

Figura 68 – Exemplo de Apoio de Carregamento



Fonte: ASTM E-519/2002 – Adaptado

Quanto a montagem das amostras, cada uma delas devem ter a dimensão de 1200mm X 1200mm. A largura da parede fica a critério do bloco utilizado na construção dos corpos de prova. Deverá ser construído três corpos de prova para o mesmo tipo de bloco, argamassa, ou seja, caso pretenda-se analisar dois tipos de traços de argamassa para o mesmo bloco deverá ser construído mais três amostras com as mesmas dimensões.

Logo após a construção dos corpos de prova não se recomenda o transporte do mesmo por pelo menos sete dias. Deve-se manter os corpos de prova armazenados no laboratório por pelo menos 28 dias. Além disso, deve-se manter a temperatura em torno de $24 \pm 8^{\circ}\text{C}$, com uma umidade relativa entre 25 e 75%.

Além do ensaio dos corpos de prova, é necessário realizar o ensaio dos seguintes elementos:

- a) Argamassa – para cada argamassa utilizada dever-se-á retirar três amostras cúbicas de 50mm para realização de ensaio de compressão das amostras;
- b) Blocos - assim como argamassa, é necessário realizar o ensaio de compressão em 6 blocos;

O procedimento do ensaio está descrito no item 6 da ASTM E519-2002 onde deve-se seguir os três passos a seguir:

- 1) Posição dos apoios de carregamento – os apoios devem ser posicionados na direção da diagonal onde será aplicado o carregamento;
- 2) Posição do corpo de prova – o corpo de prova deve-se posicionado de maneira que a diagonal do corpo de prova esteja alinhada com o eixo da máquina de ensaio. Em alguns casos é necessário realizar o capeamento com gesso no vértice inferior do corpo de prova;
- 3) Instrumentação – caso exista a necessidade de se medir os deslocamentos, deve-se posicionar os elementos de medição (LVDT's, extensômetros) nas duas diagonais da amostra.

A partir das informações dos ensaios é possível então realizar o cálculo da tensão, deformação devido ao cisalhamento e o módulo de rigidez ao cisalhamento através das seguintes equações.

$$S_s = \frac{0,707 * P}{A_n}$$

Onde:

S_s – Tensão de cisalhamento, MPa

P – Carregamento aplicado, N

A_n – Área líquida da amostra, mm², que deve ser calculada de acordo com a seguinte equação:

$$A_n = \left(\frac{W + h}{2} \right) * t * n$$

Onde:

W – Largura do corpo de prova, mm;

h – Altura do corpo de prova, mm;

t – Espessura da amostra, mm;

n – Relação entre a área de furos e área bruta do bloco.

Para a deformação, a norma prescreve o seguinte equacionamento.

$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g}$$

Onde:

γ – Deformação devido ao cisalhamento, em mm/mm.

ΔV – Variação do encurtamento vertical, mm.

ΔH – Variação do alongamento horizontal, mm.

g – Comprimento do strain gage vertical, mm.

Vale destacar que para se utilizar esta equação deve-se utilizar o mesmo strain gage na direção vertical quanto na horizontal.

E por fim, a norma apresenta fornece a equação do módulo de rigidez ao cisalhamento($G[MPa]$) de acordo com a equação a seguir.

$$G = \frac{S_s}{\gamma}$$

A seguir é apresentado é apresentado o procedimento de ensaio que foi realizado para construção dos corpos de prova.

4 Modelagem Numérica – Abordagem Geral

Neste capítulo será detalhada a terceira fase da pesquisa que consiste na avaliação de tipos análise numérica sobre o comportamento da alvenaria. Para isso, o capítulo será dividido em quatro tópicos que são os seguintes:

- a) tipos de modelagem numérica;
- b) métodos constitutivos para análise numérica;
- c) mecanismos de ruptura da alvenaria;
- d) detalhamento da análise numérica.

É possível encontrar uma diversidade de programas computacionais que realizam análise numérica. Dentre os diversos programas foi escolhido o Abaqus. A escolha do Abaqus é que autores como, por exemplo, Capuzzo Netto (2000), Peleteiro (2002), Nascimento Netto (2003), Kowalewska e Gajewska (2015) e Almeida et al (2016), adotaram o Abaqus para realizar análise numérica e obtiveram resultados satisfatórios de validação de resultados experimentais.

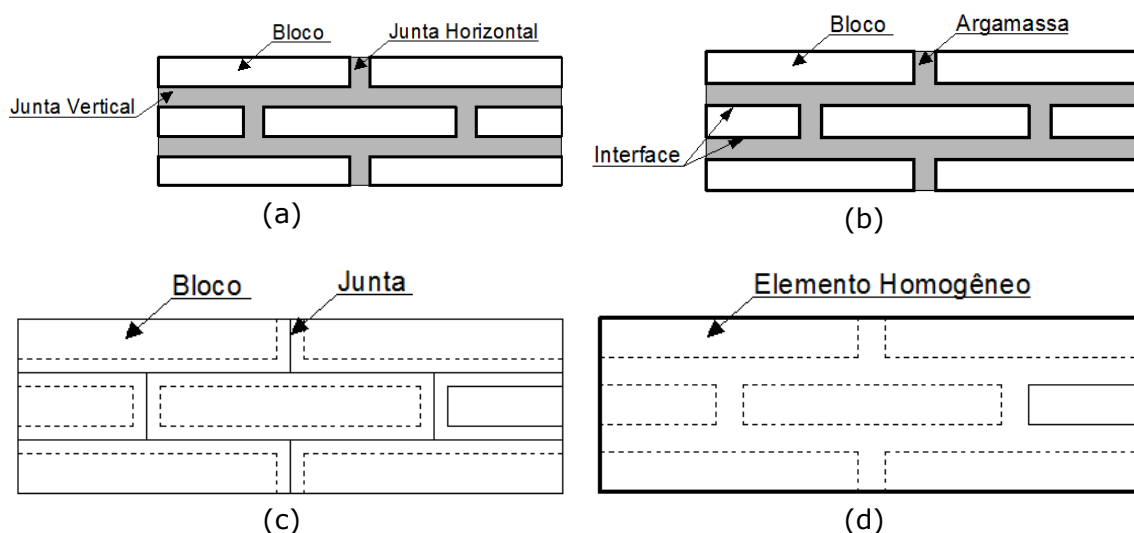
4.1 Tipos de Modelagem Numérica

A alvenaria é um material que apresenta comportamento anisotrópico. A razão desse comportamento é devido à interface entre bloco/argamassa em que as juntas de argamassa criam região de menor resistência da alvenaria. E de acordo com Oliveira (2014) a interface de argamassa é a região onde se concentra os principais fenômenos não lineares da alvenaria. Devido a essa complexidade, a literatura a respeito de modelagem numérica para alvenaria oferece três tipos de modelagens que pode ser utilizada. A escolha dentre esses tipos de modelagens se deve, principalmente, ao nível de precisão a ser considerado. Os três tipos de modelagens e as respectivas definições são apresentados a seguir e foram retiradas de Lourenço (1996):

- a) Micro-Modelagem Detalhada (MMD) – blocos e argamassa são representados dentro da junta por elementos contínuos onde a interface bloco/argamassa é representada por elementos descontínuos – figura 69.b;

- b) Micro-Modelagem Simplificada (MMS) – os blocos são expandidos e são representados por elementos contínuos onde o comportamento das juntas de argamassa e a interface bloco/argamassa são unidas dentro de um elemento descontínuo – figura 69.c;
- c) Macro-Modelagem (MM) – blocos, argamassa e a interface bloco/argamassa são considerados unidos, ou seja, considerado um elemento monolítico – figura 69.d.

Figura 69 - Tipos de Modelagem Numérica



Fonte: Lourenço (1996) - Adaptado

Quanto a MMD, Lourenço (1996) afirma que o módulo de Young, coeficiente de Poisson e propriedades inelásticas do bloco e da argamassa devem ser considerados. Nesse tipo de modelo a interface, assim como comprovado em testes experimentais de diversos autores, é uma região com grande potencial para fissura bem como deslizamentos. Ainda sobre o MMD, com esse modelo é possível olhar de maneira mais detalhada para as ações que ocorrem nos blocos, nas juntas de argamassa e também na interface entre essas unidades bem como é possível analisar ações combinadas entre os mesmos. Não obstante esse tipo de modelagem, considerando os modelos reais, apresenta uma semelhança muito relevante com os modelos experimentais reais.

Já a MMS considera, como é possível observar na figura 69.c, que cada interface do modelo é formada por uma unidade de argamassa e duas interfaces de bloco/argamassa do modelo real. Com isso é desprezada a presença da argamassa no modelo numérico. A fim de manter a dimensões

do modelo real, a MMS propõe a expansão dos blocos. Oliveira (2014) afirma quanto à precisão desse modelo que os resultados podem apresentar bastante precisão mesmo não considerando o efeito Poisson da argamassa.

O terceiro tipo de modelagem numérica possível é a macro-modelagem. Nesse tipo de modelagem não é realizada nenhuma distinção entre as unidades que compõem a alvenaria, sendo assim, a alvenaria é tratada como elemento anisotrópico homogêneo.

Com base no conhecimento desses três modelos é imprescindível conhecer a respeito da melhor utilização de cada uma dessas técnicas de modelagem. É evidente que o uso de uma técnica em detrimento da outra depende acima de qualquer coisa do nível de precisão que é relevante para análise do comportamento de uma estrutura. A micro-modelagem é utilizada para se obter um melhor entendimento a respeito do comportamento local de um elemento de alvenaria. Além disso, recomenda-se a utilização de micro-modelagem para estudo de detalhes de uma estrutura. Enquanto que a macro-modelagem se torna mais relevante para se entender o comportamento global da alvenaria.

4.2 Modelos Constitutivos para Análise Numérica

Para análise numérica dessa pesquisa será necessário três modelos constitutivos, uma vez que será necessário representar os blocos de concreto, a argamassa e também a interface bloco/argamassa. Com base na análise dos critérios disponíveis para o concreto, foi possível encontrar três modelos constitutivos que são:

- a) *Concrete Smeared Cracking (CSC):*
- b) *Brittle Cracking Model (BCM);*
- c) *Concrete Damaged Plasticity (CDP).*

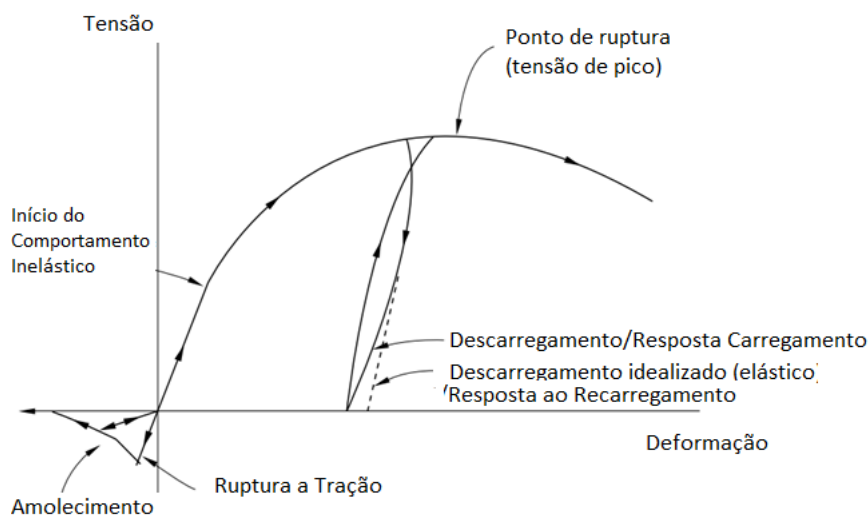
O modelo CSC destina-se a aplicações em que o concreto é submetido a esforço essencialmente monotônico e cargas pontuais, quer fissuras de tração ou compressão. A deformação plástica neste modelo é controlada por uma superfície de escoamento de "compressão". As fissuras são assumidas como sendo o aspecto mais importante do comportamento e da representação de fissuras e o comportamento anisotrópico é preponderante para esse modelo constitutivo.

O modelo BCM é destinado a aplicações em que o comportamento do concreto é dominado por fissuras de tração e ruptura por compressão não é relevante. O modelo inclui a consideração da anisotropia induzida por fissuras. Na compressão, o modelo assume comportamento elástico. Um critério de ruptura frágil está disponível para permitir a remoção de elementos de uma malha do modelo.

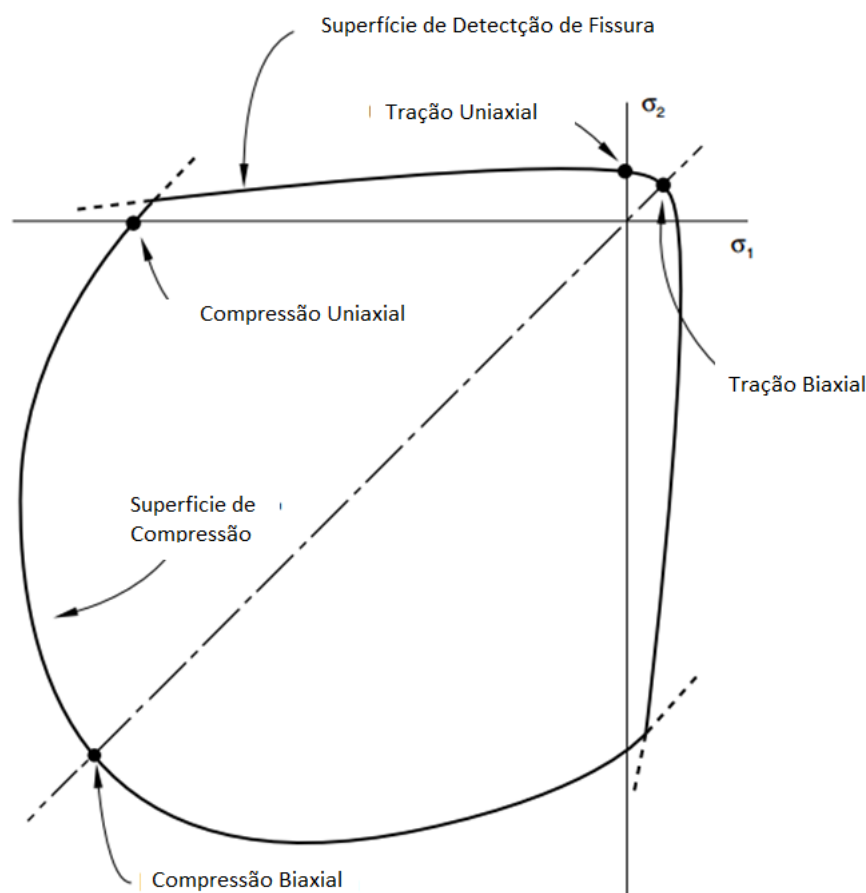
O modelo CDP é baseado na suposição de danos escalares e é utilizado para aplicações em que o concreto é submetido a condições de carga arbitrárias, incluindo carregamento cíclico. O modelo tem em consideração a degradação da rigidez elástica induzida pela deformação plástica tanto para tração quanto para compressão.

Sendo assim, dentre os três modelos constitutivos referentes ao concreto que mais se adequará ao objeto de estudo dessa pesquisa é o modelo CSC. A figura 70 ilustra a maneira como o modelo considera o comportamento do concreto, enquanto a figura 71 apresenta a superfície do plano de tensão utilizado no modelo.

Figura 70 - Comportamento Uniaxial do Concreto para o Modelo CSC

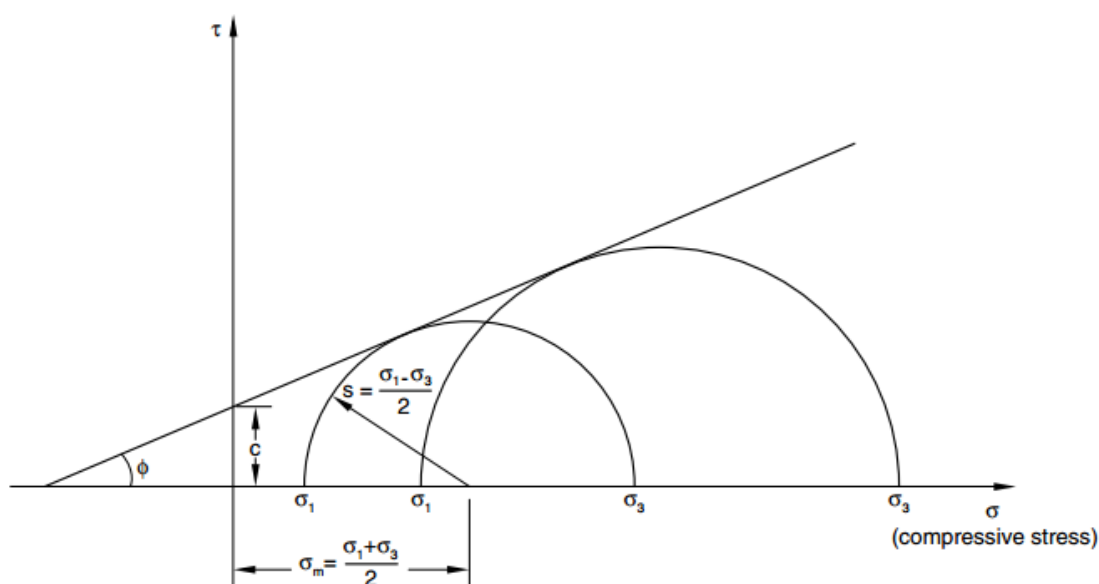


Fonte: Manual do Usuário do Abaqus Analysis – Volume III

Figura 71 - Superfície do Plano de Tensões para o Modelo CSC

Fonte: Manual do Usurário do Abaqus Analysis – Volume III

Quanto ao modelo para representar a argamassa, será considerado o modelo constitutivo de Mohr – Coulomb. No critério de Mohr – Coulomb considera-se que ocorre a ruptura do material no instante em que a tensão de cisalhamento em qualquer ponto do elemento (no caso da argamassa) se iguala com um valor que depende da tensão normal no mesmo plano da tensão de cisalhamento. Esse modelo tem como base o círculo de Mohr para estado plano de tensões. A figura 72 ilustra o modo de ruptura por esse critério.

Figura 72 - Modo de Ruptura pelo Critério de Mohr-Coulomb

Fonte: Manual do Usurário do Abaqus Analysis – Volume III

O critério Mohr-Coulomb pode também ser descrito da forma analítica em que deve se obedecer a seguinte equação:

$$\tau = c - \sigma * \tan \varphi \quad (7.2.1)$$

Onde:

τ – tensão de cisalhamento;

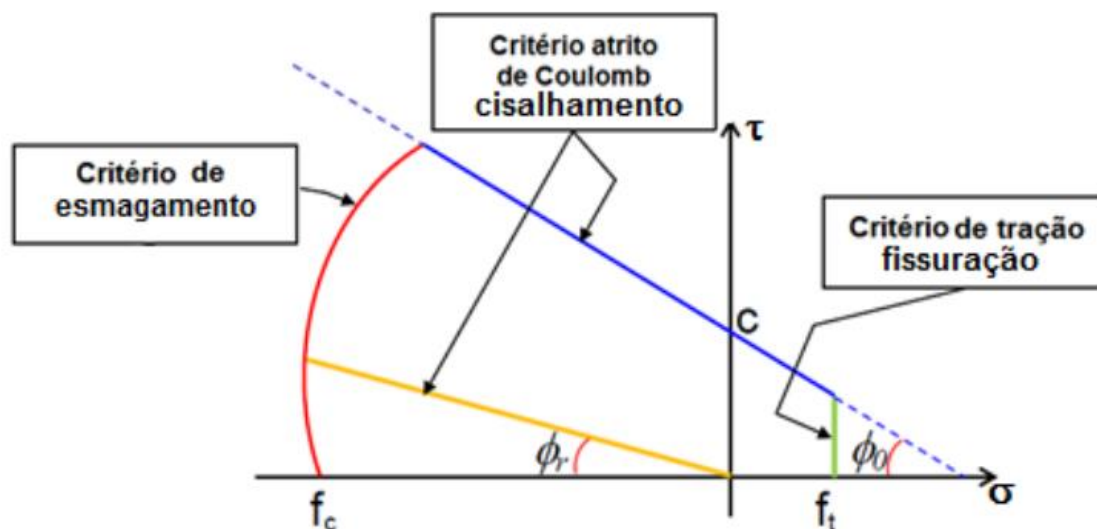
c – coesão do material;

σ – tensão normal;

φ – ângulo do coeficiente de atrito do material.

Quanto ao modelo que constituirá a interface entre os elementos será considerado o modelo proposto por Lourenço e Rots (1997) em que o modelo considera a ruptura por tração (fissuração) de faturamento de acordo com o uma superfície limite, o critério de Mohr-Coulomb para ruptura por cisalhamento, e o critério denominado “cap model” (critério de esmagamento) para ruptura por compressão. A figura 73 ilustra o modelo de forma gráfica.

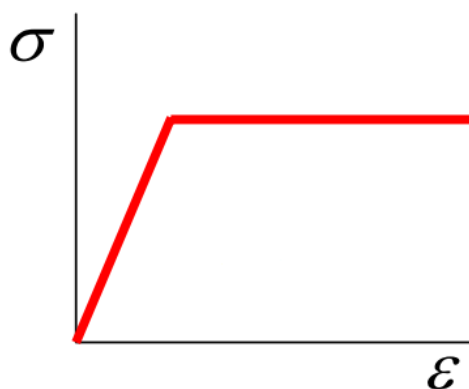
Figura 73 - Modelo Constitutivo para Interface Proposto por Lourenço e Rots (1997)



Fonte: Oliveira (2014)

Quanto ao modelo constitutivo para armadura, será adotado o modelo elasto – perfeitamente plástico, considerando como plastificação o critério de von Mises. A figura 74 ilustra um gráfico do comportamento da armadura no modelo elasto- perfeitamente plástico.

Figura 74 - Comportamento Elasto - Perfeitamente Plástico



Fonte: Braga (2013)

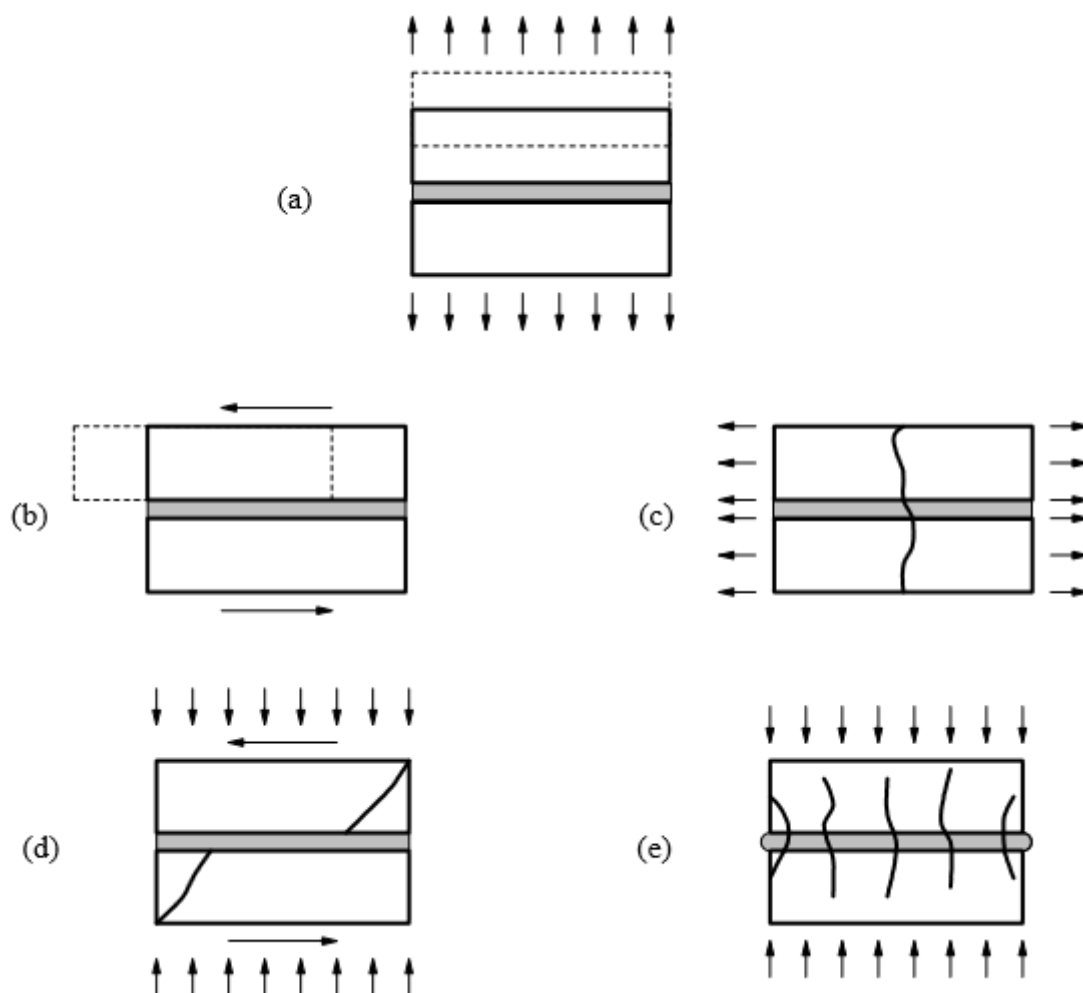
4.3 Mecanismos de Ruptura da Alvenaria

Para se garantir a precisão do modelo de micro-modelagem é necessário incorporar os tipos básicos de mecanismos de ruptura que caracterizam a alvenaria estrutural. Segundo Lourenço (1996), é possível obter cinco tipos de ruptura da alvenaria que são os seguintes:

- a) Fissura nas Juntas – figura 75.a;

- b) Escorregamento ao longo de uma junta horizontal ou vertical devido a baixos valores de tensão normal – figura 75.b;
- c) Fissuras dos blocos na direção da tração – 75.c;
- d) Fissuras diagonais à tração dos blocos de alvenaria com valores de tensão normal suficientes para desenvolver atrito nas juntas de argamassa – figura 75.d;
- e) Fendilhamento das unidades à tração como resultado da dilatação da argamassa, com valores altos de tensão normal de compressão – figura 75.e.

Figura 75 - Tipos Básicos de Mecanismos de Ruptura para Alvenaria



Fonte: Lourenço (1996)

Observando a figura 75 é possível notar que os mecanismos (a,b) ocorrem à ruptura devido a junta de argamassa. Já o mecanismo do item (c) ocorre devido a ruptura do bloco enquanto que os mecanismos descritos

nos itens (d,e) são provenientes de uma combinação de falha do bloco e da argamassa.

Segundo Peleteiro (2002) afirma que para uma micro-modelagem todos os mecanismos de ruptura apresentados podem ser incluídos no modelo numérico, uma vez que na micro-modelagem as juntas e os blocos são representados separadamente.

Com base nos tipos de modelagem e considerando o software a ser utilizado (Abaqus/2017), é explicado, no capítulo 11 parâmetros das seguintes para criação dos modelos numéricos, considerando a modelagem do tipo MMD e considerando para representação do comportamento plásticos de todos os materiais o modelo constitutivo CDP.

- a) Modelo CDP – apresenta os parâmetros de entrada para representação do comportamento plástico dos materiais, alvenaria, argamassa e concreto. Quanto ao comportamento plástico é explicado a forma, verificação dos dados de dano à compressão e à tração;
- b) Superfícies de Contato – neste item são apresentados os tipos de superfícies que são possíveis de utilizar para a criação de contato. A apresentação consiste de uma explicação detalhada dos tipos básicos de contato que o programa fornece;
- c) Propriedades de Contato – considerando o tipo de contato a ser utilizado neste trabalho, surface – surface, são explicitados os tipos de propriedades para representação da interface entre bloco – argamassa bem como a representação do bloco - bloco, onde a interface pode apresentar o comportamento semelhante a argamassa.

5 Programa Experimental – Procedimento

Neste capítulo é apresentada parte experimental realizada *Brigham Young University* (Estados Unidos). Foram realizados seis tipos de ensaios, sendo três de caracterização dos materiais, (tração e compressão) que foram blocos, argamassa e graute. Além disso, foram realizados ensaios dos elementos para analisar o comportamento de interfaces por meio do ensaio bond wrench, ensaio da junta horizontal e também a obtenção do módulo de rigidez ao cisalhamento por meio do ensaio de compressão diagonal. A tabela 53 apresenta um resumo geral dos ensaios em que se apresenta o tipo de ensaio, o objetivo e as quantidades de corpos de prova para cada ensaio.

Tabela 53 - Resumo dos Ensaios

Tipo de Ensaio	Objetivo do Ensaio	Traço da Argamassa	Número de Corpos de Prova	Quantidade Blocos por Corpo de Prova		Quantidade Total de Blocos por Ensaio	Quantidade Total de Blocos	Instrumentação (Strain Gages ou LVDT's)	Tempo de Cura (dias)	Velocidade do Ensaio
				Bloco Inteiro	Meio Bloco					
Bond Wrench AS3700/2001	Determinar o valor da resistência a aderência das juntas horizontais	Argamassa Industrializada Tipo S	15	45	Não se aplica			N	7	Não se aplica
Compressão Diagonal	Determinar a resistência ao cisalhamento da interação entre o bloco e a argamassa		3	15	6			S	28	12,7mm/min ou 8900N/min
Ensaio de Cisalhamento da Junta Horizontal	Determinar a resistência da junta horizontal		29	3	Não se aplica				28	0,1MPa/min
Ensaio de Tração - Indireta	Determinar a resistência à tração do bloco, argamassa e graute	Não se Aplica	6	1	Não se aplica			N	Não se aplica	12,7mm/min ou 8900N/min
Ensaio de Compressão	Determinar a resistência à compressão do bloco, argamassa e graute	Não se Aplica	6	1	Não se aplica			N	Não se aplica	12,7mm/min ou 8900N/min

5.1 Ensaio de Bond Wrench e Ensaio da Junta Horizontal

Com objetivo de facilitar o processo de execução, foram criados prismas com a mesma quantidade de blocos, ou seja, três. Para a otimização da montagem dos prismas foi desenvolvido um instrumento que também teve a função de auxiliar na obtenção de um controle maior da espessura da argamassa. A figura 76 apresenta o instrumento utilizado para confecção dos prismas.

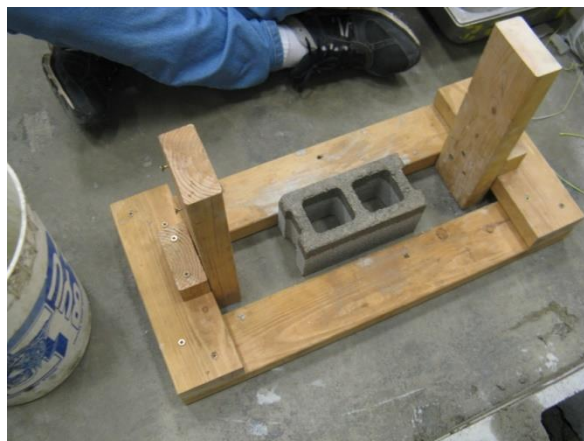
Figura 76 - Dispositivo para Construção dos Prismas



O procedimento de execução dos prismas é descrito a seguir:

- a) A face superior do primeiro bloco é umidecida (para reduzir a absorção da água da argamassa) e este é posicionado dentro do instrumento criado, conforme figura 77;

Figura 77 - Preparação do Corpo de Prova - Etapa 1



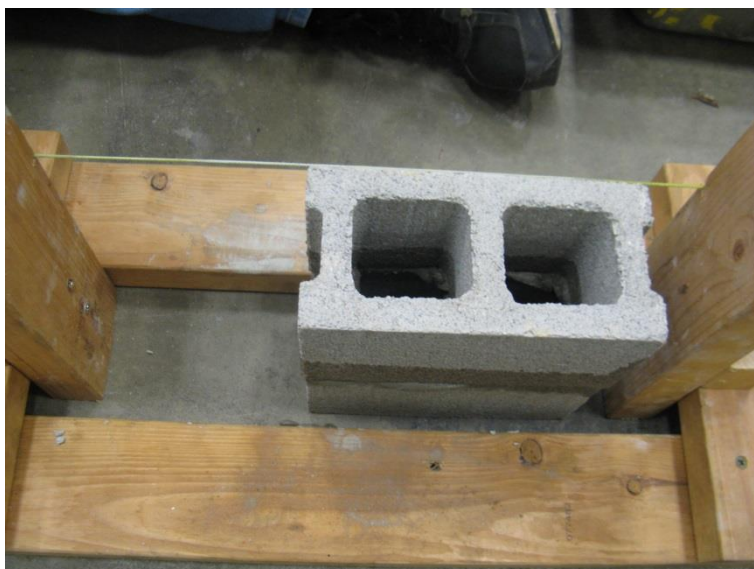
- b) Coloca-se argamassa em todas as paredes da face superior do bloco, conforme figura 78;

Figura 78 - Preparação do Corpo de Prova - Etapa 2



- c) Umedece-se o bloco e posiciona-o sobre a argamassa, conforme figura 79;

Figura 79 - Preparação do Corpo de Prova - Etapa 3



- d) Posiciona-se a primeira linha, orientando-se a partir dela para observar o nível do prisma, conforme figura 80;

Figura 80 - Preparação do Corpo de Prova - Etapa 4



- e) Repetir os passos b), c) e d) mais uma vez e assim obter um prisma de três blocos, conforme a figura 81.

Figura 81 - Corpo de Prova - Ensaio de Cisalhamento da Junta e Bond Wrench



5.2 Ensaio de compressão diagonal

Foram executadas dez paredes quadradas (sendo cinco paredes grauteadas e cinco paredes ocas), com três blocos de comprimento e seis blocos de altura. O procedimento de execução é apresentado a seguir:

- a) Para criação da primeira a fiada colocou-se dois cordões de argamassa, conforme a figura 82;

Figura 82 - Preparação do Corpo de Prova - Etapa 1



- b) Umedeceu-se toda a superfície superior da primeira fiada para colocar-se a argamassa em todas as faces, conforme figura 83;

Figura 83 - Preparação do Corpo de Prova - Etapa 2



- c) Posicionou-se os blocos da segunda fiada e observou-se o nível da fiada, bem como o prumo, conforme figura 84;

Figura 84 - Preparação do Corpo de Prova - Etapa 3



- d) Para as demais fiadas, repetiu-se por mais quatro vezes os itens b) e c) para se obter a parede, conforme a figura 85.

Figura 85 - Corpo de Prova - Compressão Diagonal



5.3 Grauteamento das paredes

Após aproximadamente 48 horas da execução das paredes, estas foram grauteadas conforme o procedimento a seguir:

- a) Umedeceu-se a parede, conforme figura 86, para que as paredes internas dos blocos não absorvessem a água do graute;

Figura 86 - Grauteamento - Etapa 1



b) Lançou-se de dois copos de graute, conforme figura 87;

Figura 87 - Grauteamento - Etapa 2



c) Adensou-se o graute, conforme figura 88, para o preenchimento dos vazios;

Figura 88 - Grauteamento - Etapa 3

d) Repetiu-se o procedimento dos itens b) e c) para que ocorresse o grauteamento completo das paredes.

O procedimento apresentado anteriormente foi repetido por mais quatro vezes e com isso foram obtidas cinco paredes grauteadas para realização do ensaio.

5.4 Preparação dos corpos de prova de argamassa

Para a execução dos corpos de prova de argamassa para o teste de compressão, seguiu-se o procedimento da norma Americana ASTM9999 e para montagem dos corpos de prova de tração, seguiu-se os parâmetros prescritos pela ASTM8888. As imagens, na figura 89, apresentam os corpos de prova desde a execução até a desmoldagem.

Figura 89 - Corpos de Prova de Argamassa - Compressão(a), (b), (c) e Tração(d), (e), (f)

(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Vale destacar que os corpos de prova foram preparados para cada saco de argamassa utilizado.

5.5 Preparação dos corpos de prova do graute

Para a execução dos corpos de prova do graute para ensaio de compressão e tração seguiu-se o procedimento da norma Americana ASTM9999. A figura 90 apresenta os corpos de prova desde a execução até a desmoldagem.

Figura 90 - Corpos de Prova - Graute - Compressão e Tração



(a)



(b)



(c)

Vale destacar que os corpos de prova foram preparados para cada saco de graute utilizado.

6 Programa Experimental – Apresentação dos Resultados

Nesse capítulo é apresentado os resultados obtidos dos ensaios descritos no capítulo anterior.

6.1 Ensaio de Tração Indireta dos Componentes

Além dos ensaios de caracterização da interface foram realizados ensaios de caracterização das unidades, argamassa e graute. A seguir são apresentados algumas figuras desses ensaios bem como os gráficos de força vs deslocamento obtido até a ruptura do corpo de prova. Vale destacar que neste capítulo será apresentado os ensaios de caracterização de resistência a tração desses elementos.

6.1.1 Unidades

Foram ensaiados um total de 12 blocos a fim de se obter a curva de força x deslocamento de cada corpo de prova até a ruptura. Todos os ensaios foram realizados a taxa de deslocamento de aproximadamente 1,27mm/min. As figuras 91 e 92 apresentam um corpo de prova posicionado para o ensaio e a ruptura observada em todos os ensaios.

Figura 91 – Exemplo Corpo de Prova de Tração Indireta - Antes do Ensaio

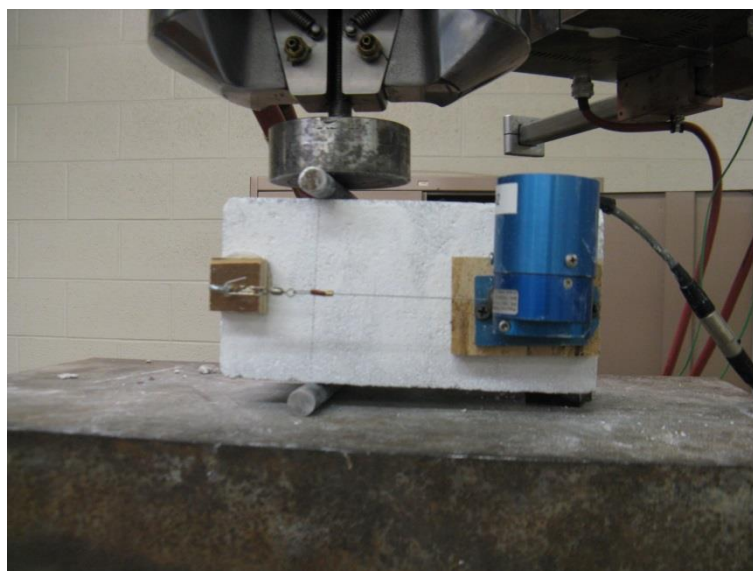
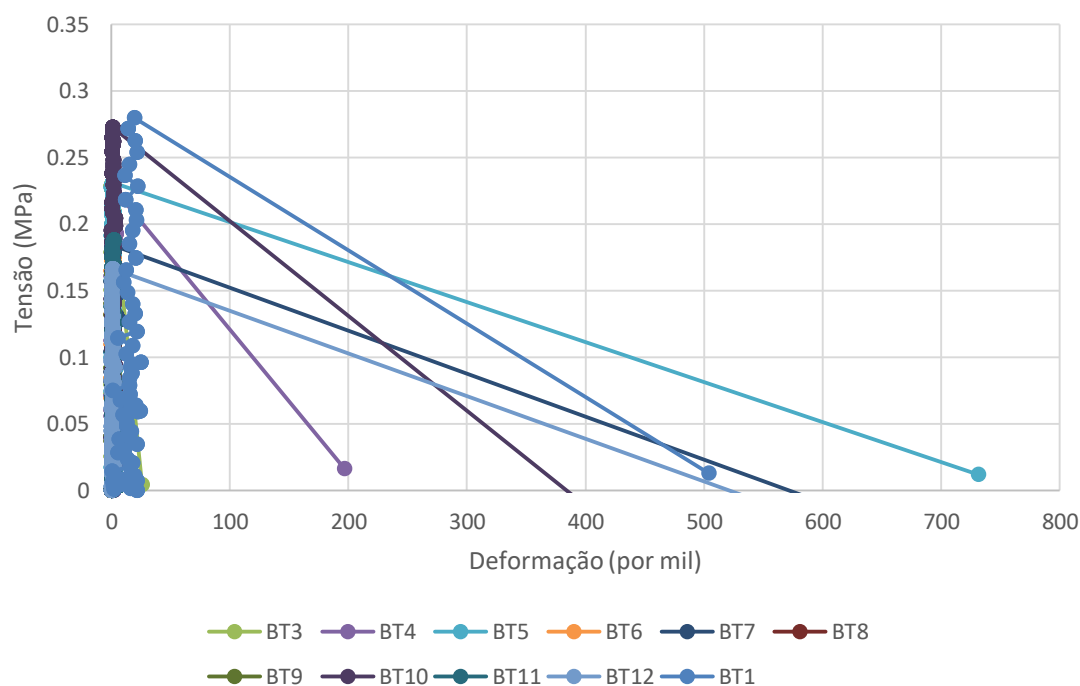


Figura 92 – Exemplo de Corpo de Prova de Tração Indireta - Após Ensaio

A seguir são apresentadas as curvas de tensão vs deformação obtidas para cada corpo de prova, no gráfico 1.

Gráfico 1 - Tensão vs Deformação - Tração Indireta

Com base no gráfico 1, é possível extrair o valor de tensão máxima em cada corpo de prova e o respectivo valor da deformação. Com base nessas informações, foi calculado o valor de tensão de tração característica e média. Os valores de tensão de tração, bem como, o valor característico e médio são apresentados na tabela 54. É importante destacar que o valor característico da tensão de tração foi calculado de acordo com a ABNT/NBR 15961-2/2018.

Tabela 54 – Cálculo de Resistência Característica a Tração do Bloco

Corpos de Prova	Força Máxima	Área(mm²)	Tensão de Tração(MPa)	Número de amostras	Daods Ordenados	fbk1(Mpa)	fbk2(Mpa)	fbk3(Mpa)	fbk4(Mpa)	fbk,est(Mpa)
BC1	7,062	25231	0,5598	12	0,0871	0,1405	0,1377	0,0776	0,1405	0,0776
BC2	5,994		0,4751		0,3626					
BC3	5,780		0,4582		0,0976					
BC4	5,749		0,4557		0,0990					
BC5	5,838		0,4628		0,1013					
BC6	4,574		0,3626		0,1087					
BC7	4,641		0,3679		0,1226					
BC8	5,095		0,4039		0,1233					
BC9	4,085		0,3238		0,1245					
BC10	6,879		0,5453		0,1279					
BC11	4,748		0,3764		0,1467					
BC12	4,205		0,3333		0,1506					

6.1.2 Argamassa

Foram ensaiados 6 corpos de prova de argamassa com um tempo de cura de 28 dias. As figuras 93 e 94 apresentam o corpo de prova posicionado para o ensaio e também a ruptura típica observada no ensaio. Foi considerado aproximadamente a mesma taxa de deslocamento por minuto nesse ensaio.

Figura 93 - Exemplo de Corpo de Prova de Compressão Diametral da Argamassa - Antes do Ensaio

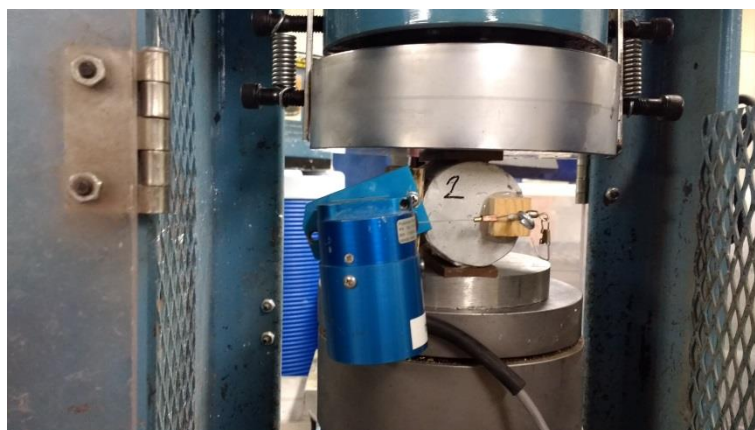
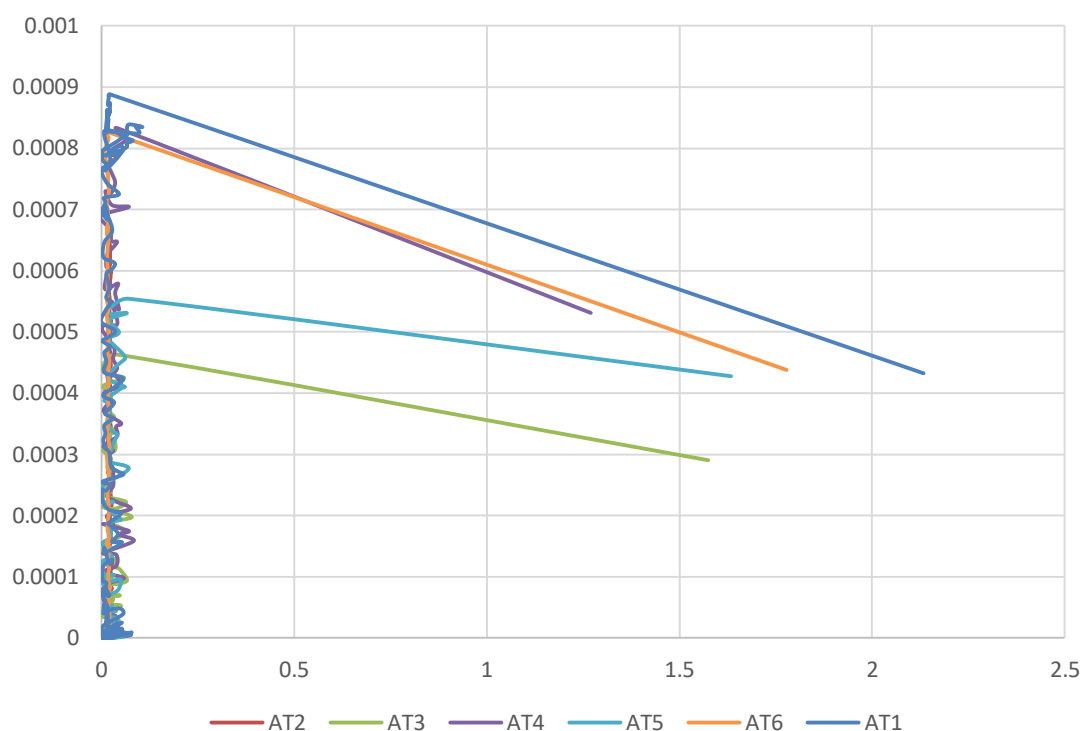


Figura 94 - Exemplo de Corpo de Prova de Compressão Diametral da Argamassa - Após o Ensaio



A seguir são apresentadas as curvas tensão vs deformação obtidas para cada corpo de prova no gráfico 2 a seguir.

Gráfico 2 - Curva Tensão vs Deformação - Tração Indireta

Com base no gráfico 2, assim como no item 8.4.1 dessa tese, foi calculado o valor característico da argamassa conforme tabela 55. para o cálculo da tensão característica foi utilizado o método proposto pela ABNT/NBR6118/2017.

Tabela 55 - Cálculo de Resistência Característica a Tração da Argamassa

Corpo de Prova	Carga Máxima(kN)	Área Efetiva(mm²)	Tensão de Compressão(Mpa)	Número de amostras	Dados Ordenados	Tensão Média	fti-fcm	(fti-fcm)/fcm	soma((fti-fcm)/fcm)²	Desio Padrão	ftk(MPa)
AT1	18,24	20000,00	0,91	6	0,04559	0,03637	0,00922	0,25350	0,22380	0,19313	0,02482
AT2	13,75		0,69		0,03437		-0,00200	-0,05498			
AT3	9,65		0,48		0,02413		-0,01224	-0,33656			
AT4	17,57		0,88		0,04394		0,00756	0,20795			
AT5	11,54		0,58		0,02885		-0,00753	-0,20693			
AT6	16,54		0,83		0,04136		0,00498	0,13702			

6.1.3 Graute

Foram ensaiados 4 corpos de prova de argamassa com um tempo de cura de 28 dias. As figuras 95 e 96 apresenta-se o corpo de prova posicionado para o ensaio e também a ruptura típica observada no ensaios. Foi considerado aproximadamente a mesma taxa de deslocamento por minuto nesse ensaio.

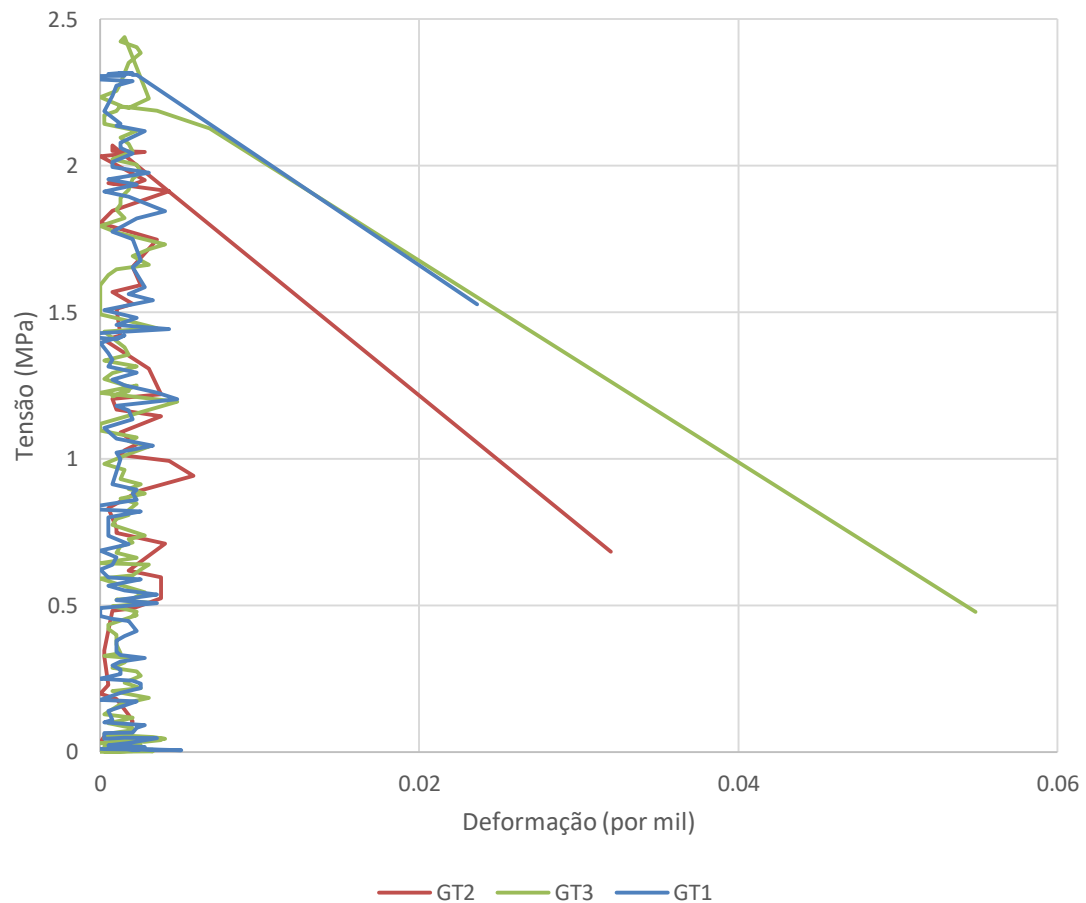
Figura 95 - Exemplo de Corpo de Prova de Compressão Diametral do Graute - Antes do Ensaio



Figura 96- Exemplo de Corpo de Prova de Compressão Diametral do Graute - Após o Ensaio



A seguir são apresentado as curvas de tensão vs deformação obtidas para cada corpo de prova.



Assim como nos itens 8.4.1 e 8.4.2 foi calculado o valor de resistência característica do graute com base nos valores de tensão máxima de cada corpo de prova. O cálculo da resistência se encontra na tabela 56.

Tabela 56 - Cálculo da Resistência Característica a Tração do Graute

Corpo de Prova	Carga Máxima(kN)	Área Efetiva(mm²)	Tensão de Compressão(MPa)	Número de amostras	Ordenar os dados	Tensão Média	fti-fcm	(fti-fcm)/fcm	soma((fci-fcm)/fcm)²	Desio Padrão	ftk(MPa)
GC1	66,64	62831,85	2,12	4	3,26	3,51599	- 0,25477	-0,07246	0,01727	0,06570	3,136
GC2	72,79		2,32		3,33		- 0,18405	-0,05235			
GC3	65,01		2,07		3,64		0,12355	0,03514			
GC4	76,63		2,44		3,83		0,31527	0,08967			

6.2 Ensaio de Compressão dos Componentes

Além dos ensaios de caracterização da interface foram realizados ensaios de caracterização das unidades, argamassa e graute. A seguir são apresentados algumas figuras desses ensaios bem como os gráficos de força x deslocamento obtido até a ruptura do corpo de prova. Vale destacar que neste capítulo será apresentado os ensaios de caracterização de resistência a tração desses elementos.

6.2.1 Unidades

Foram ensaiados um total de 6 blocos a fim de se obter a curva de força vs deslocamento de cada corpo de prova até a ruptura. Todos os ensaios foram realizados a taxa de deslocamento de aproximadamente 1,27mm/min. As figuras 97 e 98 apresenta-se um corpo de prova posicionado para o ensaio e a ruptura observada em todos os ensaios.

Figura 97 - Ensaio de Compressão dos Blocos



(a)



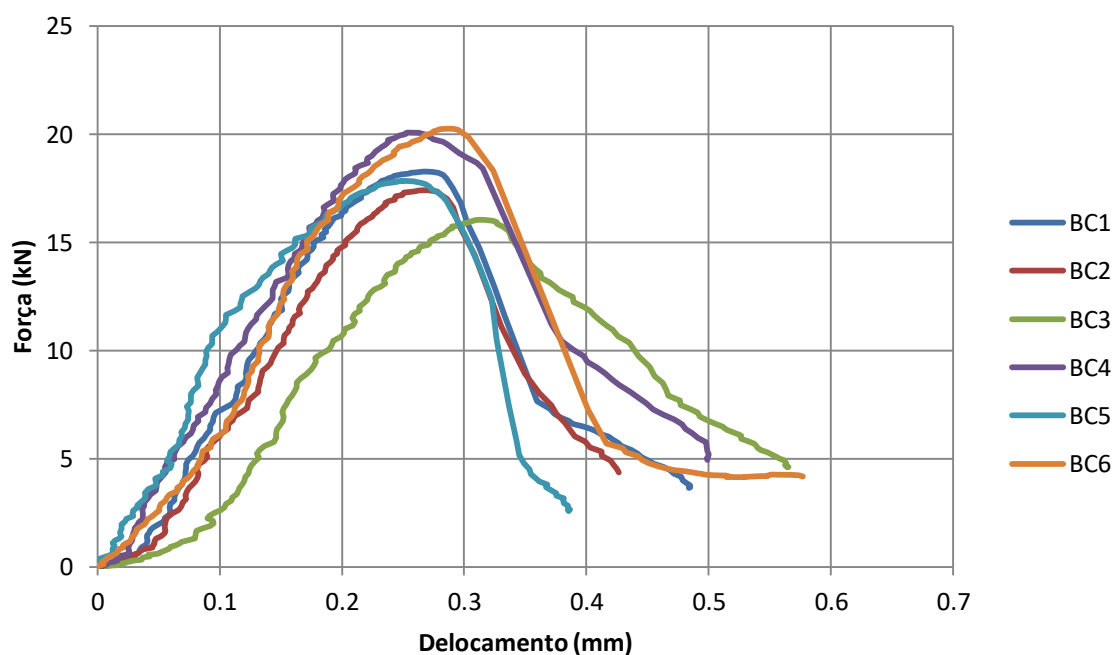
(b)



(c)

A seguir são apresentadas as curvas de força vs deslocamento obtidas para cada corpo de prova.

Gráfico 3 – Força vs Deslocamento – Blocos de Concreto



Seguindo a metodologia já empregada no cálculo da resistência a tração, foi calculado o valor de resistência característica a compressão do bloco, tabela 57. Além disso, com base no gráfico 3, foi calculado também o módulo de elasticidade dos blocos, que são apresentados na tabela 58.

Tabela 57 - Cálculo da Resistência a Característica a Compressão dos Blocos

Corpo de Prova	Carga Máxima(kN)	Área Efetiva(mm²)	Tensão de Compressão(Mpa)	Número de amostras	Ordenar os dados	fbk1(Mpa)	fbk2(Mpa)	fbk3(Mpa)	fbk4(Mpa)	fbk,est(Mpa)
BC1	150,85	8257,90	18,27	6	16,04	15,61	18,31	14,27	18,31	14,27
BC2	143,72		17,40		17,40					
BC3	132,45		16,04		17,84					
BC4	165,73		20,07		18,27					
BC5	147,30		17,84		20,07					
BC6	167,20		20,25		20,25					

Tabela 58 - Módulo de Elasticidade Longitudinal dos Blocos

Corpo de Prova	Carga Máxima(kN)	Deslocamento	Deformação	Tensão de Compressão(Mpa)	Módulo de Elasticidade	Módulo Médio	Eci-Ecm	(Eci-Ecm)/Ecm	soma((Eci-Ecm)/Ecm)²	Desio Padrão	Módulo de Elasticidade Característico
BC1	150,85	0,02	0,0002686	18,27	68002,20	65691,31	2310,88	0,04	3,02	0,41	21743,93
BC2	143,72	0,02	0,0002709	17,40	64251,07		64251,07	0,98			
BC3	132,45	0,03	0,0003125	16,04	51331,51		51331,51	0,78			
BC4	165,73	0,02	0,0002535	20,07	79180,47		79180,47	1,21			
BC5	147,30	0,02	0,0002495	17,84	71484,12		71484,12	1,09			
BC6	167,20	0,03	0,0002849	20,25	71060,68		71060,68	1,08			

6.2.2 Argamassa

Foram ensaiados 6 corpos de prova de argamassa com um tempo de cura de 28 dias. As figuras 98 e 99 apresentam o corpo de prova posicionado para o ensaio e também a ruptura típica observada no ensaio. Foi considerado aproximadamente a mesma taxa de deslocamento por minuto nesse ensaio.

Figura 98 - Ensaio de Compressão da Argamassa



Figura 99 - Ruptura da Argamassa



A seguir são apresentadas as curvas de tensão vs deformação, gráfico 4, obtidas para cada corpo de prova.

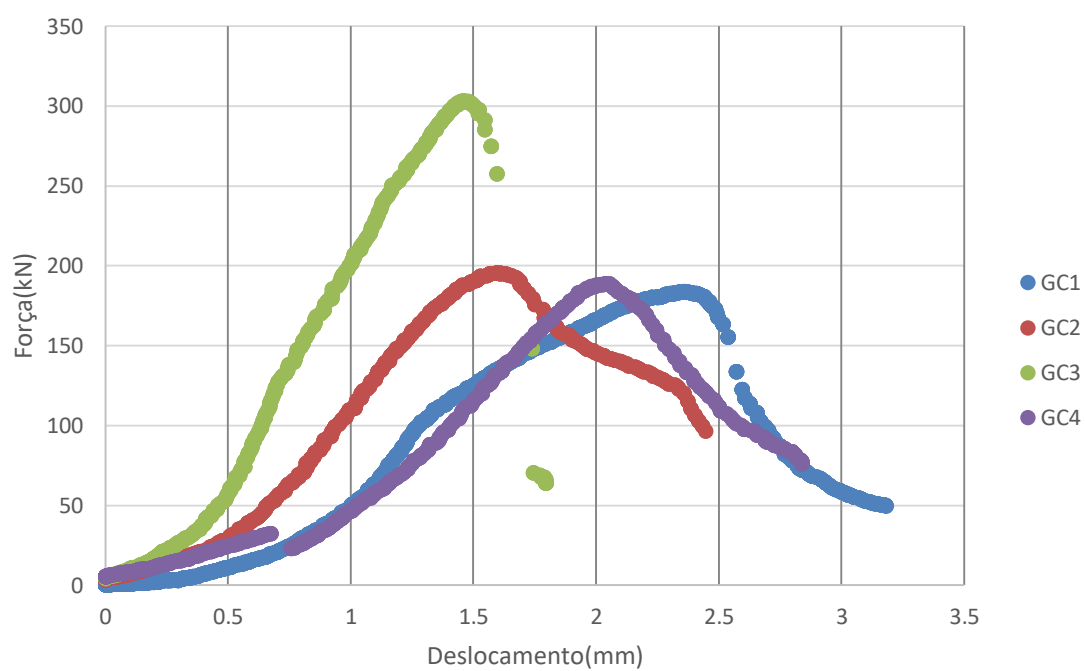
Gráfico 4 - Curvas Tensão vs Deformação- Ensaio de Compressão - Argamassa - 28 dias

6.2.3 Graute

Foram ensaiados 4 corpos de prova de argamassa com um tempo de cura de 28 dias. As figuras 100 e 101 apresentam o corpo de prova posicionado para o ensaio e também a ruptura típica observada no ensaio. Foi considerado aproximadamente a mesma taxa de deslocamento por minuto nesse ensaio.

Figura 100 - Ensaio de Compressão do Graute**Figura 101 - Ruptura do Corpo de Prova**

A seguir são apresentadas as curvas de força vs deslocamento, gráfico 5, obtidas para cada corpo de prova.

Gráfico 5 – Força vs Deslocamento - Graute

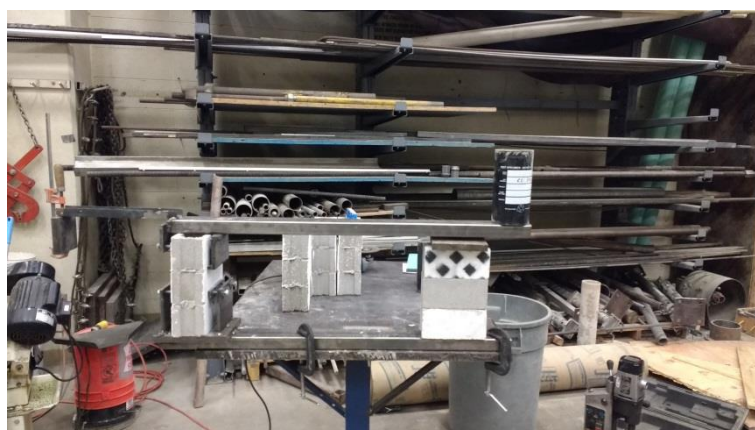
6.3 Ensaio de Bond Wrench

Para a execução do ensaio foi criado um dispositivo para a realização do ensaio. A figura 102 apresenta o corpo de prova posicionado para realizar o ensaio.

Figura 102 - Ensaio de Bond Wrench - Início



(a)



(b)

No cilindro posicionado na extremidade a direita da chave foi colocado a areia até que se perdesse a aderência entre o bloco e a argamassa. A figura 103 apresenta a ruptura dessa aderência.

Figura 103 - Ensaio de Bond Wrench - Ruptura

(a)



(b)



(c)

Foi possível notar nos ensaios que apenas dois tipos de ruptura podem ocorrer que são a argamassa descolar do bloco superior (103.a) ou pode se romper a argamassa do segundo (103.b).

Conforme apresentado nos capítulos anteriores foram ensaiados 15 prismas de três blocos, sendo que cada corpo de prova construído foi possível obter dois resultados por amostra, ou seja, foram obtidos 30 resultados

que foram calculados de acordo com a equação apresentada no item 3.4.1.1.1:

$$f_{sp} = \left(\frac{M_{sp}}{Z_d} \right) - \left(\frac{F_{sp}}{A_d} \right)$$

Com base nessa equação, é apresentado na tabela 59 os resultados encontrados para cada ensaio realizado.

Onde:

$C_1(\text{kg})$ e $C_2(\text{kg})$ – massa de areia posicionada na extremidade direita da chave;

$C_1(\text{N})$ e $C_2(\text{N})$ – força causada pela massa inserida na extremidade da chave;

$L_{C1}(\text{mm})$ e $L_{C2}(\text{mm})$ – distância entre o centro de gravidade do respectivo cilindro até o centro de gravidade do prisma;

$M_{C1C2}(\text{Nmm})$ – momento fletor causado pela massa de areia utilizada;

$M_{peça}(\text{Nmm})$ – momento fletor causado pela chave utilizada no ensaio;

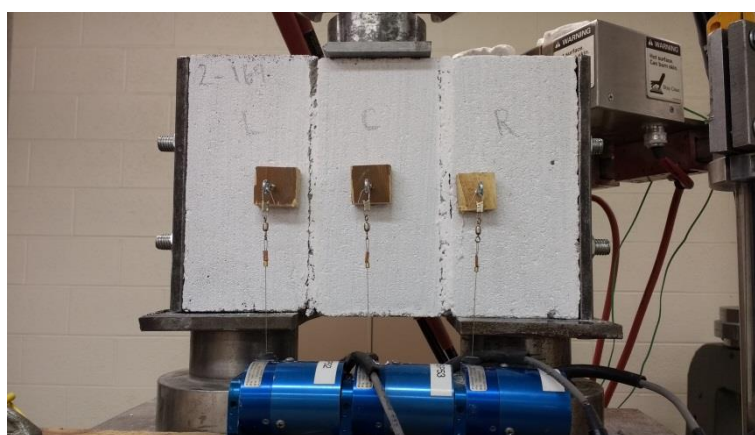
Tabela 59 - Resultados - Bond Wrench

Calculo do Msp												Fsp(N)	fsp(N/mm2)
Teste	C1(g)	C2(g)	C1(kg)	C2(kg)	C1(N)	C2(N)	Lc1(mm)	Lc2(mm)	Mc1c2(Nmm)	Mpeca(Nmm)	Msp(Nmm)		
1	1457		1,46		14,3				12788		23790	129,8	0,06
2	1909		1,91		18,7				16755		27757	134,2	0,08
3	1464		1,46		14,4				12852		23854	129,8	0,06
4	2536	991	2,54	0,99	24,9	9,7			29968		40971	150,1	0,15
5	2456		2,46		24,1				21558		32561	139,6	0,10
6	2495	200	2,50	0,20	24,5	2,0			23456		34459	141,9	0,11
7	2104		2,10		20,6				18464		29467	136,1	0,09
8	2303		2,30		22,6				20214		31216	138,1	0,10
9	1289		1,29		12,6		895	793	11314	11002,6	22317	128,1	0,05
10	2139		2,14		21,0				18772		29774	136,5	0,09
11	1738		1,74		17,0				15252		26255	132,5	0,07
12	1341		1,34		13,2				11769		22771	128,6	0,06
13	1560		1,56		15,3				13692		24695	130,8	0,07
14	1979		1,98		19,4				17368		28371	134,9	0,08
15	2458	760	2,46	0,76	24,1	7,5			27486		38488	147,0	0,13
16	1563		1,56		15,3				13718		24721	130,8	0,07
17	1947		1,95		19,1				17085		28087	134,6	0,08
18	1902		1,90		18,7				16689		27691	134,1	0,08
Média	1924	651	1,92	0,65	18,9	6,4			17733		28736	135,4	0,08
Desvio Padrão	418	407	0,42	0,41	4,1	4,0	Nao Se aplica	Nao Se aplica	5237	Nao Se aplica	5237	6,1	0,03
Coeficiente de Variação	22	63	21,70	62,52	21,7	62,5			339		18	4,5	29,49

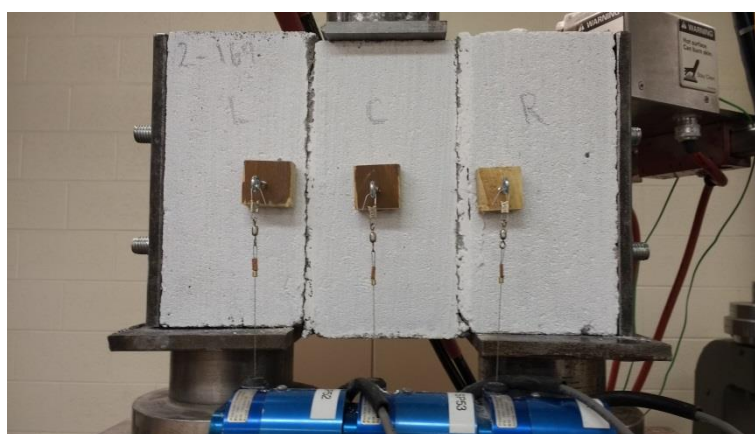
6.4 Ensaio de Cisalhamento da junta Horizontal

Neste tópico é apresentado os resultados dos ensaios de cisalhamento da junta horizontal. Para este ensaio foram construído 30 corpos de prova que divididos em três grupos de pré tensão. O nível de pré-tensão utilizado foi utilizado de acordo com a norma EN1052-3/2007 que foram $0,2\text{N/mm}^2$, $0,6\text{N/mm}^2$ e $1,0\text{N/mm}^2$. A figura 104 apresenta alguns corpos de prova após o ensaio realizado.

Figura 104 - Ensaio de Cisalhamento da junta Horizontal – Corpo de Prova antes do ensaio (a), corpo de prova após o ensaio (b) e (c), instrumentação do corpo de prova e deslocamento do bloco intermediário (d), caminho das fissuras (e) e (f)



(a)



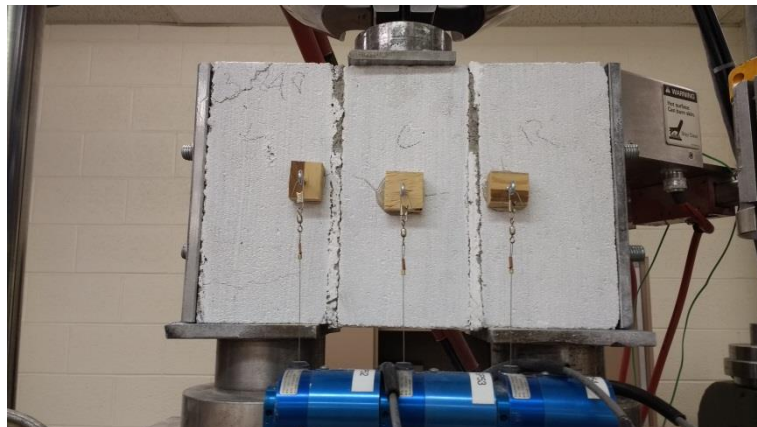
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Para cada corpo de prova foram ensaiado foi obtido uma curva de força x deslocamento para cada nível de pré-tensão especificado anteriormente. Os gráficos 6 a 8 apresentam o conjunto de corpos de prova desses níveis de pré-tensão.

Gráfico 6 - Tensão de Cisalhamento x Deformação - Pré - Compressão de 0,2MPa

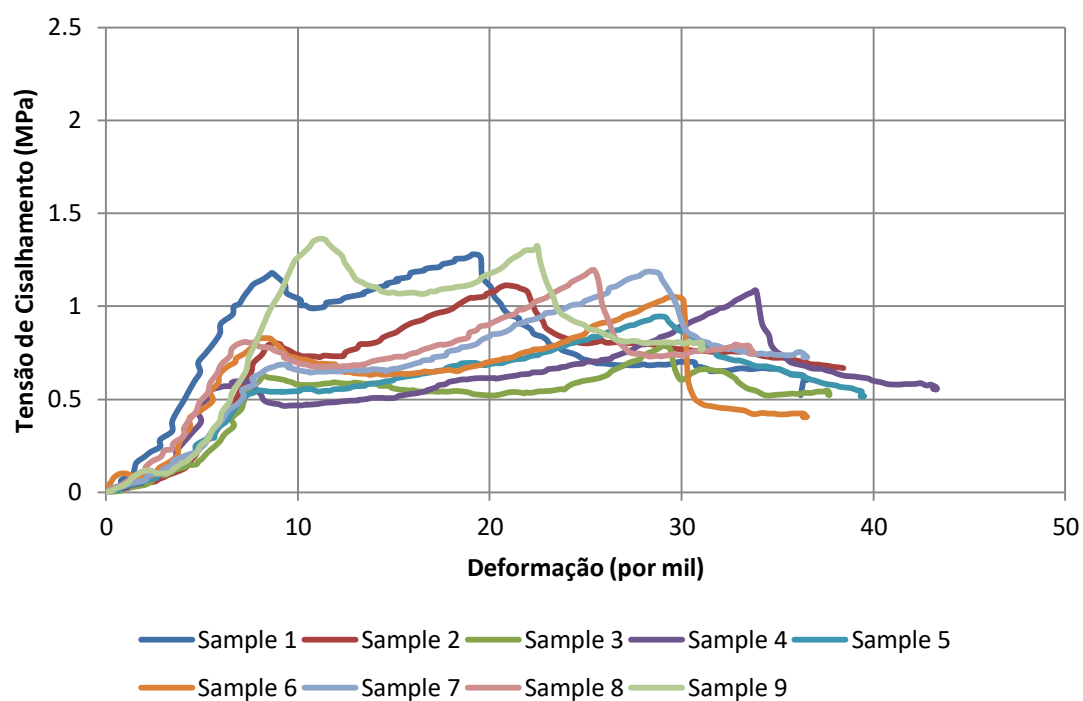


Gráfico 7 - Tensão de Cisalhamento x Deformação - Pré - Compressão de 0,6 MPa

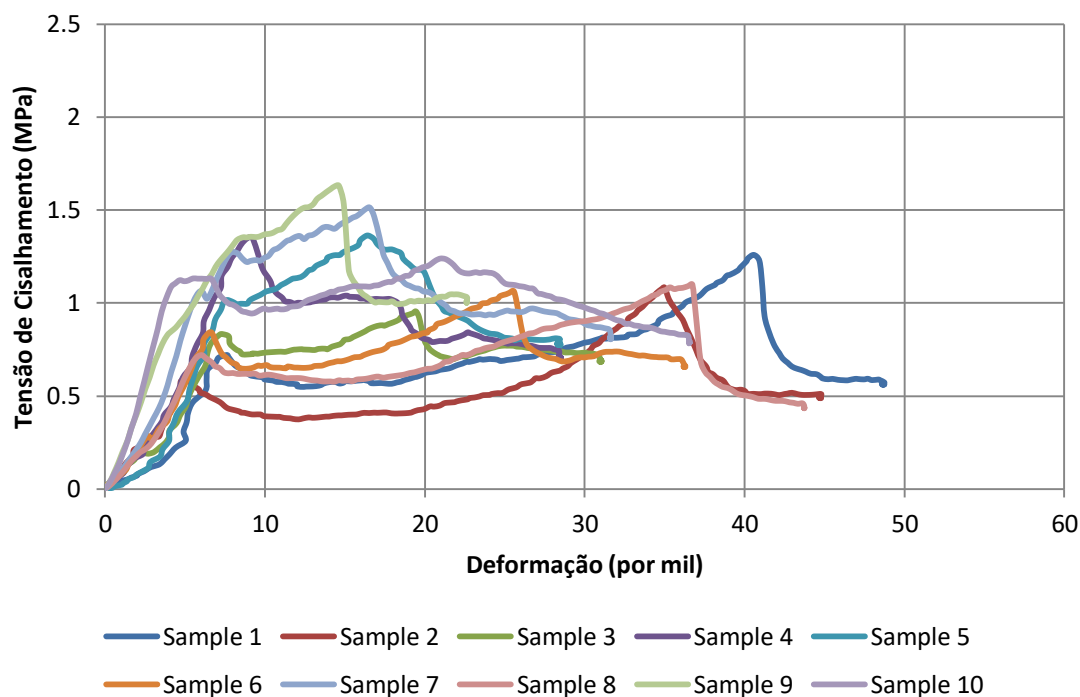
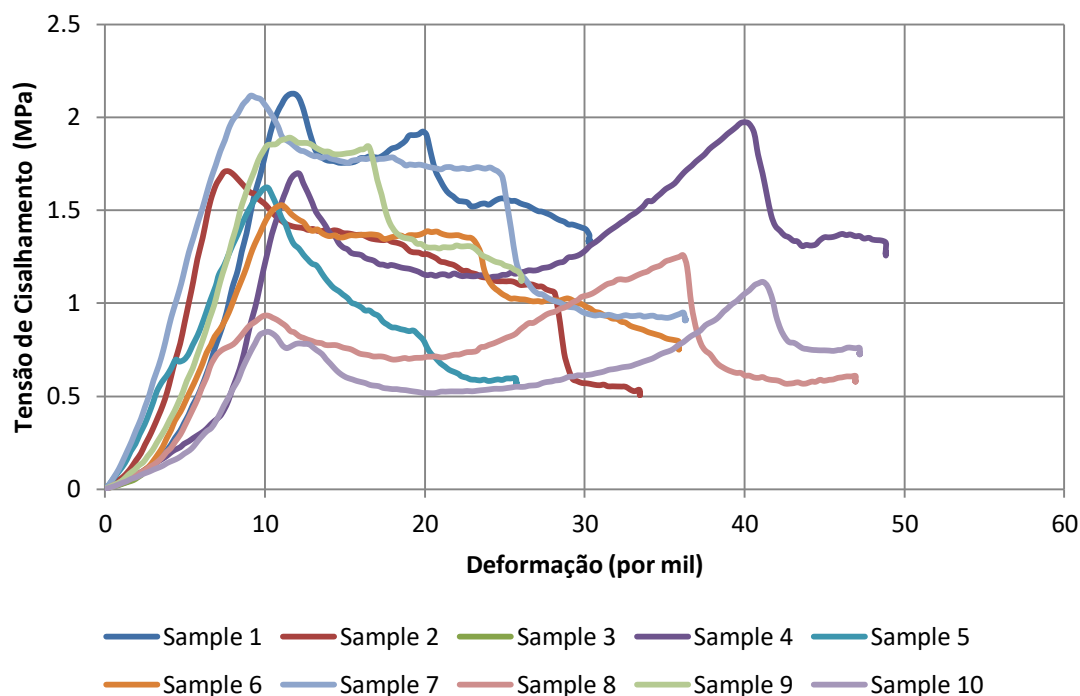


Gráfico 8 - Tensão de Cisalhamento x Deformação - Pré - Compressão de 1,0 MPa



Considerando ainda o conjunto de ensaios representando pelos gráficos 6 a 8, foi possível obter a equação que descreve o atrito na junta do corpo de prova. Para isso foi extraído do gráfico os valores de tensão de cisalhamento referente ao primeiro pico de cada amostra bem como a res-

pectiva deformação para essa tensão. Com base nesses valores foi encontrado um valor médio de tensão de cisalhamento e deformação para cada nível de pré compressão (0,2, 0,6 e 1,0MPa). Esses valores se encontram na tabela 60 a seguir.

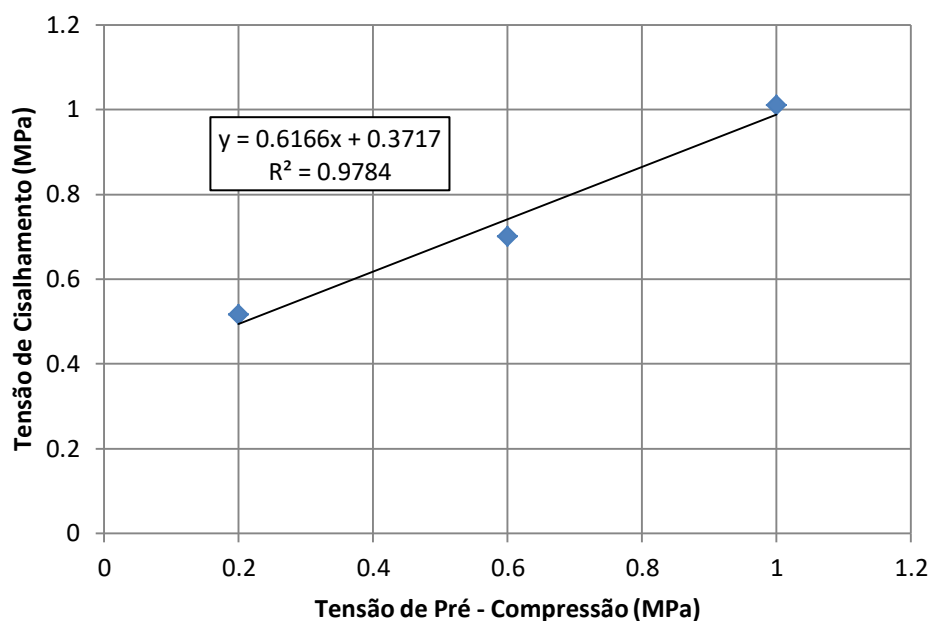
Tabela 60 - Resumo dos Resultados – Ensaio de Cisalhamento da Junta Horizontal

Pré Com- pressão (MPa)	Amostra	Força (N)	Deslocamento (mm)	Área Líquida (mm ²)	Força Média (N)	Deslocamento Médio (mm)	Tensão de Cisalhamento (MPa)	Tensão de Cisalhamento Média (MPa)	Desvio Padrão
0,2	1	12126	1,45	8221	8488	1,42	0,737	0,516	0,17
	2	8238	1,46				0,501		
	3	6490	1,36				0,395		
	4	6143	1,21				0,374		
	5	5520	1,30				0,336		
	6	8509	1,36				0,518		
	7	7055	1,60				0,429		
	8	8305	1,21				0,505		
	9	14003	1,86				0,852		
0,6	1	7406	1,28	8221	11498	2,09	0,450	0,699	0,21
	2	11129	5,87				0,677		
	3	8554	1,24				0,520		
	4	13923	1,52				0,847		
	5	14003	2,76				0,852		
	6	8634	1,09				0,525		
	7	15547	2,78				0,946		
	8	7397	1,02				0,450		
	9	16752	2,45				1,019		
	10	11637	0,92				0,708		
1	1	21836	1,94	16598	16598	1,77	1,328	1,009	0,27
	2	17571	1,30				1,069		
	3	17321	2,01				1,053		
	4	17437	2,04				1,061		
	5	16654	1,71				1,013		
	6	15698	1,85				0,955		
	7	21752	1,53				1,323		
	8	9586	1,67				0,583		
	9	19430	1,94				1,182		
	10	8696	1,71				0,529		

Com base na tabela 60, foi construído um gráfico de tensão de cisalhamento de médio por nível de pré compressão (gráfico 9) e a partir desse gráfico se obteve a tensão de cisalhamento inicial, ou seja, quando a tensão de pré compressão é nula e também o coeficiente de atrito do conjunto de

dados analisados. Esses dois parâmetros (tensão de cisalhamento inicial e coeficiente de atrito) foram obtidos a partir da regressão linear dos dados do gráfico 4.

Gráfico 9 - Tensão de Cisalhamento Média x Tensão de Pré Compressão

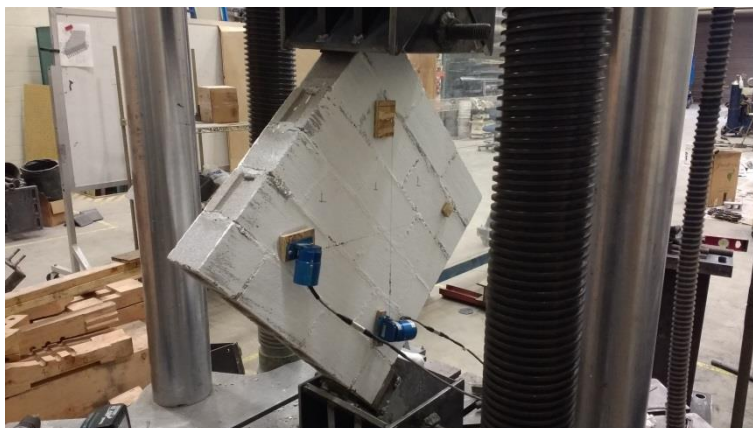


Com base no gráfico 9 é possível notar que linha de tendência apresenta uma boa correlação com os dados experimentais e com isso tem-se a tensão de cisalhamento inicial (τ_0), em MPa, é igual 0,37 e o coeficiente de atrito que é representado por $\tan \phi$ é igual a 0,61 que corresponde a um ângulo, em radianos, igual a 0,552.

6.5 Compressão Diagonal

Neste item é apresentado o resultado dos ensaios de compressão diagonal. Foram contruídos, assim como descrito no capítulo 4, 10 corpos de prova que foram divididos em oco e cheio. Todos os corpos de prova foram dispostos na máquina da mesma forma, conforme a figura 105.

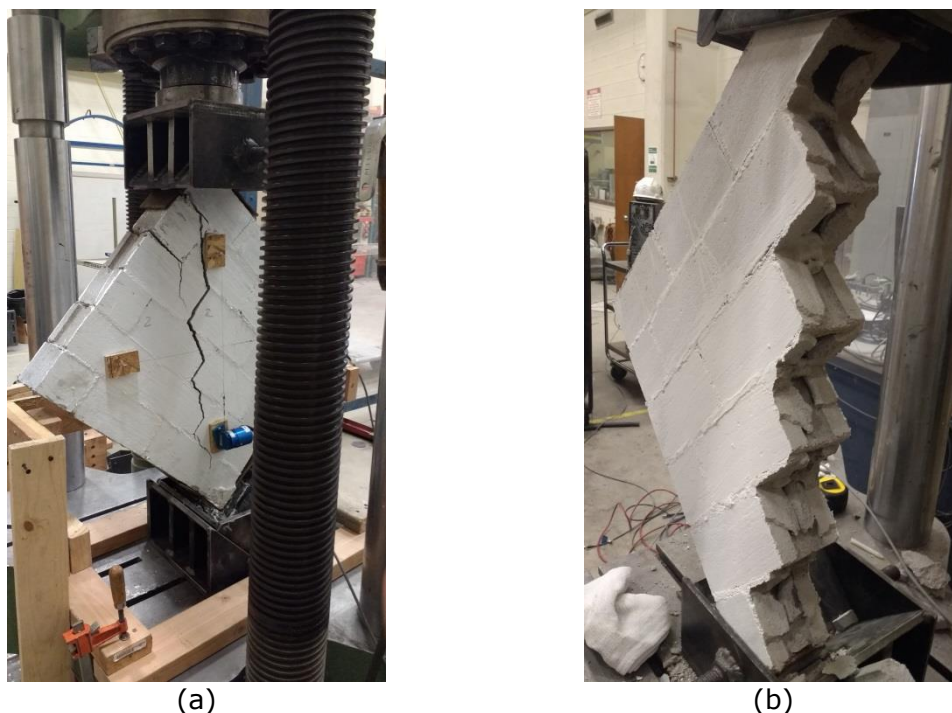
Figura 105 - Compressão Diagonal - Antes do Ensaio



Foi observado que o modo de ruptura dos corpos de prova seguiram o mesmo apresentado na literatura, conforme Bolhassani et al (2015), Knox et al (2017) entre outros citados neste trabalho. Além disso foi construído um dispositivo, conforme figura 106 e 107, que protegia a instrumentação bem como as pessoas que estavam no local.

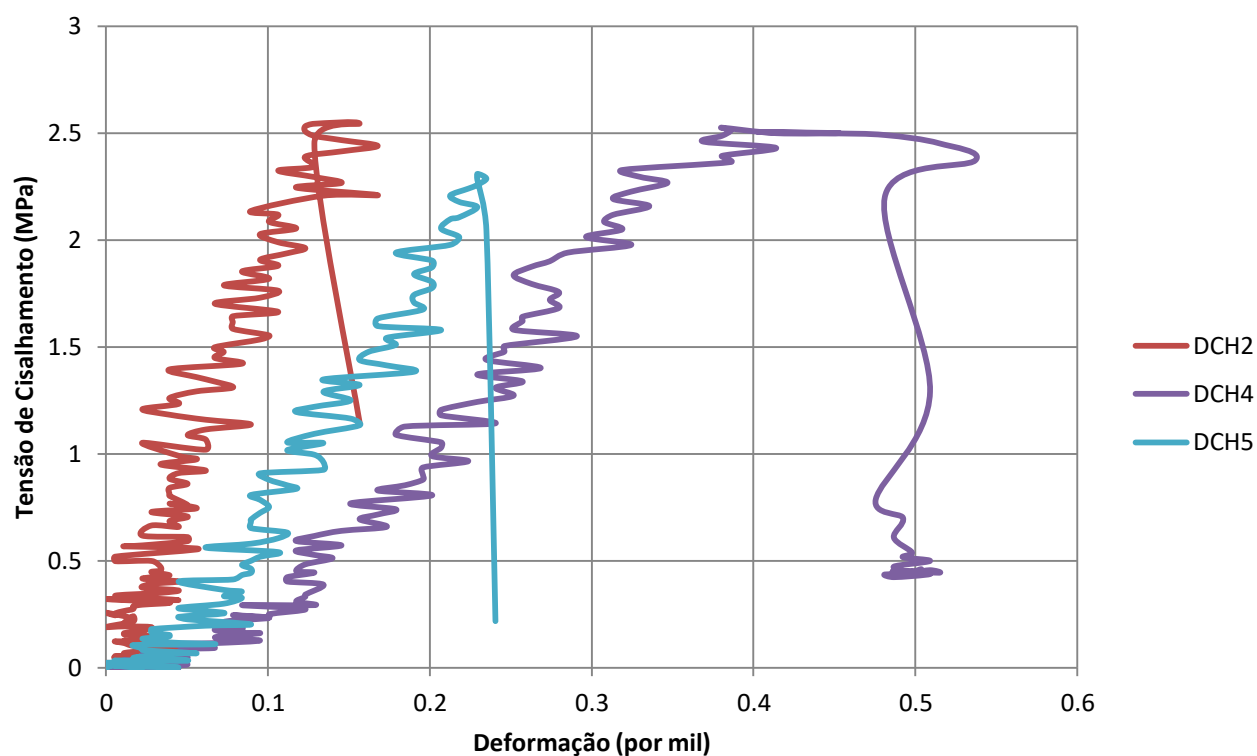
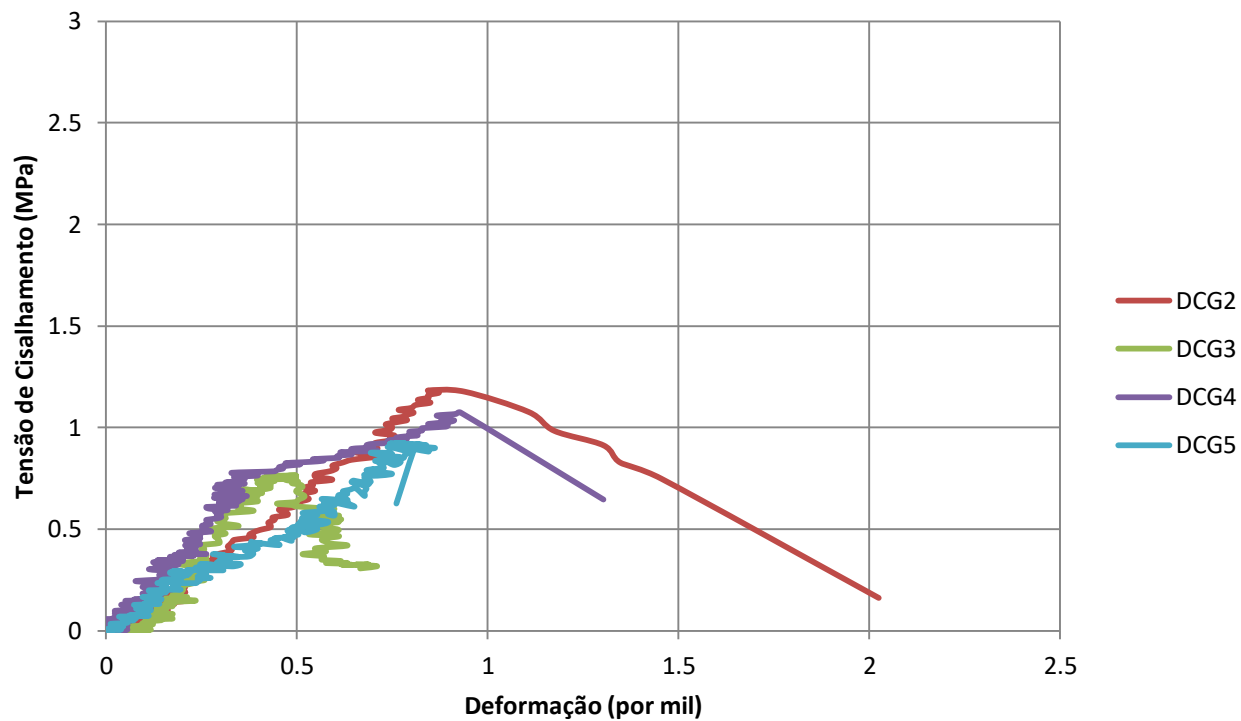
Figura 106 - Compressão Diagonal - Após a Ruptura



Figura 107 - Ruptura Típica

É importante destacar que é de extrema importância o momento de posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaio bem como manter a mesma posição dos instrumentos de medição. Quanto ao posicionamento, caso o corpo de prova não esteja totalmente alinhado com a máquina realizará a aplicação do deslcoamento, pode ser que ocorra outros esforços que combinaram com a compressão, como por exemplo, cisalhamento e desta forma os resultados não serão satisfatório. Já a importância de manter a mesma posição dos instrumentos de medição é porque facilita o cálculo da deformação do corpo de prova para obtenção do módulo de elasticidade transversal de cada corpo de prova.

A partir destes ensaios são criados gráficos de tensão vs deformação. Os gráficos 10 e 11 a seguir representam tensão vs deformação vertical para cada amostra e também a curva média respectiva a cada grupo de ensaio.

Gráfico 10 – Tensão vs Deformação - Oco**Gráfico 11 - Tensão vs Deformação - Grauteada**

Para o cálculo do módulo de elasticidade transversal é necessário três informações, a partir dos gráficos 10 e 11, que são:

- a) Tensão Máxima suportada pelo corpo de prova em MPa;
- b) Deslocamento horizontal e vertical, expresso em milímetros, do corpo de prova referente a carga máxima;
- c) O comprimento inicial do instrumento de medição também expresso em milímetros;

Lembrando que para o cálculo da tensão máxima é necessário calcular área da seção transversal na qual foi aplicada força durante o ensaios. Com base nessas informações a tabela 61 apresenta os valores de módulo de elasticidade transversal para cada corpo de prova e também o valor médio.

Tabela 61 - Cálculo do Módulo de Elasticidade Transversal para Paredes

Tipo de Parede	Oca	Grauteada
Força Máxima Média(kN)	23,44	67,68
Desvio Padrão	4,96	11,51
Coefficiente de Variação	17,06	17,01
Seção Transversal(mm²)	5922	46804
Tensão de Cisalhamento Média	2,79	1,02
Desvio Padrão	0,59	0,17
Coefficiente de Variação	17,06	17,01
Deslocamento Horizontal Médio (mm)	0,0584	0,0017
Desvio Padrão	0,0707	0,0005
Coefficiente de Variação	292,88	34,06
Deslocamento Vertical Médio	0,224	0,345
Desvio Padrão	0,138	0,073
Coefficiente de Variação	36,28	21,24
Comprimento do String Pot (mm)	454,64	
Deformação Cisalhamento Médio	0,000648071	0,000763449
Desvio Padrão	0,00022906	0,000161559
Coefficiente de Variação	26,11	21,16
Módulo de Elasticidade Transversal Médio (MPa)	3389	1358
Devio Padrão	989	165
Coefficiente de Variação	29,20	12,18

7 Programa Experimental – Análise dos Resultados

Nesse capítulo é apresentando uma análise comparativa dos dados obtidos com os dados referente ao levantamento bibliográfico apresentado no capítulo 2. As tabelas 62 a 69 e o gráfico 12, apresentam resumos dos valores obtidos nesta pesquisa. Vale destacar que todas as comparações serão realizadas a partir dos valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 62 - Resistência à Compressão das Unidades, Argamassa e Graute

Elemento	$F_{máx,m}$	DP	CV(%)	A	$\sigma_{máx,m}$	$\sigma_{0,3Fmáx,m}$	DP	CV(%)	$\varepsilon_{0,3Fmáx}$	DP	CV(%)	$E_{0,3Fmáx}$	DP	CV(%)
Bloco	151,20	13,30	8,80	8221	18,39	6,06	0,37	6,05	8,870E-05	2,249E-05	25,35	71892	18464	25,68
Argamassa	33,20	5,16	15,55	1600	20,75	6,33	0,97	15,27	8,774E-03	1,246E-03	14,20	727	103	14,21
Graute	202,87	61,60	30,36	7854	25,83	8,07	2,39	29,61	2,230E-03	5,215E-04	23,39	3769	1374	36,45

Elemento	$F_{máx,m}$	DP	CV(%)	A	$\sigma_{máx,m}$	$\sigma_{0,9Fmáx,m}$	DP	CV(%)	$\varepsilon_{0,9Fmáx}$	DP	CV(%)	$E_{0,9Fmáx}$	DP	CV(%)
Bloco	151,20	13,30	8,80	8221	18,39	15,69	1,35	8,58	1,958E-04	2,659E-05	13,58	81571	13697	16,79
Argamassa	33,20	5,16	15,55	1600	20,75	17,83	2,86	16,02	1,821E-02	2,420E-03	13,29	990	170	17,18
Graute	202,87	61,60	30,36	7854	25,83	20,08	5,09	25,35	3,842E-03	4,151E-04	10,80	5314	1685	31,71

Elemento	$F_{máx,m}$	DP	CV(%)	A	$\sigma_{máx,m}$	ε_u	DP	CV(%)	$\varepsilon_{máx}$	DP	CV(%)
Bloco	151,20	13,30	8,80	8221	18,39	2,702E-04	2,278E-05	8,43	4,845E-04	7,412E-05	15,30
Argamassa	33,20	5,16	15,55	1600	20,75	2,176E-02	3,076E-03	14,13	3,177E-02	4,425E-03	13,93
Graute	202,87	61,60	30,36	7854	25,83	5,020E-03	6,836E-04	13,62	5,511E-03	8,199E-04	14,88

Unidades:

$F_{máx,m}$ – kN

A – mm²

$\sigma_{máx,m}, \sigma_{0,3Fmáx,m}, \sigma_{0,9Fmáx,m}$ – MPa,

$\varepsilon_{0,3Fmáx}, \varepsilon_{0,9Fmáx}, \varepsilon_u, \varepsilon_{máx}$ – mm/mm

$E_{0,3Fmáx}, E_{0,9Fmáx}$ – MPa,

Tabela 63 - Resistência á Tração dos Blocos

	Força Máxima	Deformação	Tensão	Módulo de Elasticidade 1	Deformação Máxima	Tensão
BT1	2,799E-01	2,154E-01	2,219E-02	1,030E-01	5,602E+00	1,021E-03
BT2	2,376E-01	4,484E-02	1,883E-02	4,199E-01	2,425E+00	1,035E-03
BT3	2,291E-01	2,546E-03	1,816E-02	7,134E+00	2,546E-03	3,355E-04
BT4	2,279E-01	4,390E-03	1,806E-02	4,114E+00	2,183E+00	1,314E-03
BT5	2,314E-01	9,094E-03	1,834E-02	2,017E+00	8,125E+00	9,506E-04
BT6	1,813E-01	2,195E-03	1,437E-02	6,547E+00	2,697E-02	1,437E-02
BT7	1,839E-01	2,226E-02	1,458E-02	6,549E-01	6,943E+00	1,356E-03
BT8	1,959E-01	9,094E-03	1,553E-02	1,708E+00	4,954E+00	1,216E-03
BT9	1,619E-01	2,195E-03	1,283E-02	5,847E+00	1,841E-01	1,174E-03
BT10	2,727E-01	1,380E-02	2,161E-02	1,566E+00	4,524E+00	1,300E-03
BT11	1,882E-01	2,038E-02	1,492E-02	7,318E-01	8,580E+00	9,786E-04
BT12	1,667E-01	1,129E-02	1,321E-02	1,170E+00	6,312E+00	1,188E-03
Média	2,130E-01	2,979E-02	1,689E-02	2,668E+00	4,155E+00	2,187E-03
Desvio Padrão	3,928E-02	5,970E-02	3,113E-03	2,548E+00	3,127E+00	3,847E-03
Coeficiente de Variação	18,44	200,37	18,44	95,52	75,26	175,91

Tabela 64 - Resistência á Tração - Argamassa

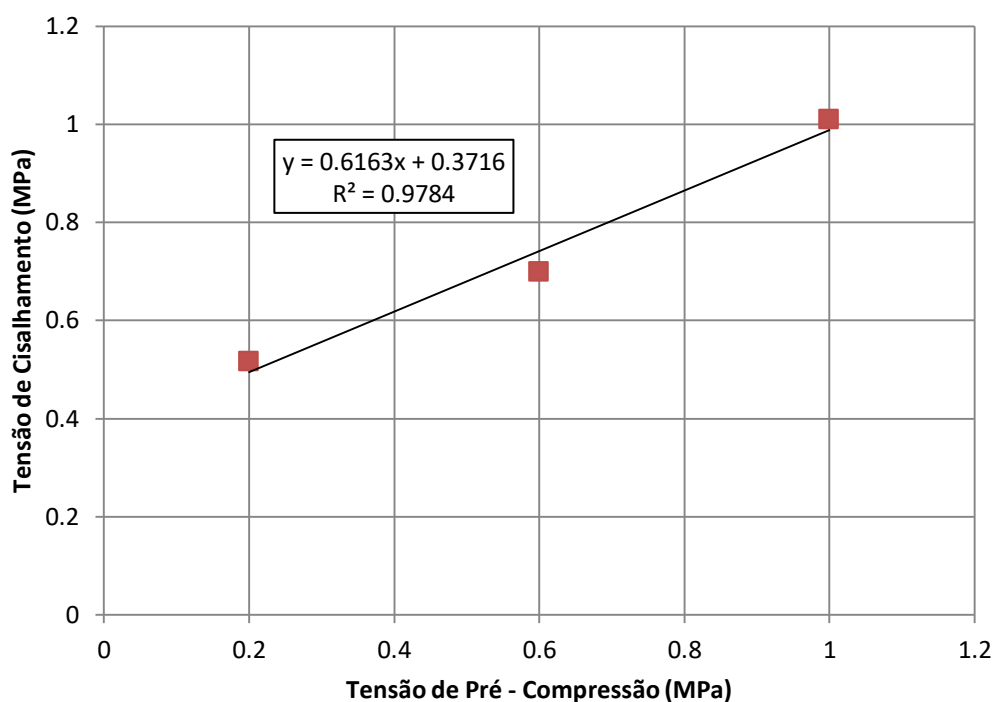
	Tensão Má- xima	Deformação	Módulo de Elasticidade	Deformação Máxima	Tensão Última
AT1	8,883E-04	2,159E-02	4,114E-02	2,13	4,325E-04
AT2	6,828E-04	1,854E-02	3,682E-02	0,04	3,025E-04
AT3	4,631E-04	4,064E-02	1,139E-02	1,57	2,905E-04
AT4	8,332E-04	4,064E-02	2,050E-02	1,27	5,311E-04
AT5	5,542E-04	7,112E-02	7,793E-03	1,63	4,277E-04
AT6	8,280E-04	9,906E-03	8,359E-02	1,78	4,379E-04
Média	7,083E-04	3,374E-02	3,354E-02	1,40	4,037E-04
Desvio Padrão	1,714E-04	2,209E-02	2,792E-02	0,73	9,152E-05
Coeficiente de Variação	24,20	65,46	83,23	51,79	22,67

Tabela 65 - Resistência á Tração - Graute

	Tensão Má- xima	Deformação	Deformação máxima	Tensão
GT1	2,32	1,778E-03	2,362E-02	1,53
GT2	2,07	7,620E-04	3,200E-02	0,68
GT3	2,44	1,524E-03	5,486E-02	0,48
Média	2,28	1,355E-03	3,683E-02	0,90
Desvio Padrão	0,19	5,287E-04	1,617E-02	0,56
Coeficiente de Variação	8,28	39,03	43,91	62,10

Tabela 66 - Tensão de Cisalhamento e Rigidez da Interface(análise gráfica)

f_{pi}	0,2	0,6	1,0
F_m	8488	11498	16598
DP	2831	3652	4430
CV(%)	33,35	31,76	26,69
$\delta_{v,m}$	1,42	2,09	1,77
DP	0,21	1,51	0,23
CV(%)	14,46	72,26	13,21
τ_m	0,516	0,699	1,009
DP	0,172	0,209	0,269
CV(%)	33,35	29,95	26,69
$K_{s,m}$	0,359	0,420	0,580
DP	0,088	0,170	0,180
CV(%)	24,51	40,48	31,03

Gráfico 12 – Tensão de Cisalhamento vs Tensão de pré-compressão**Tabela 67 - Cálculo do Valor de K_n e K_s**

	E_b	E_a	ν	h	G_b	G_a	K_n	K_s
$E_{0,3Fm\acute{a}x}$	71892	727	0,2	5	29955	303	147	61
$E_{0,9Fm\acute{a}x}$	81571	990			33987	412	200	83

Tabela 68 – Resistência à tração na flexão da argamassa

Cálculo do Msp							Fsp(N)	fsp(N/mm2)
	C1(N)	C2(N)	Lc1(mm)	Lc2(mm)	Mc1c2(Nmm)	Mpeca(Nmm)		
Média	17,18	12,08	894	793	17613	11002	135,47	0,0853
DP	6,23	6,88			9296		11,00	0,0449
CV(%)	36,27	57,00			52		8,11	52,68

Tabela 69 – Compressão Diagonal – Tensão de cisalhamento e Módulo de elasticidade transversal – Parede oca e grauteada

Tipo de Parede	Oca	Grauteada
Força Máxima Média	23,44	67,68
Desvio Padrão	4,96	11,51
Coefficiente de Variação	17,06	17,01
Seção Transversal(mm ²)	5922	46804
Tensão de Cisalhamento Média	2,799	1,022
Desvio Padrão	0,593	0,173
Coefficiente de Variação	17,06	17,01
Deslocamento Horizontal Médio (mm)	0,0584	0,0017
Desvio Padrão	0,0707	0,0005
Coefficiente de Variação	292,88	34,06
Deslocamento Vertical Médio	0,2243	0,3453
Desvio Padrão	0,1382	0,0733
Coefficiente de Variação	36,28	21,24
Comprimento do String Pot (mm)	454	
Deformação Cisalhamento Médio	0,0006	0,0007
Desvio Padrão	0,0002	0,0001
Coefficiente de Variação	26,11	21,16
Módulo de Elasticidade Transversal Médio (MPa)	3389	1358
Devio Padrão	989	165
Coefficiente de Variação	29,20	12,18

7.1 Análise dos Resultados – Blocos

Neste item é apresentado um levantamento de dados a literatura da resistência a compressão de blocos (tabela 70). Nestes dados são apresentados blocos com diferentes escalas (1:1, 1:2 e 1:3). Com esse conjunto de dados é possível notar que a resistência à compressão não apresenta influência devido a variação de escala do bloco.

Tabela 70 - Comparação entre Resistência à Compressão Obtidos da Literatura com Resultado dos Ensaio – Escalas 1:1, 1:2 e 1:3

Autor	Escala	Resistência à Compressão	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Long et al (2005)	1:2	24,4	2,8	11,4
	1:1	29,2	1,6	5,4
Barbosa (2008)	1:1	24,7	5,8	23,7
Hughes (2010)	1:3	54,8	2,6	4,7
Wierzbicki (2010)		19,2	1,2	6,2
Kaaki (2013)	1:3	14,1	1,6	11,3
Banting e El-Dakhkhni (2014)	1:2	26,5	3,5	13,2
Bolhassani et al (2015)	1:1	21,6		
Knox et al (2017)	1:1	12,9	1,3	10,0
	1:2	16,9	4,9	28,0
Alotabi e Galal (2018)	1:2	21,73	2,0	9,4
Média de Todos os Valores Experimentais			24,2	
Desvio Padrão			11,3	
Coeficiente de Variação			46,9	
Pasquantonio	1:2	18,4	13,3	8,8

A comparação com os dados da literatura foi, a partir, do valor da resistência média à compressão da literatura no valor de 24,2MPa(CV=46,9%). De acordo com a tabela 71, o valor obtido nos ensaios foi de 18.4MPa(CV=8.8%) e a aproximação com a média geral da literatura foi de aproximadamente 76%.

No entanto ao comparar o resultado experimental com o valor médio de resistência à compressão, considerando apenas escala 1:1, é apresentado na tabela 71. Analogamente a tabela 71, é calculado o valor médio de resistência à compressão, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 71 - Comparação entre Resistência à Compressão Obtidos da Literatura com Resultado dos Ensaios – Escala 1:2

Autor	Escala	Resistência à Compressão	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Long et al (2005)	1:2	24,4	2,7	11,4
Banting e El-Dakhkhni (2014)	1:2	26,5	3,4	13,2
Knox et al (2017)	1:2	16,9	4,9	28,0
Alotabi e Galal (2018)	1:2	21,73	2,0	9,4
Média de Todos os Valores Experimentais		22,4		
Desvio Padrão		4,1		
Coeficiente de Variação		18,51		
Pasquantonio	1:2	18,4	13,3	8,8
Pasquantonio/Média Geral		0,82		

A resistência média da literatura obtida foi igual a 22,4 MPa (CV=18.51%) e a correlacionado com o valor experimental foi em torno de 82%. Considerando apenas os blocos de escala 1:1, tabela 72, a correção com o valor experimental foi de 83%.

Tabela 72 - Comparação entre Resistência à Compressão Obtidos da Literatura com Resultado dos Ensaios – Escala 1:1

Autor	Escala	Resistência à Compressão	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Long et al (2005)	1:1	29,2	1,57	5,4
Barbosa (2008)	1:1	24,7	5,84	23,6
Bolhassani et al (2015)	1:1	21,6		
Knox et al (2017)	1:1	12,9	1,3	10,0
Média de Todos os Valores Experimentais		22,1		
Desvio Padrão		6,8		
Coeficiente de Variação		31,1		
Pasquantonio	1:2	18,4	13,3	8,8
Pasquantonio/Média Geral		0,83		

É possível concluir dessa maneira que a resistência à compressão dos blocos não apresenta alterações significativas analisa-se diferentes escalas de bloco. No entanto o mesmo não é possível inferir sobre o comportamento do módulo de elasticidade do bloco. A tabela 73, a apresenta um comparativo análogo ao que foi realizado para resistência à compressão.

Tabela 73 - Comparação entre Módulo de Elasticidade Longitudinal dos Blocos Obtidos da Literatura com Resultado dos Ensaios – Escala 1:1

Autor	Módulo de Elasticidade
Haach et al (2010)	9600
Binda et al (1988)	4870
Drougkas et al (2015)	4200
Futmüller e Adam (2011)	7500
Gumaste et al (2007)	3370
Hossain et al (1997)	12900
Kaushik et al (2007)	5300
McNary e Abrams (1985)	9900
McNary e Abrams (1985)	15000
Oliveira et al (2006)	12000
Page (1978)	6740
Panizza et al (2012)	5760
Reddy et al (2009)	8000
Riddington e Naom (1994)	22000
Schlegel (2004)	5500
Vermeltfoort et al (2007)	4000
Vermeltfoort et al (2007)	16700
Vyas e Reddy (2010)	14500
Média	9324
Desvio Padrão	5199
Coeficiente de Variação	55,76
Pasquantonio	3291
Pasquantonio/Média	35,29

Se observa que os valores de módulo de elasticidade apresentam uma maior amplitude do que a resistência à compressão. A razão para tal fato é que as deformações se distribuem de maneira distintas considerando as diferentes escalas utilizadas.

Considerando a amplitude dos valores é possível concluir que os valores de módulo de elasticidade dos blocos obtidos nos ensaios se encontram dentro dos dados encontrados na literatura.

Ainda a respeito dos blocos é apresentado, tabela 74, o comparativo da resistência à tração dos blocos. Para essa análise foram levantados um conjunto de nove autores que apresentam um estudo de resistência à tração indireta.

Tabela 74 – Comparação entre Resistência à Tração Obtidos da Literatura com Resultado dos Ensaios – Escala 1:1

Autor	Escala	Resistência à Tração	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Barbosa (2008)	1:1	1,57	0,37	24,03
Basha e Kaushik (2016)	1:1	0,54	Não Informado	Não Informado
Bolhassani et al (2015)	1:1	1,50	Não Informado	Não Informado
Borchlet e Brown (1978)	1:1	1,86	0,72	39,4
Hughes (2010)	1:3	2,20	0,34	15,5
Long et al (2005)	1:2	2,35	0,70	30,1
Long et al (2005)	1:1	2,48	0,09	3,9
Lourenço et al (2005)	1:1	3,70	Não Informado	Não Informado
Moradabadi et al (2015)	1:1	6,50	Não Informado	Não Informado
Média de Todos os Valores Experimentais			2,52	
Desvio Padrão			1,72	
Coeficiente de Variação			68,19	
Pasquantonio	1:2	1,10	0,26	24,65
Pasquantonio/Média			43,61	

Para análise da resistência à tração é necessário analisar considerando, com base nos dados encontrados, a amplitude dos resultados obtidos, assim como na análise do módulo de elasticidade, apresenta uma variação muito alta, uma vez que o coeficiente de variação foi de 68,19% o resultado se encontra dentro do intervalo levantado.

7.2 Análise Resultados – Ensaio de Cisalhamento da Junta Horizontal

Continuando a análise comparativa com a literatura encontrada sobre ensaio de cisalhamento da junta horizontal. É importante ressaltar que através desse teste é possível obter os seguintes parâmetros:

- Tensão de Cisalhamento inicial e coeficiente de atrito – valor obtido através da linha de tendência obtida da relação entre tensão de cisalhamento por tensão de pré compressão;
- Coeficiente de rigidez da interface de cisalhamento – valor obtido a partir do gráfico de tensão de cisalhamento por deslizamento. É

- importante ressaltar que será considerado o mesmo valor de rigidez para deslizamento nos dois planos de cisalhamento possíveis;
- c) Coeficiente de rigidez da interface de cisalhamento – valor, também, será obtido a partir de uma ponderação entre os módulos de elasticidade do bloco e da argamassa e coeficiente de Poisson. Para obtenção desses valores foi considerado a equação proposta por Lourenço et al (2005);

Para a análise do coeficiente de atrito, bem como tensão de cisalhamento inicial, foi obtido um conjunto de cinco dados. A tabela 75 apresenta uma análise dos dois parâmetros.

Tabela 75 - Comparação entre Coeficiente de Atrito e Tensão de Cisalhamento Inicial Obtidos da Literatura com Resultado dos Ensaios – Escala 1:1

Autores	$\mu = \tan \varphi$	$\varphi(\text{rad})$	$\tau_0(\text{Mpa})$
Lourenço et al, (2004)	1,03	0,8	1,39
Almeida et al (2016)	1,15	0,855	
Abdou et al, (2006)	1,05	0,81	1,27
Lizarraga and Perez-Gavillan (2017)	1,05	0,81	0,55
	1,2	0,87	0,46
Bolhassani (2015)	0,99	0,78	
Média	1,07	0,82	0,91
Desvio Padrão	0,07	0,03	0,48
Coeficiente de Variação	7,38	4,40	52,34
Pasquantonio et al, (2018)	0,61	0,55	0,37
Pasquantonio et al, (2018)/Média Autores	0,56	0,67	0,40

Considerando a tabela 75, se observa que o valor encontrado para coeficiente de atrito se apresentou próximo aos valores encontrados na literatura. No entanto, o valor obtido experimentalmente se apresenta abaixo dos valores obtidos na literatura. A razão pela qual ocorre essa diferença é devido a escala dos modelos, é importante destacar que os dados obtidos para comparação foram de ensaios realizados com blocos em escala natural. E devido a essa diferença na escala dos blocos apresenta uma diferença no comportamento do material como também foi observado por Mohammed et al (2011), que estudou a influência na escala em blocos cerâmicos, ainda sobre a diferença de resultados entre as escalas Hughes (2010) que infere que a escala dos elementos apresenta certa influência na análise de alguns parâmetros que são apresentados na tabela 76 a seguir. É importante destacar que essa tabela Hughes (2010).

Tabela 76 – Parâmetros para Ajuste de Escala

Grupo	Quantity	Dimensão	Modelo Escala 1:1	Modelo
Carregamento	Força Concentrada	F	$S_o S_L^2$	S_L^2
	Momento	FL	$S_o S_L^3$	S_L^3
Geometria	Dimensão Linear	L	S_L	S_L
	Deslocamento	L	S_L	S_L
	Área	L ²	S_L^2	S_L^2
	Volume	L ³	S_L^3	S_L^3
Propriedades do Material	Tensão de Compressão nos Blocos	FL ⁻²	S_o	1
	Deformação dos Blocos	1	1	1
	Módulo de Elasticidade	FL ⁻²	S_o	1
	Coefficiente de Poisson	1	1	1
	Rigidez	FL ⁻¹	$S_o S_L$	S_L

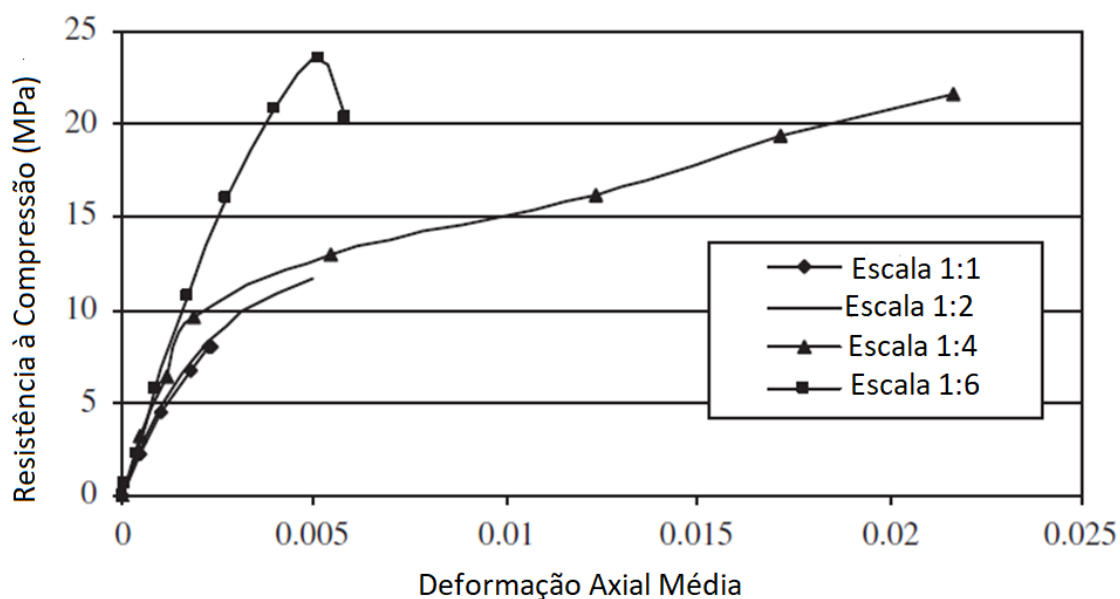
Com base nisso pode-se concluir que para a análise de blocos de escala 1:2 em relação a blocos de escala natural é possível notar que a relação entre o coeficiente de atrito e a tensão de cisalhamento inicial é possível considerar uma relação de aproximadamente ½.

Prosseguindo a análise com base nos ensaios da junta horizontal, é apresentada as fundamentações para o valor de rigidez a partir dos gráficos de ensaio de cisalhamento da junta horizontal. A tabela 77 apresenta os valores de rigidez para cada nível de pré compressão.

Tabela 77 – Valores de coeficiente de rigidez considerando cada nível de tensão de pré-compressão

f_{pt}	0,2	0,6	1,0
$K_{s,m}$	0,359	0,420	0,580
DP	0,088	0,170	0,180
CV(%)	24,51	40,48	31,03

As razões observadas para os valores obtidos de rigidez são por razão do efeito escala, esse termo foi comentado por diversos autores Hughes (2010) e Mohamed et al (2011) abordam essa perspectiva em suas análises. De forma geral essa teoria afirma que o comportamento tensão vs deformação está, de certa forma, relacionado com o tamanho/escala do modelo a medida que se aumenta/diminui a escala do modelo o comportamento do material é influenciado pela escala conforme é possível ser observado na figura 108.

Figura 108 – Tensão x Deformação

Fonte: Mohamed et al (2011) - Adaptada

Por essa razão, os valores encontrados referente aos ensaios (coeficiente de atrito, tensão de cisalhamento inicial e rigidez ao cisalhamento) apresentam uma boa correlação com os resultados referente a escala natural.

No entanto, considerando a literatura sobre o assunto, estudo de rigidez, foi possível encontrar uma equação proposta por Lourenço et al (2005) que obtém os parâmetros de rigidez. A equação é baseada na espessura da argamassa, coeficiente de Poisson dos materiais e módulos de elasticidade longitudinal (rigidez na direção normal) e transversal (rigidez na direção tangencial).

Tabela 78 - Comparativo entre os valores de coeficiente de rigidez ao cisalhamento e normal

Autor	$K_{ss} = K_{tt}$ (MPa/mm)	K_{nn} (MPa/mm)
Vandoren et al, (2013)	124	222
Nasiri and Liu (2017)	320	1011
Lourenço et al, (1994)	99	222
Lizarraga and Perez-Gavilan (2017)	103	153
	85	143
Massart et al, (2004)	191	351
Abdula et al, (2017)	46	82
	62	110
Abdula et al, (2017b)	27	62

Média	117	262
Desvio Padrão	90	294
Pasquantonio	118	197
Pasquantonio / Média a partir da literatura	101%	75%

De acordo com a tabela 78, nota-se que os valores estão próximos dos valores da literatura. No entanto é importante destacar que esses parâmetros encontrados na literatura apresentam uma grande amplitude dos resultados.

É importante destacar que esses parâmetros de rigidez são utilizados em modelagens numéricas. Especificadamente para elaboração da interface entre elementos quando se considera o a modelagem do tipo micro-modelagem.

7.3 Análise dos Resultados – Bond Wrench

Prosseguindo com a análise dos dados experimentais, foi possível encontrar, através da literatura, um conjunto de resultados referente a resistência a flexão da argamassa. Quanto aos resultados encontrados buscou-se na literatura as resistências a flexão da argamassa seguindo os parâmetros estabelecidos pela norma australiana AS3700/2017, porém considerando a metodologia dessa norma não foram encontrados muitos valores. Importante lembrar que para o conjunto de amostras é menor que 30 o valor do coeficiente de variação encontrado se apresentou próximo ao coeficiente de variação prescrito pela norma australiana de 30% enquanto o valor encontrado foi de 29.49%.

Além disso, a análise realizada nesse item apresenta os resultados encontrados em uma pesquisa extensa, porém, os resultados encontrados não são de blocos de concreto e nenhum de escala reduzida, a tabela 79 apresenta um comparativo dos resultados.

Tabela 79 – Comparativo entre as resistências à flexão da argamassa

Autores	Resistência à Flexão da Argamassa	CV	Observações
Thamboo et al (2013)	0,42	Não informado	Argamassa com fibra polimérica com blocos de concreto
Pavía e Hanley (2008)	0,27	32,6	Argamassa de cal, a existência de três valores é devido a variação do tipo de argamassa que o autor realizou, Além disso, o bloco era cerâmico
	0,19	24,6	
	0,32	33,9	
Barr et al (2015)	0,11	7,9	Argamassa de cal e blocos de arenito, Esse ensaio foi realizado exatamente após montagem dos corpos de prova,
	0,23	2,4	
	0,33	2,9	
Barr et al (2015)	0,08	3,8	Argamassa de cal e blocos de arenito, Esse ensaio foi realizado exatamente após 1 minuto da montagem dos corpos de prova,
	0,19	2,7	
	0,31	1,7	
Barr et al (2015)	0,07	19,4	Argamassa de cal e blocos de arenito, Esse ensaio foi realizado exatamente após 15 minutos montagem dos corpos de prova,
	0,18	9	
	0,25	4,8	
Khalaf (2005)	0,12	14	Bloco de calcareo e a diferença dos valores de resistência se deve a variação do traço de argamassa,
	0,15	15	
	0,18	17	
Shabdin et al (2018)	0,1	39	Foram utilizados blocos cerâmicos
Média dos Autores		0,21	
Desvio Padrão		0,10	
CV		48,1	
Pasquantonio		0,08	
Desvio Padrão		0,03	
CV		29,4	
Pasquantonio/Média dos Autores		38,9	

Com base na análise é possível considerar que o resultado é satisfatório apesar da baixa correlação entre a média dos valores encontrados na literatura. A razão para isso é que ao observar a maneira como foram reali-

zados os ensaios e também as variações realizadas pelos autores, uma das conclusões dos autores Pavía e Henley (2005) que o estudo dessa resistência apresenta diversas variações, como por exemplo, a geometria do bloco, tipo de argamassa e principalmente tempo de cura do corpo de prova. Com relação ao tempo de cura da argamassa, Barr et al (2015) realizou um estudo, da análise de argamassa de cal, porém o fato mais relevante da pesquisa é que Barr et al (2015) realizou o ensaio em três momentos distintos em que um grupo de amostras foi ensaiado logo após a montagem, outro grupo após 1 minuto e por último um grupo que foi testado após 15 minutos, e percebe-se pelos resultados que a partir da absorção da água da argamassa pelo bloco a resistência a flexão da argamassa é reduzida.

Como os ensaios dessa pesquisa foram realizados considerando o tempo de cura de 28 dias, conforme AS3700//2017, entende-se que o valor da resistência, por essa razão, é razoável.

7.4 Análise dos Resultados – Compressão Diagonal

Por último é realizada uma análise dos resultados obtidos de compressão diagonal. Neste item se seguiu o mesmo procedimento de análise realizado nos demais ensaios. As tabelas 80 e 81 apresentam o comparativo dos resultados encontrados na literatura.

Tabela 80 – Comparativo entre as tensões de cisalhamento – Parede Oca

Autores	Tensão de Cisa- lhamento (MPa)	CV	Observações
Long et al (2005)	2,24	12,7	Blocos de con- creto - escala 1:2
	1,77	10,2	Blocos de con- creto - escala 1:1
Kaaki (2013)	0,37		Blocos de Con- creto - Escala 1:1
	0,38		Blocos de Con- creto - Escala 1:3
Bolhassani (2015)	0,51	17,8	Blocos de Con- creto
Média dos Valores		1,054	
Desvio Padrão		0,88	
CV		84,02	
Pasquantonio		2,79	
Pasquantonio/Média dos Autores		264,70	

Tabela 81 – Comparativo entre as tensões de cisalhamento – Parede Grauteada

Autores	Tensão de Cisalhamento (MPa)	CV	Observações
Long et al (2005)	2,2	2,9	Blocos de concreto - escala 1:2
	1,78	23,4	Blocos de concreto - escala 1:1
Bolhassani (2015)	1	14,3	Blocos de Concreto
Média dos Valores		1,66	
Desvio Padrão		0,60	
CV		36,68	
Pasquantonio		1,02	
Pasquantonio/Média dos Autores		61,44	

A partir dos resultados apresentados na tabela 80 é possível observar que os resultados referente a parede oca são discrepantes entre os autores. A razão principal verificada a partir da literatura para essa disparidade dos valores é que a ausência do graute faz com que a resistência do corpo de prova seja proporcionada apenas pela junta da argamassa. E de acordo com o verificado no item 7.3, a aderência entre bloco e argamassa é um ponto frágil e de difícil mensuração por meio dos ensaios que são prescritos pelas normas vigentes.

Enquanto que com a presença do graute, tabela 81, dificulta o deslizamento entre a argamassa e o bloco e por essa razão os corpos de prova apresentam valores de força de ruptura maior e deslocamentos menores. Porém a redução da tensão de cisalhamento se deve a formulação proposta pela norma americana.

7.5 Considerações sobre os Ensaios

A partir das análises dos resultados, capítulo 7, e também considerando a apresentação dos resultados, capítulo 6, pode se concluir que:

a) Blocos:

- Os ensaios de compressão dos blocos, foi possível concluir que o comportamento tensão vs deformação do conjunto de seis blocos apresentaram uma boa consistência;
- Considerando a resistência média dos blocos, 18.4 MPa, ficou dentro do intervalo dos resultados encontrados na literatura independente da escala dos blocos;
- Ainda considerando o ensaio de resistência à compressão, o valor médio encontrado para módulo de elasticidade do bloco o valor ficou dentro dos valores encontrados na literatura;
- Além disso, o valor de módulo de elasticidade considerando 30 % da tensão máxima, conforme a NBR 8522-2017, e utilizando até 85% da tensão máxima, conforme Kaaki (2013), as diferenças entre os valores são muito pequena e por essa razão é possível considerar o comportamento linear até aproximadamente próximo a ruptura dos blocos;
- Com base nos ensaios de resistência à tração, foi possível obter a curva tensão vs deformação do bloco e resistência média à tração se enquadra dentro dos valores da literatura;
- Considerando as curvas de tensão vs deformação tanto dos ensaios de resistência à compressão e à tração é possível realizar a modelagem numérica do bloco de maneira bem representativa, uma vez que por meio dos ensaios citados foi obtido de maneira detalhada o comportamento do bloco pós tensão de pico.

b) Ensaio de cisalhamento da junta horizontal:

- Durante os ensaios, foi possível notar que ao aplicar a tensão de pré compressão de 1.0 MPa, se notou que alguns corpos de prova apresentaram ruptura no blocos em con-

trapartida nas tensões de pré compressão menores houve ruptura apenas na junta de argamassa;

- Ainda sobre os ensaios, foi possível notar que, independentemente do nível de pré compressão, após a ruptura de uma das juntas o bloco central (onde é aplicado o deslocamento) apresenta uma acomodação da primeira junta rompida e a partir dessa acomodação o corpo de prova volta a ganhar resistência até a ruptura da segunda junta;
- A partir da análise da tensão de cisalhamento dos ensaios foi obtido os valores de coeficiente de atrito bem como o valor de tensão de cisalhamento inicial se apresentaram próximos aos valores encontrados na literatura de testes realizados com blocos de escala natural;

c) Bond Wrench Test

- Durante os ensaios, foi observado que este ensaio apresenta uma sensibilidade excessiva ao carregamento utilizado;
- Foi observado os dois tipos de fissuras existentes na literatura no decorrer dos ensaios;
- Devido a sensibilidade observada no decorrer dos ensaios, o valor de resistência à tração na flexão da argamassa foi muito variado, uma vez que a resistência foi de aproximadamente 0.08MPa com um coeficiente de variação de um pouco menos de 30%;
- Ao comparar os resultados com a literatura, foi possível notar que a literatura apresenta uma pequena disparidade nos resultados, nota-se que tempo de cura da argamassa é um dos fatores preponderantes para o aumento da resistência da argamassa;

d) Compressão Diagonal

- Fundamentado nos ensaios, foi possível notar que a ruptura das amostras foi a mesma observada em ensaios de bloco de escala natural;
- Ainda sobre a ruptura, não foi verificado alguma diferença no tipo de ruptura com a presença ou não do graute;

- Quanto a resistência se observou que para modelos de escala 1:2 se alcançou valores menor de resistência a tração do que o encontrado na literatura considerando blocos de escala natural;
- O módulo de elasticidade transversal da alvenaria encontrado nos ensaios tanto dos modelos oco quanto grauteado, foram menores em comparação com os valores encontrados utilizando blocos de escala natural;
- Ao pesquisar na literatura dados sobre esses ensaios que as paredes ocas apresentam grande disparidade entre as resistências ao cisalhamento uma vez que o único contato entre os blocos são argamassa e com a presença do graute o deslizamento entre bloco e argamassa é contido pela presença do graute nos vazios.

8 Modelagem Numérica com Validação a Partir do Programa Experimental

Nesse capítulo é apresentado a modelagem numérica dos ensaios apresentados no capítulo 6. Os ensaios aqui validados foram os seguintes:

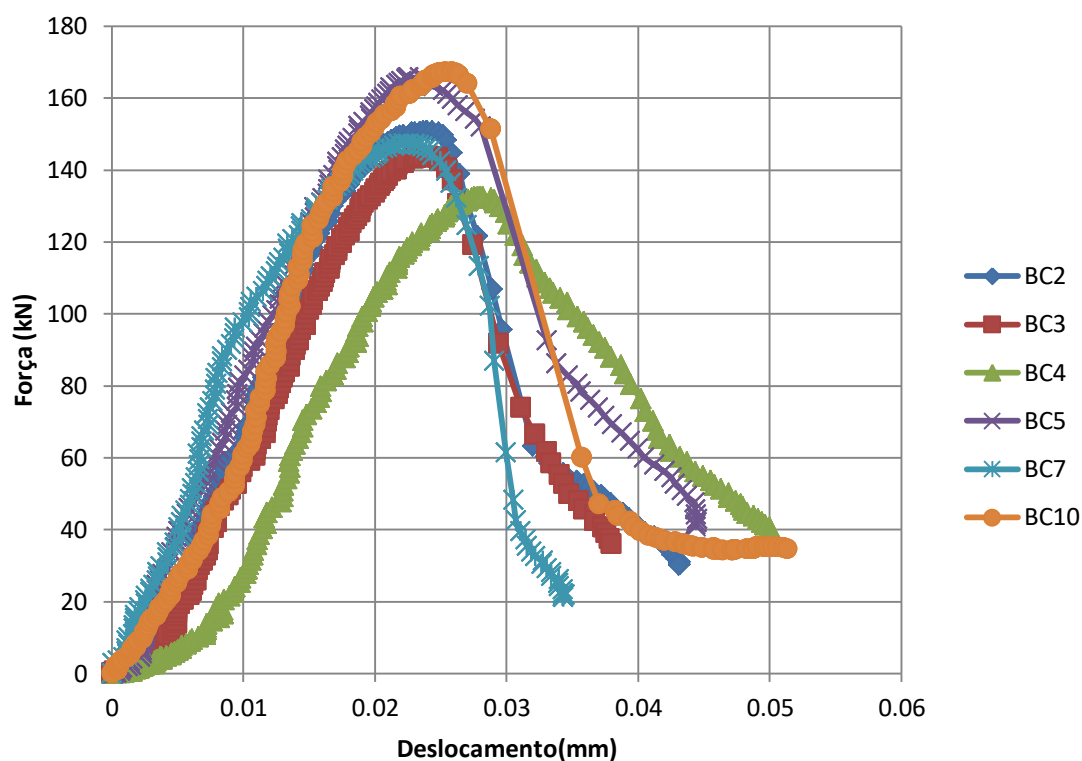
- a) Ensaio de resistência à compressão dos blocos, argamassa e graute;
- b) Ensaio de bond wrench;
- c) Ensaio de cisalhamento da junta horizontal;
- d) Ensaio de compressão diagonal

Além desses modelos, foram elaborados modelos com a função de aplicar de maneira mais contundente os resultados encontrados. Essa aplicação foi realizada criando modelos de prismas de 2 e 3 blocos ocos e grauteados. Para efeito de comparação desses resultados foi considerado curvas de tensão vs deformação obtida por outros autores.

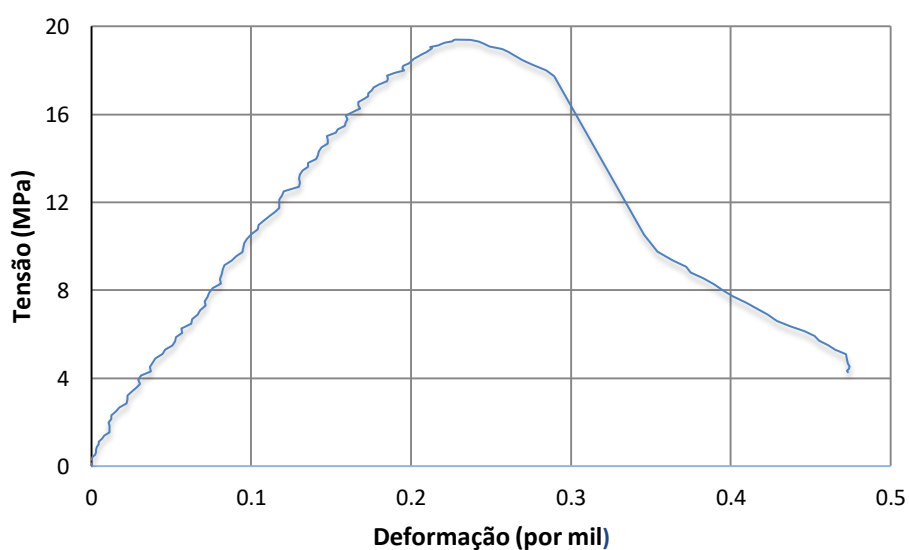
Além disso, na questão da análise dos prismas foram criados modelos com e sem argamassa, o objetivo dessa análise é descobrir se há possibilidade de realizar modelos micro – modelagem em alvenaria estrutural e as propriedades de argamassa serem consideradas apenas nos elementos de interface.

8.1 Modelos Numéricos – Ensaio de Compressão dos Blocos

Em um primeiro momento foi necessário analisar dentre o conjunto de blocos ensaiados qual apresentava um comportamento mais semelhante ao que se encontra na literatura referente a ensaios de compressão. Ao observar as curvas de tensão vs deformação foi possível notar que o bloco denominado como BC5 apresenta um comportamento ideal para validação, conforme é possível observar no gráfico 13 a seguir.

Gráfico 13 - Curvas Força vs Deslocamento dos Blocos

Após a escolha de qual curva seria utilizado para validação dos ensaios, foi obtido o módulo de elasticidade longitudinal do bloco, no entanto para esse cálculo se considerou que o trecho linear do bloco se mantém até aproximadamente 85% da tensão máxima resistida pelo bloco. O gráfico 14 a seguir apresenta a curva de tensão vs deformação do bloco BC5.

Gráfico 14 - Curva Tensão vs Deslocamento BC5

Considerando a proposta de Kaaki (2013) em que o autor afirma que é possível considerar até aproximadamente 90% da tensão máxima como

trecho elástico, foi realizado uma análise a respeito do trecho linear referente ao bloco BC5. O objetivo dessa análise era a determinação do fim do trecho elástico e início do trecho inelástico. A partir disso, a seguir são apresentados as últimas análises a respeito do módulo de elasticidade longitudinal. Os gráficos 15 a 17 apresentam essas análises.

Gráfico 15 - Trecho Elástico - Tensão Elástica 15MPa

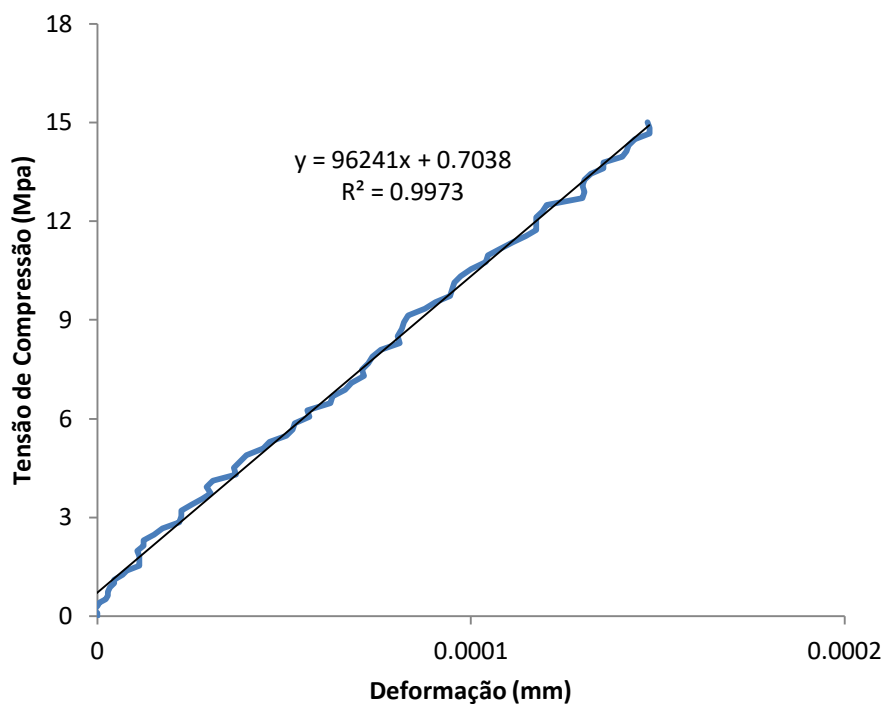


Gráfico 16 - Trecho Elástico - Tensão Elástica 16MPa

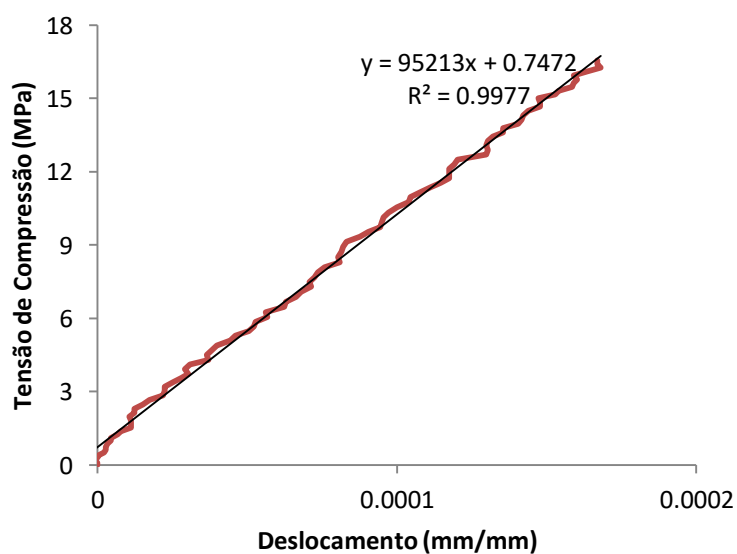
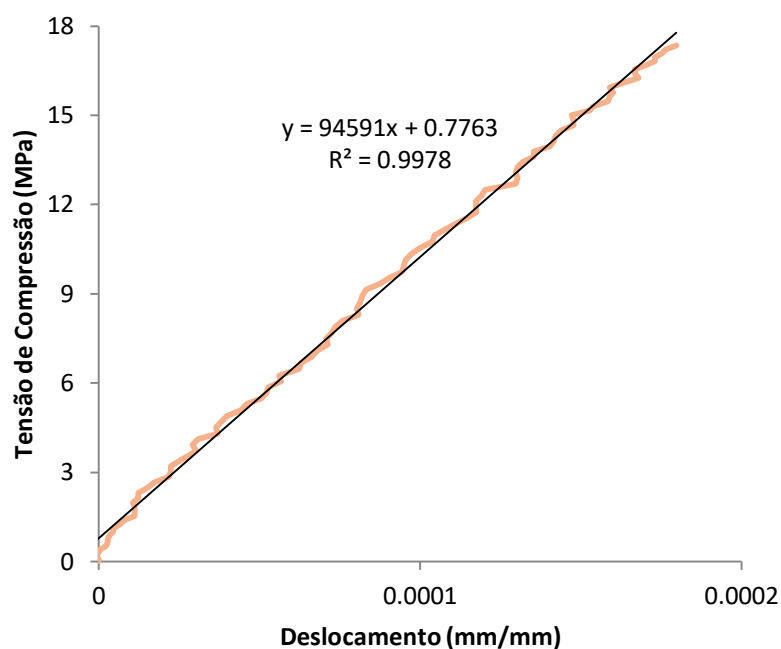


Gráfico 17 - Trecho Elástico - Tensão Elástica 17,35MPa

Analisando os gráficos anteriores (15 a 17), observa-se que a curva mais ideal para representar o trecho elástico é o gráfico 17. Sendo assim, a deformação, cuja unidade é por mil, correspondente a tensão de 15MPa é 0,154. Ainda a respeito do gráfico 17, é possível notar que o módulo de elasticidade longitudinal, a partir de uma linha de tendência, é que o módulo de elasticidade é 96241 MPa.

Além disso, o coeficiente de Poisson considerado para este modelo foi 0,2. Quanto ao comportamento plástico foi considerado o modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP), neste modelo é necessário informar três bases de dados para a melhor representação do mesmo que são os dados Plasticity (Plasticidade), Compressive Behavior (Comportamento a Compressão) e Tension Behavior (Comportamento a Tração). Na tabela 79, são apresentados os parâmetros referentes a plasticidade.

Tabela 82 - Modelo CDP - Parâmetros de Plasticidade

Ângulo de Dilatância	Excentricidade	f_{b0}/f_{c0}	K	Viscosidade
36	0,1	1,16	0,6667	0,000001

De acordo com o manual do Abaqus para se representar o trecho inelástico do comportamento de um material, quer compressão ou tração, é necessário retirar a deformação elástica referente ao ponto considerado, ou seja, deve se realizar o seguinte cálculo.

$$\varepsilon_{inelástica} = \varepsilon_{total} - \varepsilon_{elástica}$$

Sendo assim, os pontos considerados na calibração do modelo numérico, estão apresentados na tabela 80 a seguir;

Tabela 83 - Base de Dados de Deformação Inelástica e Tensão de Compressão

Deformação Inelástica	Tensão (MPa)	Deformação Inelástica	Tensão (MPa)	Deformação Inelástica	Tensão (MPa)
0,00E+00	15,01	6,24E-05	18,83	2,16E-04	9,35
5,62E-06	15,16	6,58E-05	19,00	2,25E-04	9,06
6,74E-06	15,31	6,97E-05	19,13	2,28E-04	8,80
1,12E-05	15,47	7,19E-05	19,20	2,35E-04	8,54
1,18E-05	15,63	7,42E-05	19,26	2,42E-04	8,27
1,29E-05	15,77	7,87E-05	19,32	2,48E-04	7,99
1,63E-05	16,10	7,92E-05	19,37	2,54E-04	7,72
2,08E-05	16,26	8,04E-05	19,39	2,62E-04	7,43
2,59E-05	16,82	8,99E-05	19,38	2,69E-04	7,15
2,81E-05	17,08	9,50E-05	19,30	2,76E-04	6,88
2,92E-05	17,22	9,83E-05	19,20	2,82E-04	6,60
3,26E-05	17,35	1,02E-04	19,08	2,90E-04	6,35
3,77E-05	17,50	1,10E-04	18,97	2,99E-04	6,13
3,82E-05	17,62	1,14E-04	18,84	3,05E-04	5,91
4,21E-05	17,87	1,17E-04	18,67	3,08E-04	5,70
4,83E-05	17,99	1,23E-04	18,45	3,14E-04	5,50
5,11E-05	18,30	1,29E-04	18,25	3,18E-04	5,29
5,28E-05	18,41	1,37E-04	18,00	3,25E-04	5,09
5,45E-05	18,52	1,42E-04	17,73	3,25E-04	4,84
5,73E-05	18,63	1,98E-04	10,53	3,26E-04	4,66
5,96E-05	18,73	2,07E-04	9,75	3,27E-04	4,52

Ainda sobre o comportamento a compressão deve-se informar a maneira como será o comportamento do material ao dano causado com incremento de deslocamento. Para isso é necessário informar os parâmetros de dano que é calculado da seguinte maneira.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_{ci}}{\sigma_{máx}}$$

Onde:

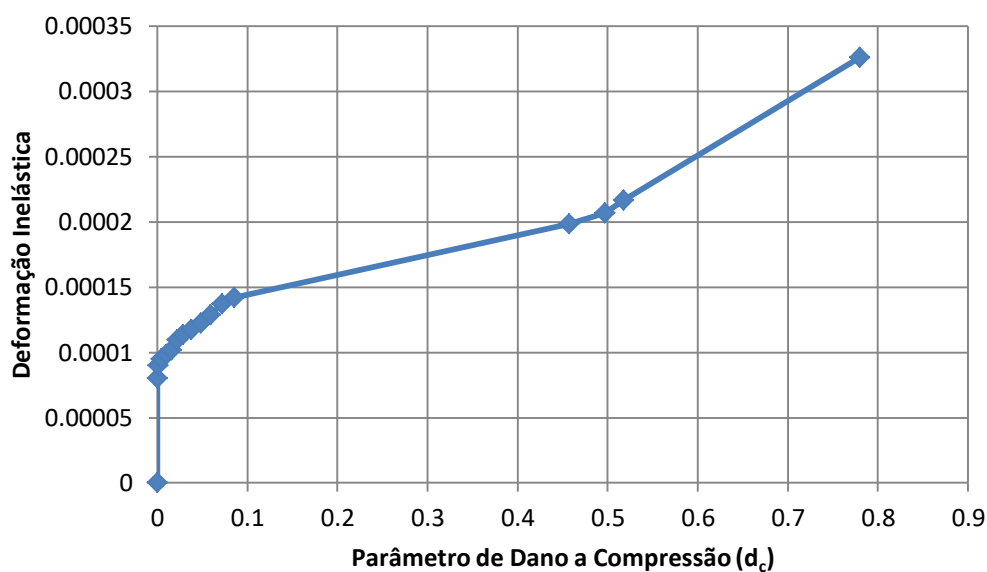
d_c – parâmetro de dano à compressão – unidade adimensional;

σ_{ci} – tensão de compressão medida após a tensão de pico – unidade MPa;

$\sigma_{m\acute{a}x}$ – tensão máxima – unidade MPa.

Conhecendo, então, as coordenadas referentes de dano e deformação inelástica foi possível esboçar uma curva, conforme 18, que representa o crescimento do dano no bloco BC5

Gráfico 18 - Curva Deformação Inelástica vs Parâmetro de Dano a Compressão



Ainda sobre o comportamento do material ao dano vale destacar duas informações:

- Os parâmetros de dano, d_c , se referem ao valor de dano após alcançado a tensão máxima;
- É necessário realizar uma verificação prévia da deformação plástica que o Abaqus para que os pares de valores (d_c ; $\epsilon_{inelástico}$) inseridos forneçam valores de deformação plástica positiva e crescente. Essa verificação de acordo com o Abaqus pode ser realizada a partir da seguinte equação:

$$\epsilon_{plástico} = \epsilon_{inelástico} - \frac{d_c}{(1 - d_c)} * \frac{\sigma_c}{E}$$

O comportamento a tração seguiu o mesmo procedimento apresentado para compressão.

Para o lançamento do bloco no Abaqus foi utilizado os valores médios das dimensões do bloco. E a partir disso, o bloco foi lançado a partir de coordenadas x e y de maneira que o centro do bloco coincidissem com a origem (0,0,0). A tabela 81 são apresentadas as coordenadas do bloco inteiro.

Tabela 84 - Coordenadas para Locação do Bloco no Abaqus - o eixo do bloco será o ponto médio da largura e do comprimento

		x	y
Bloco	<i>Primeiro Ponto</i>	-84	-45
	<i>Segundo Ponto</i>	84	45
	<i>Variação</i>	168	90
Furo 1	<i>Primeiro Ponto</i>	-67	-29
	<i>Segundo Ponto</i>	-9	29
	<i>Variação</i>	59	58
Furo 2	<i>Primeiro Ponto</i>	9	-29
	<i>Segundo Ponto</i>	67	29
	<i>Variação</i>	58	58

Quanto aos resultados são apresentados a seguir, as figuras 109 a 112, que ilustram a distribuição de tensão, distribuição de deformação, distribuição de dano à compressão, bloco após a ruptura (ensaio experimental).

Figura 109 – Distribuição de Tensão

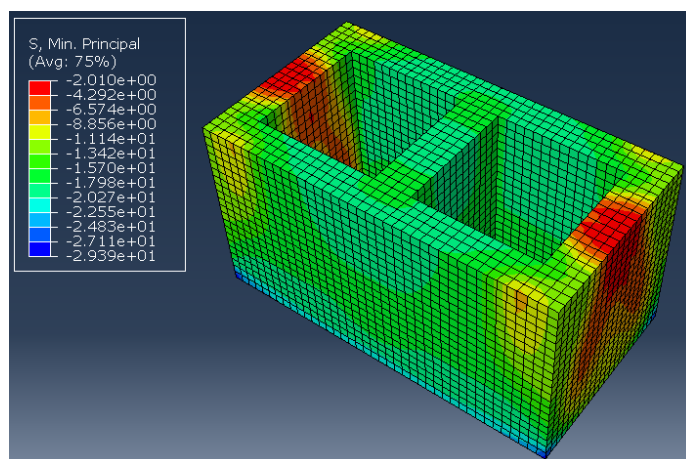


Figura 110 – Distribuição de Deformação

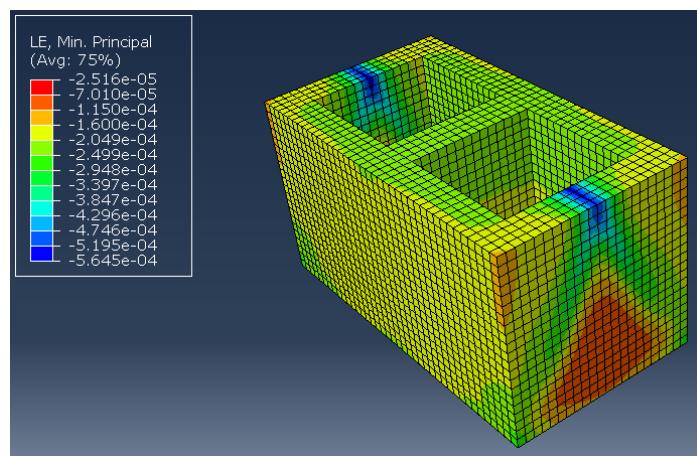


Figura 111 - Distribuição do dano no bloco

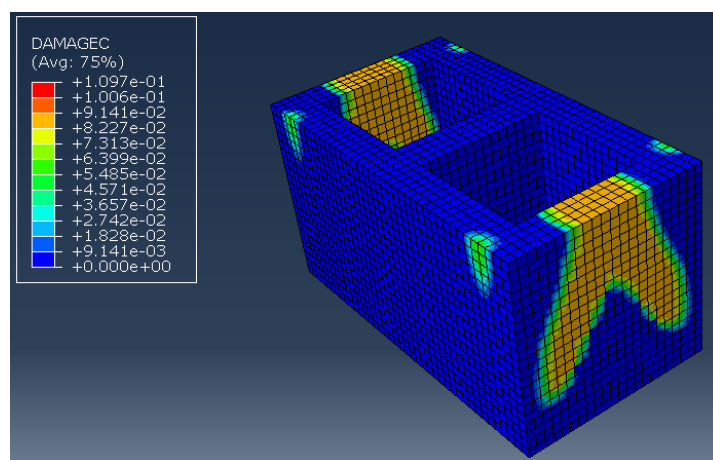


Figura 112 - Exemplo de Bloco Testado

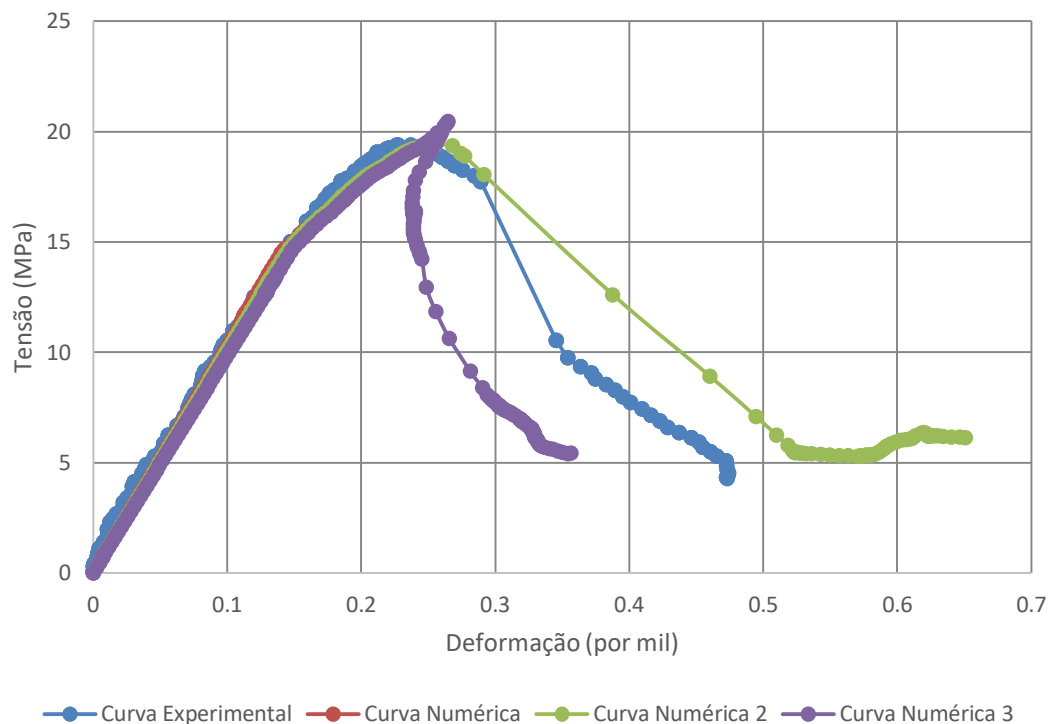


A tabela 85 apresenta um comparativo com os três modelos numéricos que mais se aproximaram do resultado experimental referente ao bloco BC5. Além disso, são apresentados as curvas de tensão vs deformação do bloco BC5, modelos numérico 1, 2 e 3, no gráfico 19 a seguir.

Tabela 85 - Comparativo da Tensão Máxima e respectiva Deformação e Módulo de Elasticidade

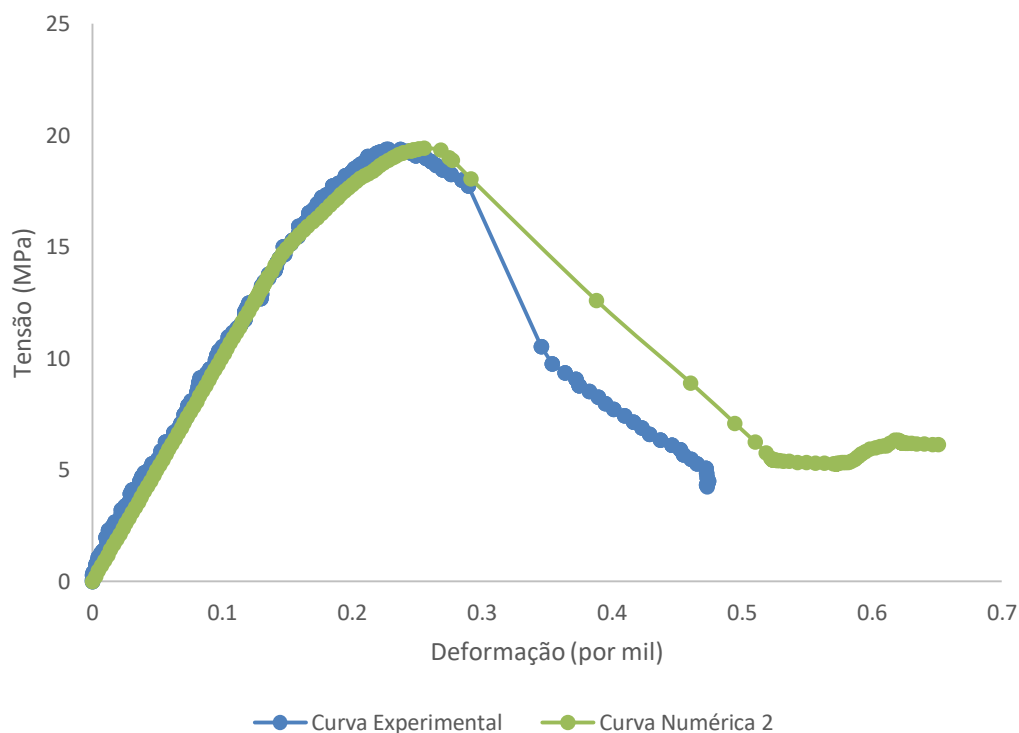
	<i>Experimental</i>	<i>Numérico</i>	<i>Numérico 2</i>	<i>Numérico 3</i>
Tensão(MPa)	19,39	17,06	19,43	20,44
Erro	Não Se Aplica	11,98	0,23	0,05
Deformação(por mil)	0,2276	0,1899	0,2556	0,2646
Erro	Não Se Aplica	16,55	12,31	16,28

Gráfico 19 - Tensão x Deformação do Bloco - Comparativo entre Experimental e Numérico



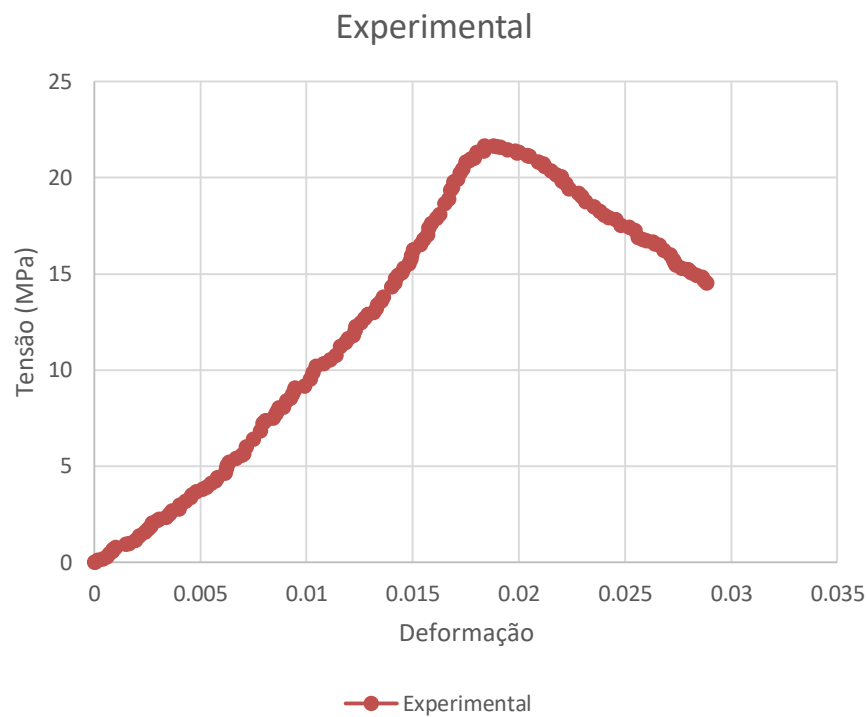
Analisando o conjunto de informações, a curva número 2 será a que melhor representará os blocos que foram ensaiados. Para uma melhor visualização o gráfico 20 apresenta apenas a curva experimental e a curva numérica 2.

Gráfico 20 - Tensão vs Deformação do Bloco - Comparativo entre Experimental e Numérico 2

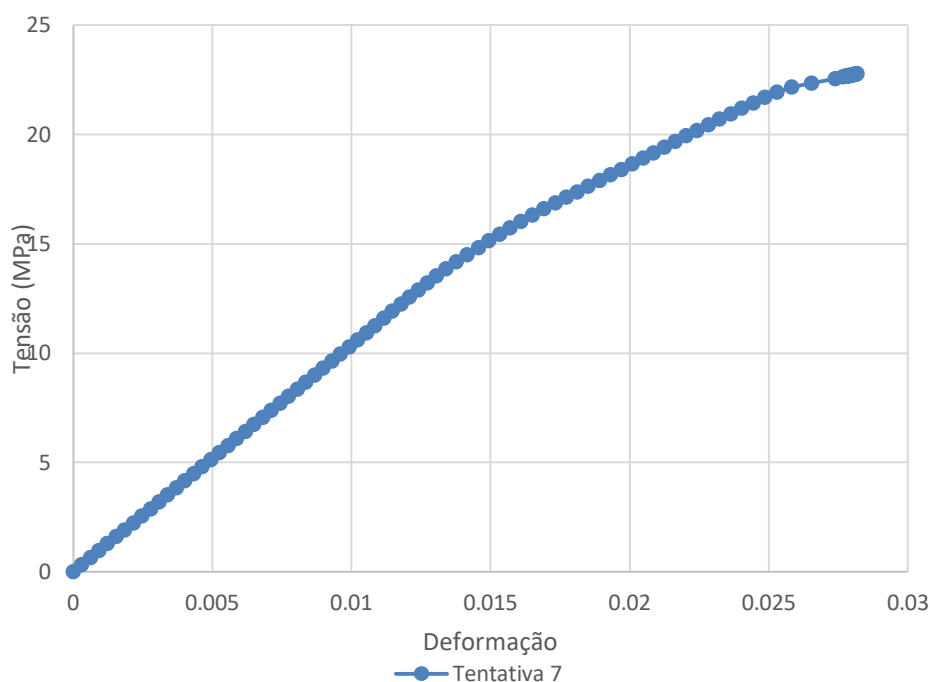


8.2 Modelos Numéricos – Ensaio de Compressão da Argamassa

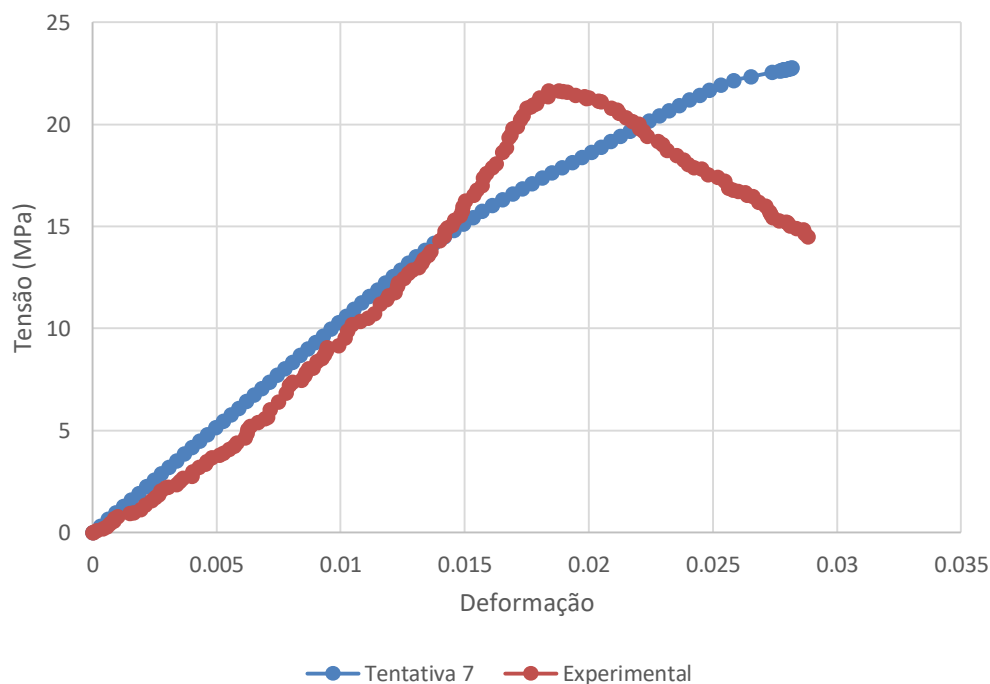
Neste tópico é apresentado o processo de validação do ensaio de compressão da argamassa, onde se buscou representar o comportamento de um corpo de prova em formato de cubo e cuja dimensão era 40mm. Para efeito de comparação é apresentado a seguir a curva experimental da amostra, gráfico 21, que será utilizada como base para validação.

Gráfico 21 - Tensão vs Deformação – Argamassa – Modelo Experimental

Em um primeiro momento se considerou o módulo de elasticidade de 1053MPa para o corpo de prova e uma malha de 4mm, essa tentativa será denominada como tentativa 7, uma vez que, foram realizadas outras tentativas para melhor representação do dano no modelo. Para essa situação se obteve o seguinte a seguinte curva de tensão vs deformação, conforme gráfico 22.

Gráfico 22 - Tensão vs Deformação – Argamassa - Modelo Numérico

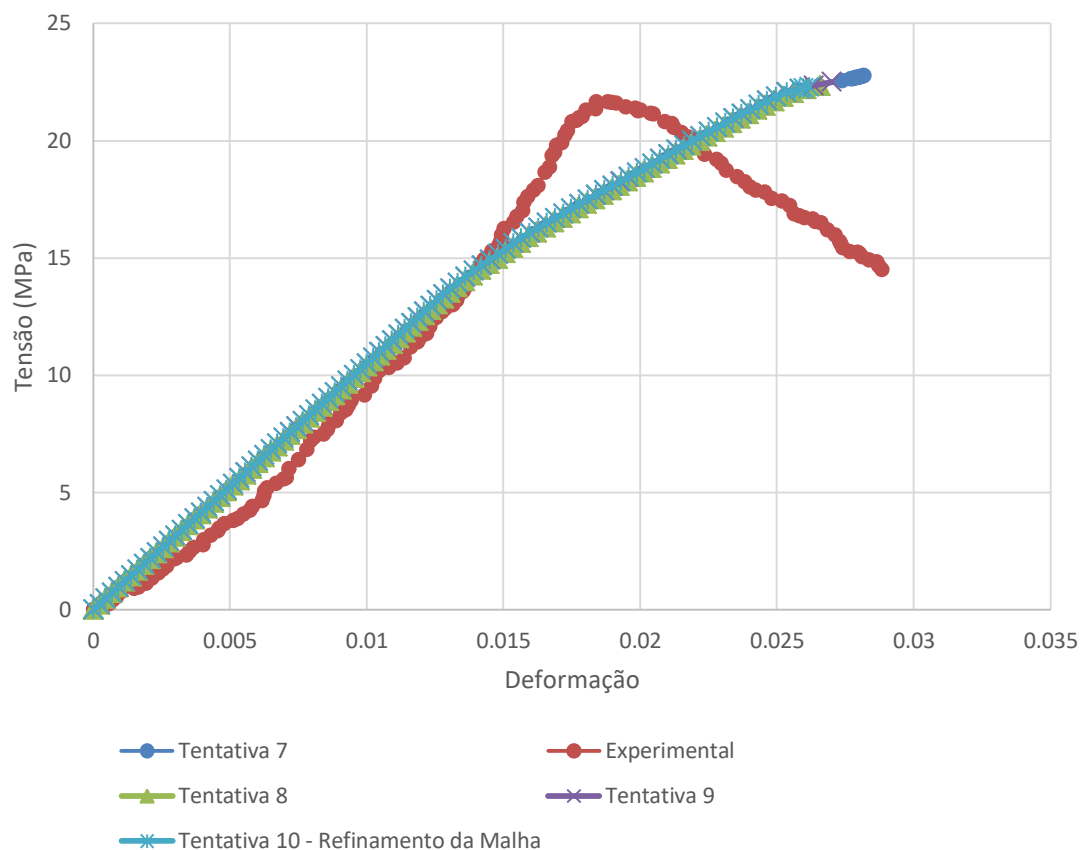
Fazendo um gráfico comparando as duas curvas é possível notar que os valores máximos dos gráficos estão próximos, no entanto, as deformações não estão próximas. O gráfico a seguir apresenta essa análise.

Gráfico 23 - Comparativo - Tensão vs Deformação - Modelo experimental e numérico

Foram realizadas mais três tentativas considerando o mesmo módulo de elasticidade e alterando parâmetros, como por exemplo, redução da di-

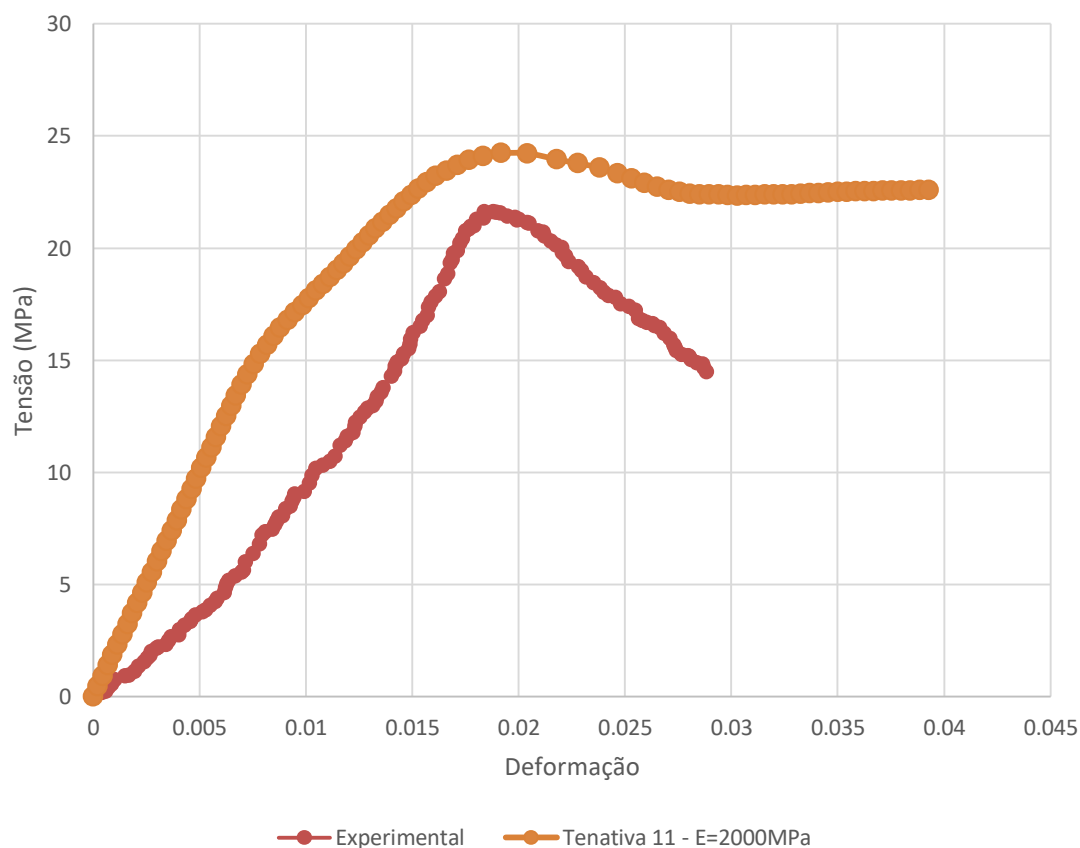
mensão da malha (tentativa 10), aplicando um deslocamento maior (tentativa 8 e 9), porém nenhuma alteração significativa foi detectada.

Gráfico 24 - Tensão vs Deformação - Modelo Numérico e experimental – Processo de Validação



Com base nisso, fundamentado em outras análises e observações de modelos numéricos estudados na literatura, foi aumentado o módulo de elasticidade para 2000MPa mantive os demais parâmetros o mesmo. A razão de realizar essa alteração é que observando todos os gráficos é possível notar que o modelo numérico está se apresentando menos rígido do que o modelo experimental e por essa razão foi aumentado o valor do módulo de elasticidade longitudinal.

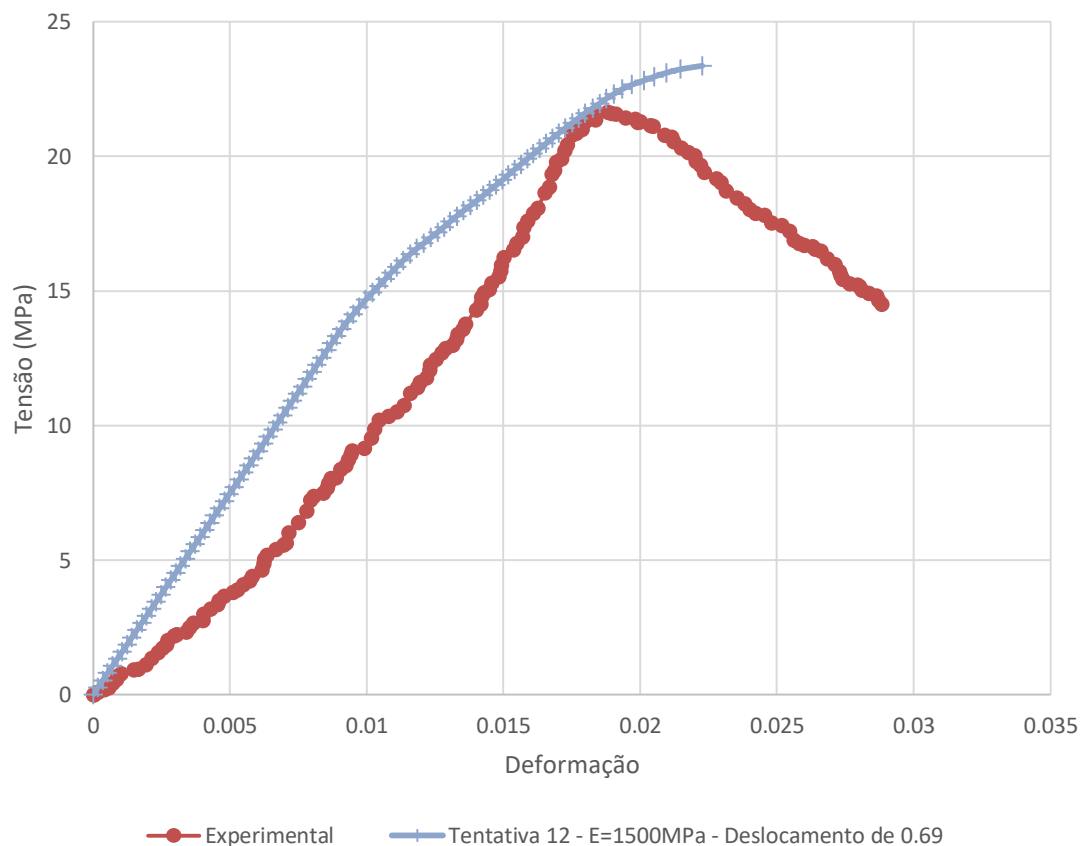
Gráfico 25 - Comparativo - Tensão vs Deformação - Argamassa - Considerando Enumérico = 2000MPa



É possível notar que o gráfico 25, ao se avaliar a tensão máxima e sua respectiva deformação houve uma aproximação maior nos valores, uma vez que ambos, resultado do modelo numérico, apresentaram um aumento de aproximadamente 11% em comparação com o resultado experimental. No entanto, é possível notar que o comportamento das duas curvas é relativamente distinto. Por essa razão foi realizado mais um teste, mas nesse novo teste se considerou o valor do módulo de elasticidade igual a 1500MPa. A seguir é apresentado um gráfico que compara as duas curvas.

O modelo com esse valor de módulo de elasticidade não completou o processamento e parou no deslocamento relativo a aproximadamente 77% do que foi considerado no início o valor de 0.9mm, sendo assim o modelo será mais uma vez processado, porém com o valor de 0.69mm. A seguir apresenta-se o gráfico que compara o modelo numérico e resultado experimental.

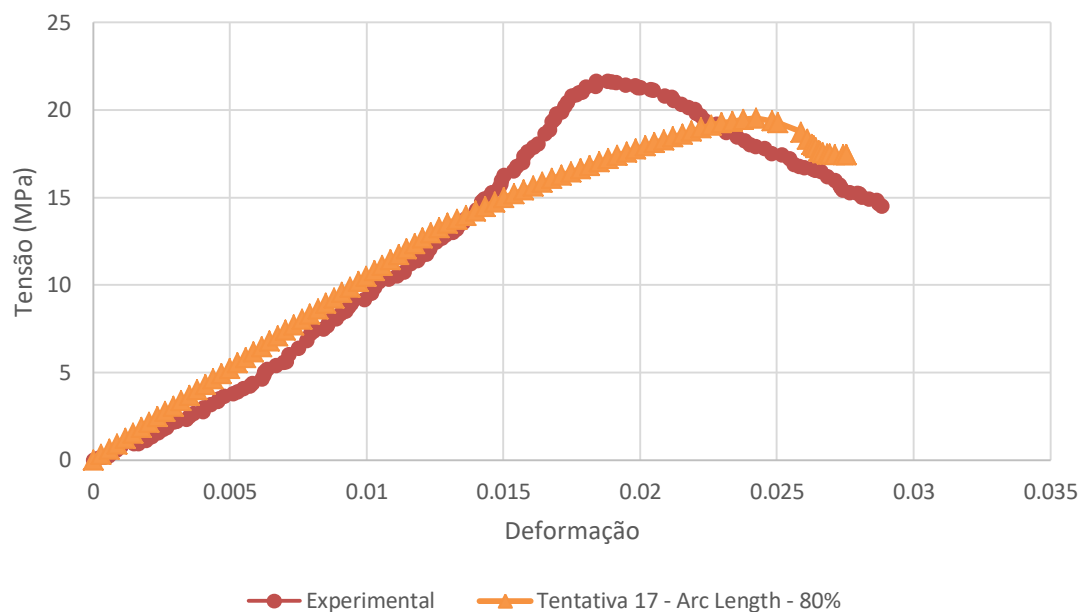
Gráfico 26 - Comparativo - Tensão vs Deformação - Modelo Numérico e Experimental - Considerando E numérico = 1500MPa



Uma nova tentativa foi realizada considerando o método de resolução arc-length. Pois em todos os modelos realizados com o método de newton não foi possível ultrapassar o deslocamento máximo previsto nos ensaios experimentais. Para esse processamento se considerou um incremento máximo de 1% do deslocamento de 1.15mm que foi calculado para a argamassa. Além disso, se considerou o módulo de elasticidade longitudinal de 1053MPa que foi encontrado a partir de uma linha de tendência considerando a tensão máxima elástica igual a aproximadamente 15MPa, processo análogo ao que foi realizado na validação do bloco de concreto.

O modelo não completou o processamento devido ao valor do incremento, o máximo alcançado foi aproximadamente 80% que equivale a 0.91mm. A seguir, no gráfico 27, é apresentada a curva que compara o último passo de incremento e a curva experimental apresentada.

Gráfico 27 – Comparativo – Tensão vs Deformação – Argamassa – Modelo Numérico e Experimental – Método Arc – Length – Considerando Enumérico = 1053MPa



Para uma próxima análise, observando todos os gráficos alcançados até o momento é possível notar que o modelo se apresenta pouco rígido na região plástica e por essa razão a próxima análise consistirá na alteração do parâmetro de visco elástico de 0,001 para 0,0001. Além disso, foi imposto que o máximo deslocamento do modelo é o mesmo aplicado no modelo anterior de 1.15mm. O modelo não apresentou nenhuma diferença significativa, por essa razão foi realizada uma nova alteração de 0,001 para 0,01.

Foram feitas diversas alterações, porém não se alcançou diferença alguma quanto ao comportamento da curva e os valores máximos de tensão e sua respectiva deformação apresentou, praticamente, a mesma diferença em relação ao experimental da mesma forma que os demais testes, as figuras 113 a 116 apresentam a distribuição de tensão, deformação e distribuição de dano à compressão e a ruptura da argamassa, respectivamente. Além disso, a tabela 83 apresenta um comparativo entre a tensão de ruptura e deformação última do modelo experimental e as tentativas de validação.

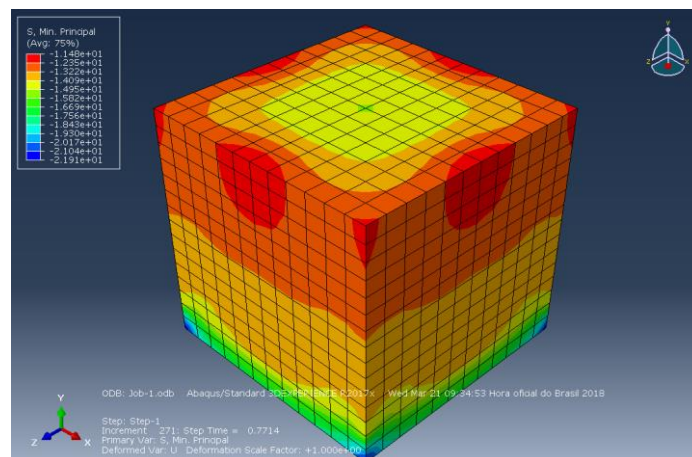
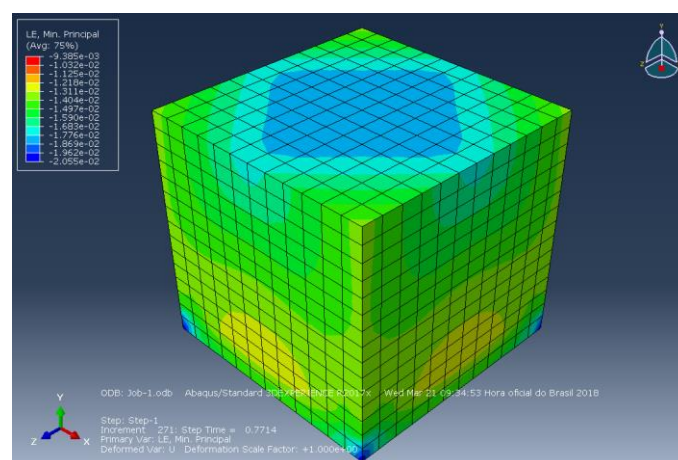
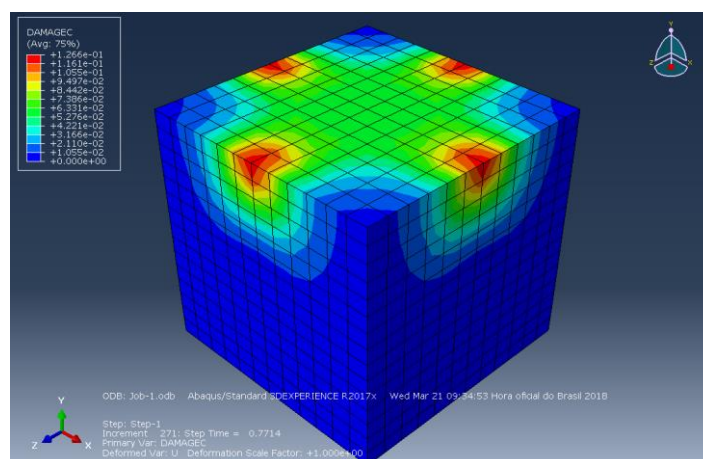
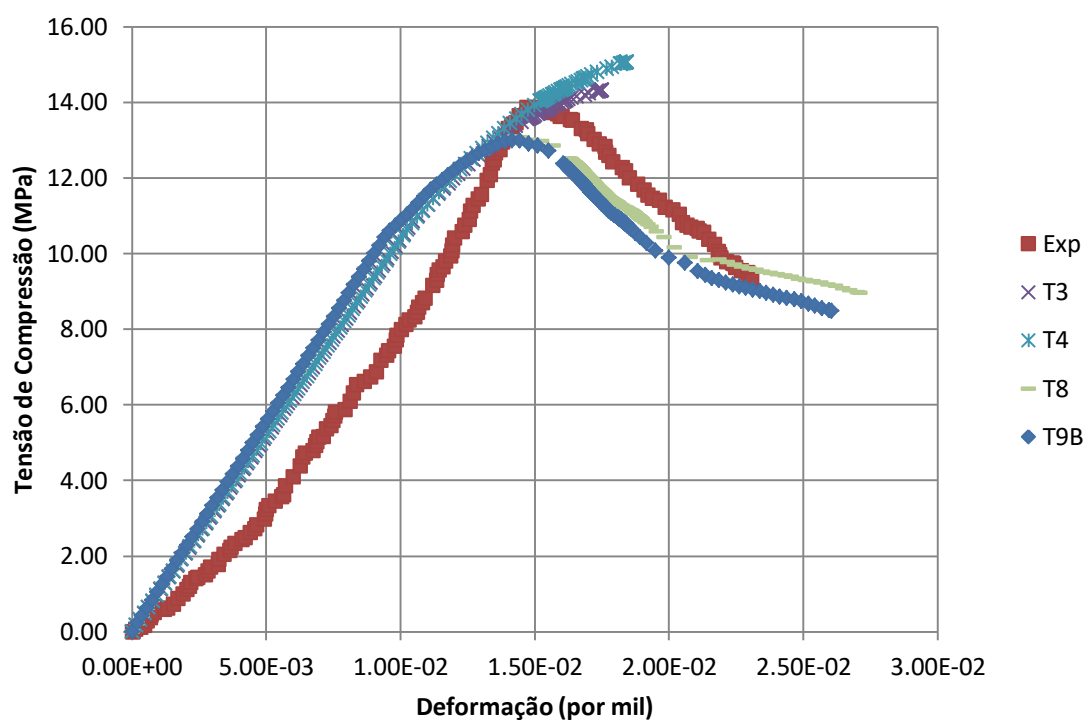
Figura 113 - Distribuição de Tensão**Figura 114 - Distribuição de Deformação****Figura 115 - Distribuição do Dano à Compressão**

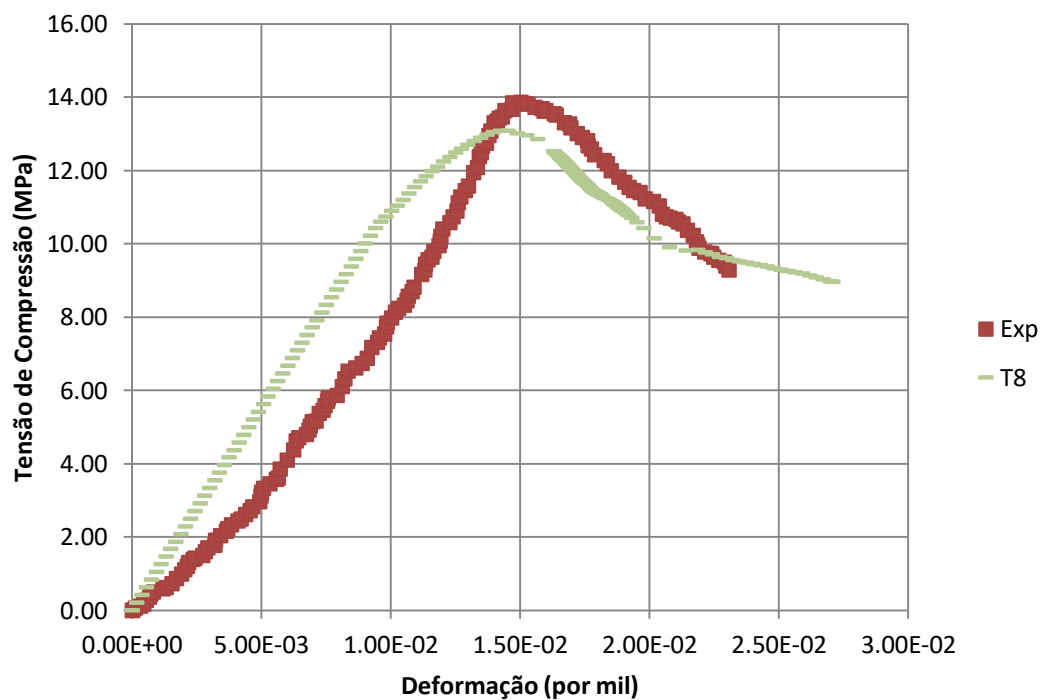
Figura 116 – Ruptura da Argamassa**Gráfico 28 – Comparativo – Tensão vs Deformação – Modelo Numérico e Experimental****Tabela 86 – Comparativo – Tensão de ruptura e deformação última - Modelos Numéricos e Experimental**

	Experimental	Tentativa 3	Tentativa 4	Tentativa 8	Tentativa 9	Tentativa 9B
Tensão	13,86	14,31	15,06	13,00	13,07	12,99
Erro	Não se Aplica	3,30	8,65	6,20	5,65	6,27
Deformação	0,0150368	0,0174894	0,0184109	0,0210536	0,0142418	0,0141451
Erro	Não se Aplica	16,31	22,43	40,01	5,28	5,93

O modelo a ser utilizado que melhor representa o comportamento da argamassa é referente a tentativa 8. Apesar do deslocamento apresentar o maior erro, o comportamento da curva tensão vs deformação da tentativa 8

se assemelha ao modelo experimental. Sendo assim a seguir é apresentado o gráfico de tensão vs deformação da curva experimental e tentativa 8, gráfico .

Gráfico 29 – Comparativo – Tensão vs Deformação – Modelo Numérico (Tentativa 8) e Experimental



8.3 Modelos Numéricos – Ensaio de Compressão do Graute

Neste item é apresentado o procedimento de criação do modelo numérico que representará o ensaio de compressão do graute. Esta etapa será dividida da seguinte maneira:

- a) Dados de Entrada e Geometria do Modelo
- b) Estudo das Malhas
- c) Restrições do Modelo
- d) Resultados

8.3.1 Dados de Entrada do Modelo e Geometria

Os dados de entrada para representação do modelo numérico foram extraídos do conjunto de curvas de tensão vs deformação tanto a compressão como tração do graute e os gráficos 30 e 31 apresentam o conjunto de curvas. Com base em uma observação visual foi escolhida a curva referente ao corpo de prova GC2 para obtenção dos dados referentes a compressão e o valor de resistência à tração foi considerado o valor médio da tensão. As respectivas curvas estão apresentadas nos gráficos 30 e 31.

Gráfico 30 – Força vs Deslocamento – Compressão - Graute

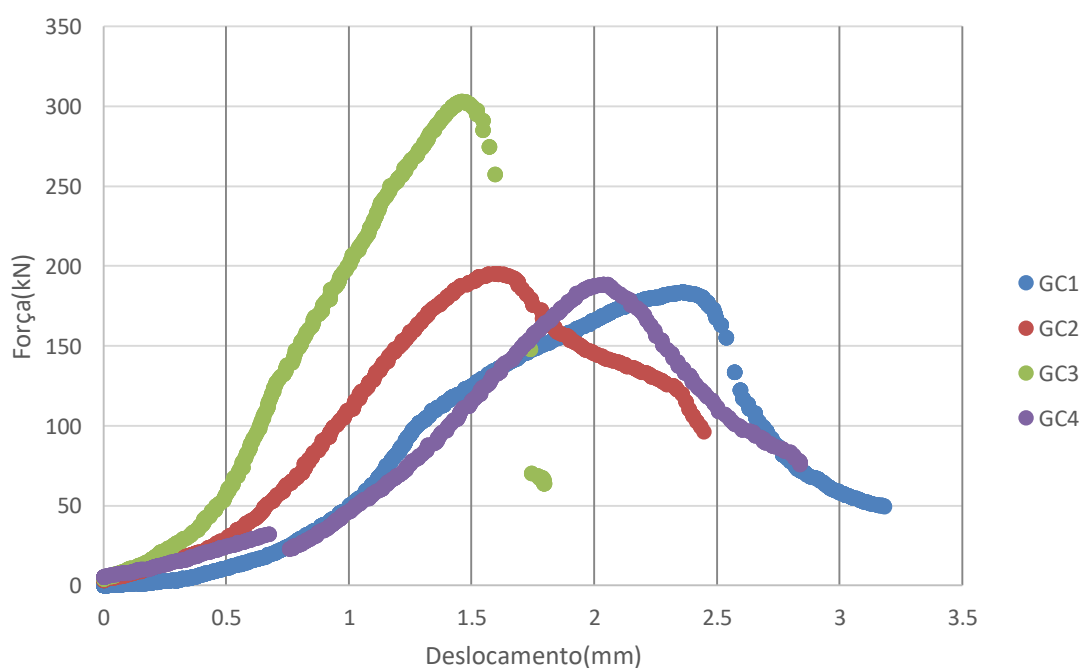
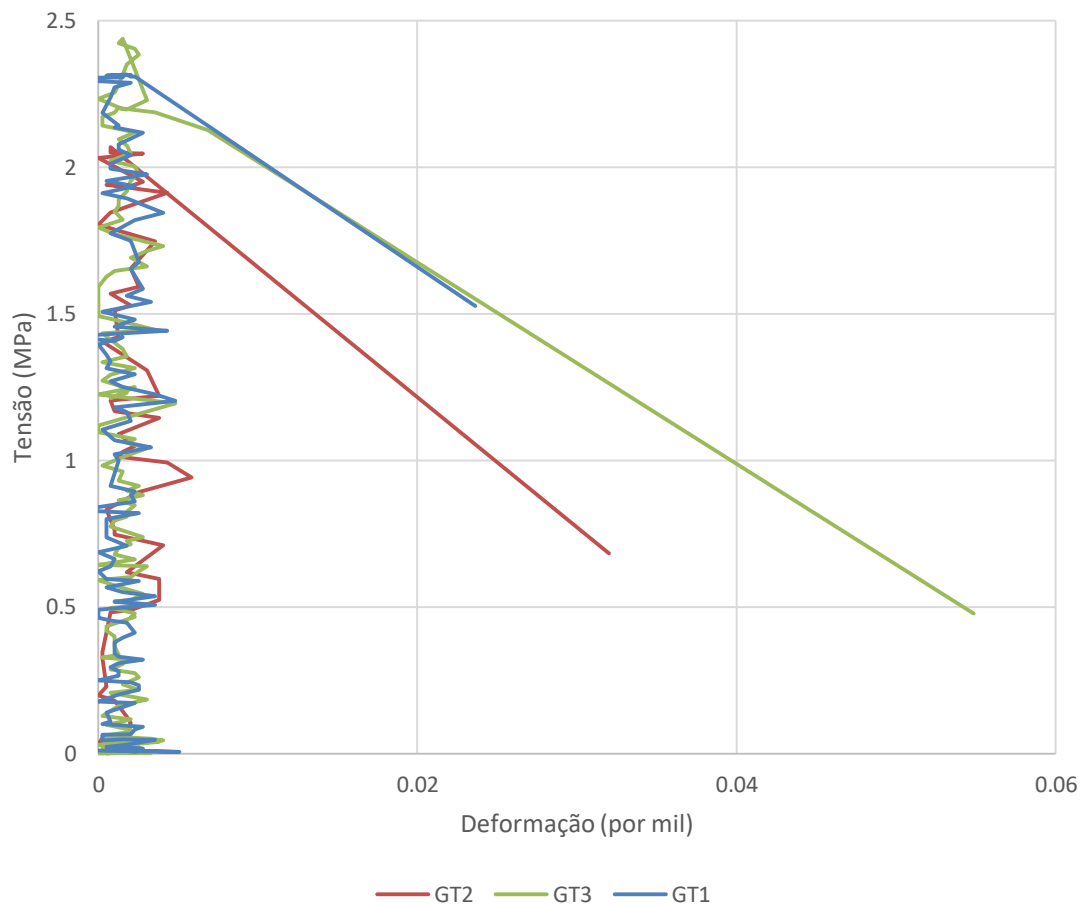


Gráfico 31 - Tensão vs Deformação - Tração - Graute

Quanto ao modelo plástico para representação do graute, assim como nos modelos anteriores, foi utilizado o modelo CDP. Dessa forma, é apresentado os seguintes parâmetros de entrada:

- a) Dados de Entrada para Fase Elástica, conforme tabela 87;
- b) Dados de Plasticidade do Graute, conforme tabela 88;
- c) Dados de Tensão e Deformação Inelástica do Comportamento a Compressão do Graute, conforme tabela 89;
- d) Dados de Tensão e Deformação Inelástica do Comportamento a Tração do Graute, conforme tabela 90;
- e) Parâmetros de dano à compressão e tração, conforme tabela 91 e 92, respectivamente.

Tabela 87 - Propriedades Elásticas do Graute

Graute	$E \text{ (MPa)}$	4234
	ν	0,2

Tabela 88 - Dados da Plasticidade do Concreto

<i>Ângulo de Dilatância</i>	<i>Excentricidade</i>	f_{b0}/f_{c0}	K	<i>Parâmetro de Viscosidade</i>
36	0,145	1,16	2/3	0,001

Tabela 89 - Dados Comportamento a Compressão – Trecho Inelástico

Tensão	Deformação Inelástica	Tensão	Deformação Inelástica
19,01414	0	16,41528	0,005206
19,06224	0,003031	16,31881	0,005225
19,1563	0,003069	15,8043	0,005325
19,30658	0,003131	15,38826	0,005406
19,39277	0,003169	15,22918	0,005438
19,40684	0,003175	14,78765	0,005525
19,47592	0,003206	14,69391	0,005544
19,60761	0,003269	14,23065	0,005638
19,64541	0,003288	14,10879	0,005663
19,70663	0,003319	13,62927	0,005763
19,73049	0,003331	13,42371	0,005806
19,83337	0,003388	13,33644	0,005825
19,8873	0,003419	13,07771	0,005881
19,96872	0,003469	12,85169	0,005931
19,98812	0,003481	12,57456	0,005994
20,01651	0,0035	12,25009	0,006069
20,09644	0,003556	12,06495	0,006113
20,1684	0,003613	11,62811	0,006219
20,19058	0,003631	11,47828	0,006256
20,21186	0,00365	11,23357	0,006319
20,23221	0,003669	11,11356	0,00635
20,2989	0,003738	10,67165	0,006469
20,3149	0,003756	10,38198	0,00655
20,36536	0,003825	10,25169	0,006588
20,38398	0,003856	10,10238	0,006631
20,42334	0,00395	9,997483	0,006663
20,43202	0,003988	9,671417	0,006763
20,43696	0,004031	9,533279	0,006806
20,4372	0,004038	9,474902	0,006825
20,43733	0,004044	9,061545	0,006963
20,41521	0,004119	8,846676	0,007038

20,40684	0,004131	8,776661	0,007063
20,34548	0,004194	8,724667	0,007081
20,3376	0,0042	8,405448	0,0072
20,26345	0,00425	8,260133	0,007256
20,18293	0,004294	8,180988	0,007288
20,01286	0,004369	7,935111	0,007388
19,91356	0,004406	7,830981	0,007431
19,68872	0,004481	7,728881	0,007475
19,43206	0,004556	7,502904	0,007575
19,34009	0,004581	7,39365	0,007625
19,31663	0,004588	7,300029	0,007669
18,78495	0,004719	7,067468	0,007781
18,48091	0,004788	7,004892	0,007813
18,13337	0,004863	6,94317	0,007844
17,9243	0,004906	6,870211	0,007881
17,55716	0,004981	6,739519	0,00795
17,18152	0,005056	6,692956	0,007975
16,99137	0,005094	6,681394	0,007981

Tabela 90 - Dados Comportamento a Tração - trecho Inelástico

Tensão	Deformação Inelástica
1,97	0
2,65	5,08E-05
2,98	0,000152
1,69	0,000965
1,36	0,0016
1,27	0,00183
1,18	0,00206
1,14	0,00234
1,07	0,00241

Tabela 91 - Parâmetro de Dano a Compressão

d_c	$\varepsilon_{c,pl}$
0	0
0	0,00404
0,00149189	0,00413125
0,004493922	0,00419375
0,004879695	0,0042
0,008507629	0,00425
0,012447738	0,00429375

0,02076938	0,00436875
0,054835921	0,0045875

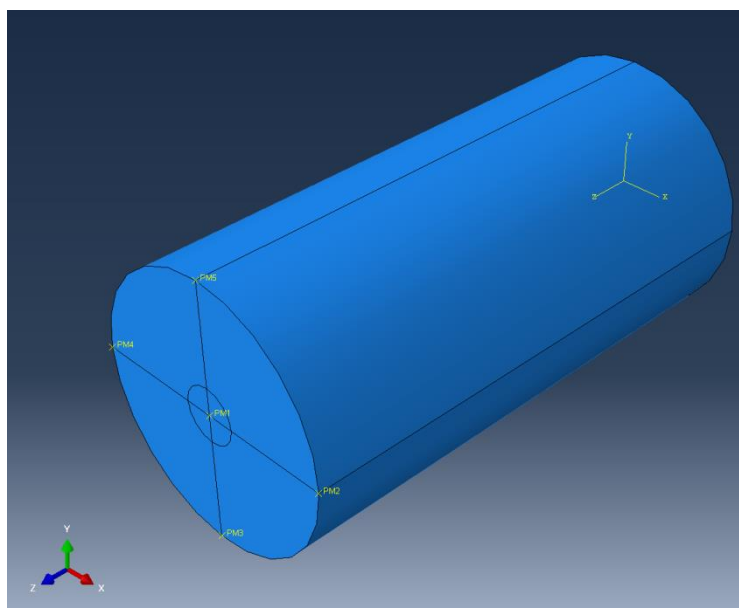
Tabela 92 - Parâmetros de Dano a Tração

d_c	$\varepsilon_{c,pl}$
0	0
0	0,000152
0,572	0,000979
0,603	0,00109

Quanto à geometria considerada, se seguiu os critérios estabelecidos pela NBR5738/2003. Foi utilizado um cilindro de diâmetro 100 mm e altura de 200 mm, uma vez que a norma estabelece que a altura do cilindro deve ser o dobro do diâmetro, conforme item 4.1.1.

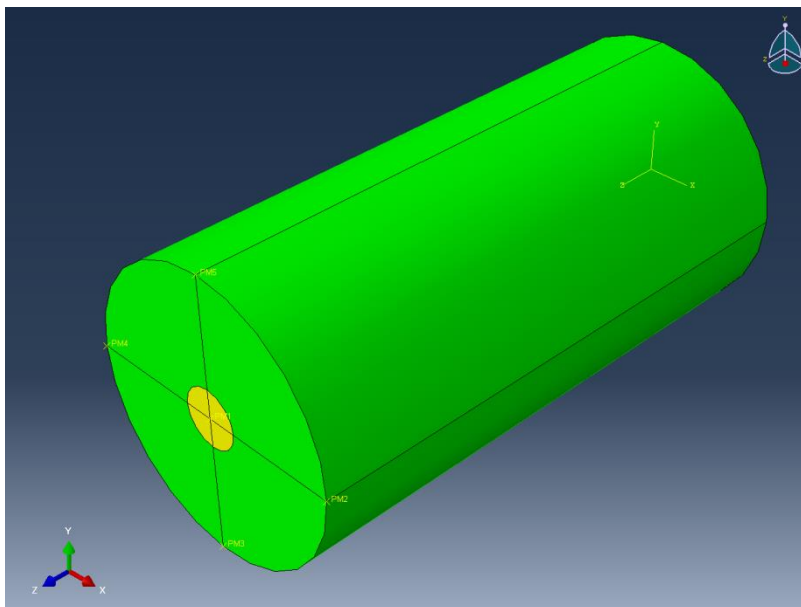
8.3.2 Estudo das Malhas

Por se tratar de um corpo de prova cuja seção transversal é circular, não foi possível a aplicação apenas de elementos prismáticos uma vez que haveria uma variação na dimensão e na forma do elemento. Por essa razão foi necessário a utilização de tipos de malha diferente para o mesmo modelo. Em um primeiro momento foi criado uma partição circular cujo diâmetro era de 20 mm, além disso, foi particionada, em quatro partes iguais, a seção transversal e com isso se obteve a seguinte forma do modelo conforme a figura 117.

Figura 117 - Partição do Modelo

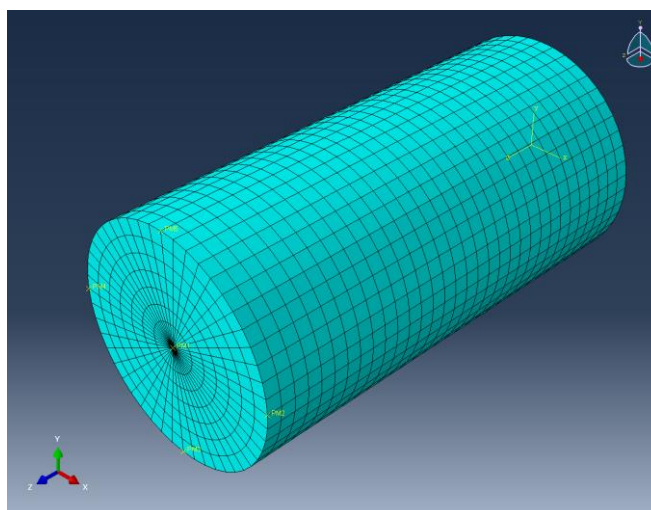
E partir dessa partição foi utilizado dois tipos de malha, conforme a figura 118, na parte mais interna (circunferência interna) foi utilizada o modelo *Wedge* que cria uma malha radial na parte mais externa foi utilizado o modelo hexagonal estruturado como nos demais modelos.

Figura 118 - Representação da Diferença de Malha



Quanto à dimensão da malha, ao contrário do que foi realizado no bloco e na argamassa onde se estabeleceu a dimensão da malha, se dividiu o segmento de arco em 12 partes iguais, o segmento de reta mais afastada do centro em 6 partes iguais e o segmento de reta interno em 1 parte e o resultado desse procedimento é apresentado na figura 119. A razão pela qual se utilizou essa forma divisão é para obtenção de uma malha que aproximasse da dimensão que foi utilizada nos blocos.

Figura 119 - Representação da Malha do Graute



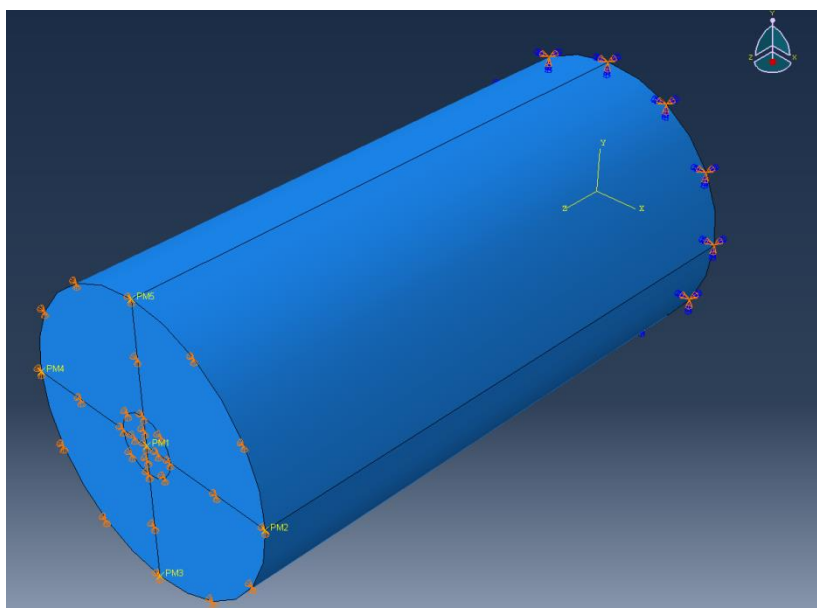
Assim como nos modelos anteriores (bloco e argamassa) foi utilizado o elemento de malha C3D8R na parte externa e na interna foi utilizado o elemento C3D6.

8.3.3 Restrições do Modelo

As vinculações aplicadas no modelo foram impostas de maneira que representassem da melhor maneira o ensaio físico. Por essa razão foi aplicado as seguintes condições de contorno no modelo:

- Na base do graute se restringiu todas as possibilidades de translação e rotação da base, conforme a figura 120.
- Quanto ao topo do modelo foi restringida as translações nos eixo X e Y, conforme figura 120;
- Ainda no topo, foi aplicado um deslocamento na direção longitudinal em toda a superfície no valor 1.5mm, conforme figura 120.

Figura 120 - Vinculação do Modelo



8.3.4 Resultados

A partir do modelo preparado foi processado considerando, conforme explicado no item anterior, com um deslocamento médio de 1.5mm. Considerando esse deslocamento e o modelo é apresentado nas figuras 121 a 124, apresentando, respectivamente, a distribuição de tensão, deformação, dano à compressão e à tração.

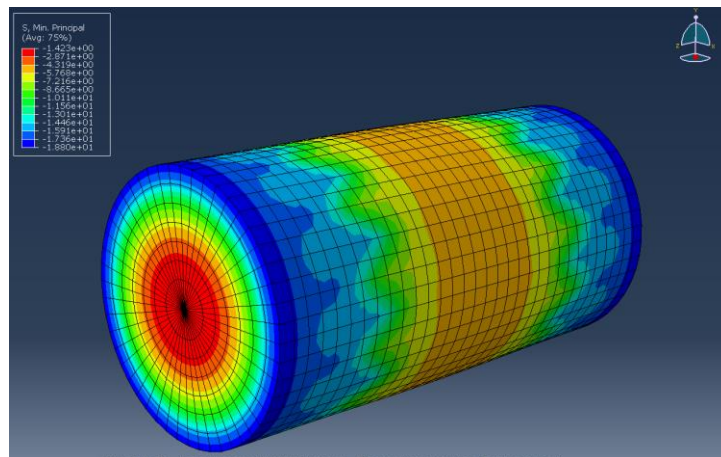
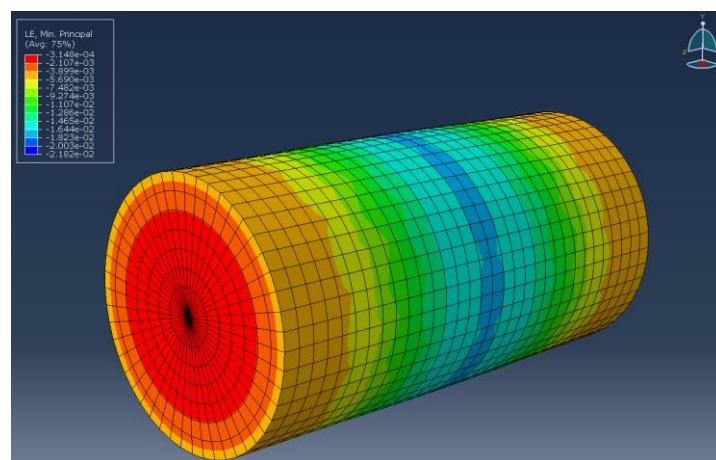
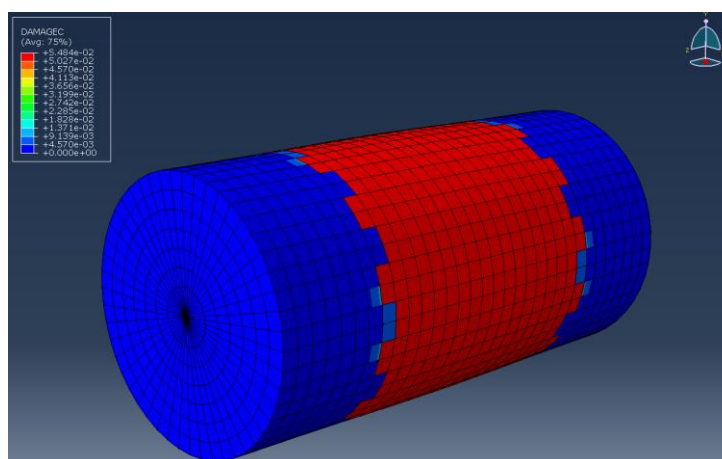
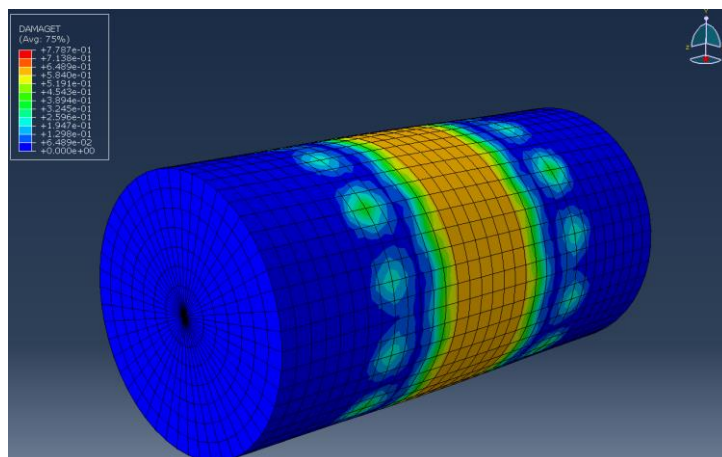
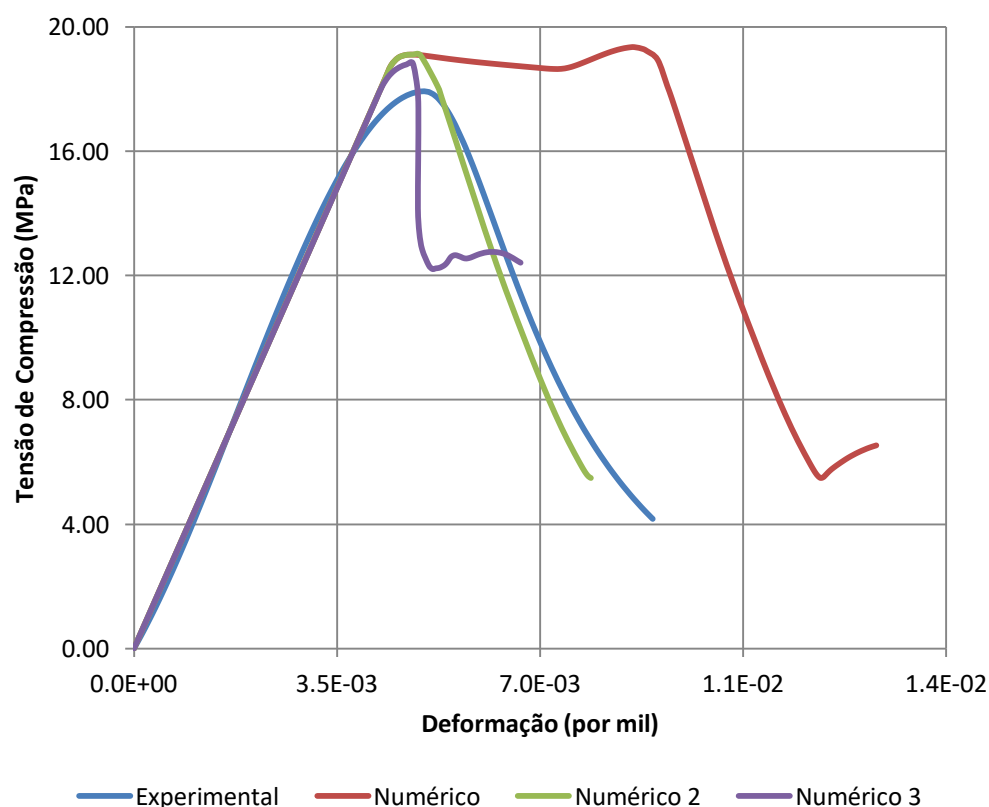
Figura 121 - Distribuição de Tensão**Figura 122 - Distribuição das Deformações****Figura 123 - Dano a Compressão Último Passo**

Figura 124 - Distribuição de Dano a Tração

Considerando as figuras 121 a 124, apesar da apresentação de curvas de três modelos numéricos distintos, as imagens não apresentaram grandes diferenças apesar das curvas apresentadas no gráfico 32.

Gráfico 32 – Comparativo – Tensão vs Deformação – Modelo Numérico e Experimental

Analisando o gráfico 32, percebe-se que o a curva do modelo numérico 2 apresenta um comportamento mais semelhante com o modelo experimental. O gráfico 33, apresenta apenas a curva do modelo experimental e modelo numérico 2. Além disso, na tabela 90 é apresentado um comparativo com os valores de pico dos modelos numéricos e experimental.

Gráfico 33 – Comparativo – Tensão vs Deformação – Modelo Numérico e Experimental

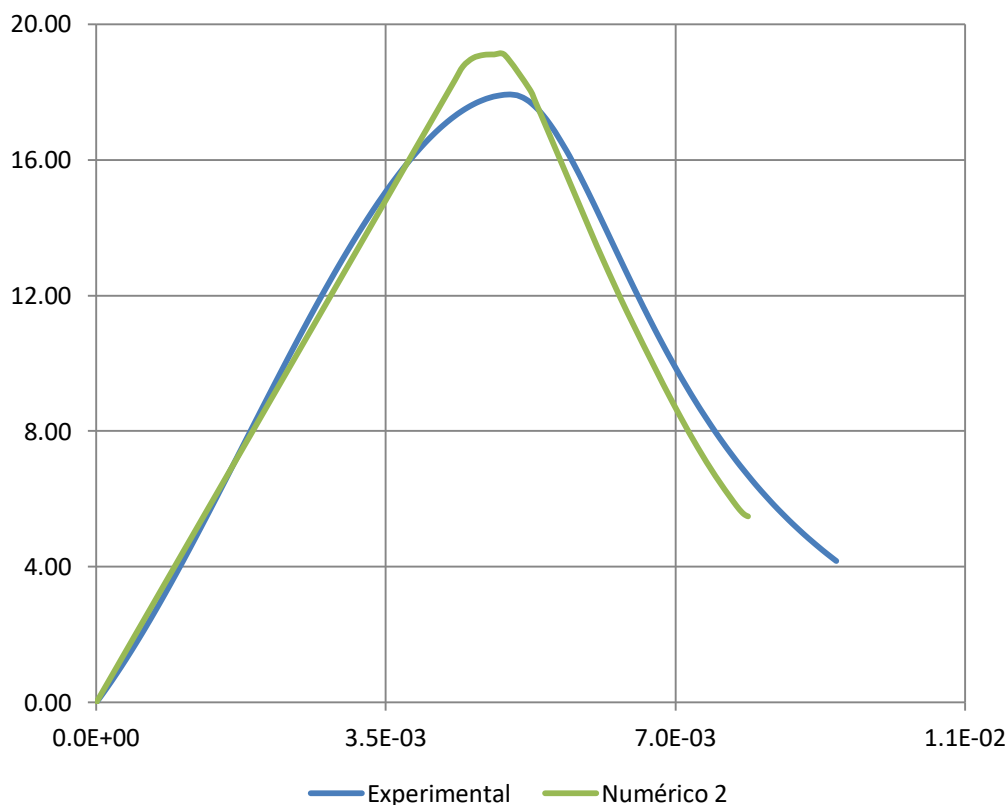


Tabela 93 - Comparação entre as melhores aproximações

	Experimental	Numérico 1	Numérico 2	Numérico 3
Módulo de Elasticidade (MPa)	4234,00	2242,96	3973,87	3918,62
Erro (%)	0	47,02	6,14	7,45
Tensão Máxima (MPa)	17,93	19,35	19,10	18,83
Erro (%)	0	7,92	6,58	5,06
Deformação (mm/mm)	0,00500625	0,00862587	0,00480793	0,00480623
Erro (%)	0	72,30	3,96	3,99

8.4 Modelos Numéricos – Ensaio de Compressão dos Prismas

Nesse item é relatado procedimento de criação do modelo numérico que representará o ensaio de prisma de compressão. Os modelos de prisma que foram criados foram divididos em dois grupos que são prismas ocos (sem graute) e cheios (com graute). Além disso, em cada um desses grupos

foram construídos prismas com dois e três blocos. Este item, assim como nos demais ensaios, foi dividido da seguinte maneira:

- a) Dados de Entrada do Modelo
- b) Geometria do Modelo
- c) Dados de Interface
- d) Estudo das Malhas
- e) Restrições do Modelo
- f) Resultados

8.4.1 Dados de Entrada de do Modelo

Para a criação do modelo foi considerado os dados obtidos através do modelo numérico do bloco de concreto e também da argamassa. Os dados utilizados podem ser divididos em dados da fase elástica e inelástica (também chamada de fase plástica). Os parâmetros referente a fase elástica do bloco, argamassa e graute são apresentados na tabela 94:

Tabela 94 - Dados de Entrada para Fase Elástica

<i>Bloco</i>	<i>E (MPa)</i>	98462
	<i>ν</i>	0,2
<i>Argamassa</i>	<i>E (MPa)</i>	970
	<i>ν</i>	0,2
<i>Graute</i>	<i>E (MPa)</i>	4234
	<i>ν</i>	0,2

Enquanto que para fase plástica foi utilizado o modelo CDP (Concrete Damaged Plasticity). O modelo CDP, como explicado no capítulo 4 e de forma mais detalhada no anexo A, tem por característica a representar a plasticidade do concreto bem como o comportamento do mesmo após surgimento de dano no material. Para a representação do comportamento plástico do material é necessário informar três informações ao modelo que são, os dados de plasticidade do concreto que são apresentados na tabela 95, 96, para bloco e graute, argamassa, respectivamente.

Tabela 95 - Parâmetros de Plasticidade do Bloco e Graute

<i>Ângulo de Dilatância</i>	<i>Excentricidade</i>	<i>f_{b0}/f_{c0}</i>	<i>K</i>	<i>Parâmetro de Viscosidade</i>
36	0,145	1,16	2/3	0,001

Tabela 96 - Parâmetros de Plasticidade da Argamassa

<i>Ângulo de Dilatância</i>	<i>Excentricidade</i>	<i>f_{b0}/f_{c0}</i>	<i>K</i>	<i>Parâmetro de Viscosidade</i>
36	0,126	1,16	2/3	0,001

As outras informações para representação da plasticidade do modelo CDP é a curva de tensão vs deformação a compressão e tração do trecho

inelástico do material. Os dados referentes ao comportamento inelástico dos componentes do prisma são os mesmos que foram utilizados nos modelos independentes de bloco, argamassa e graute.

8.4.2 Geometria do Modelo

Quanto à geometria do modelo foi obtido um valor médio para cada dimensão, por meio da medida de 10 blocos, e com base nessa medição se alcançou os seguintes valores que estão apresentados na tabela 97 a seguir.

Tabela 97 - Dimensões dos Blocos Inteiros de Concreto, Pasquantonio

Largura (y) mm	Comprimento (x) - mm	Altura(z) - mm	Paredes Externas - mm	Septos - mm
90	168	90	17	17

A fim de viabilizar o lançamento do bloco, e também da argamassa, o bloco foi lançado no Abaqus por meio de coordenadas considerando o centro geométrico do bloco como a origem. Vale destacar que a argamassa foi considerada em toda a face do bloco, portanto as dimensões em planta da argamassa são as mesmas do bloco, o único valor que foi alterado foi a espessura (que equivale a altura do bloco) de 5mm.

No entanto o graute, ao contrário do modelo numérico do componente, foi criado um modelo prismático cuja base desse prisma foi considerado furo do bloco.

8.4.3 Dados de Interface

Para a representação de interface entre o bloco e a argamassa foi criada uma propriedade de interface que consiste de três grandes parâmetros que são:

- a) Tangential Behavior (comportamento tangencial ou cisalhante);
- b) Normal Behavior (comportamento normal ou perpendicular);
- c) Cohesive Behavior (comportamento coesivo);

Quanto ao comportamento tangencial foi necessária a inserção do coeficiente de atrito que nesse caso foi utilizado o valor de 0,61, e foi considerando que a tensão de cisalhamento sem limite. Quanto ao tipo de formulação de atrito (que no software está como *formulation friction*) utilizada para

esse comportamento foi o *penalty* (ou penalidade, que é explicado no Anexo A).

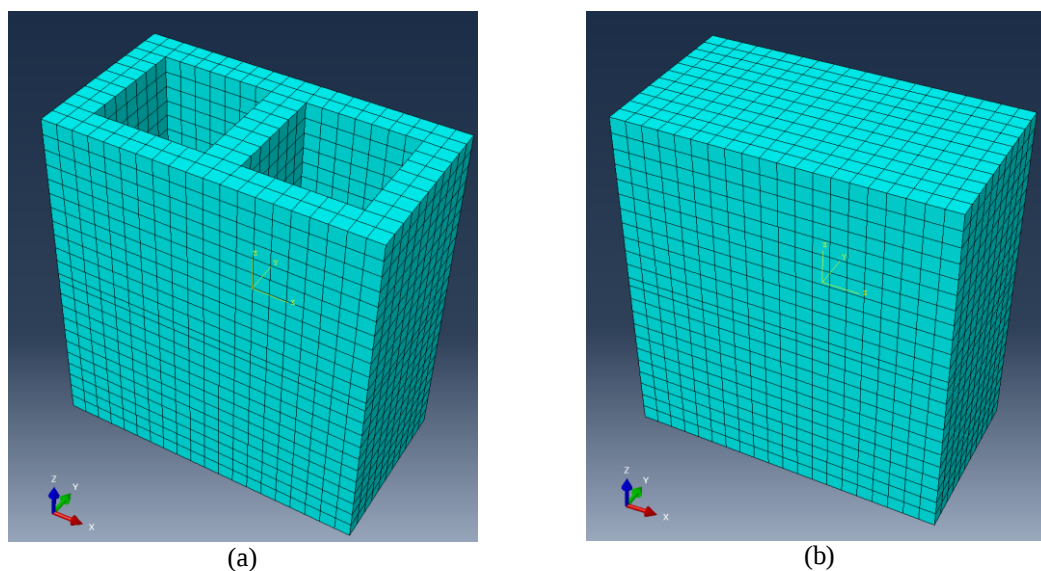
Quanto ao comportamento normal, ou perpendicular, foi utilizado o tipo Hard Contact (ou contato rígido), foi considerado esse tipo de contato devido a sua grande aplicação em modelos de alvenaria que foi encontrado na literatura como, por exemplo, Bolhassani (2015), Minaie(2009), Moradabadi (2015) entre outros.

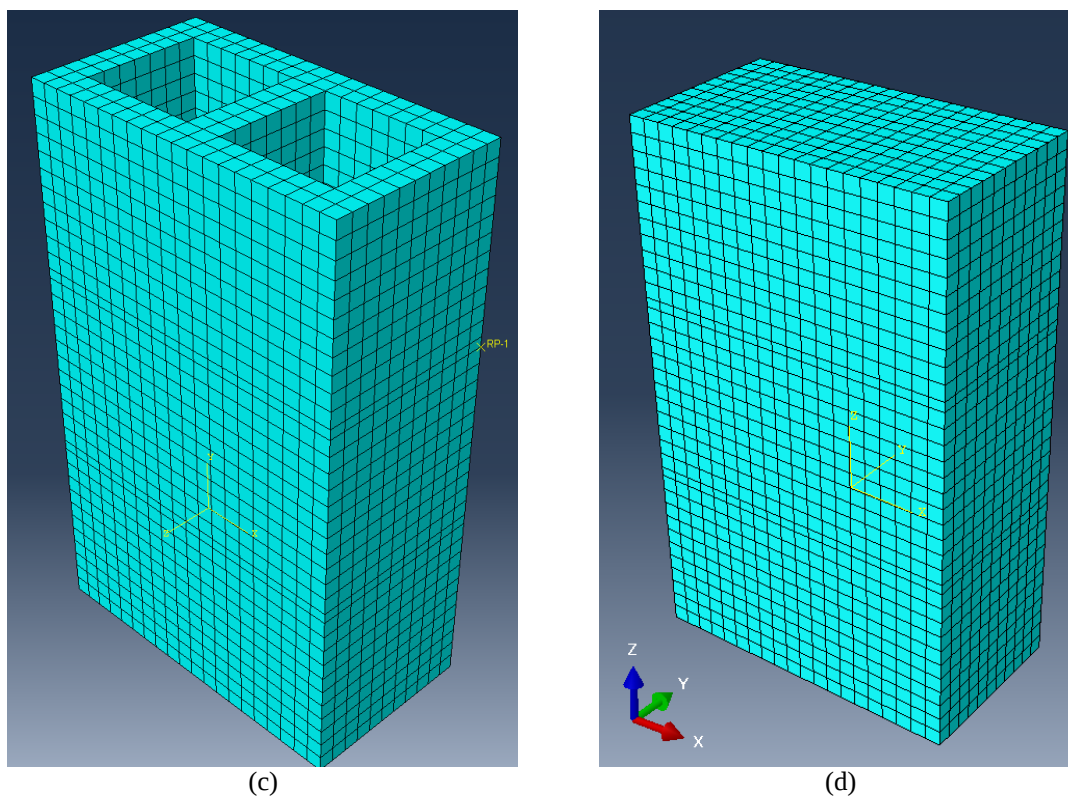
8.4.4 Estudo das Malhas

Por se tratar de um modelo com mais de um componente, ou seja, na composição do corpo de prova há dois ou três blocos e uma ou duas fiadas de argamassa e a presença ou não do graute, se optou por uma malha que fosse menos refinada em comparação com a que foi utilizada no bloco e na argamassa.

Com o intuito de facilitar o ajuste de malha foi considerada a mesma dimensão da malha tanto para bloco, argamassa e graute que foi de 8,5mm. A figura a seguir apresenta a malha de cada um dos componentes.

Figura 125 Malhas Utilizadas nos Prismas – Prisma de Dois Blocos Oco (a), Prisma de Dois Blocos Grauteado (b), Prisma de Três Blocos Oco (c) e Prisma de Três Blocos (d)



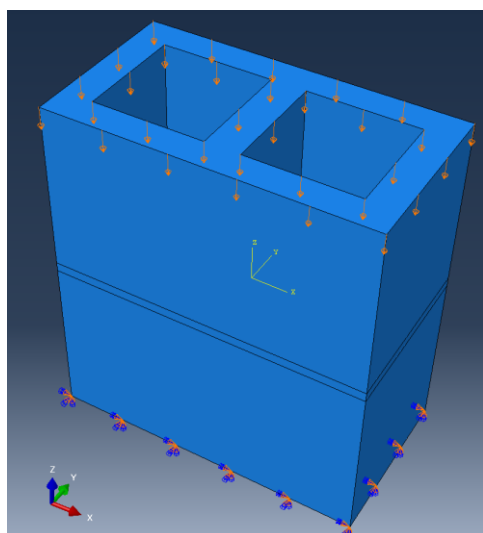


Quanto ao elemento utilizado para a modelagem foi mantido o mesmo elemento que foi utilizado nas demais modelagens que foi o C3D8R, assim como os conceitos referentes ao comportamento coesivo bem como da interface, no anexo A, é explicado a razão pela qual se optou pela utilização desse elemento finito.

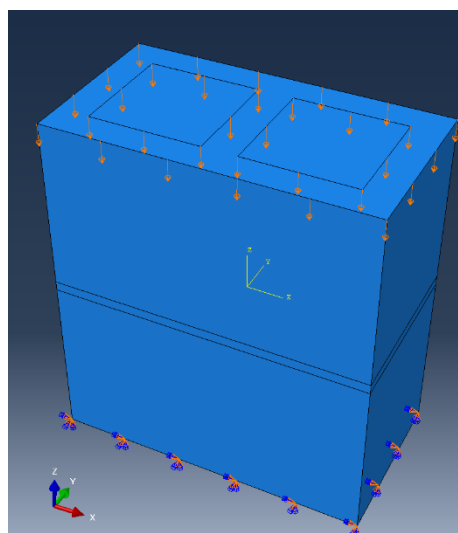
8.4.5 Condições de Vínculo do Modelo

As vinculações aplicadas nos modelos tinham como objetivo a representação da chave que foi utilizada no ensaio, ou seja, a vinculação foi criada de maneira que apenas o bloco do topo tivesse liberdade para transladar bem como rotacionar. Para se alcançar tal objetivo foi considerada a seguinte vinculação, a base do prisma foram restringidos todos os movimentos de translação bem como de rotação, conforme apresentado na figura 126;

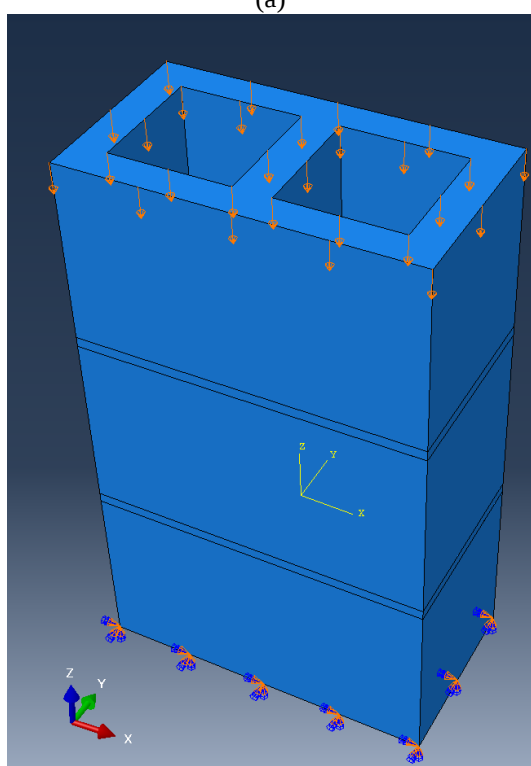
Figura 126 - Condições de Vínculo dos Modelos – Prisma de Dois Blocos Oco (a), Prisma de Dois Blocos Grauteado (b), Prisma de Três Blocos Oco (c) e Prisma de Três Blocos (d)



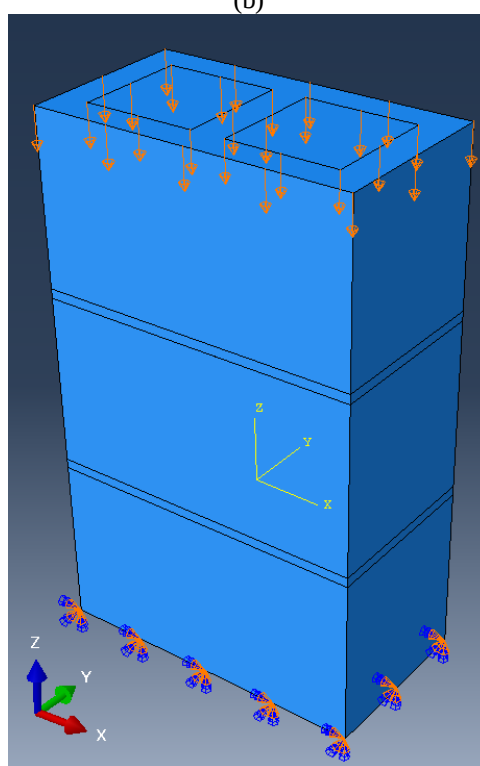
(a)



(b)



(c)



(d)

8.4.6 Resultados

Com base nos parâmetros anteriormente apresentados foi possível uma boa representação do comportamento dos prismas. É importante destacar que os modelos de prismas com dois blocos oco ou cheio e prisma de três blocos oco foram comparados com base em curvas de tensão por deformação da literatura. Já o prisma de três blocos grauteados foi comparado com o resultado dos ensaios realizados por Fortes (2017). A razão pela qual se chega a essa conclusão é devido ao comportamento do modelo ser semelhante ao que foi alcançado no ensaio físico e a distribuição de tensão e

deformação apresenta um comportamento semelhante ao que é encontrado na literatura como forma de ruptura. Este item resultados, com o objetivo de facilitar o entendimento dos resultados, será dividido em quatro tópicos.

8.4.6.1 *Prisma de 2 Blocos - Oco*

Nesse item são apresnetados os resultados alcançados para os primas de dois blocos sem graute. As figuras 127 e 128 são apresentados, respectivamente, distribuição de tensão e deformação. A tabela 98, apresenta a resistência a compressão dos blocos do modelo numérico (fb), resistência à compressão dos prismas (fp) e também a eficiência prisma/bloco (fp/fb).

Figura 127 - Distribuição de Tensão

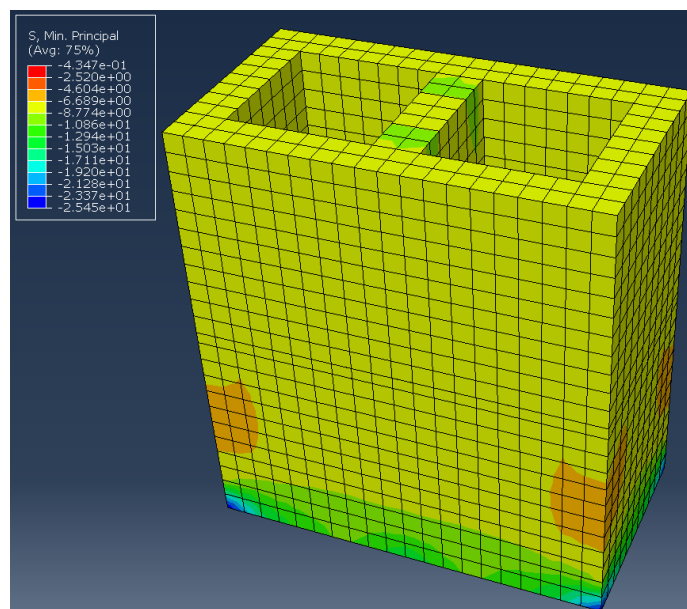
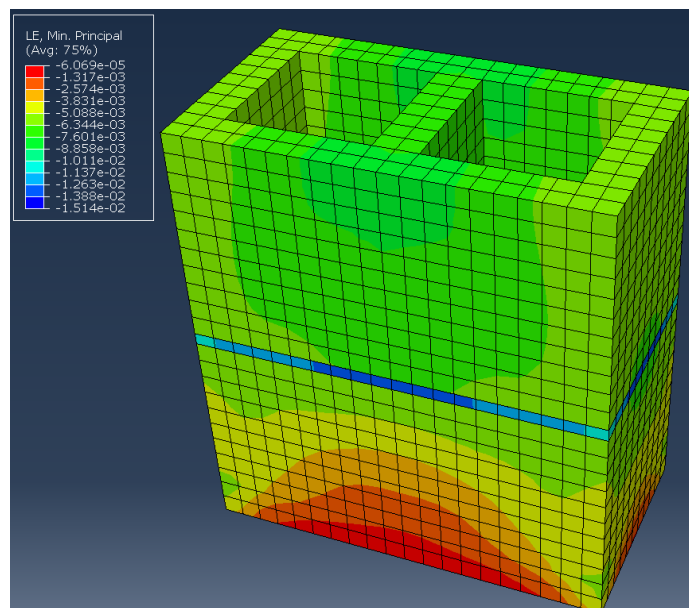
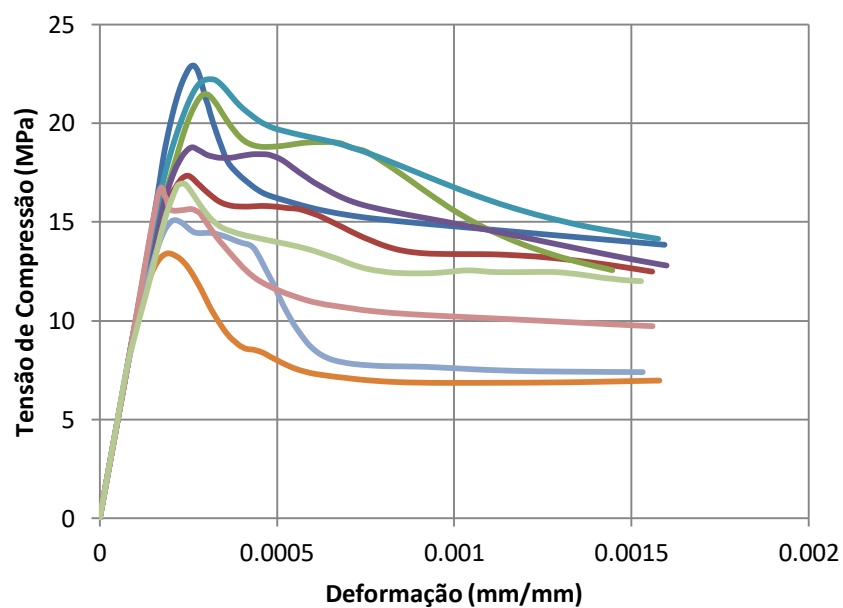


Figura 128 - Distribuição de Deformação**Gráfico 34 - Tensão vs Deformação – Prismas 2 Blocos sem Graute**

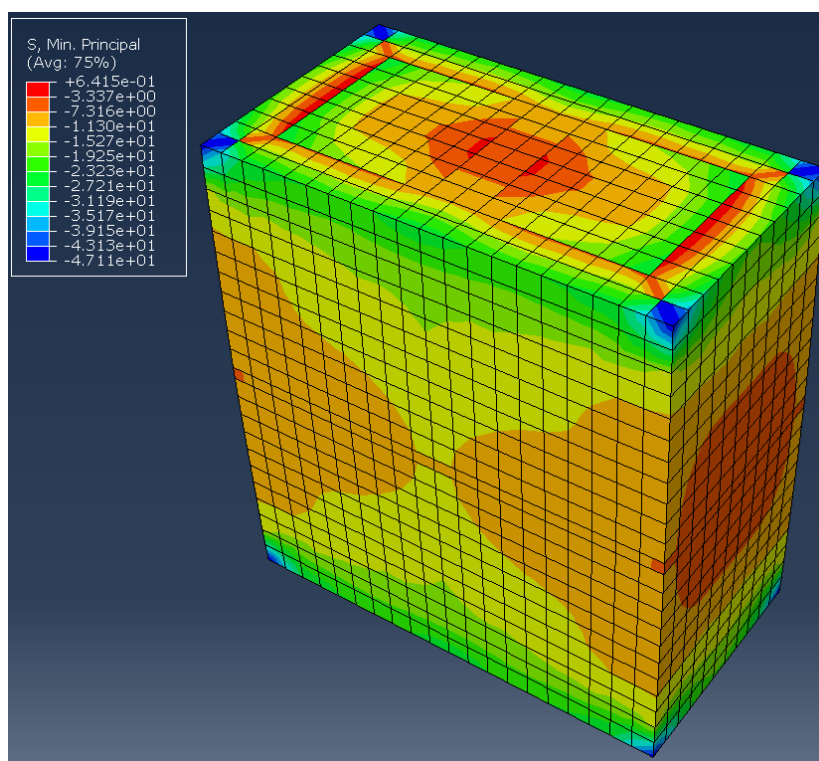
Numérico 1 Numérico 2 Numérico 3
 Numérico 5 Numérico 4 Numérico 6
 Numérico 7 Numérico 8 Numérico 9

Tabela 98 - Eficiência Prisma – Bloco

fb		Numérico 1	Numérico 2	Numérico 3	Numérico 4	Numérico 5
19,43	fp	22,91	17,34	21,47	22,22	18,77
	fp/fb	1,17	0,89	1,10	1,14	0,96
		Numérico 5	Numérico 6	Numérico 7	Numérico 8	Numérico 9
	fp	18,77	13,41	15,09	16,74	16,88
	fp/fb	0,96	0,69	0,77	0,86	0,86

8.4.6.2 Prisma de 2 Blocos – Grauteado

De maneira análoga ao item 8.4.6.1, é apresentado nas figuras 129 e 130, respectivamente, distribuição de tensão e deformação. O gráfico 35, apresenta as curvas tensão vs deformação.

Figura 129 - Distribuição de Tensão

Ao analisar a distribuição de tensão do modelo numérico grauteado, é possível notar a simetria das tensões bem como da deformação. Não obstante, os pontos onde se percebe as maiores tensões e por consequência as maiores deformações ocorrem nas regiões de interface entre bloco e argamassa e também bloco e graute.

Figura 130 - Distribuição de Deformação

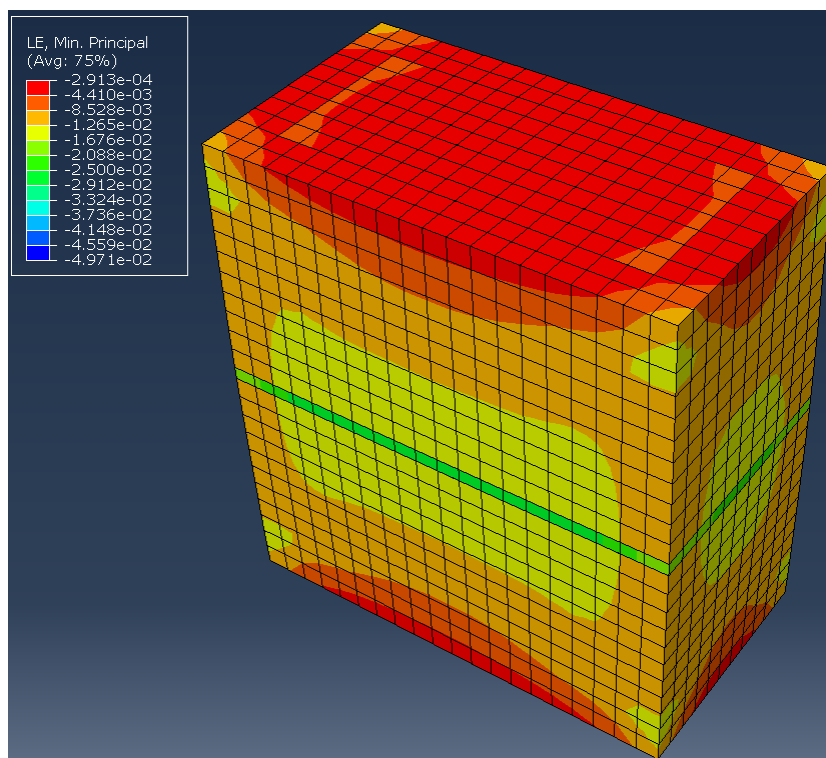
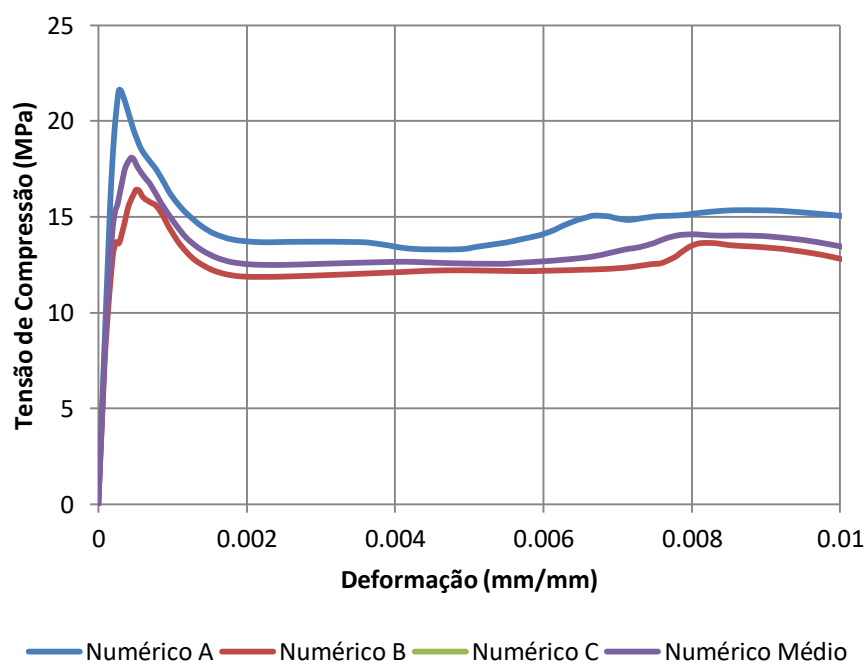


Gráfico 35 – Tensão vs Deformação – Prismas de Dois Blocos sem Graute



8.4.6.3 Prisma de 3 Blocos – Oco

Prosseguindo com a apresentação dos resultados, nesse item são explicitados as distribuição de tensão, figura 131, distribuição de deformação, figura 132. Além disso, o gráfico 36, apresenta as curvas tensão vs deformação dos modelo numéricos.

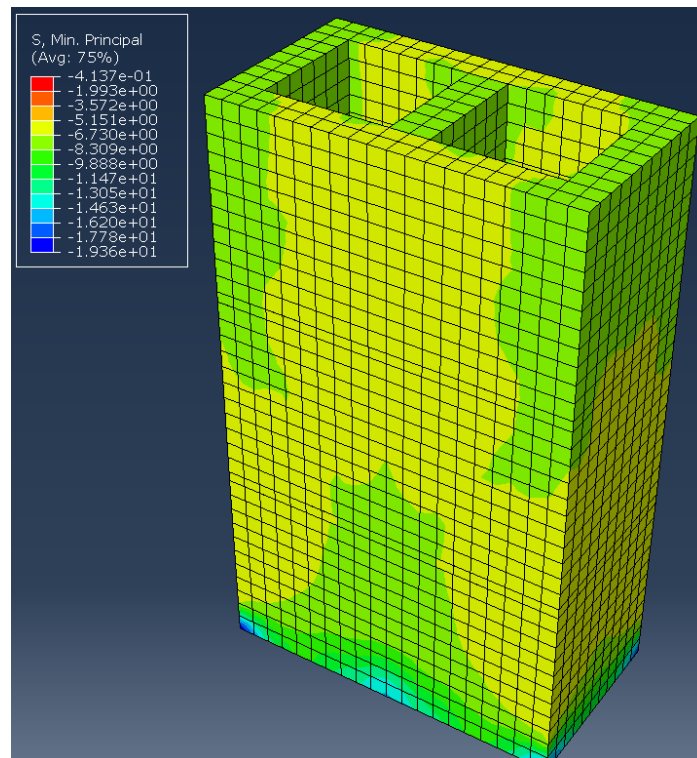
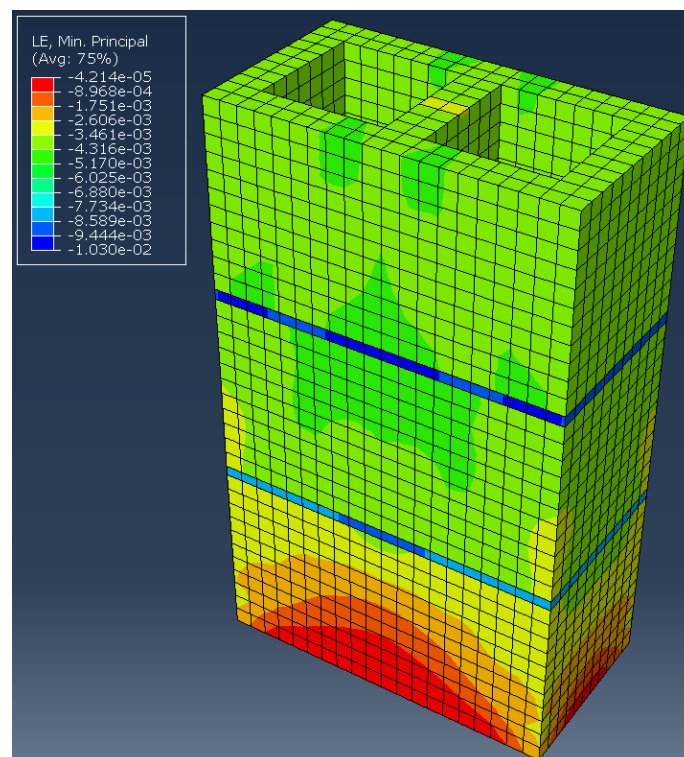
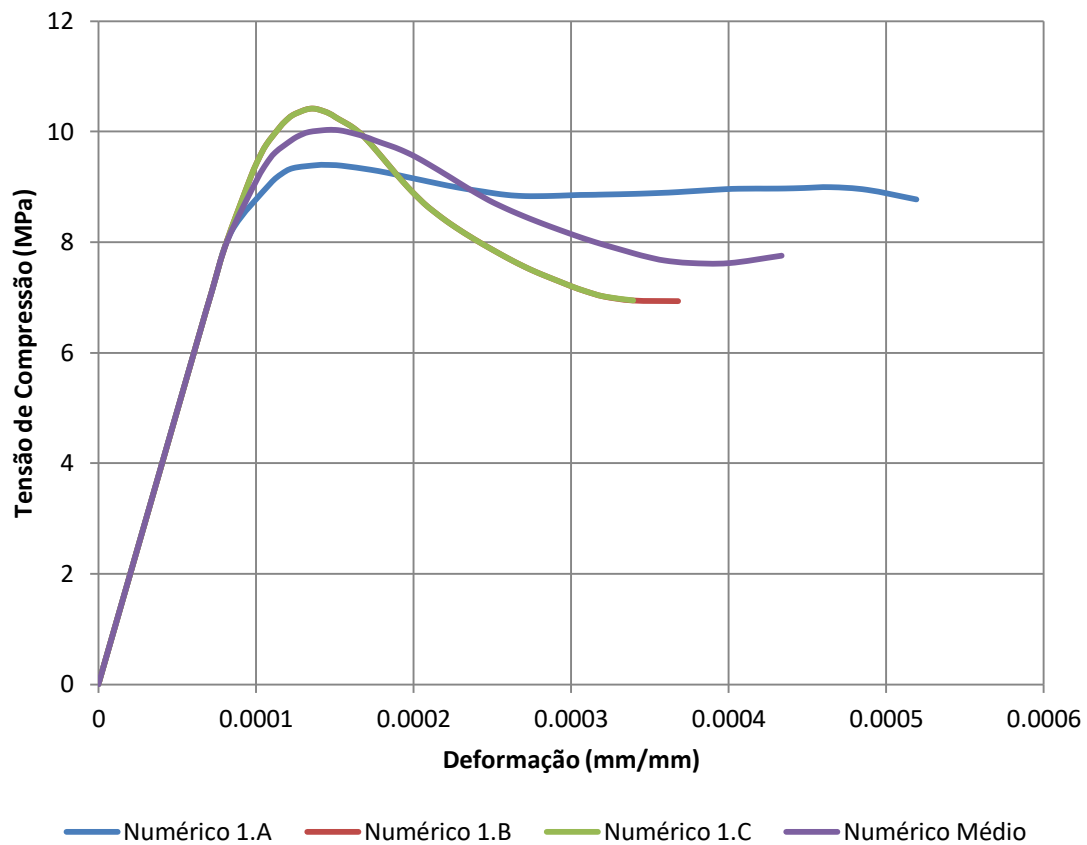
Figura 131 - Distribuição de Tensão**Figura 132 - Distribuição de Deformação**

Gráfico 36 – Tensão vs Deformação – Prismas de Três Blocos – Sem Graute

8.4.6.4 Prisma de 3 Blocos - Grauteado

Para efeito de validação do modelo numérico é considerado o comportamento da curva tensão vs deformação, gráfico 37, do modelo numérico é semelhante à curva experimental bem como o valor da tensão máxima alcançada e a sua respectiva deformação, como pode ser analisado na tabela 96. A distribuição de tensão bem como da deformação são apresentadas na figura 132 e 133, respectivamente.

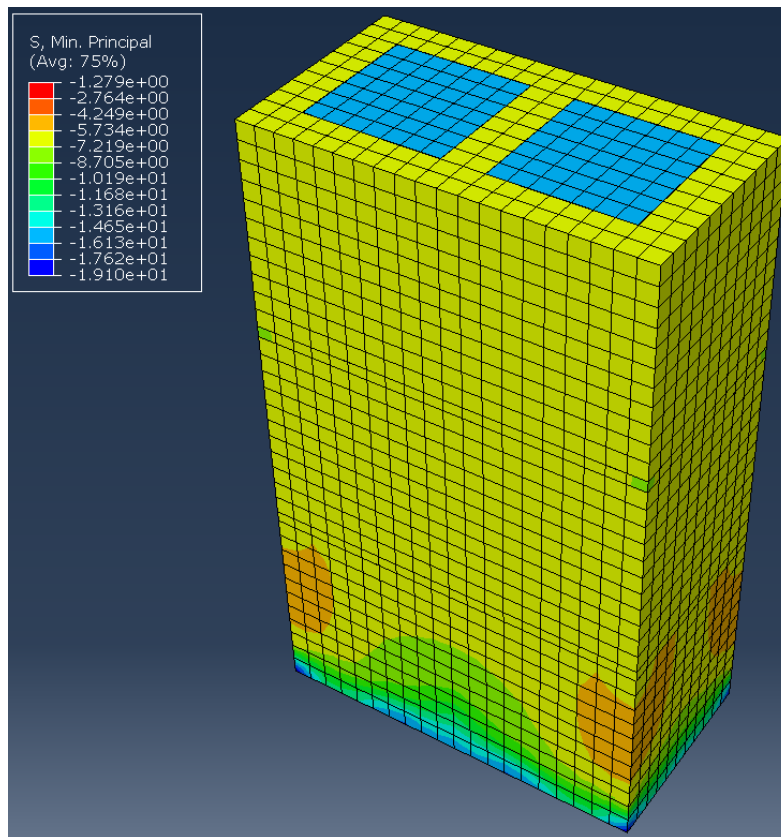
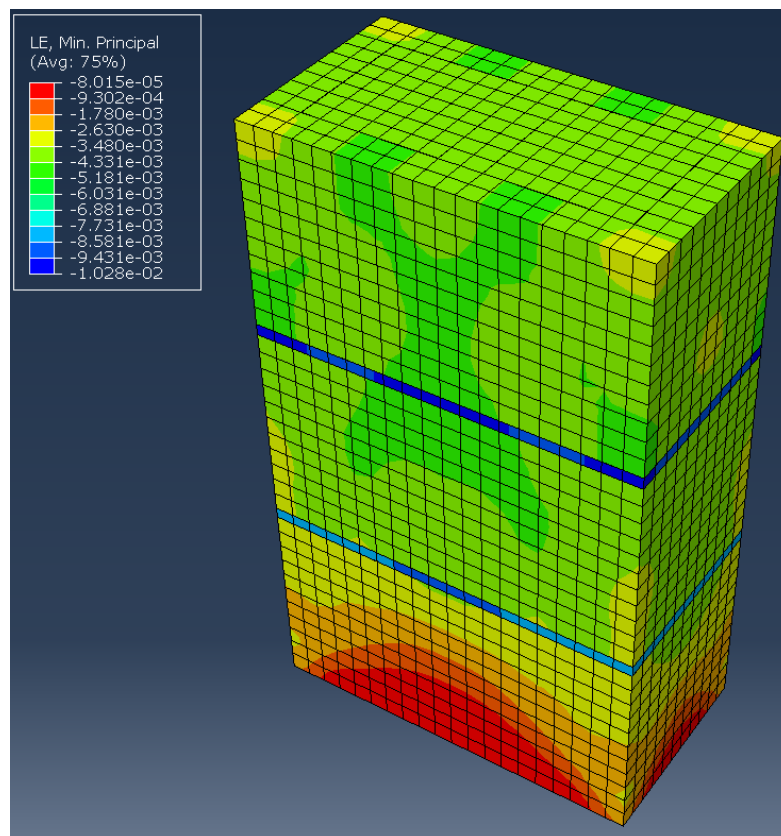
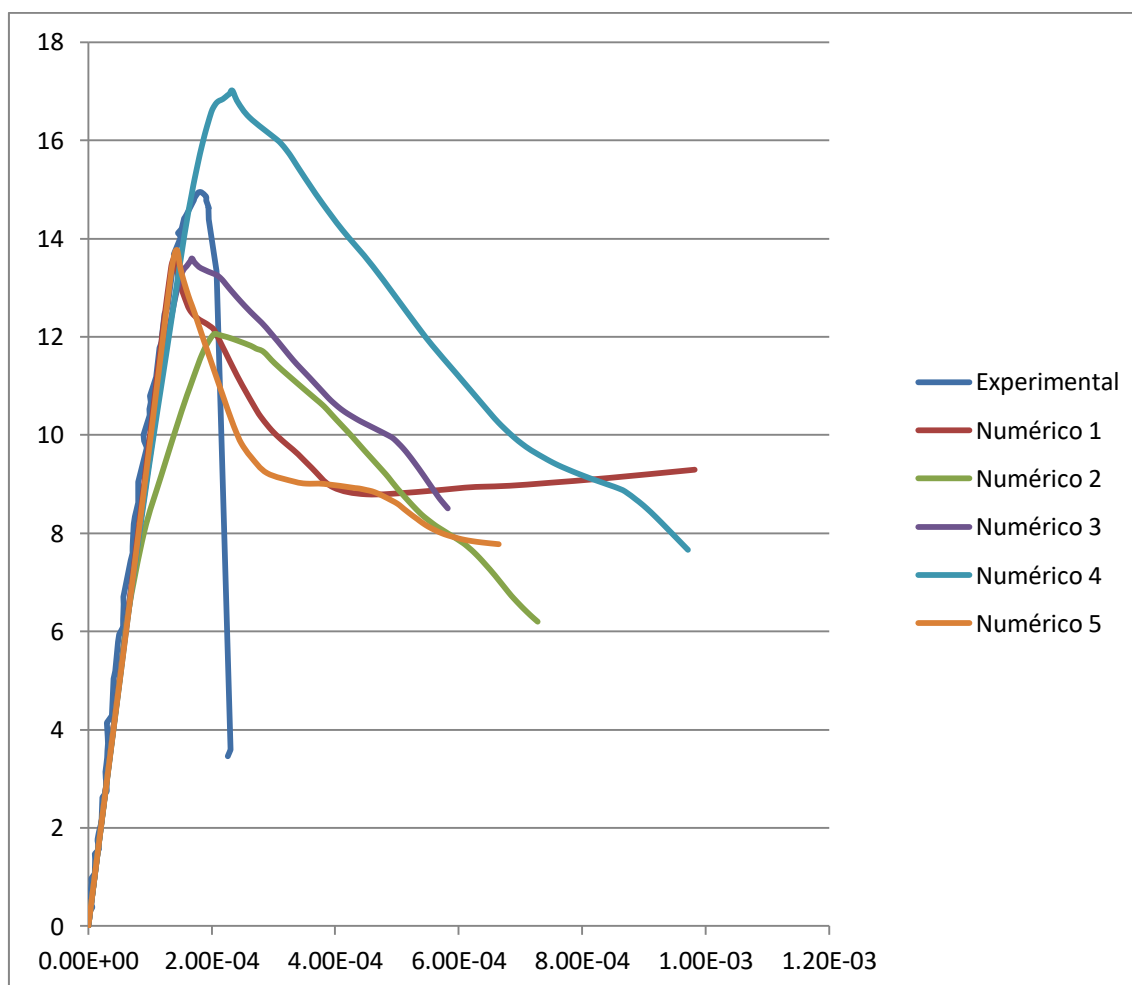
Figura 133 - Distribuição de Tensão**Figura 134 - Distribuição de Deformação**

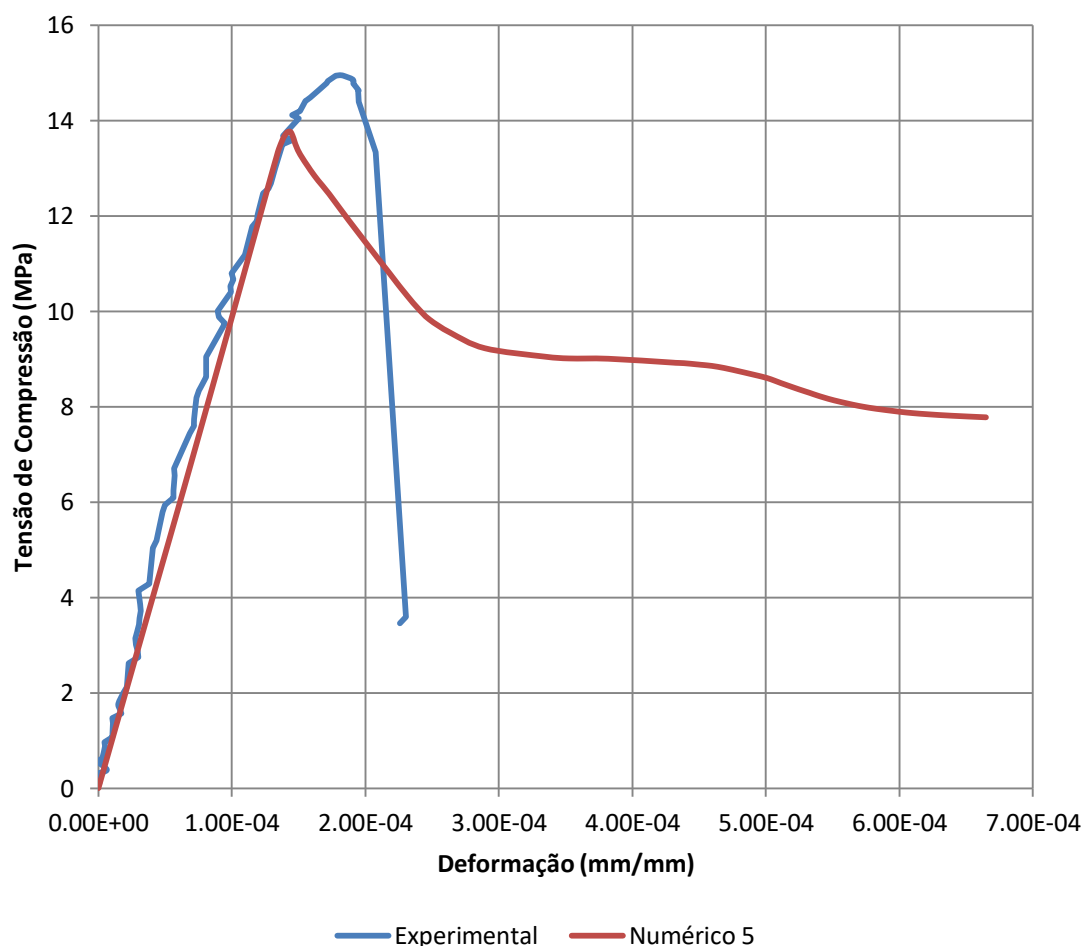
Gráfico 37 - Comparativo - Tensão vs Deformação - Prismas de Três Blocos Grauteados - Modelo Numérico e Experimental



Analisando o gráfico 37, é possível perceber que os elementos caracterizados anteriormente, bloco, argamassa e graute, foram representados de maneira coesa, uma vez que ao analisar as curvas de tensão vs deformação dos modelos numéricos são muito semelhantes ao modelo experimental. Apesar da semelhança entre as curvas é possível notar que a curva do modelo numérico 5 apresenta um comportamento muito semelhante ao modelo experimental mesmo a deformação apresentando um erro de aproximadamente 20%, conforme é possível observar na tabela 99. O gráfico 38 apresenta a comparação entre o modelo numérico 5 e modelo experimental.

Tabela 99 - Comparativo de Tensões e Deformações - Modelos Numérico e Experimental

	Experimental	Numérico 1	Numérico 2	Numérico 3	Numérico 4	Numérico 5
Tensão	14,95	13,64	12,06	13,59	17,01	13,76
Erro	0	8,75	19,32	9,06	13,80	7,90
Deformação	1,81E-04	1,40E-04	2,05E-04	1,68E-04	2,33E-04	1,43E-04
Erro	0	22,62	13,14	7,20	28,92	20,78



8.5 Bond Wrench – Modelo Numérico

Nesse item é apresentado o procedimento de criação do modelo numérico que representará o ensaio de Bond Wrench. Esta etapa será dividida da seguinte maneira:

- Dados de Entrada do Modelo
- Geometria do Modelo
- Dados de Interface
- Estudo das Malhas
- Restrições do Modelo

f) Resultados

8.5.1 Dados de Entrada de do Modelo

Para a criação do modelo foi considerado os dados obtidos através do modelo numérico do bloco de concreto e também da argamassa. Os dados utilizados podem ser divididos em dados da fase elástica e inelástica (também chamada de fase plástica). Os parâmetros referentes a fase elástica tanto do bloco como da argamassa são apresentados na tabela 100 a seguir.

Tabela 100 - Dados de Entrada para Fase Elástica

<i>Bloco</i>	<i>E (MPa)</i>	98462
	<i>ν</i>	0,2
<i>Argamassa</i>	<i>E (MPa)</i>	970
	<i>ν</i>	0,2

Enquanto que para fase plástica foi utilizado o modelo CDP (Concrete Damaged Plasticity). Para a representação do comportamento plástico do material é necessário informar três informações, como explicado anteriormente nos modelos numéricos anteriores que são, os dados de plasticidade do concreto que são apresentados na tabela 101 e 102, para bloco e argamassa respectivamente.

Tabela 101 - Dados de Plasticidade do Bloco

<i>Ângulo de Dilatância</i>	<i>Excentricidade</i>	<i>f_{b0}/f_{c0}</i>	<i>K</i>	<i>Parâmetro de Viscosidade</i>
36	0,145	1,16	2/3	0,001

Tabela 102 - Dados de Plasticidade da Argamassa

<i>Ângulo de Dilatância</i>	<i>Excentricidade</i>	<i>f_{b0}/f_{c0}</i>	<i>K</i>	<i>Parâmetro de Viscosidade</i>
36	0,126	1,16	2/3	0,001

As outras informações para representação da plasticidade do modelo CDP é a curva de tensão vs deformação a compressão e tração do trecho inelástico do material que são os mesmos utilizados no modelos numéricos de prismas.

8.5.2 Geometria do Modelo

Quanto a geometria do modelo foi obtido um valor médio para cada dimensão, por meio da medida de 10 blocos, e com base nessa medição se alcançou os seguintes valores que estão apresentados na tabela X a seguir.

Tabela 103 - Dimensões dos Blocos Inteiros de Concreto, Pasquantonio

Largura (y) mm	Comprimento (x) - mm	Altura(z) - mm	Paredes Externas - mm	Septos - mm
90	168	90	18	18

A fim de viabilizar o lançamento do bloco, e também da argamassa, o bloco foi lançado no abaquos por meio de coordenadas considerando o centro geométrico do bloco como a origem, conforme figura X a seguir. Vale destacar que a argamassa foi considerada em toda a face do bloco, portanto as dimensões em planta da argamassa são as mesmas do bloco, o único valor que foi alterado foi a espessura(que equivale a altura do bloco) de 5mm.

8.5.3 Dados de Interface

Para a representação de interface entre o bloco e a argamassa foi criada uma propriedade de interface que consiste de três grandes parâmetros que são:

- a) *Tangential Behavior* (comportamento tangencial ou cisalhante);
- b) *Normal Behavior* (comportamento normal ou perpendicular);
- c) *Cohesive Behavior* (comportamento coesivo);

Quanto ao comportamento tangencial e normal da interface foi utilizado os mesmos dados aplicados na modelagem numérica dos prismas. Já o cohesive behavior, ou comportamento coesivo, foi considerado para que fosse possível a partir desse ensaio a calibração dos parâmetros que apresentam uma maior influência na interface entre os dois materiais. Seguindo a mesma lógica aplicada ao comportamento tangencial, onde se utilizou um valor máximo para o coeficiente de atrito a fim de que esse comportamento não influenciasse na análise, foi considerado os valores de rigidez ao cisalhamento, nas duas direções (t e s) como um valor que impossibilitaria a deslizamento dos materiais nessa direção considerando a hipótese de ruptura a partir dos ensaios realizados. Para o cálculo da rigidez normal foi considerada a equação proposta por Lourenço et al (2005) que relaciona os módulos de elasticidade do bloco e da argamassa. Baseado na equação o valor da rigidez normal da interface 196MPa/mm e para rigidez ao cisalhamento tanto na direção paralela ao plano de cisalhamento quanto perpendicular foi considerado o valor de 10000MPa/mm.

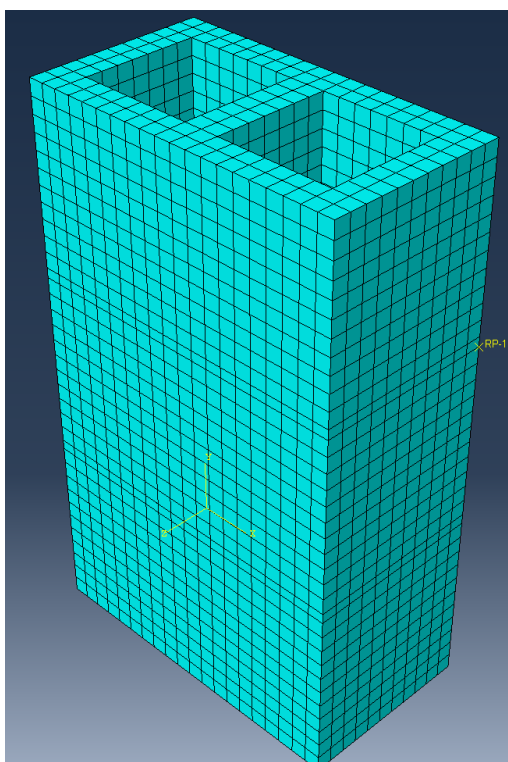
Não obstante a análise, foi considerado para a representação mais próxima ao modelo experimental que somente haveria contato entre os nós no início do modelo e isso é inserido selecionando na propriedade de *cohesive behavior* a opção *only slave nodes initially in contact*.

8.5.4 Estudo das Malhas

Por se tratar de um modelo com mais de um componente, ou seja, na composição do corpo de prova há três blocos e duas fiadas de argamassa, se optou por uma malha que fosse menos refinada em comparação com a que foi utilizada no bloco e na argamassa.

Com o intuito de facilitar o ajuste de malha foi considerada a mesma dimensão da malha tanto para bloco como para argamassa que foi de 8,5mm. A figura 135 a seguir apresenta a malha de cada um dos componentes.

Figura 135 - Prisma de 3 Blocos para Ensaio de Bond Wrench



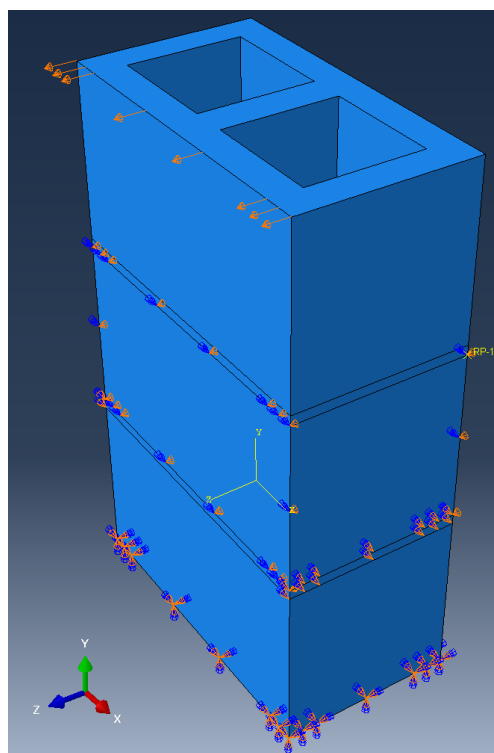
Quanto ao elemento utilizado para a modelagem foi mantido o mesmo elemento que foi utilizado nas demais modelagens que foi o C3D8R, assim como os conceitos referentes ao comportamento coesivo bem como da interface, no item 11.2 do capítulo 11 explica a razão pela qual se optou pela utilização desse elemento finito.

8.5.5 Condições de Vínculo do Modelo

As vinculações aplicadas no modelo tinham como objetivo a representação da chave que foi utilizada no ensaio, ou seja, a vinculação foi criada de maneira que apenas o bloco do topo tivesse liberdade para transladar bem como rotacionar. Para se alcançar tal objetivo foi considerada a seguinte vinculação:

- Na base do prisma foram restringidos todos os movimentos de translação bem como de rotação, conforme apresentado na figura 136;
- As faces paralelas ao eixo X, conforme figura 136, do bloco intermediário do prisma foi colocado restrição de translação no eixo Z e rotação no eixo X;
- Quanto à argamassa da primeira fiada foi restringido o deslocamento e rotação no eixo X, conforme a figura 136. A razão pela qual se utilizou essa restrição é porque nos modelos prévios a argamassa deslocava no eixo X.
- Foi aplicado um deslocamento de 0,4mm na direção Z no topo do prisma, conforme figura 136.

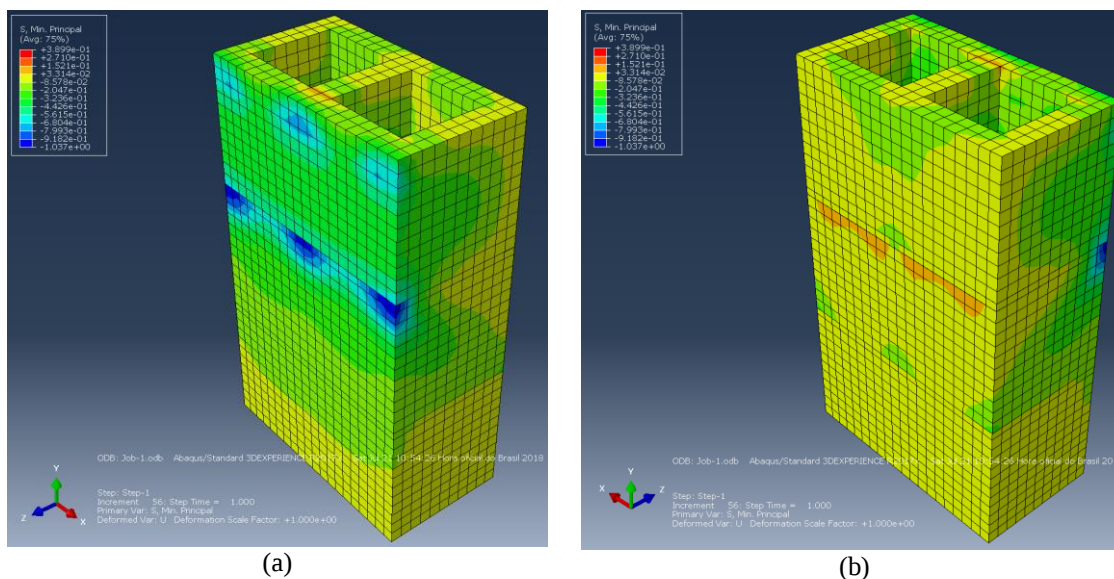
Figura 136 - Condições de Vínculo do Modelo



8.5.6 Resultados

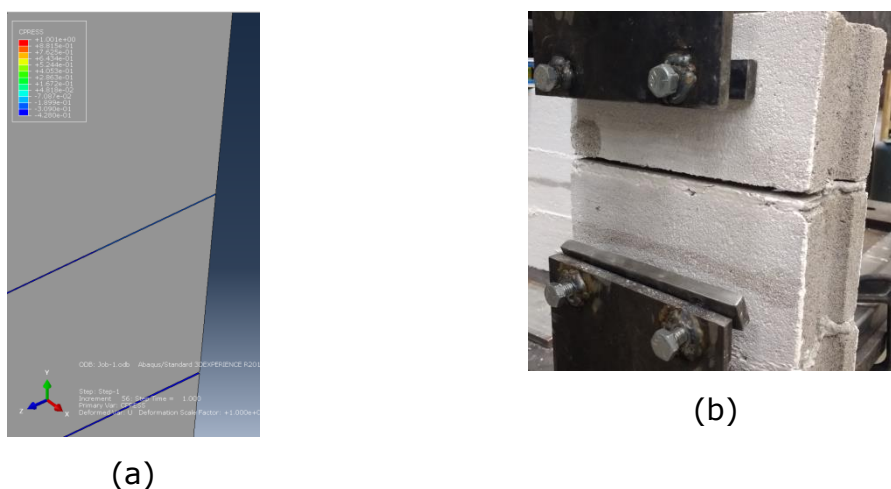
Com base nos parâmetros anteriormente apresentados foi possível obter uma representação razoável do ensaio de Bond Wrench. A razão pela qual se chega a essa conclusão é devido ao comportamento do modelo ser semelhante ao que foi alcançado no ensaio físico. A figura 137 apresenta a distribuição de tensão que foi alcançado após o processamento.

Figura 137 - Distribuição de Tensão



Além disso, foi possível notar que, assim como no ensaio físico, o modelo numérico apresentou uma perda de contato entre o bloco e a argamassa, comportamento semelhante ao que foi observado que durante os ensaios, conforme figura 138.

Figura 138 – Comparativo – Ruptura – Modelo Numérico (a) e Experimental (b)



Considerando a variabilidade do ensaio foi possível alcançar um valor de tensão de tração relativamente próximo ao modelo experimental. Uma vez que o valor de resistência à tração da argamassa foi de 0.0853MPa com um coeficiente de variação igual a 50% enquanto que o valor de resistência à tração do modelo numérico foi de 0.075MPa e em comparação com o valor experimental apresenta um erro de aproximadamente 13%.

No entanto, para melhor representação do ensaio seria necessário uma instrumentação que viabilizasse medir o deslocamento no decorrer do ensaio. A partir do deslocamento seria possível uma análise mais detalhada do modelo numérico, uma vez que seria possível avaliar a rigidez do modelo experimental bem como do modelo numérico. Além disso, seria possível uma representação do comportamento do ensaio pós pico.

8.6 Modelos Numéricos - Ensaio do Cisalhamento da Junta Horizontal

Prosseguindo na criação de modelos numéricos é discutido e apresentado o procedimento para validação do ensaio de cisalhamento da junta horizontal. O ensaio de cisalhamento da junta horizontal foi realizado de acordo com a norma europeia EN1052-3 e basicamente é executado construindo-se um prisma com três blocos e aplicou uma carga de pré – compressão perpendicular ao topo do prisma, conforme detalhado no capítulo 3 deste trabalho. Na fase experimental, foram construídos 29 corpos que foram divididos nos três níveis de pré – compressão (0,2MPa, 0,6MPa e 1,0MPa).

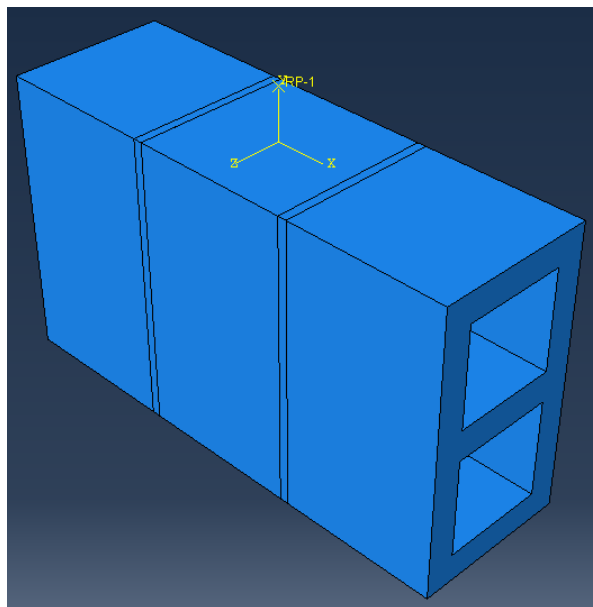
Com base nesse ensaio, o objetivo é encontrar parâmetros para representação da interface entre bloco – argamassa. De acordo com o Abaqus e a literatura encontrada e já apresentada neste trabalho sobre caracterização da interface é necessário indicar quatro opções de propriedade de contato que são os seguintes:

- a) Comportamento Normal
- b) Comportamento Tangencial
- c) Comportamento Coesivo
- d) Dano

8.6.1 Criação do Modelo

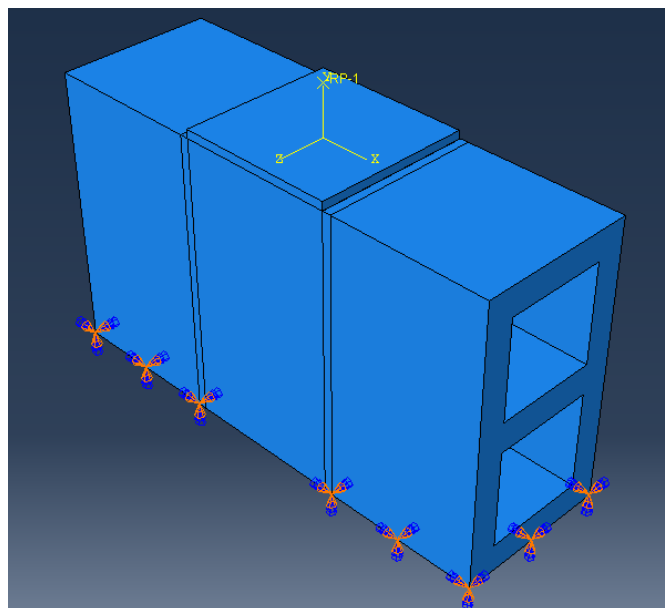
A geometria do bloco foi a mesma considerada nos modelos anteriores e a espessura do da argamassa foi de 5mm. A figura 139 apresenta a geometria do modelo.

Figura 139 - Geometria do Modelo - Ensaio de Cisalhamento da Junta Horizontal



Para aplicação do deslocamento foi adicionado ao modelo uma placa para aplicação uniforme do deslocamento sobre o bloco central do prisma. A figura 140 apresenta a chapa de aplicação do deslocamento.

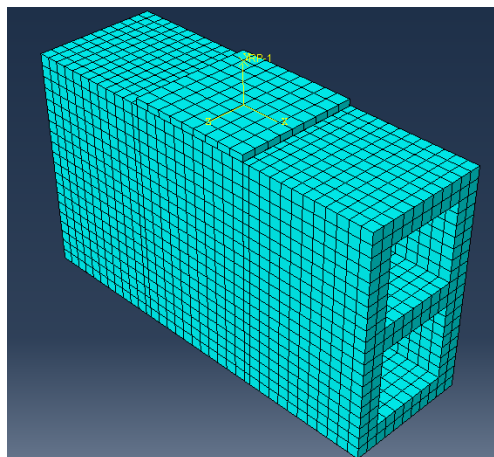
Figura 140 - Modelo com Chapa Rígida de Distribuição de Deslocamento



Além disso, na figura 140 são apresentadas também as condições de contorno que foram consideradas no modelo. É possível notar que foi considerada a restrição em todas as direções tanto translação quanto rotação.

Quanto à malha utilizada foi a mesma dos demais modelos até aqui desenvolvidos que foi o elemento C3D8R, inclusive para a chapa de aplicação, a figura 141 apresenta o modelo com a malha.

Figura 141 - Modelo com a Malha



A interação entre a chapa que foi aplicado o deslocamento com o corpo de prova foi realizado uma restrição, que de acordo com o Abaqus, é denominado como *tie*. A partir dessa restrição imposta qualquer movimentação que for imposta a chapa será aplicado na face superior do bloco intermediário. Além disso, para viabilizar a construção do gráfico (tensão de cisalhamento vs deformação) foi acoplado à chapa um ponto externo onde foi o aplicado o deslocamento, a figura 142 destaca esse ponto de aplicação do deslocamento.

Figura 142 – Deslocamento – Direção e Ponto de Aplicação

Para a criação de interface entre bloco e argamassa foram consideradas quatro propriedades de contato que foram detalhadas no anexo A desta tese. Vale lembrar que as propriedades de contato utilizadas foram as seguintes: *normal behavior*, *tangential behavior*, *cohesive behavior* e *damage*. A tabela 104 apresenta as propriedades.

Tabela 104 - Propriedades de Contato

Comportamento Normal (Normal Behavior)	Comportamento Tangencial (Tangential Behavior)		Dano (Damage)		
Contato Rígido (Hard Contact)	Coefficiente de Atrito	Tensão de Cisalhamento Limite	tn	ts*	tt*
	0,61	0,37	0,0853	0,37	0,37

*os valores de ts e tt foram obtidos através da tensão de cisalhamento média de ruptura para cada nível de pré compressão.

Na tabela 100 não é apresentado os valores referentes a rigidez referente ao *cohesive behavior* porque esses valores foram utilizados para calibração dos modelos.

8.6.2 Calibração do Modelo – Pré Compressão 0,2MPa

De acordo com a literatura encontrada, os valores encontrados encontram na tabela 105 a seguir, é possível notar que o parâmetro de rigidez obtido por meio da equação proposta na literatura apresenta um valor próximo ao que foi relatado pelos mesmos.

Tabela 105 - Parâmetros de Rigidez

Autores	Kss (MPa/mm)	Knn (MPa/mm)
Vandoren et al (2013)	124	222
Nasiri e Liu (2017)	320	1011
Lourenço et al (1994)	99	222
Lizarraga e Perez-Gavilan (2017) - 1	103	153
Lizarraga e Perez-Gavilan (2017) - 2	85	143
Massart et al (2004)	191	351
Pasquantonio et al (2018)	117	196
Abdula et al(2017)	46	82
	62	110
Abdula et al (2017)	27	62

Por essa tabela, nota-se que os parâmetros de rigidez encontrado nesse trabalho são satisfatórios ao se comparar com a literatura. No entanto com desenvolvimento dos modelos se notou que o parâmetro de maior influência no comportamento de tensão por deformação do modelo era o parâmetro de rigidez.

A partir do estudo e análise que são apresentadas na tabela 101, se observou, como dito anteriormente, que o resultado foi satisfatório. Sendo

assim, iniciou a calibração do modelo dos parâmetros encontrados, $K_{nn}=196\text{Mpa/mm}$ e $K_{ss}=117\text{ Mpa/mm}$. Para obtenção desses dois valores foi utilizada uma equação proposta por Lourenço et al (2005) e utilizada por Abdula et al(2017) e Vandoren et al (2013).

$$K_{nn} = \frac{E_b * E_m}{h * (E_b - E_m)}$$

$$K_{ss} = \frac{G_b * G_m}{h * (G_b - G_m)}$$

Para utilização da equação para obtenção do parâmetro de rigidez normal, K_{nn} , é necessário saber o módulo de elasticidade do bloco, da argamassa, e também a espessura da argamassa. Já para o cálculo do parâmetro de rigidez tangencial, além das informações anteriormente citadas é necessário conhecer o coeficiente de Poisson dos materiais. A tabela 106 apresenta os valores que foram utilizados nos cálculos.

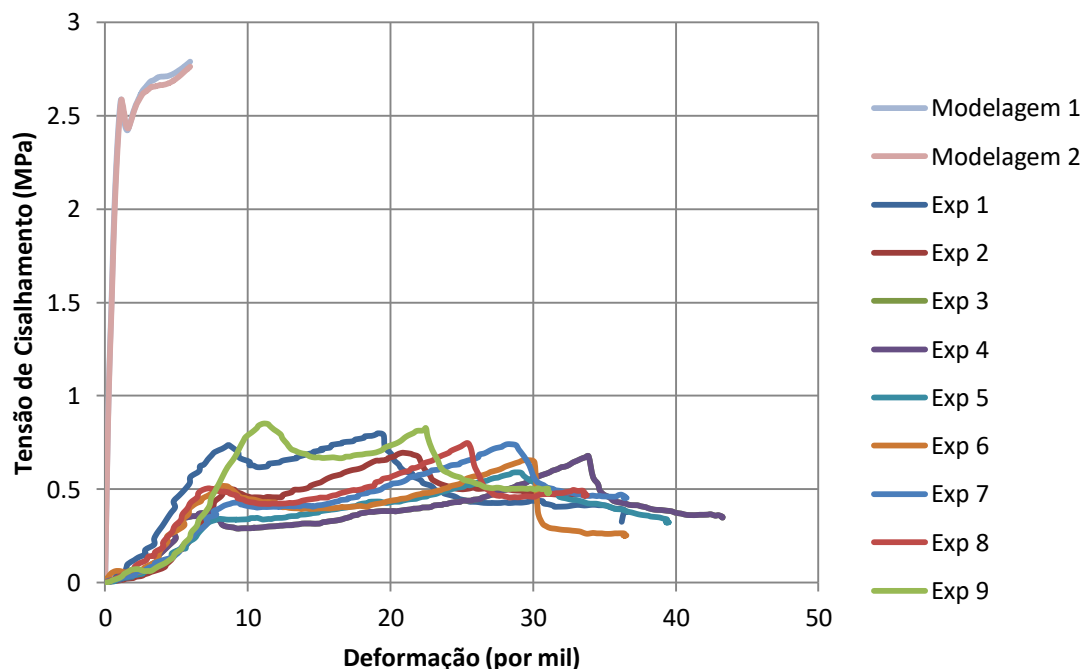
Tabela 106 - Informações para o Cálculo dos Parâmetros de Rigidez

Bloco	E(MPa)	96241
	ν	0,2
Argamassa	E (MPa)	970
	ν	0,2
Espessura	h(mm)	5

Considerando a aplicação de uma pré compressão de 0,2Mpa, mesma pré compressão utilizada nos ensaios, e uma tensão de cisalhamento média, que foi obtida a partir dos ensaios igual 0,516 Mpa (valor esse que é considerado para t_s e t_t) foi obtido o seguinte gráfico de tensão vs deformação do modelo.

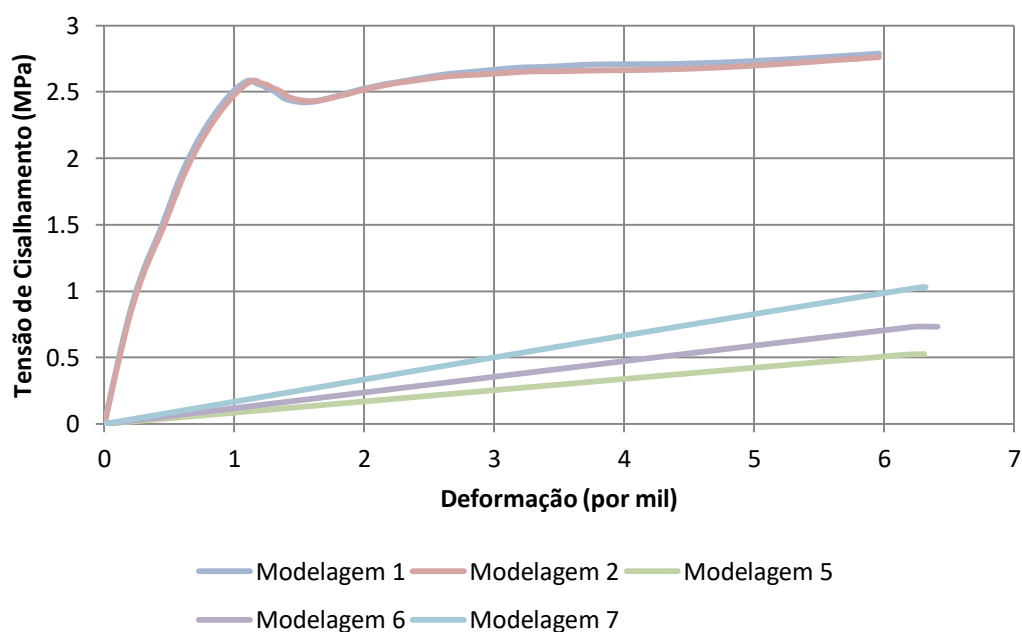
O gráfico 38 apresneta um comparativo entre o modelo numérico e as curvas de tensão de cisalhamento vs deformação dos modelos experimentais referentes. A diferença entre a modelagem 1 e 2 é devido a energia de fratura considerada nos dois modelos, onde na modelagem se utilizou o valor de 0,9Nmm e para o modelo 2 a energia foi de 1,8Nmm. No entanto os valores de tensão e deformação encontrados em ambos os modelos são muito discrepantes em comparação ao que observado no conjunto de ensaios referente a pré compressão de 0,2MPa.

Gráfico 38 – Comparação – Tensão de Cisalhamento vs Deformação – pré-compressão 0.2MPa



Sendo assim, foi realizado algumas tentativas de calibração reduzindo a rigidez e os gráficos de tensão vs deformação foram significativamente sendo alterados a cada redução da rigidez. O gráfico 39 a seguir apresenta essas alterações.

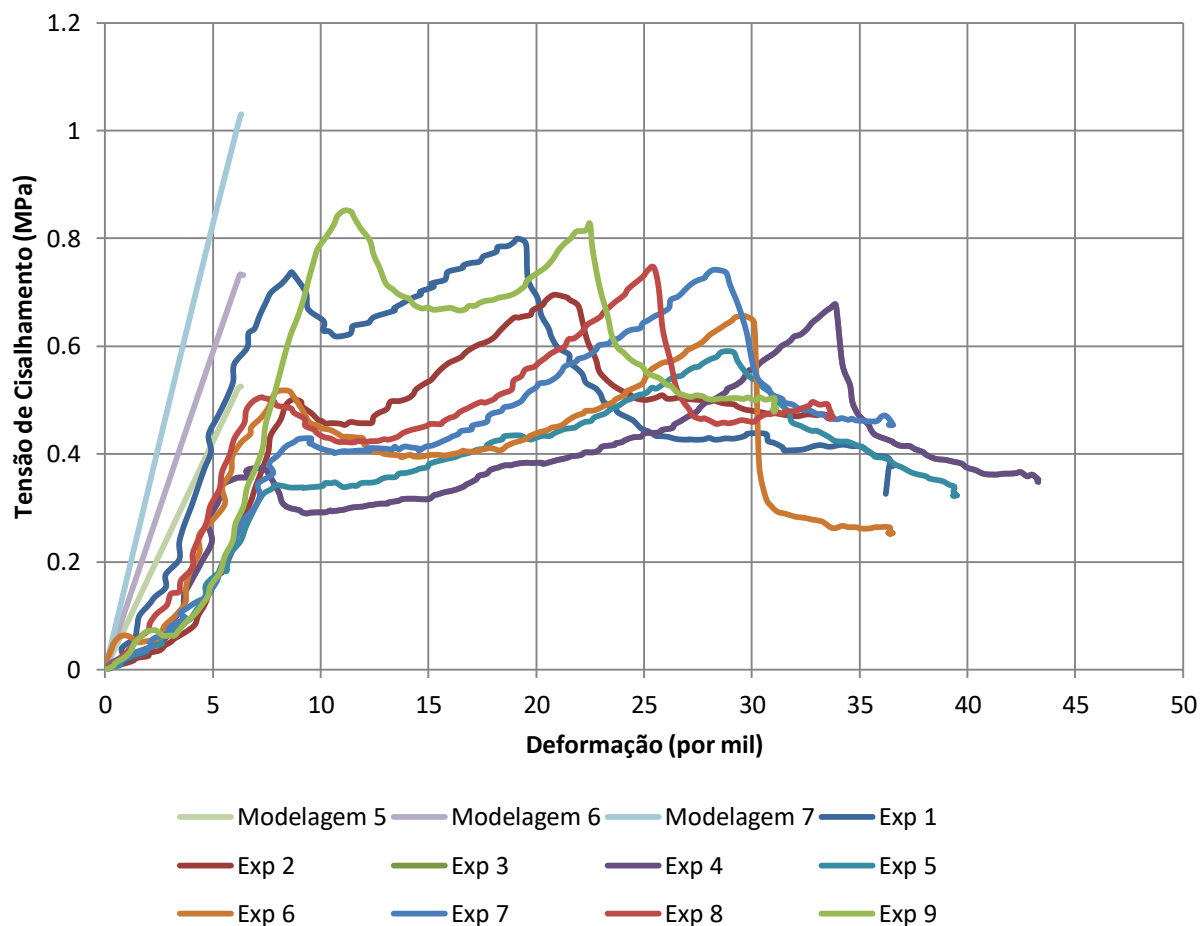
Gráfico 39 – Análise das Curvas Tensão x Deformação - Modelos Numéricos



Ao comparar as curvas de modelagem 5, 6 e 7 com o diagrama tensão vs deformação dos modelos experimentais é possível perceber que a

inclinação das curvas obtidas no modelo numérico é muito mais próxima do que foi encontrado nos modelos experimentais, conforme o gráfico 40 apresenta.

Gráfico 40 – Comparação entre Tensão de Cisalhamento x Deformação – Modelos Numéricos e Experimental – pré-compressão 0.2MPa



Dentre as curvas do modelo numérico a que apresentou uma aproximação melhor com os modelos numéricos foi a curva da modelagem número 5. Além do comportamento da curva ser semelhante aos modelos experimentais é possível notar ao comparar o valor da tensão de cisalhamento máxima e a respectiva deformação com os valores médios desse grupo de amostras, os valores apresentaram uma boa aproximação.

Gráfico 41 - Comparação entre Tensão de Cisalhamento x Deformação – Modelos Numéricos e Experimental – pré-compressão 0.2MPa – Ks= 1MPa/mm

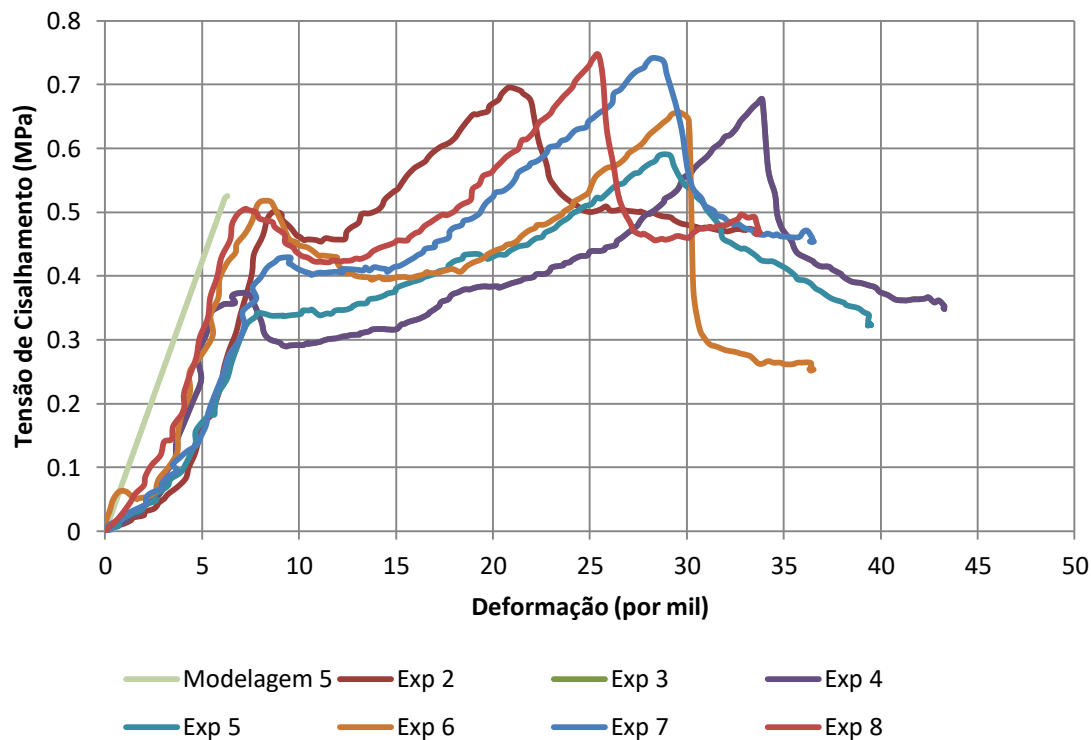


Tabela 107 - Análise Comparativa do Pico

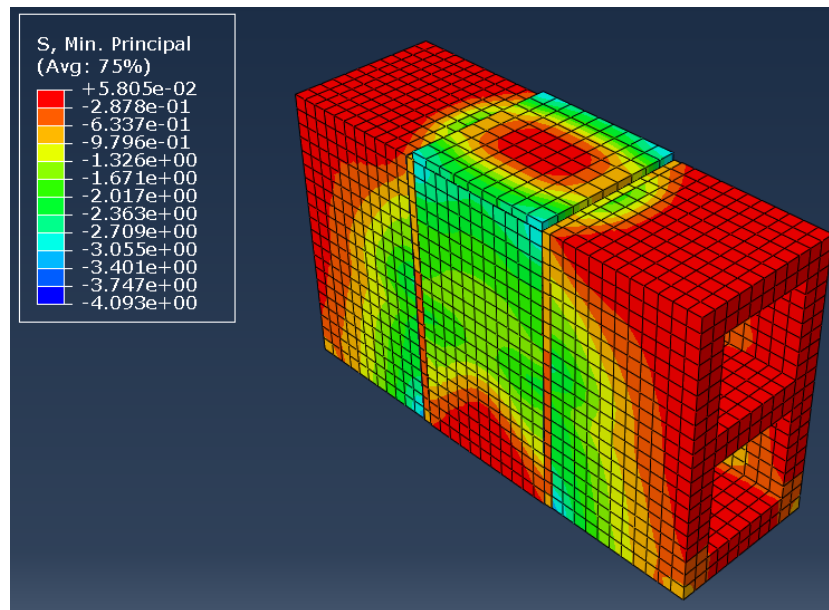
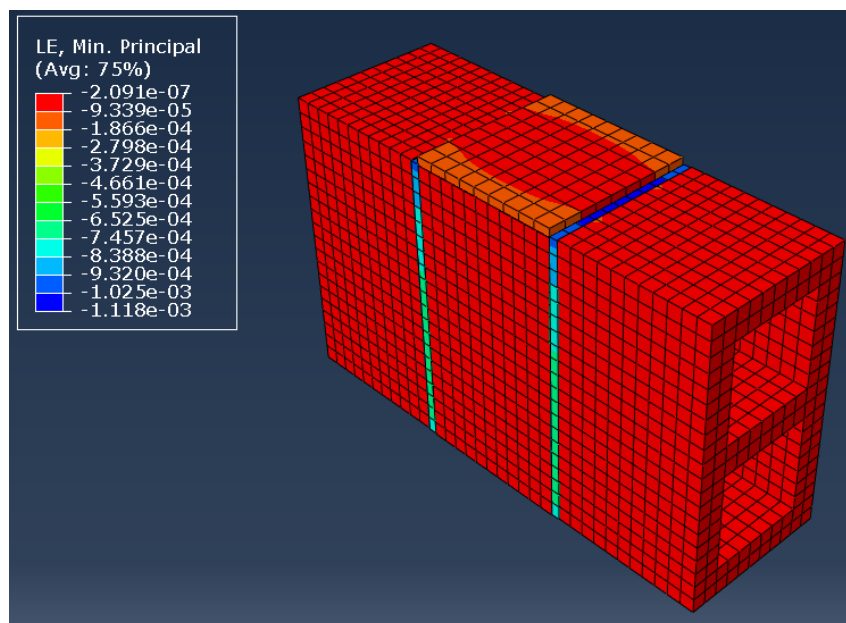
	Tensão de Cisalhamento	Deformação
Experimental Média	0,516	8,480
Numérico	0,525	6,310
Erro(%)	1,805	25,590

Os valores dos parâmetros de rigidez referente curva de modelagem número 5 são apresentados na tabela 107, juntamente com os valores referentes a representação do dano do modelo considerando uma pré compressão de 0,2MPa, conforme tabela 108.

Tabela 108 - Propriedades de Interface - Comportamento Coesivo e Dano

Comportamento Coesivo (Cohesive Behavior) Mpa/mm			Dano (Damage) MPa		
Knn	Kss	Ktt	tn	ts	tt
1,67	1	1	8,53E-02	5,16E-01	5,16E-01

Com base nessa análise é apresentado a seguir a distribuição de tensão da tensão principal em todos o modelo, figura 143, bem como a deformação em todo o modelo, figura 144.

Figura 143 - Distribuição de Tensão**Figura 144 - Distribuição de Deformação**

8.6.3 Calibração do Modelo – Pré Compressão 0,6MPa

Para calibração dos modelos experimentais que foi aplicado uma carga de pré compressão de 0,6MPa foram alteradas as seguintes informações para que o processamento do modelo:

- A pré compressão no modelo que era de 0,2MPa passou para 0,6MPa;
- Os parâmetros de dano tangencial, ou seja, t_s e t_t foram alterados de 0,516MPa para 0,699MPa;

- c) Além disso foi alterado a energia de fratura do modelo que era de 0,516 Nmm para 0,730Nmm.

As demais informações a respeito da propriedade de contato, em um primeiro momento de análise foi mantido constante, como por exemplo os parâmetros de rigidez, coeficiente de atrito e tensão de cisalhamento limite foram mantidos constantes.

A partir dessas informações foi obtida a seguinte curva de tensão vs deformação referente ao modelo numérico, gráfico 42. Além disso é apresentado uma comparação entre o resultado numérico e o valor médio experimental tanto da tensão quanto da deformação na tabela 109.

Gráfico 42 - Comparação entre Tensão de Cisalhamento x Deformação – Modelos Numéricos e Experimental – pré-compressão 0.6MPa

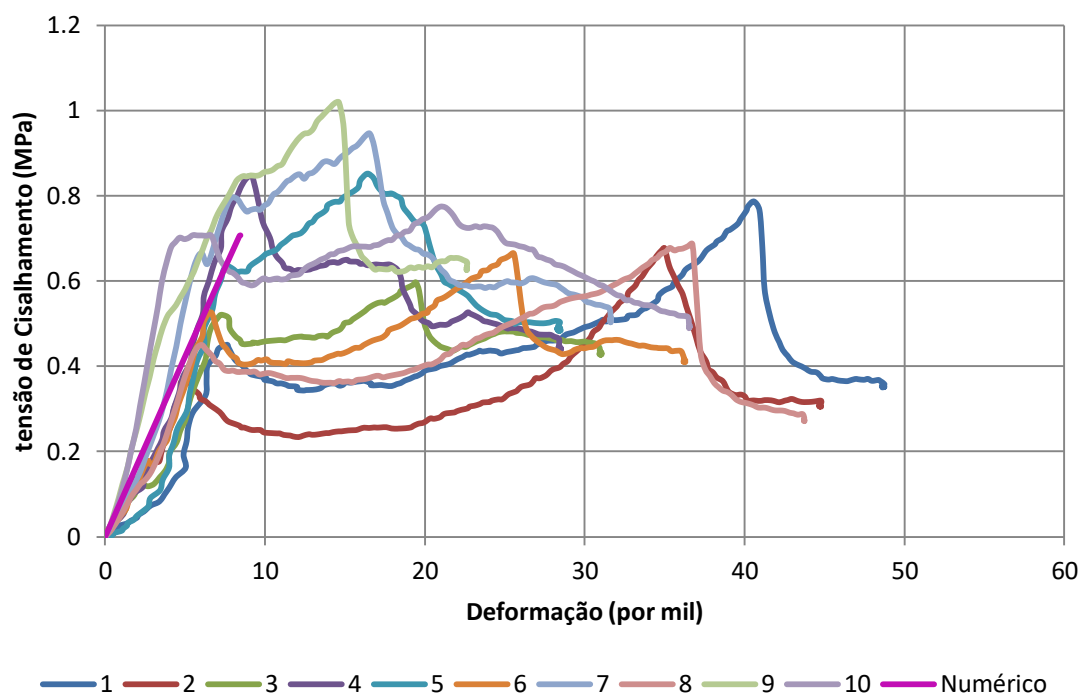


Tabela 109 - Análise Comparativa

	Tensão de Cisalhamento	Deformação
Experimental Média	0,699	12,461
Numérico	0,707	8,480
Erro(%)	1,144	31,949

As figuras a seguir apresentam mostram a distribuição de tensão em todo corpo de prova, figura 145, distribuição de deformação em todo o cor-

po de prova, figura 146 e por último é apresentando a distribuição de tensão de cisalhamento na interface entre bloco e argamassa, figura 147.

Figura 145 - Distribuição de Tensão

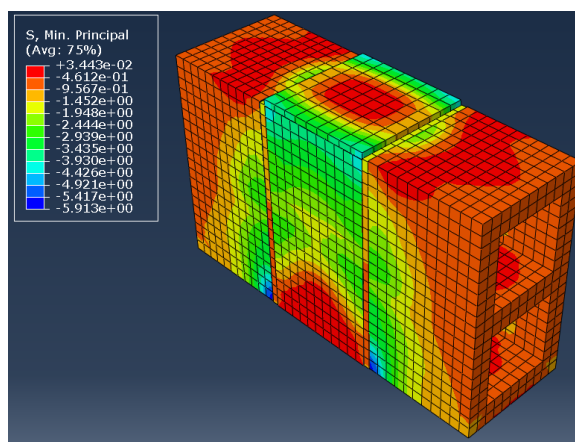


Figura 146 - Distribuição de Deformação

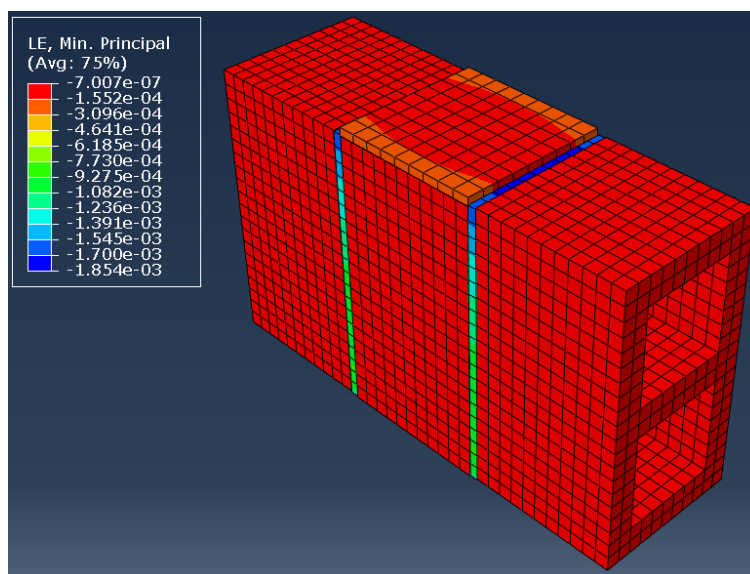
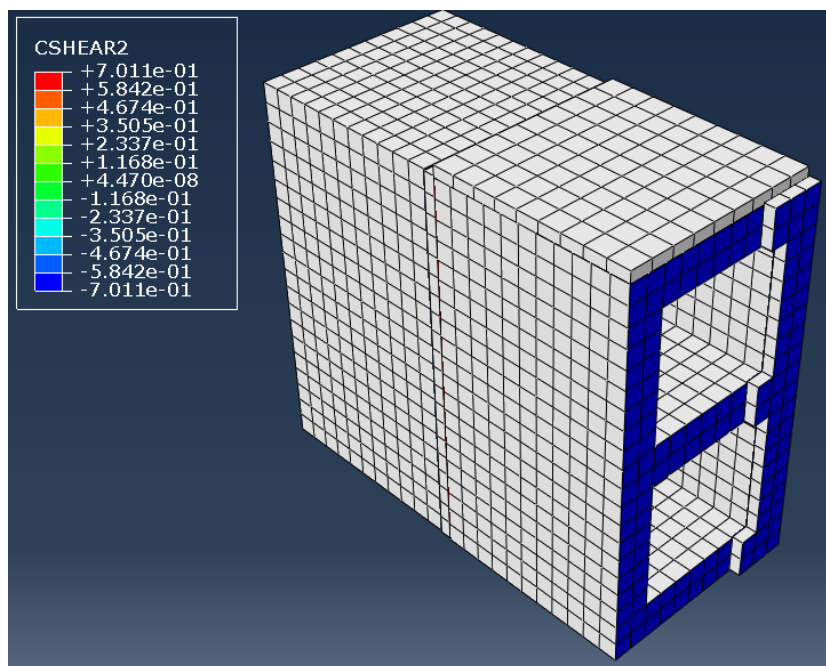


Figura 147 - Distribuição de Tensão de Cisalhamento na Interface



8.6.4 Calibração do Modelo – Pré Compressão 1,0MPa

Para calibração dos modelos experimentais que foi aplicado uma carga de pré compressão de 1,0MPa foram alteradas as seguintes informações para que o processamento do modelo:

- a) A pré compressão no modelo que era de 0,6MPa passou para 1,0MPa;
- b) Os parâmetros de dano tangencial, ou seja, t_s e t_t foram alterados de 0,699MPa para 1,009MPa; vale destacar que parâmetro de dano referente a direção normal foi mantido constante em 0,0853MPa;
- c) Além disso foi alterado a energia de fratura do modelo que era de 0,730 Nmm para 0,892Nmm.

As demais informações a respeito da propriedade de contato, em um primeiro momento de análise foi mantido constante, como por exemplo os parâmetros de rigidez, coeficiente de atrito e tensão de cisalhamento limite foram mantidos constantes.

Analogamente a situação de pré compressão de 0,6MPa, nessa nova condição imposta foi obtido um gráfico de tensão vs deformação do modelo que foi comparado com as curvas referentes ao modelo experimental. Seguindo a mesma estrutura utilizada para pré compressão de 0,6MPa é apresentado em seguida ao gráfico 43, e a tabela 110 com a análise comparati-

va dos resultados experimentais médios (tensão e deformação) com os resultados do modelo numérico.

Gráfico 43- Comparação entre Tensão de Cisalhamento x Deformação – Modelos Numéricos e Experimental – pré-compressão 1.0MPa

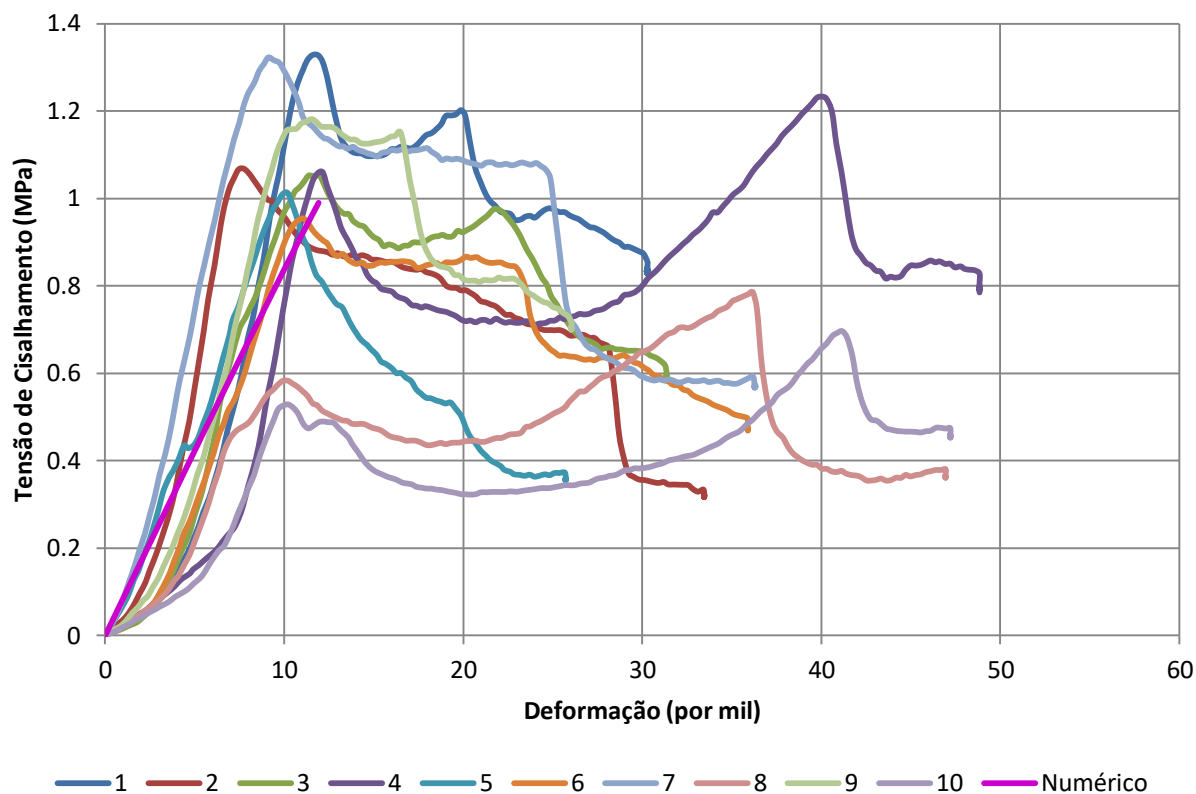


Tabela 110 - Análise Comparativa

	Tensão de Cisalhamento	Deformação
Experimental Média	1,009	10,546
Numérico	0,990	11,920
Erro(%)	1,931	13,023

As figuras a seguir apresentam mostram a distribuição de tensão em todo corpo de prova, figura 148, distribuição de deformação em todo o corpo de prova, figura 149 e por último é apresentando a distribuição de tensão de cisalhamento na interface entre bloco e argamassa, figura 150.

Figura 148 - Distribuição de Tensão

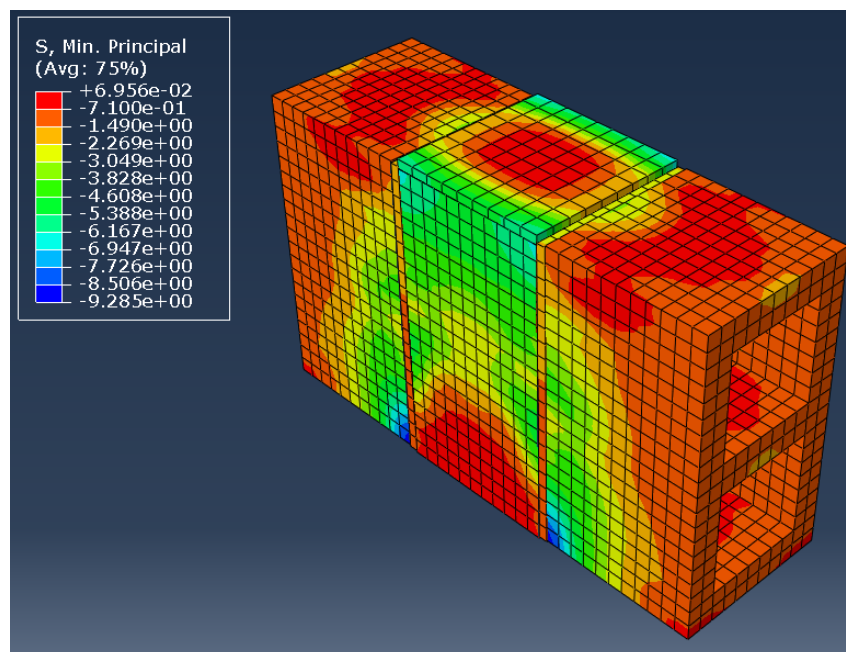


Figura 149 - Distribuição de Deformação

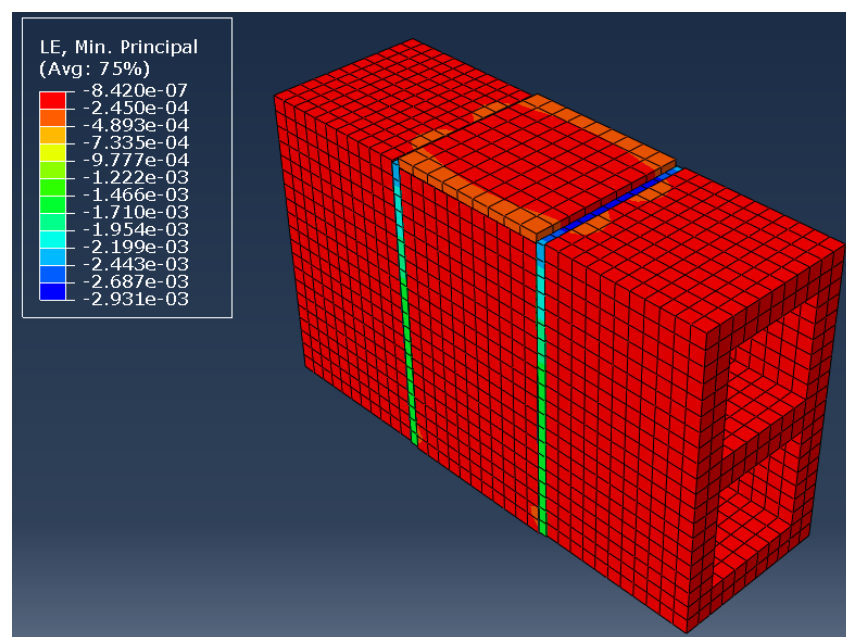
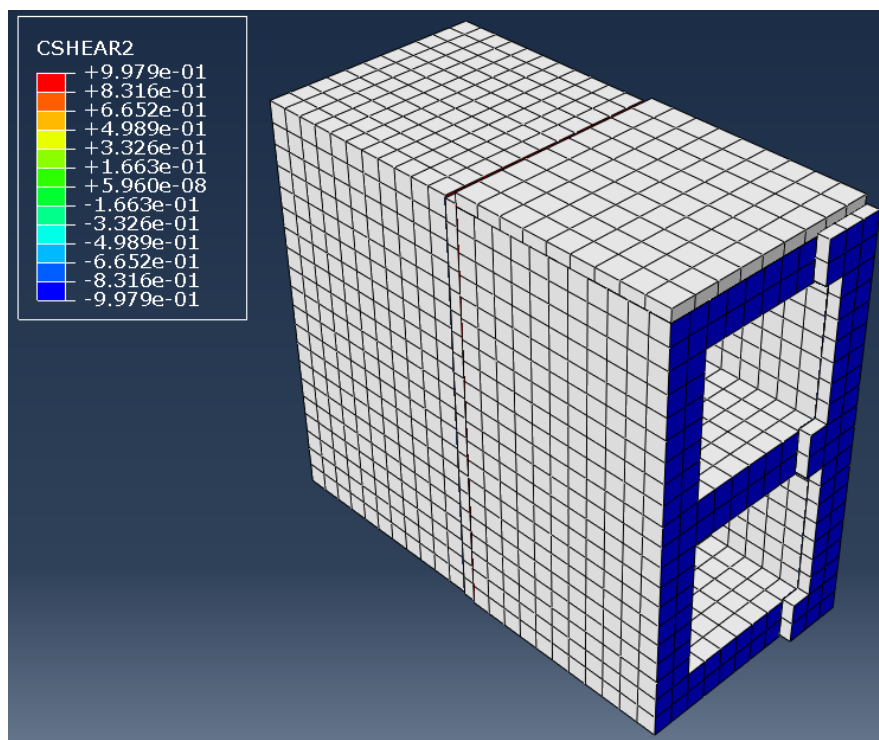


Figura 150 - Distribuição de Tensão de Cisalhamento



8.6.5 Análise da Equação de Tensão de Cisalhamento

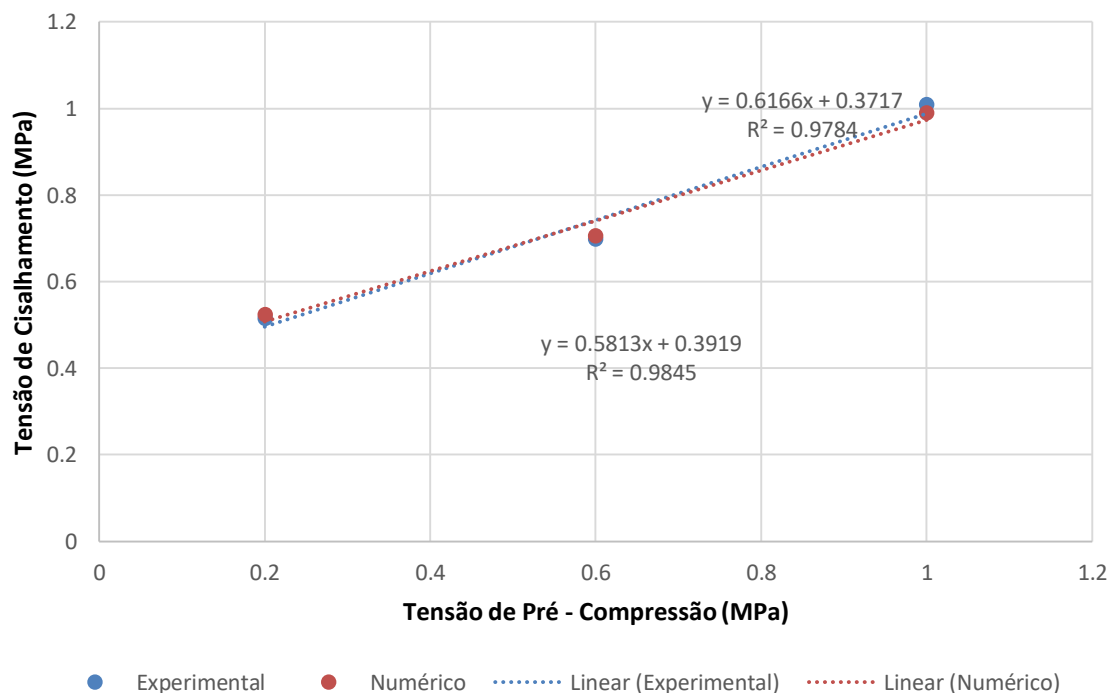
Neste tópico é apresentada uma breve análise comparativa a respeito do coeficiente de atrito e tensão de cisalhamento experimental e numérico. O procedimento para essa análise é aplicar o método apresentado pela norma EN1052-3 (2002) nos resultados numéricos encontrados nesse tópico. A tabela 111 a seguir apresenta os valores tensão de cisalhamento médio e as tensões de cisalhamento obtida nos modelos numéricos para cada nível de pré compressão considerada.

Tabela 111 - Resumo dos Resultados Experimentais e Numéricos

Pré Com- pressão (MPa)	Tensão de Cisalhamento Média (MPa)	Desvio Padrão	Tensão de Cisalhamento - Modelo Numérico
0,2	0,516	0,17	0,525
0,6	0,699	0,21	0,707
1	1,009	0,27	0,99

O gráfico 44 ilustra os resultados apresentado na tabela 112 e também uma linha de tendência das duas retas plotadas.

Gráfico 44 - tensão de Cisalhamento x tensão de pré-compressão - Experimental(Azul) e Numérico (Vermelho)



É possível notar que o coeficiente de atrito com base nos resultados numéricos é 0,5813 enquanto do modelo experimental é 0,6166. Já o valor da tensão de cisalhamento considerando pré compressão igual 0(zero) é igual 0,3919 MPa para os resultados numéricos e enquanto do resultado experimental é de 0,3717. A tabela 108 apresenta os dados aqui explicados bem como o erro percentual entre os valores.

Tabela 112 - Análise Comparativa entre os Parâmetros

	Coeficiente de Atrito	Tensão de Cisalhamento
Experimental	0,6166	0,3717
Numérico	0,5813	0,3919
Erro(%)	5,725	5,434

8.6.6 Calibração do Modelo – Considerando Tensão de Cisalhamento de Inicial no Comportamento do Dano

Outra maneira de realizar a calibração do modelo foi fixando os valores referente aos parâmetros de dano considerando como base a linha de tendência do gráfico de tensão de cisalhamento vs tensão de pré compressão e considerar dessa forma que o comportamento coesivo se inicia no ins-

tante em que se alcança tensão de cisalhamento inicial que para os ensaios realizados se alcançou um valor de 0,37 MPa.

E a partir desses dados, obter os parâmetros de rigidez que representem o comportamento mais próximo ao observado nos ensaios experimentais. Para tal realização se inicia calibração dos parâmetros de rigidez a partir do gráfico de tensão de cisalhamento vs deslizamento (deslocamento vertical relativo do bloco intermediário). Os gráficos 45 a 47 apresentam o comportamento para cada nível de pré-compressão e para cada nível de pré-compressão se alcançou os valores para os parâmetros de rigidez e estes valores são apresentados na tabela 113 a seguir. É importante destacar que como se trata de um ensaio de cisalhamento da junta horizontal os valores apresentados são referentes a rigidez da interface ao cisalhamento.

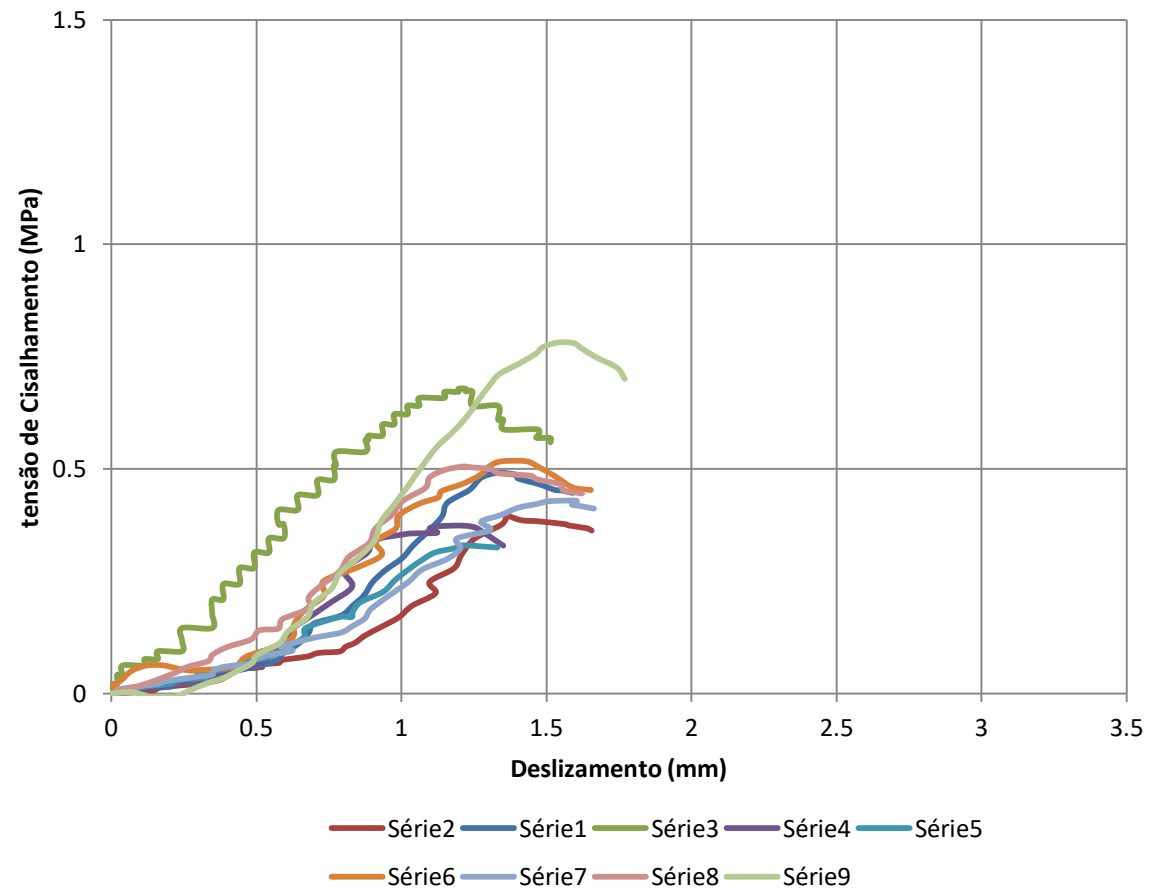
Gráfico 45 - Tensão de Cisalhamento x Deslizamento - Tensão de Pré Compressão 0.2 MPa

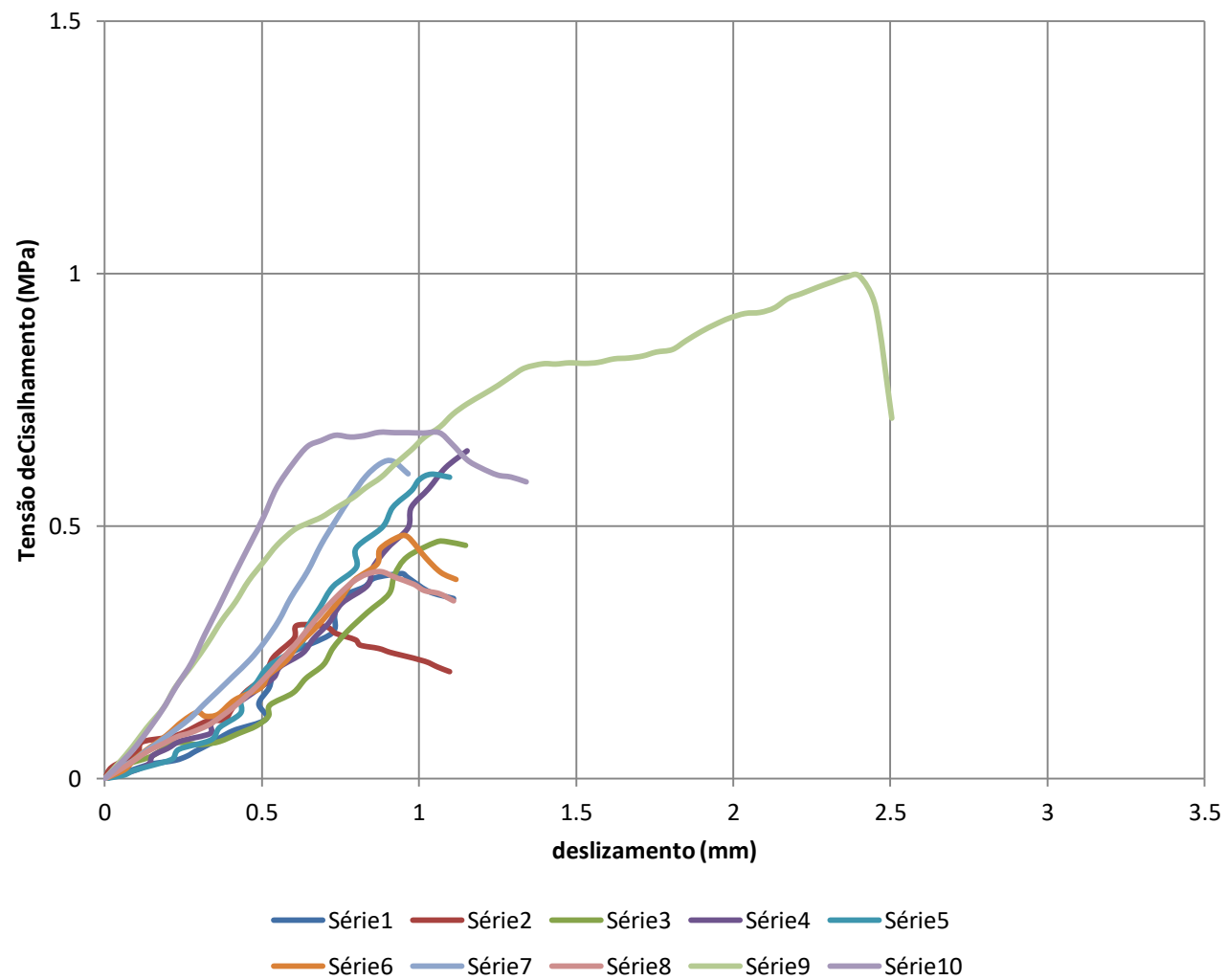
Gráfico 46 - Tensão de Cisalhamento vs Deslizamento - Tensão de Pré Compressão 0.6 MPa

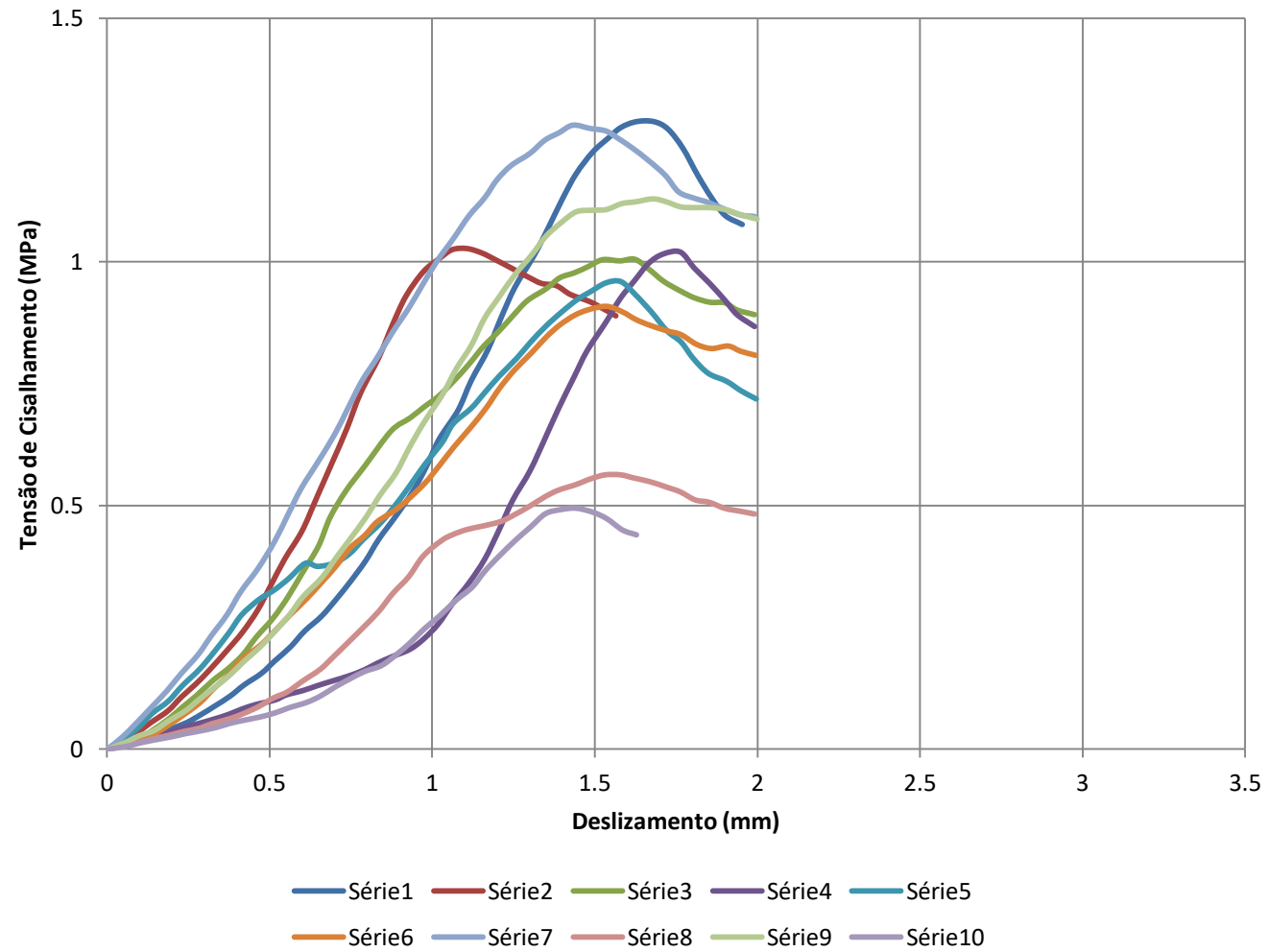
Gráfico 47 - Tensão de Cisalhamento vs Deslizamento - Tensão de Pré Compressão 1.0 MPa

Tabela 113 - Rigidez ao Cisalhamento

Tensão de Pré – Compressão	Rigidez ao Cisalhamento Media
0,2	0,37
0,6	0,33
1,0	0,57

Devido à proximidade entre os valores de rigidez ao cisalhamento foram analisados os resultados desses conjuntos de dados de duas maneiras distintas que foram as seguintes:

- 1) Considerando cada rigidez para respectiva tensão de pré compressão;
- 2) Considerou cada rigidez constante e alterou a tensão de pré compressão;
- 3) A partir da linha de tendência do gráfico 44, avaliar a influência da tensão de pré-compressão no modelo;

Além disso, como o valor de rigidez ao cisalhamento para pré-compressão de 0,2 MPa e 0,6MPa é próximo resolveu-se utilizar apenas o valor de 0,37MPa/mm e também o valor de rigidez normal foi considerado igual 196MPa/mm, valor esse que foi obtido por meio da equação proposta por Lourenço et al (2005).

Para a situação 1 os gráficos de 48 a 50 apresentam a tensão de cisalhamento vs deslizamento encontrados numericamente correlacionando com ensaios experimentais. A tabela 114 apresenta os valores máximos de tensão de cisalhamento e seu respectivo deslizamento e correlacionando.

Tabela 114 - Comparativo dos resultados para cada nível de pré compressão

Força 0,2 Mpa	Força 0,6MPa	Força 1,0MPa
7404,47	7941,6	8719,3
Tensão 0,2MPa	Tensão 0,6MPa	Tensão 1,0 Mpa
0,450	0,483	0,530
Tensão Experimental		
0,516	0,699	1,009
1,145	1,447	1,902
Deslizamento Experimental Médio		
1,42	2,09	1,76
Deslizamento Numérico		
1,67	1,88	1,86
<i>Relação deslizamento Experimental e Numérico</i>		
0,846	1,107	0,944

Gráfico 48 – Comparação – Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de Pré compressão 0.2MPa - $k_s=0.37\text{MPa/mm}$

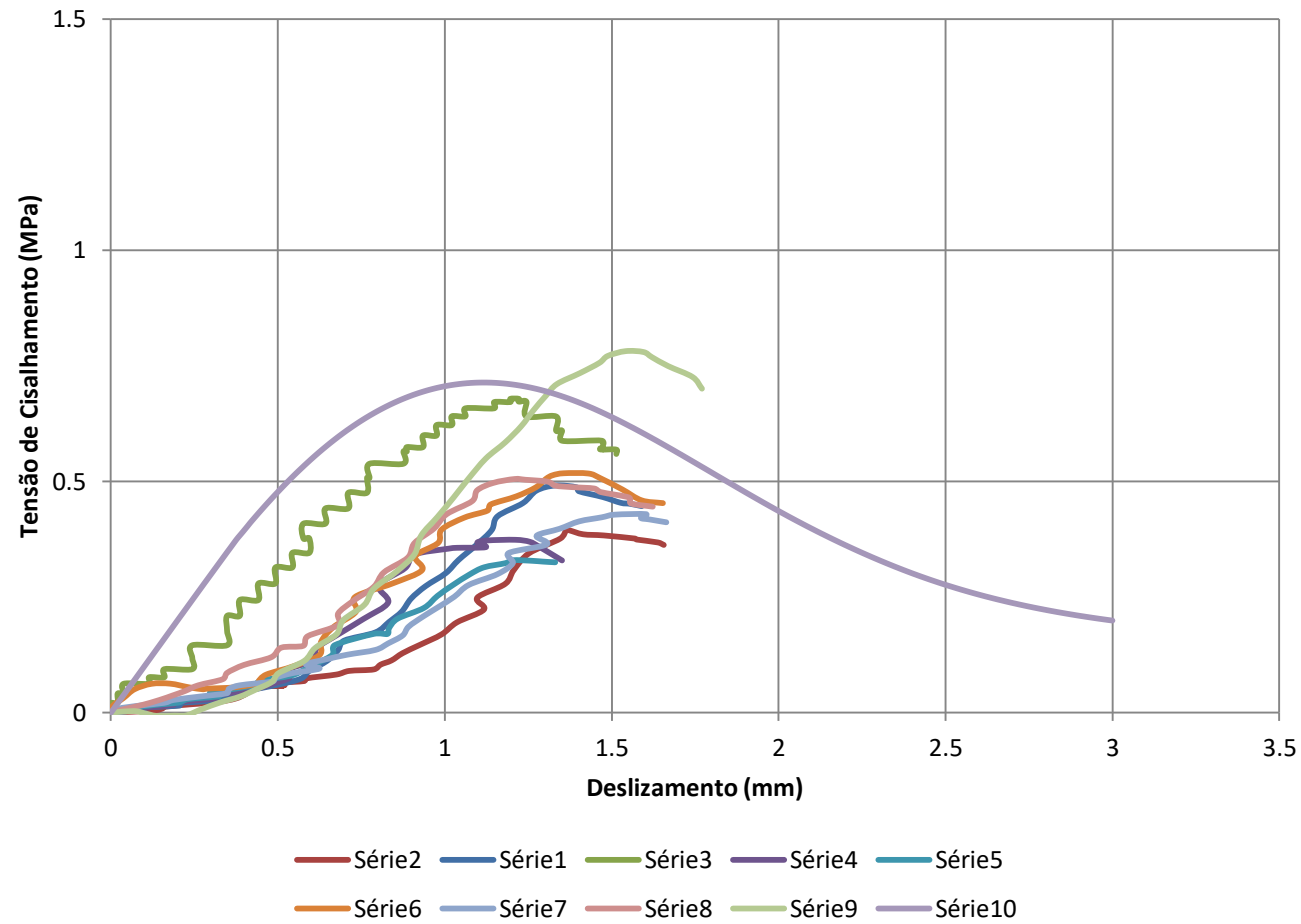


Gráfico 49 - Comparação Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de pré-compressão de 0.6MPa - $k_s=0.33\text{MPa/mm}$

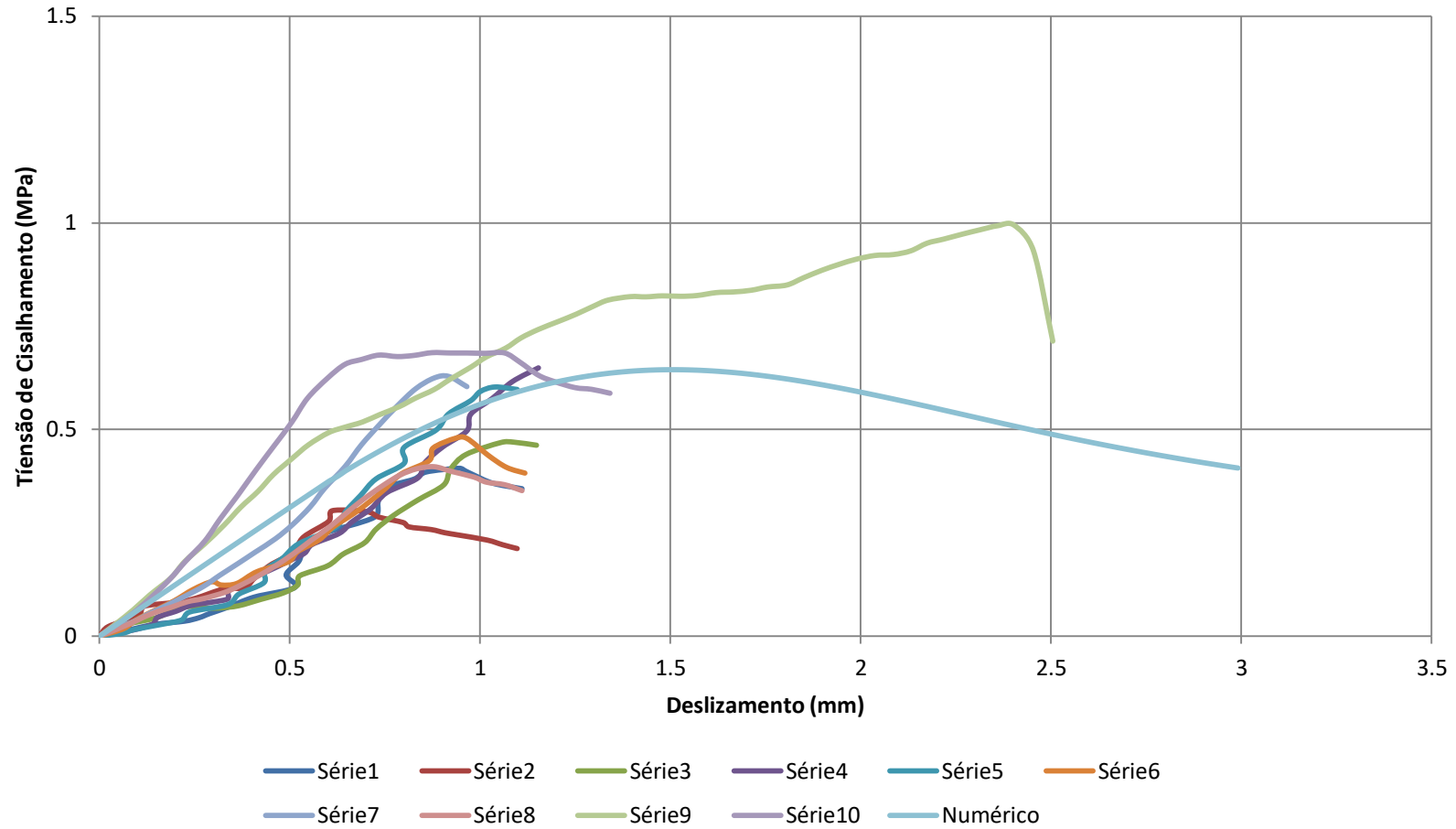
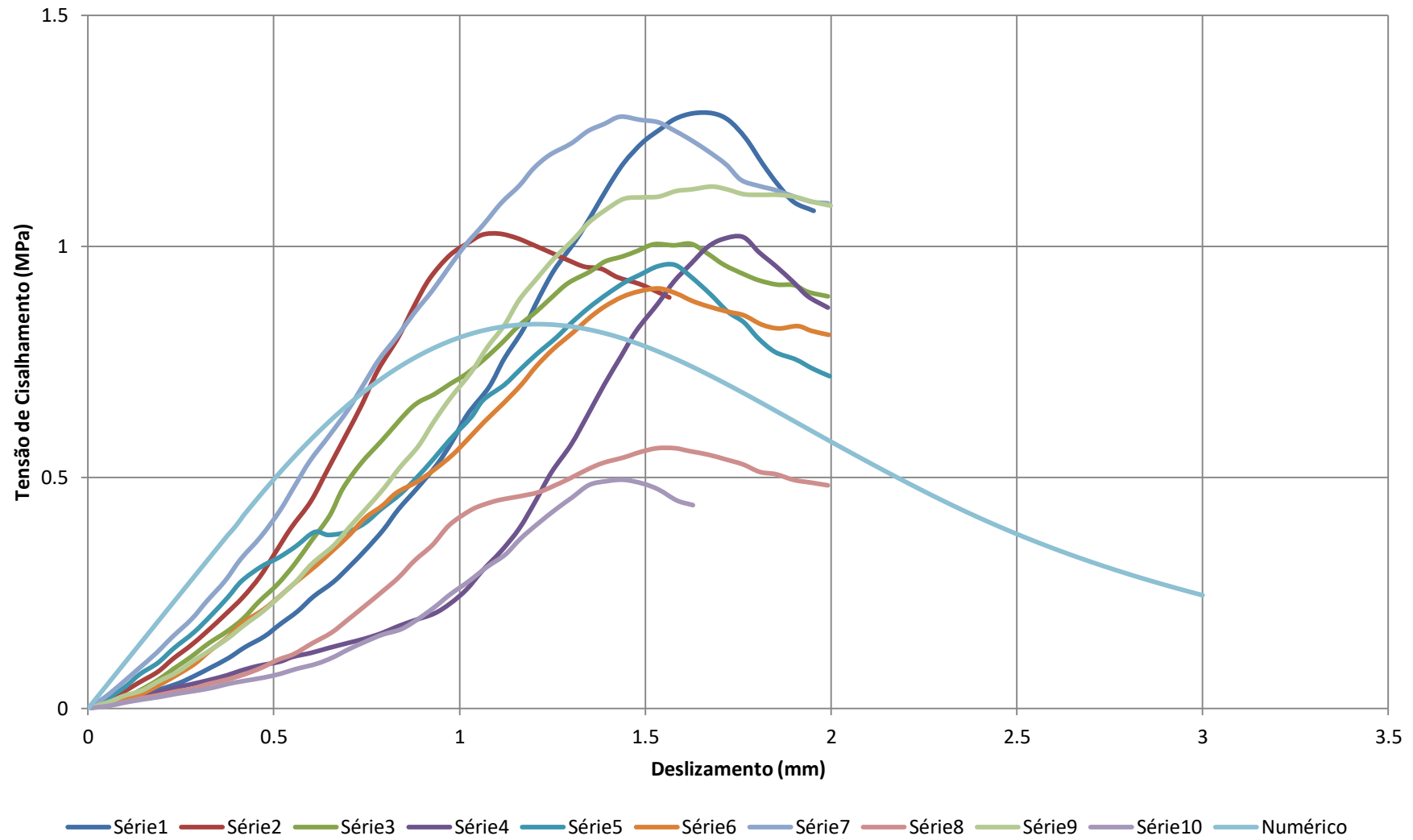


Gráfico 50 - Comparação Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de Pré compressão 1.0MPa - $k_s=0.57\text{MPa/mm}$



É possível observar pelos gráficos que a partir dos resultados experimentais apenas o caso onde foi considerado tensão de pré-compressão de 0,2 MPa, onde se alcançou uma boa aproximação tanto para a tensão quanto para o deslocamento. No entanto para pré-compressão de 0,6MPa, o valor se apresentou próximo para deslocamento o mesmo não se pode afirmar a respeito da respectiva tensão de cisalhamento. Enquanto que para o caso de tensão de cisalhamento igual 1,0 MPa os valores foram muito discrepantes.

Para a situação 2, de maneira semelhante ao que foi realizado na situação 1, os gráficos 51 a 53 apresentam o comportamento a partir da alteração apenas da tensão de pré compressão para se verificar se o modelo seria capaz captar a diferença de pré compressão aplicada, assim como foi observado nos ensaios, no entanto para esse caso se estudou para três níveis de pré-compressão que foram 0,37MPa/mm, 0,57MPa/mm e 1,0MPa/mm. O último valor de rigidez considerado para verificar a influência mais nítida das propriedades de dano e comportamento coesivo que são ineridos na interface do modelo.

Gráfico 51 - Comparação Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de Pré compressão 0.2MPa - $K_s=0.37\text{MPa/mm}$

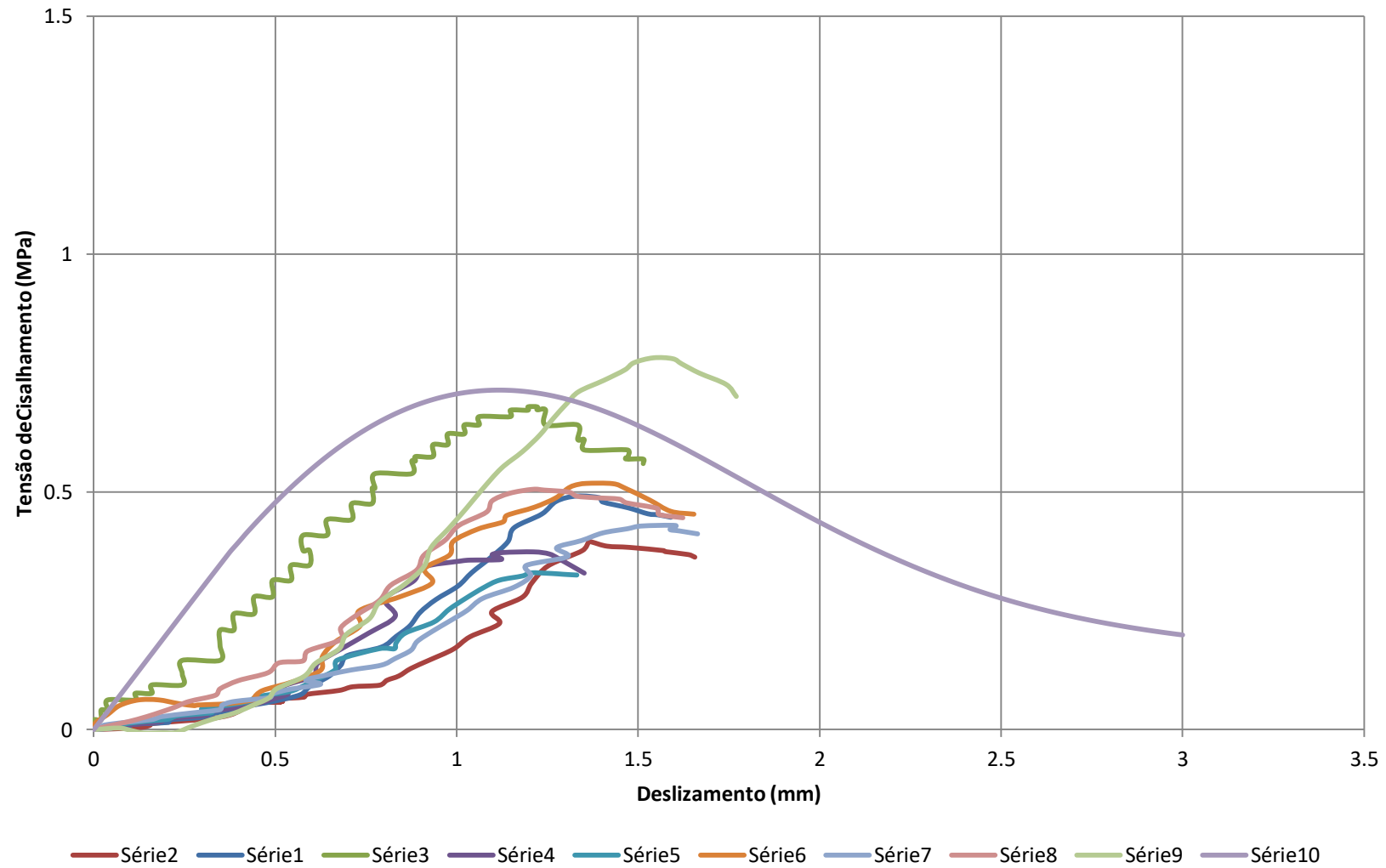


Gráfico 52 - Comparação Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de Pré compressão 0.6MPa - $k_s=0.37\text{MPa/mm}$

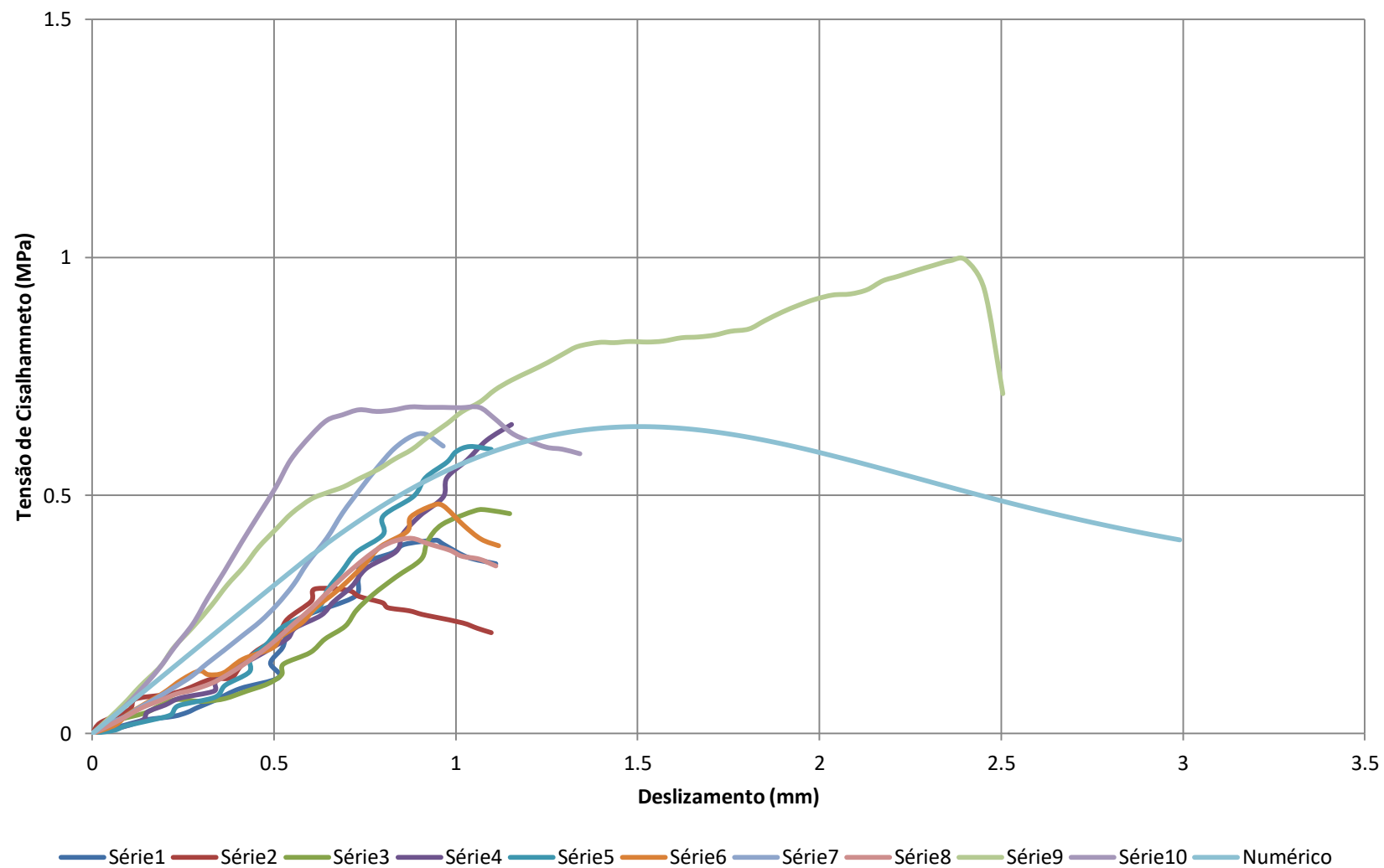


Gráfico 53- Comparação Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de Pré compressão 1.0 MPa - $k_s=0.37\text{MPa/mm}$

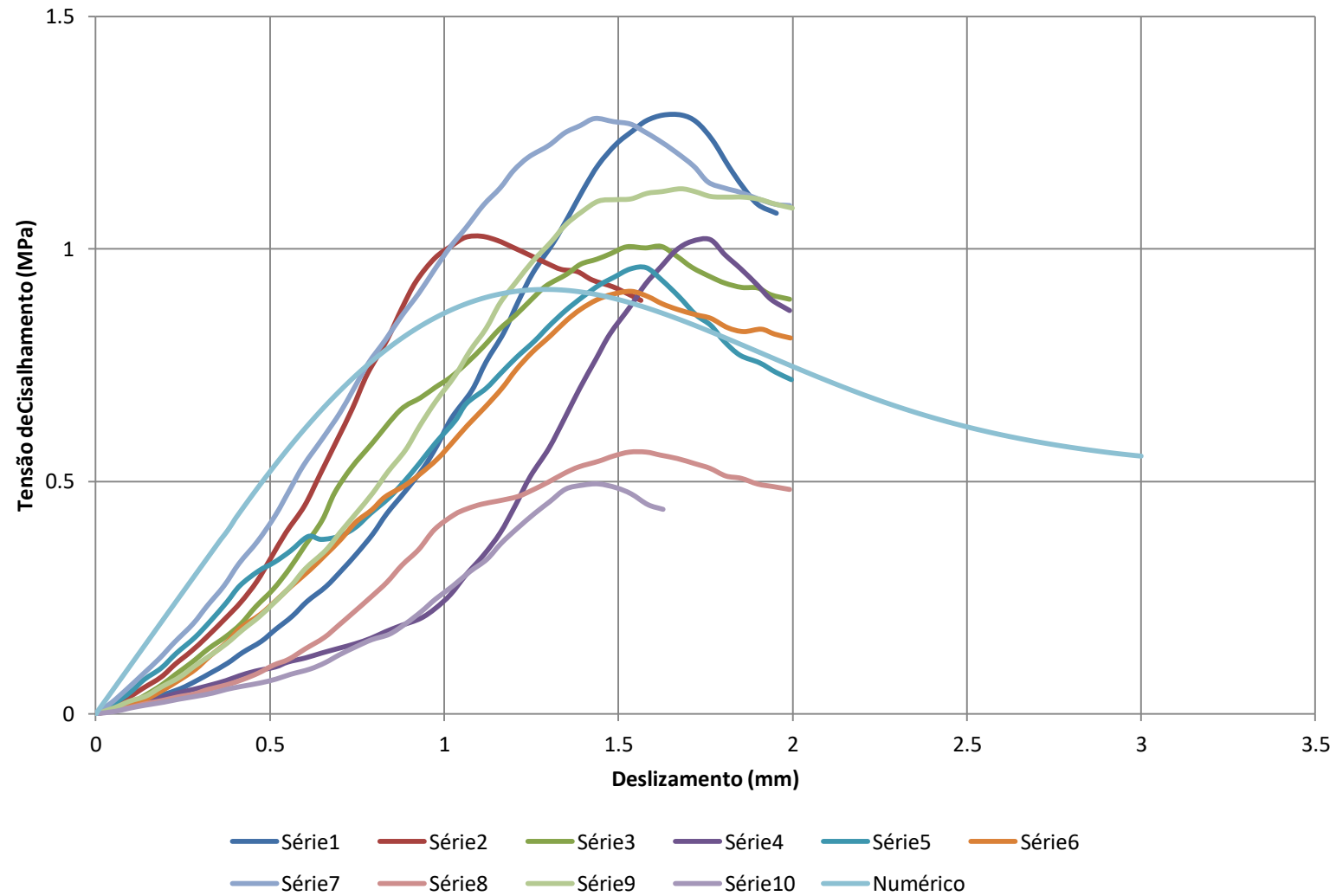


Tabela 115 - Comparativo dos resultados para cada nível de pré compressão

Força 0,2 Mpa	Força 0,6MPa	Força 1,0MPa
7404,47	7941,6	8719,3
Tensão 0,2MPa	Tensão 0,6MPa	Tensão 1,0 Mpa
0,450338767	0,483006933	0,530306532
Tensão Experimental		
0,516	0,699	1,009
1,145804089	1,447184195	1,90267315
Deslizamento Experimental Médio		
1,42	2,09	1,76
Deslizamento Numérico		
1,67716	1,88715	1,86318
<u>Relação deslizamento Experimental e Numérico</u>		
0,84666937	1,107490131	0,944621561

Analisando o comportamento do modelo, tensão de cisalhamento x deslizamento, e considerando a tabela 115, observa-se que a tensão de cisalhamento média experimental e deslizamento, assim como na situação 1, foi alcançado apenas para pré-compressão de 0,2 MPa. A tensão de cisalhamento considerando pré-compressão de 0,6MPa e 1,0MPa ficou muito distante dos respectivos valores médios de tensão de cisalhamento. Apesar da diferença entre as tensões de cisalhamento o mesmo não é possível falar a respeito do deslizamento do modelo que para os três tipos de pré-compressão os valores ficaram próximo dos valores experimentais.

Prosseguindo nessa análise é apresentado a seguir o conjunto de resultados considerando a rigidez ao cisalhamento igual 0,57MPa/mm.

Gráfico 54 - Comparação – Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de Pré compressão 0.2MPa - $k_s=0.57\text{MPa/mm}$

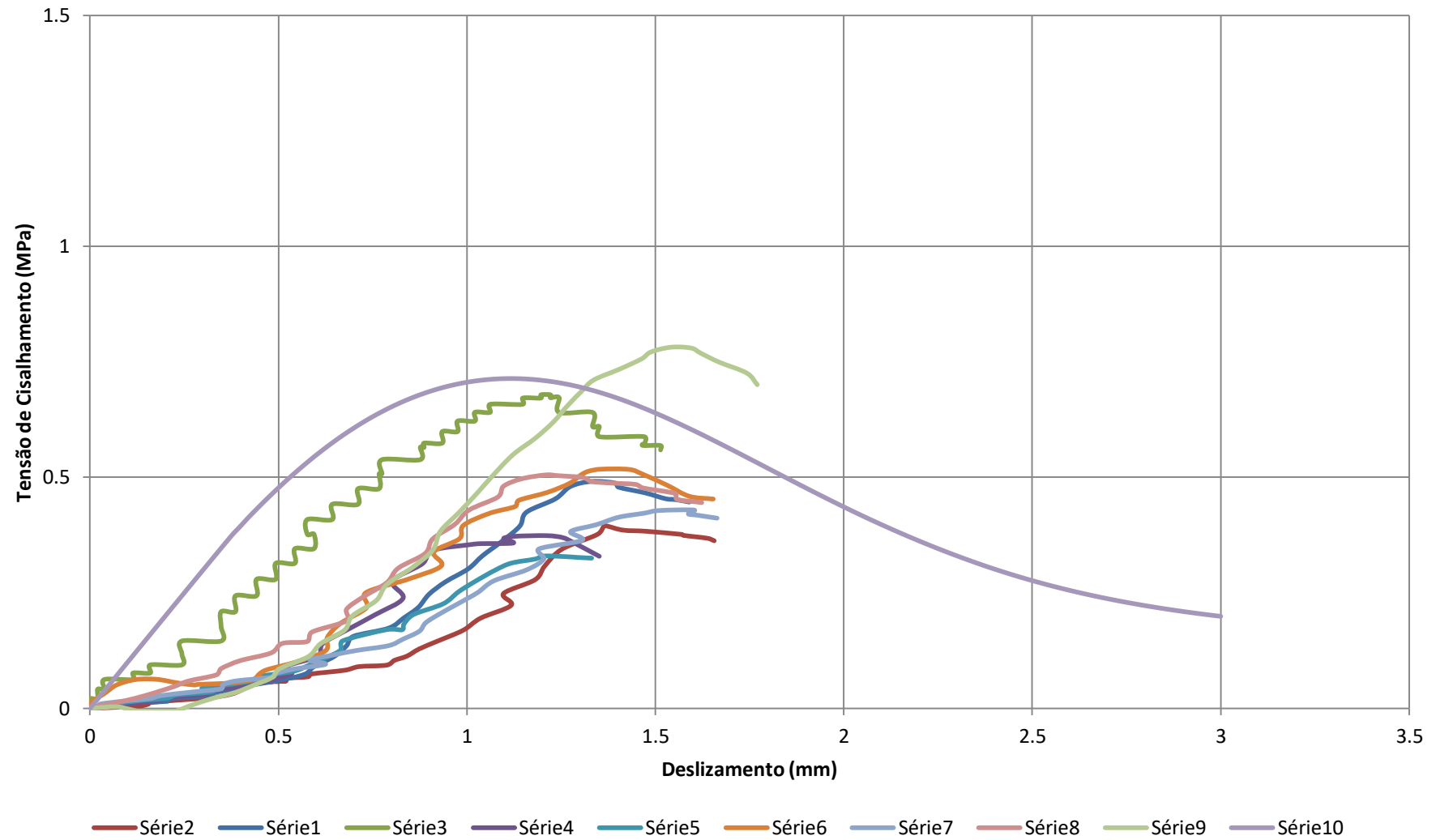


Gráfico 55 - Comparação – Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de Pré compressão 0.6MPa - $k_s=0.57\text{MPa/mm}$

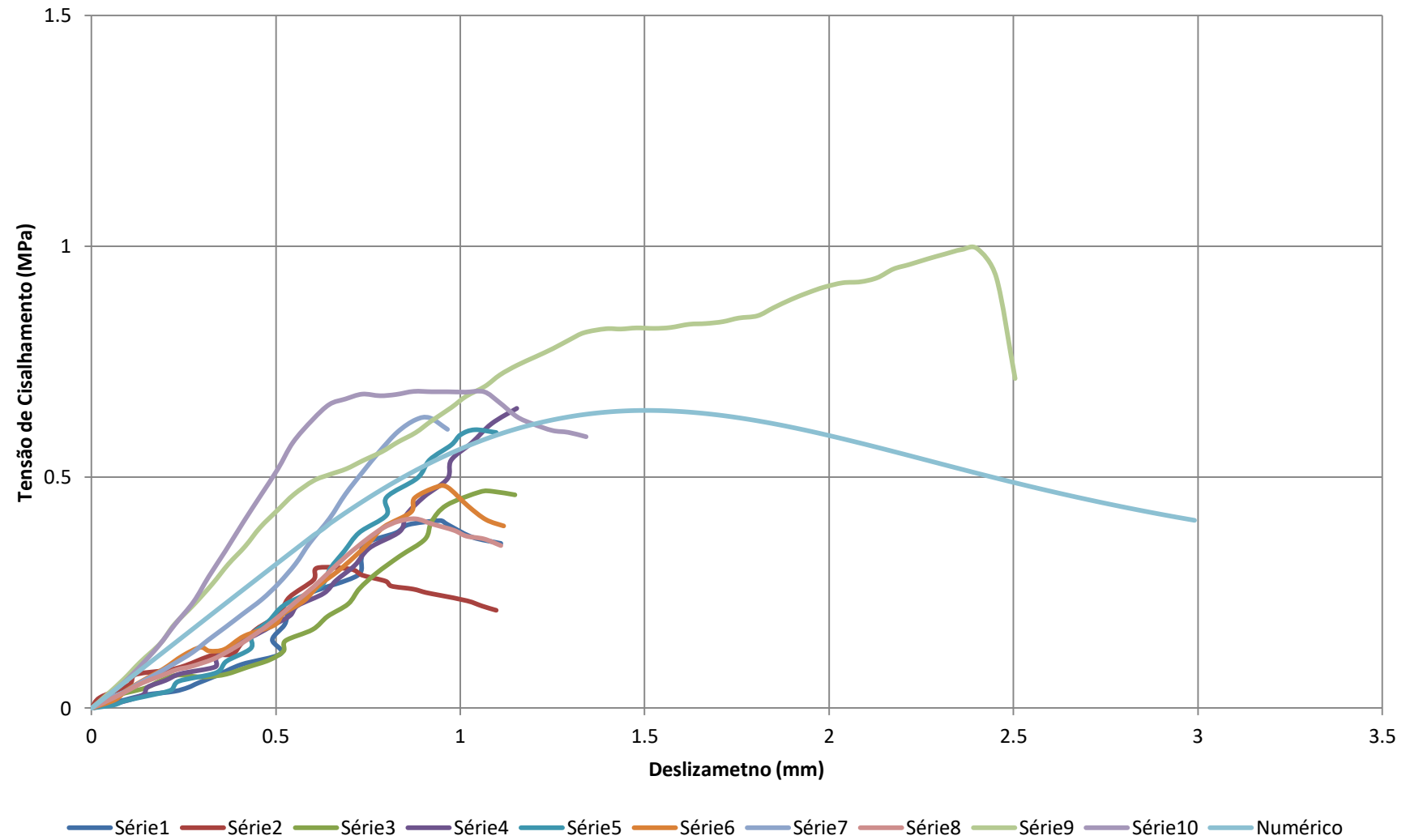


Gráfico 56 - Comparação – Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de Pré compressão 1.0MPa - $k_s=0.57\text{MPa/mm}$

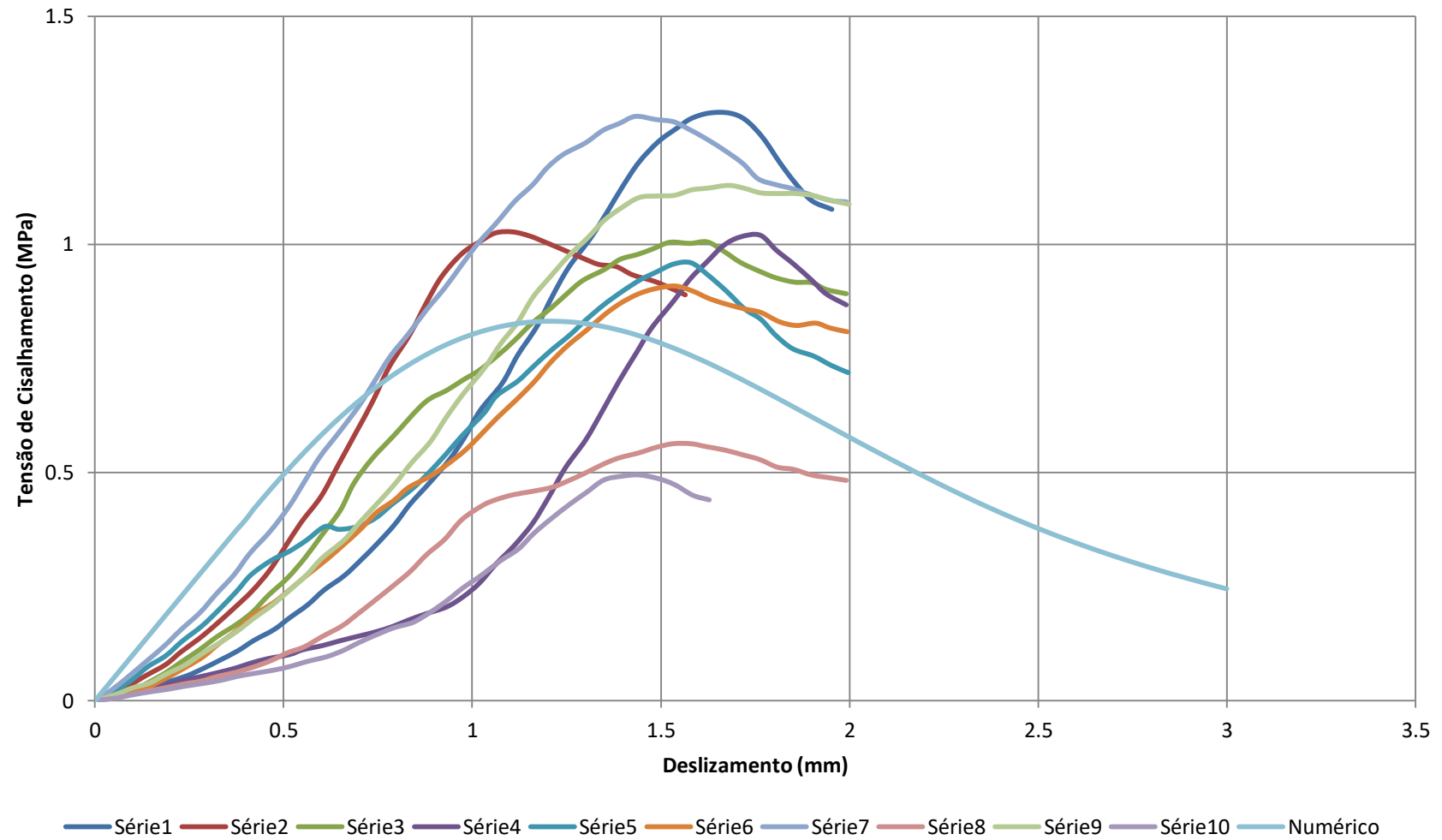


Tabela 116 - Comparativo dos resultados para cada nível de pré compressão

Força 0,2 Mpa	Força 0,6MPa	Força 1,0MPa
11735,1	12563,5	13671,8
Tensão 0,2MPa	Tensão 0,6MPa	Tensão 1,0 Mpa
0,713727041	0,764110206	0,831516847
Tensão Experimental		
0,516	0,699	1,02
0,722965463	0,914789509	1,226673883
Deslizamento Experimental Médio		
1,42	2,09	1,76
Deslizamento Numérico		
1,1192	1,15531	1,20924
<u>Relação deslizamento Experimental e Numérico</u>		
1,268763402	1,809038267	1,455459628

Analisando os gráficos 54 a 56 juntamente com a tabela 116, nota-se que apesar do aumento da rigidez ao cisalhamento o comportamento do gráfico para tensão de pré-compressão de 0,2MPa tornou o modelo mais rígido em relação ao que foi analisado com $K_{ss}=0,37$ MPa/mm. Em um primeiro momento isso denota que o parâmetro K_{ss} apresenta uma influência significativa na análise da interface, uma vez que o aumento de 54% no valor de K_{ss} resultou em um aumento na tensão de cisalhamento de 58%. No entanto considerando a análise para as tensões de pré-compressão 0,6MPa e 1,0MPa observa-se que os valores de tensão de cisalhamento ficaram mais próximos do valor obtido experimentalmente apresentando um erro de aproximadamente 9% e 22%, respectivamente.

Por último, considerando a situação 2, são apresentados os gráficos 57 a 59 e a tabela 117 , considerando $K_{ss}=1.0$ MPa/mm.

Gráfico 57 - Comparação – Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de Pré compressão 0.2MPa - $k_s=1.0\text{MPa/mm}$

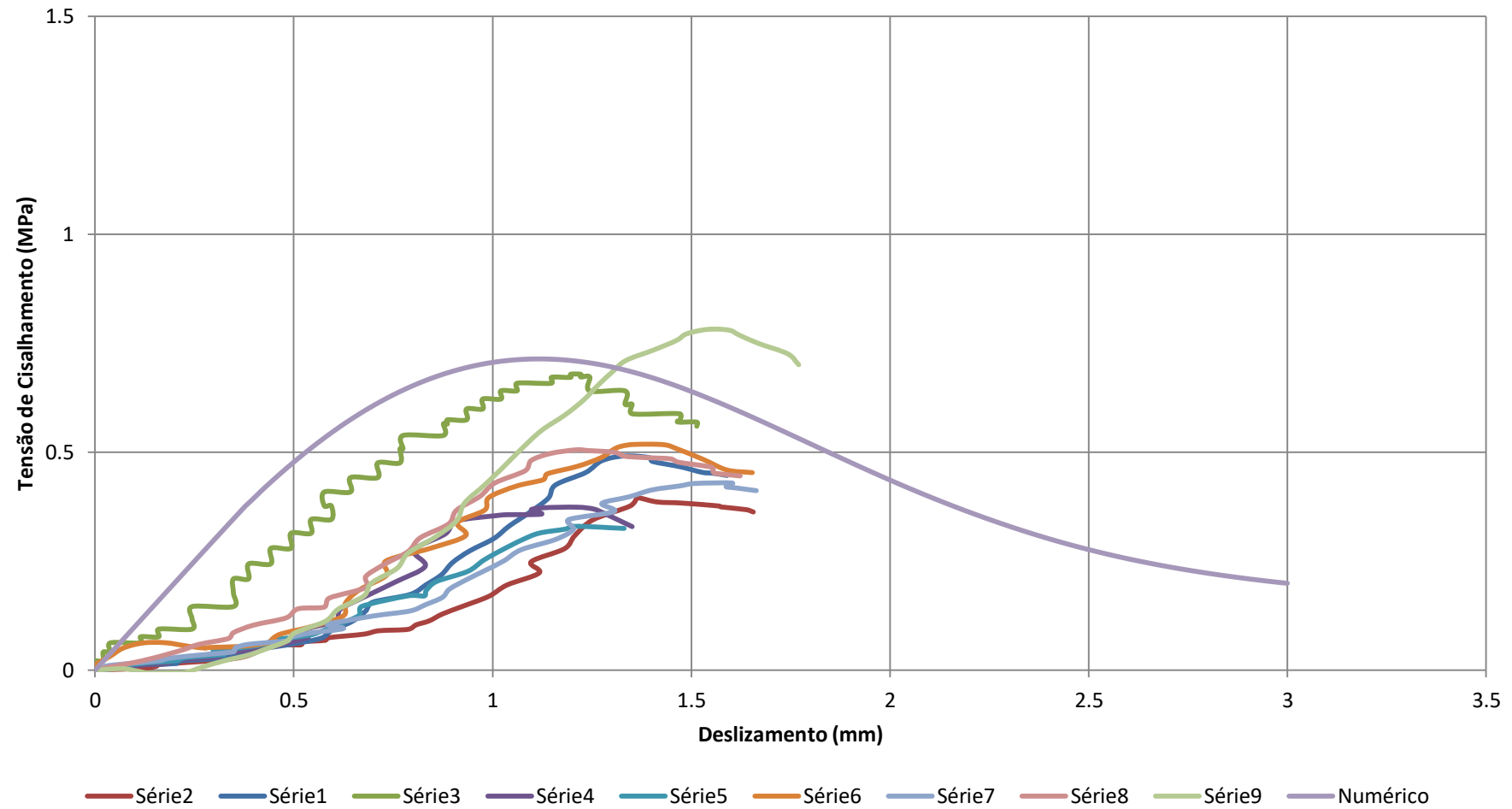


Gráfico 58 - Comparação – Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de Pré compressão 0.6MPa - $k_s=1.0\text{MPa/mm}$

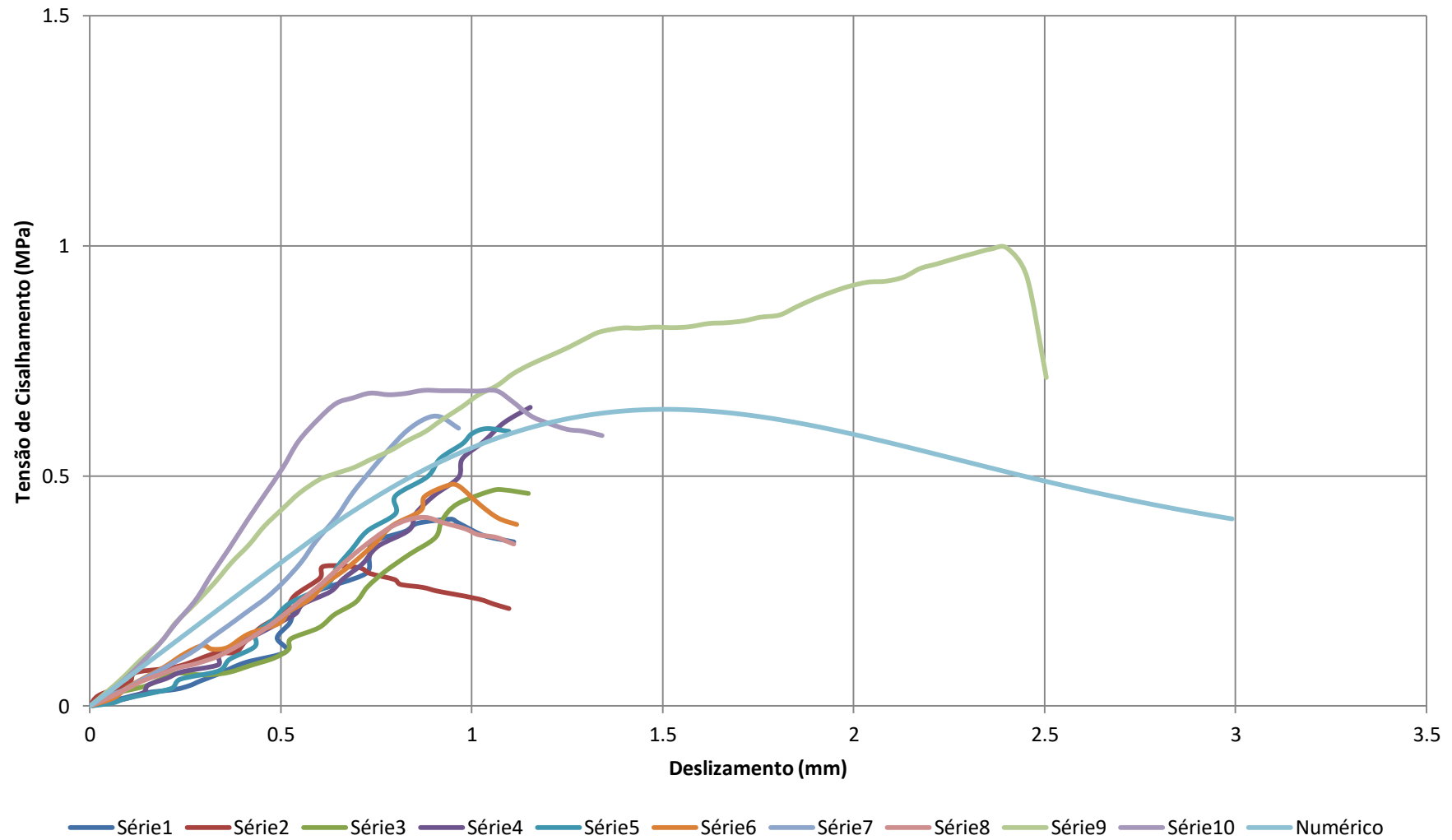


Gráfico 59 - Comparação – Curvas Experimentais e Curva Numérica –Tensão de Pré compressão 1.0MPa - $k_s=1.0\text{MPa/mm}$

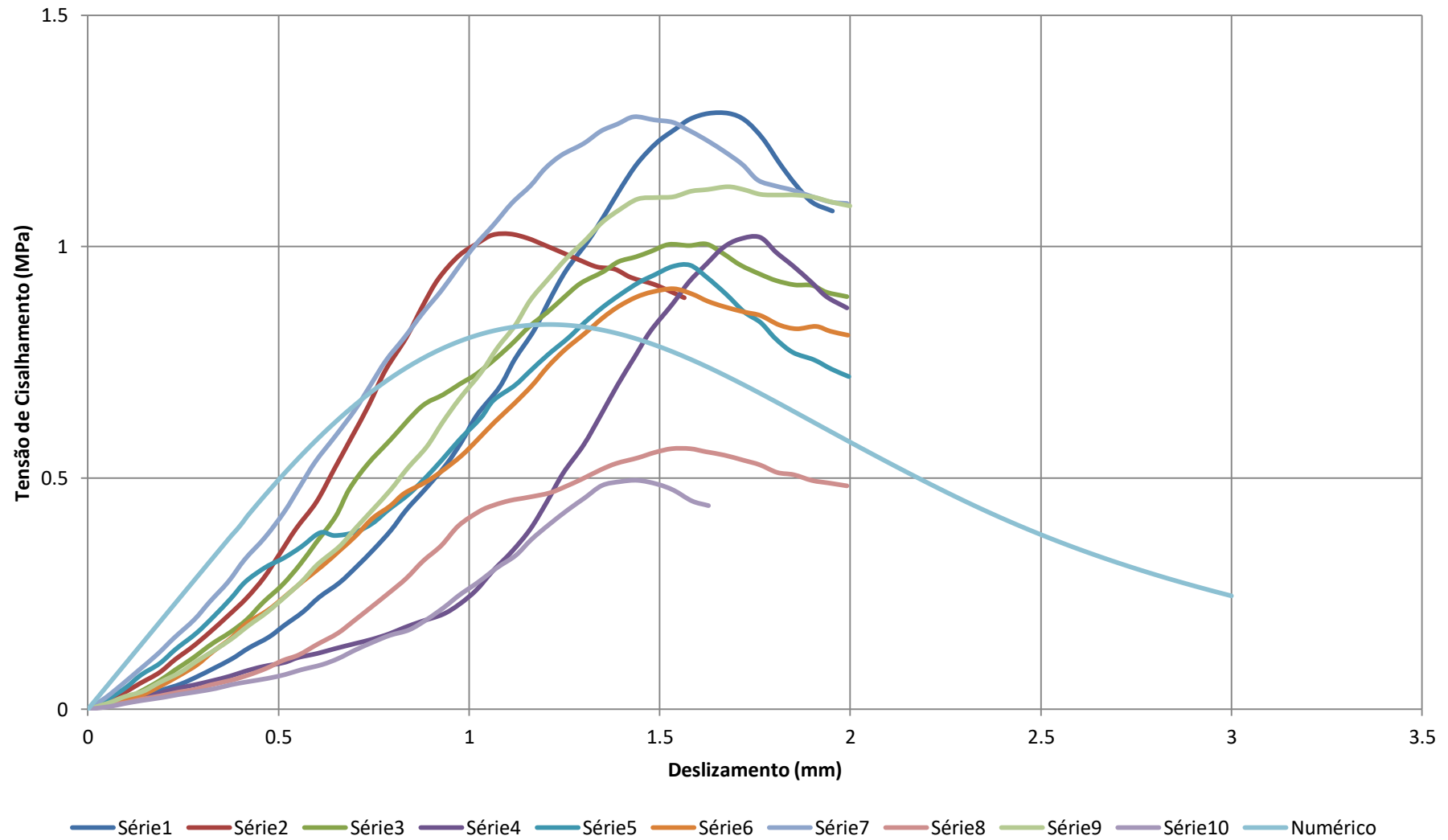


Tabela 117 - Comparativo dos resultados para cada nível de pré compressão

Força 0,2 Mpa	Força 0,6MPa	Força 1,0MPa
11735	12563,3	14740,3
Tensão 02MPa	Tensão 06MPa	Tensão 1 Mpa
0,713720959	0,764098042	0,896502859
Tensão Experimental		
0,516	0,699	1,009
0,722971623	0,914804072	1,12548442
Deslizamento Experimental Médio		
1,42	2,09	1,76
Deslizamento Numérico		
1,1192	1,15531	1,32323
<u>Relação deslizamento Experimental e Numérico</u>		
1,268763402	1,809038267	1,330078671

Para a situação 3, foram considerados todos os gráficos apresentados na situação 2. Analisando apenas os gráficos obtidos numericamente para cada tensão de pré-compressão que foi considerada tem-se os seguintes resultados.

Gráfico 60 – Curva tensão de cisalhamento x deslizamento – $K_s=0.37\text{MPa/mm}$

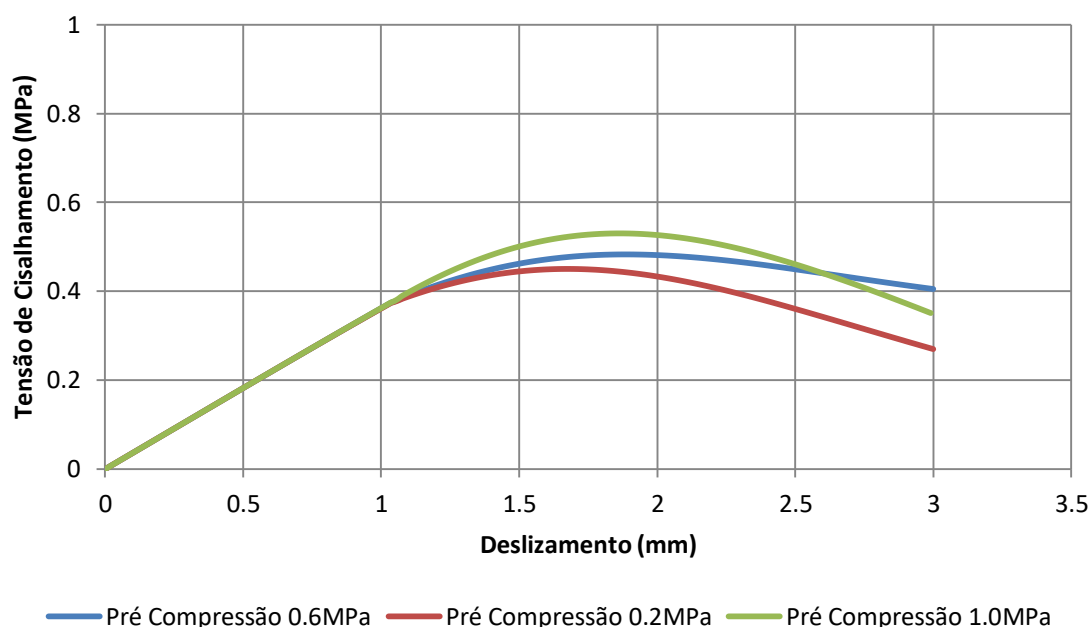


Gráfico 61 - Curva tensão de cisalhamento x deslizamento – $K_s=0.57\text{MPa/mm}$

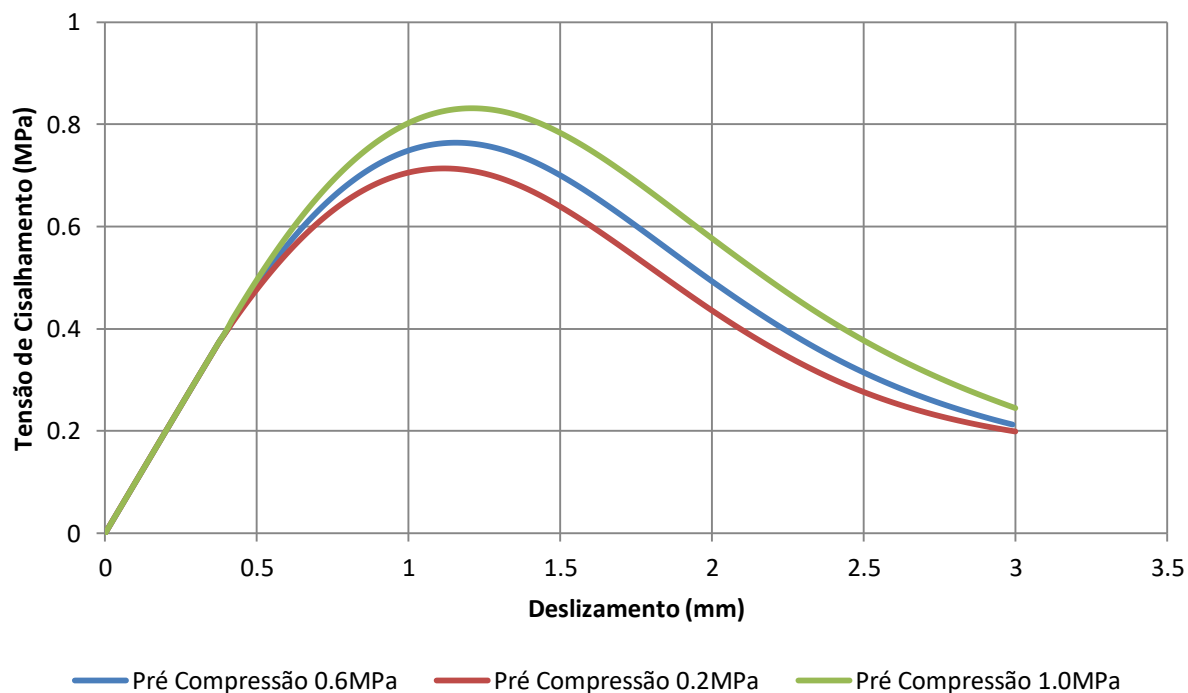
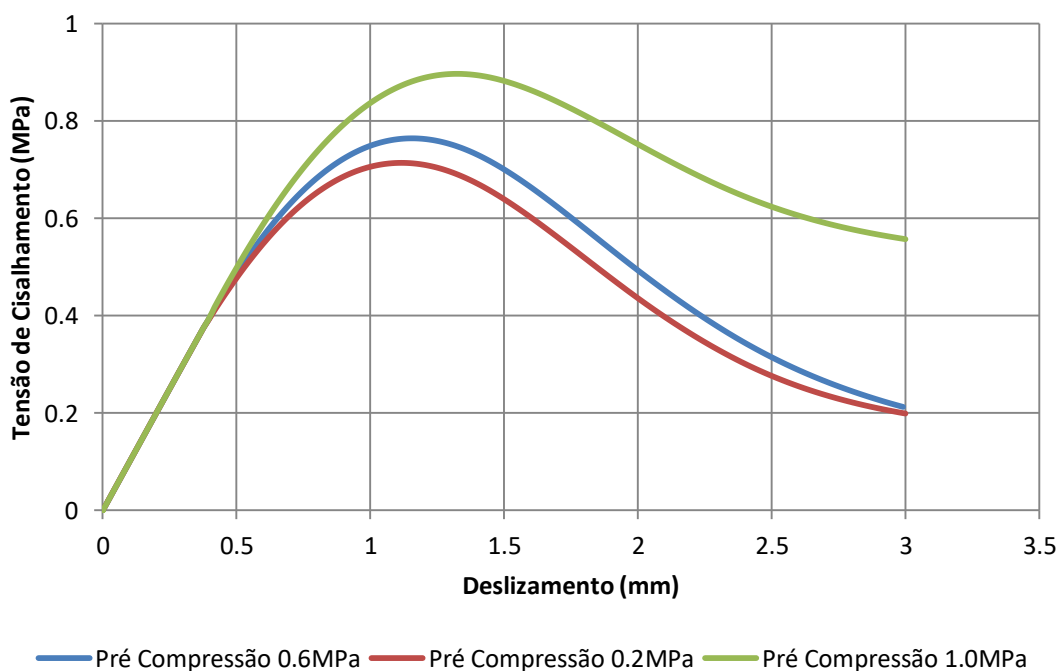


Gráfico 62 - Curva tensão de cisalhamento x deslizamento – $K_s=1.00\text{MPa/mm}$



Analisando os gráficos 60 a 62, nota-se que com a variação da tensão de pré-compressão o modelo consegue aumentar o trecho de comportamento elástico e por consequência aumenta a resistência ao cisalhamento do modelo. Considerando esse comportamento do modelo, é apresentado

na tabela 118, um resumo dos resultados considerando a fase elástica de cada uma das doze curvas.

Tabela 118 - Resumo dos Dados referente ao comportamento elástico modelo de ensaio de cisalhamento da junta horizontal

Pré Compressão	Ks	Tensão de cisalhamento elástica	Delásticos	Inclinação da Reta
0,2	0,37	0,363095	1	0,36309451
	0,57	0,504866	0,537	0,94015938
	1	0,46886	0,48	0,97679216
0,6	0,37	0,37015	1,02	0,36289178
	0,57	0,6068	0,66	0,91939342
	1	0,602907	0,65	0,92754952
1	0,37	0,422029	1,17	0,3607085
	0,57	0,631006	0,66	0,95606964
	1	0,702652	0,77	0,91253473

Com base nesses valores apresentados na tabela 118 é possível notar que com aumento da rigidez ao cisalhamento, considerando a mesma tensão de pré-compressão, há um aumento da resistência ao cisalhamento elástica em contrapartida há uma redução do deslocamento do modelo.

No entanto é possível perceber que a inclinação da reta do trecho elástico, considerando o mesmo valor de Ks, apresenta a mesma inclinação de reta e a partir disso pode se dizer que a variação que ocorre na tensão de cisalhamento e no deslocamento torna trecho elástico constante quanto à inclinação.

Ainda sobre a inclinação do trecho elástico observa-se que os valores 0,57MPa/mm e 1,0 MPa/mm apresentaram certa constância nos valores tanto considerando mesma tensão de pré-compressão como avaliando o para diferentes valores de pré-compressão.

Como último ponto da análise dos parâmetros de rigidez foi elaborado um conjunto de gráficos, a partir dos dados apresentados na tabela 118, relacionando tensão de cisalhamento elástica com os valores de rigidez ao cisalhamento, considerando a tensão de pré-compressão, conforme os gráficos 63 a 65.

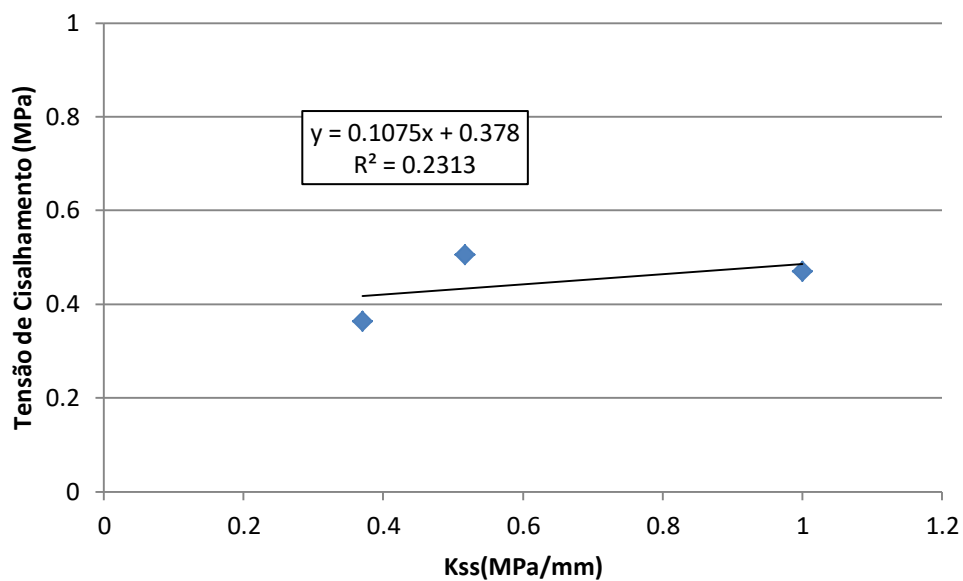
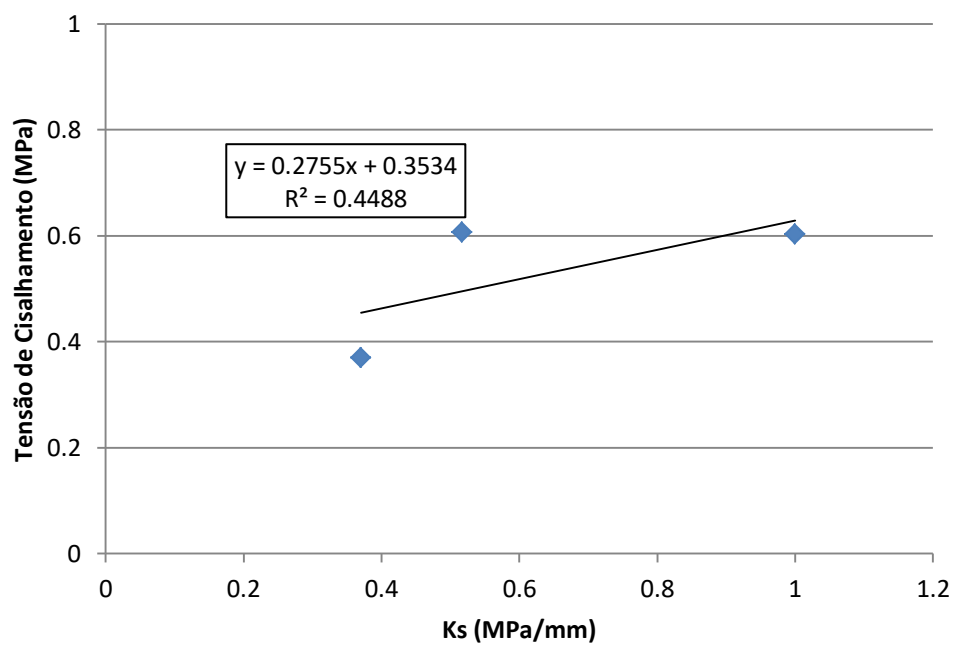
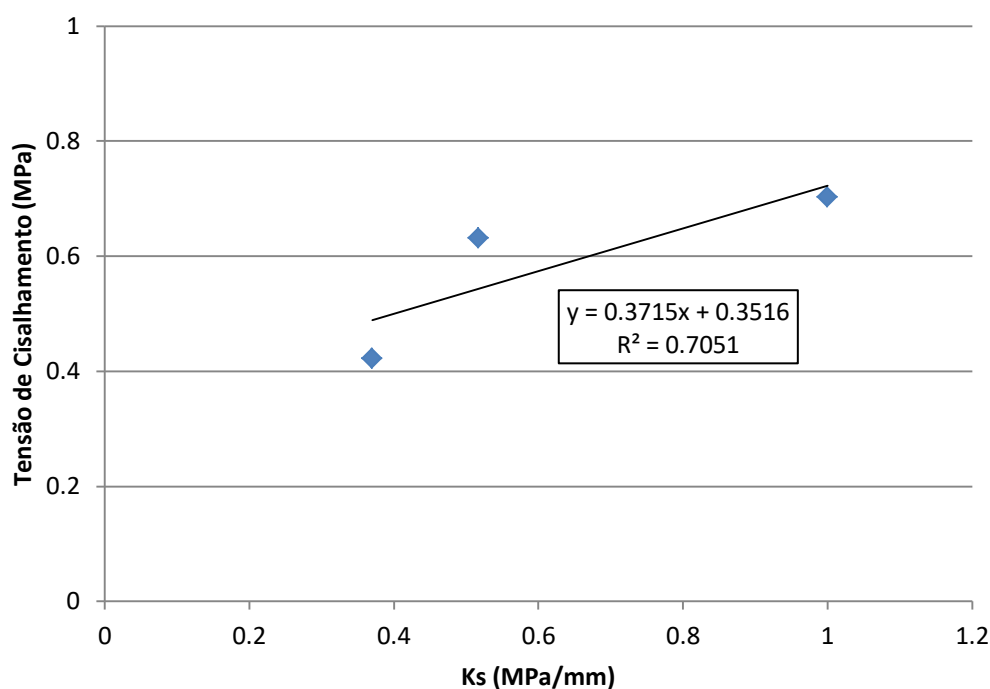
Gráfico 63 - Tensão de Cisalhamento x Ks – pré-compressão 0.2 MPa**Gráfico 64 - Tensão de Cisalhamento x Ks – pré-compressão 0.6 MPa**

Gráfico 65 - Tensão de Cisalhamento x Ks – pré-compressão 1.0 MPa

Considerando os gráficos 63 a 65, é possível observar que ao aumentar a tensão de pré-compressão no modelo ocorre um aumento na precisão dos valores, no entanto a tensão de cisalhamento inicial se manteve constante e muito próximo ao valor inserido no comportamento de dano ao cisalhamento que $t_s = t_t = 0,37 \text{ MPa}$.

Considerando as linhas de tendência alcançadas e considerando a tensão limite de cisalhamento elástica com base no modelo numérico ideal foi possível encontrar por três equações diferentes (linhas de tendência dos gráficos 63 a 65) o mesmo valor de Ks que foi de $0,62 \text{ MPa/mm}$, conforme a tabela 119 a seguir.

Tabela 119 - Parâmetro Ks por meio da equação da Linha de Tendência

Y	a	b	b verdadeiro	Ks	Média	dp	CV
0,445	0,1075	0,378	0,067	0,628	0,62	0,00218	0,347
0,526	0,2755	0,3544	0,172	0,625			
0,585	0,3715	0,3516	0,233	0,628			

Com base no valor de $K_s = 0,62 \text{ MPa/mm}$, são apresentando os gráficos 66 a 68 para a comparação do comportamento do modelo para cada uma três tensões de pré-compressão utilizadas no estudo. Além disso, são apresentados a distribuição de tensão e deformação, nas figuras 151 e 152, respectivamente, e também a distribuição da tensão de cisalhamento na direção da junta horizontal.

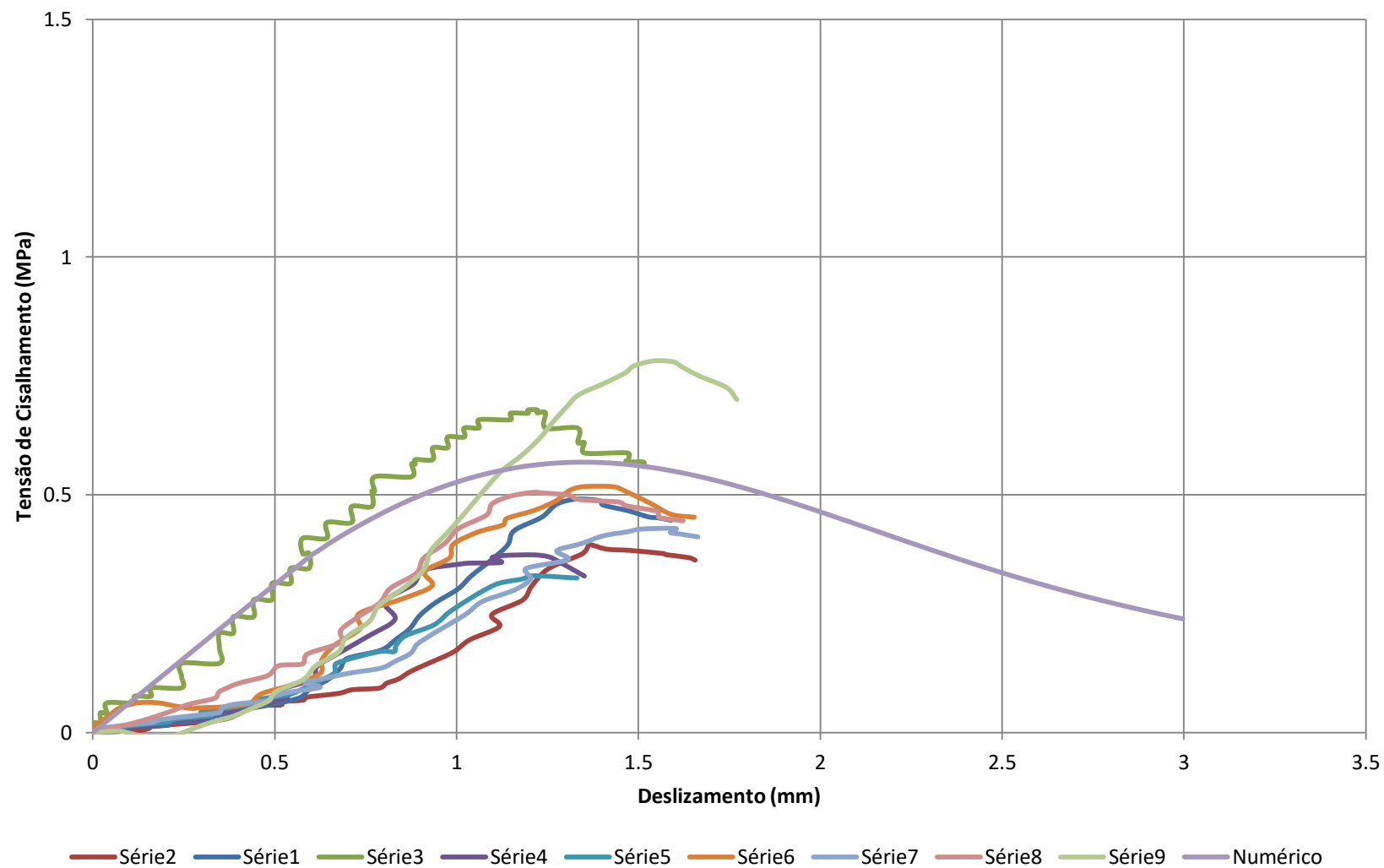
Gráfico 66 – Comparação entre Modelo Numérico e Experimental – pré-compressão 0.2MPa – $K_s=0.62\text{MPa/mm}$ 

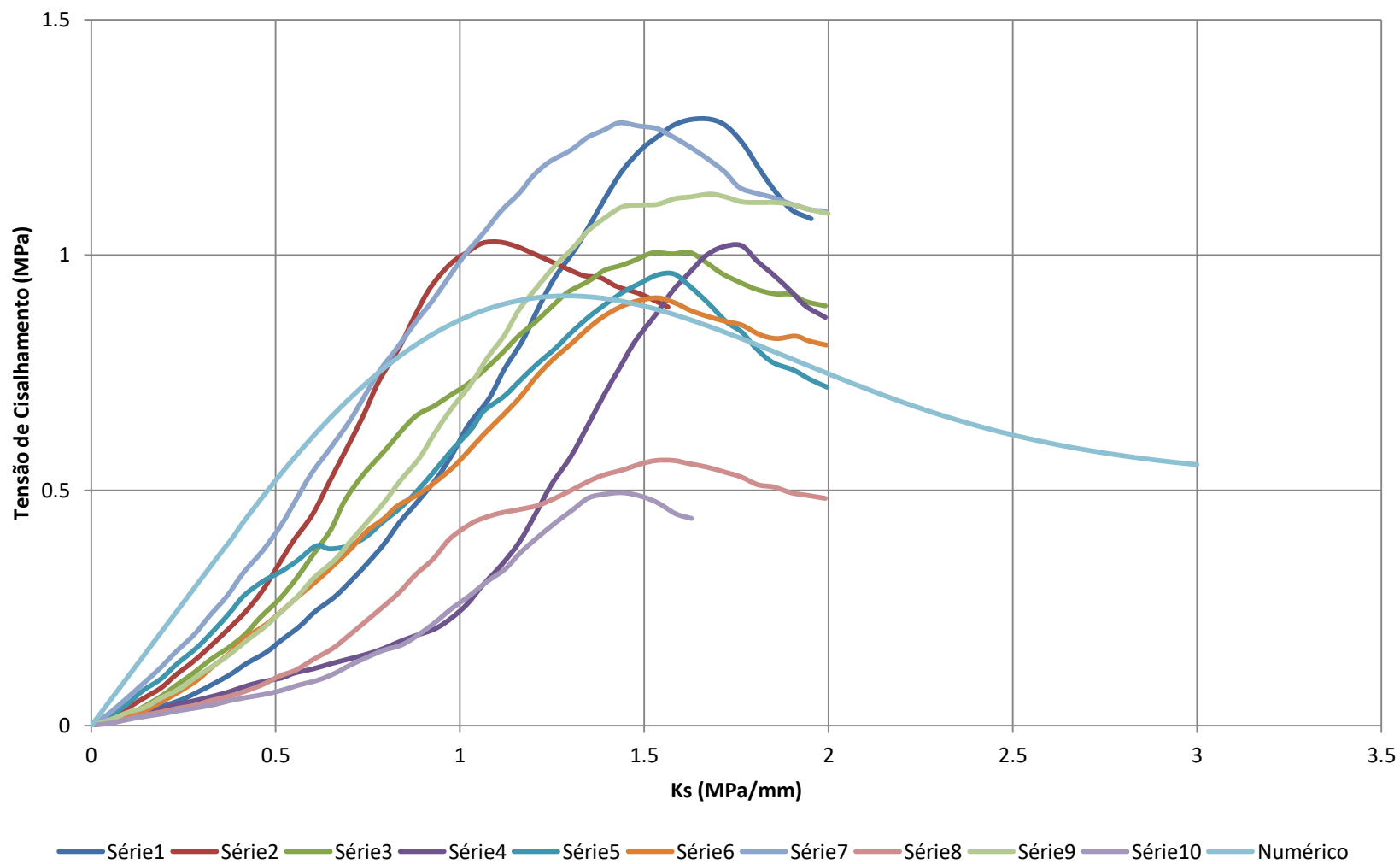
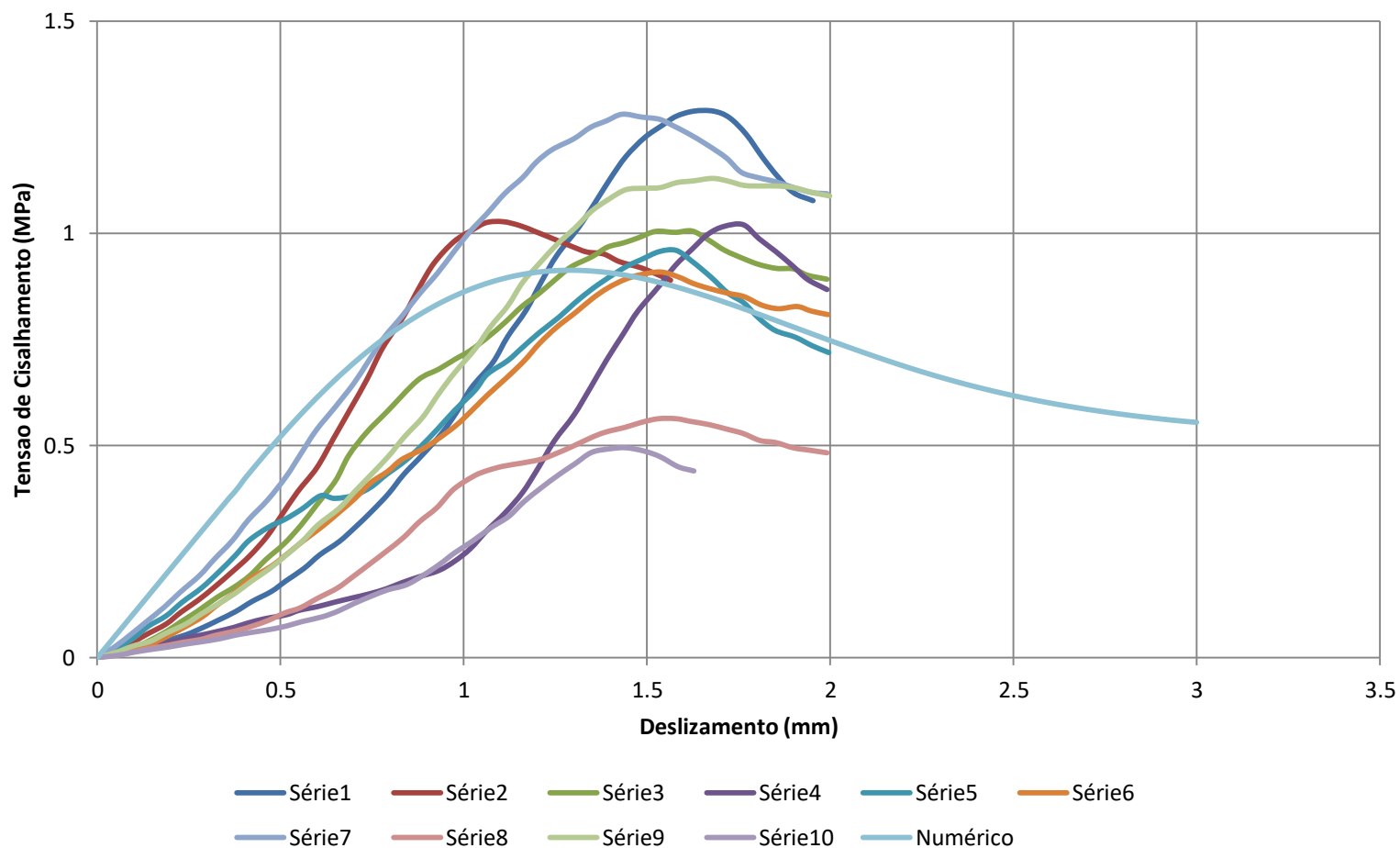
Gráfico 67 - Comparação entre Modelo Numérico e Experimental – pré-compressão 0.6MPa – $K_s=0.62\text{MPa/mm}$ 

Gráfico 68 - Comparação entre Modelo Numérico e Experimental – pré-compressão 1.0 MPa – $K_s=0.62\text{MPa/mm}$ 

As imagens a seguir, figuras 151 a 159, apresentação para cada nível de pré-compressão a distribuição de tensão, deformação e também a distribuição da tensão de cisalhamento na face do bloco.

Figura 151 - Distribuição de Tensão – pré-compressão 0.2 MPa

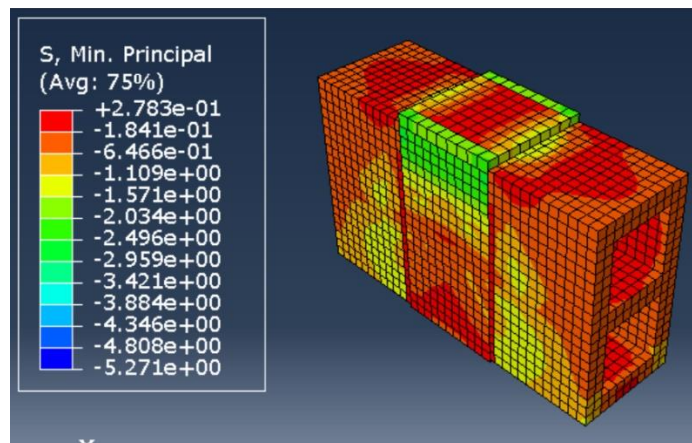


Figura 152 - Distribuição de Deformação – pré-compressão 0.2MPa

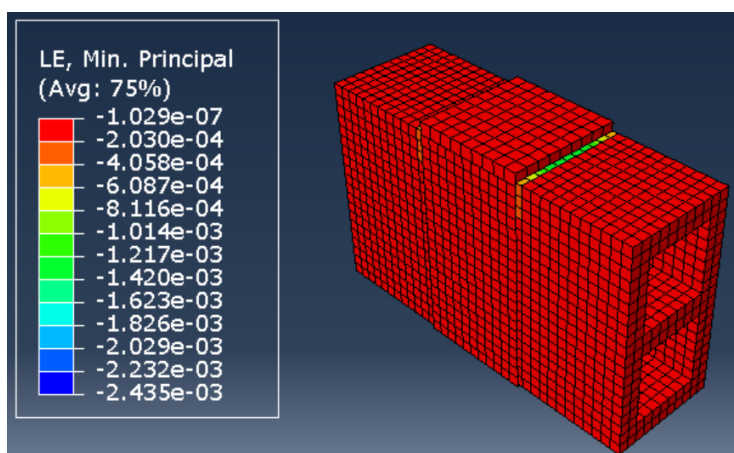


Figura 153 - Distribuição de Tensão de Cisalhamento – pré-compressão 0.2MPa

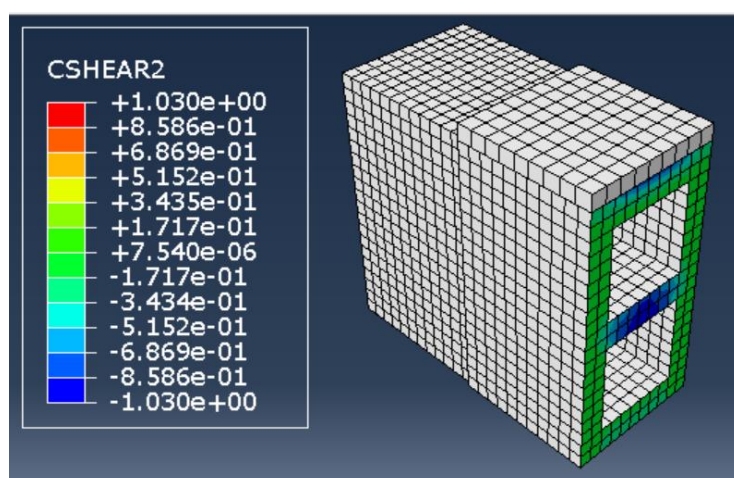


Figura 154 - Distribuição de Tensão – pré-compressão 0.6 MPa

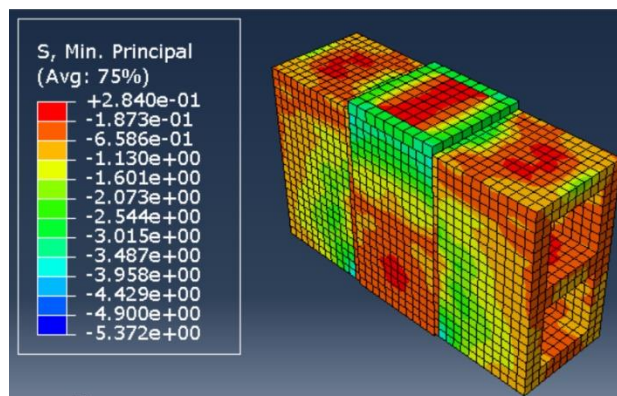


Figura 155 - Distribuição de Deformação – pré-compressão 0.6MPa

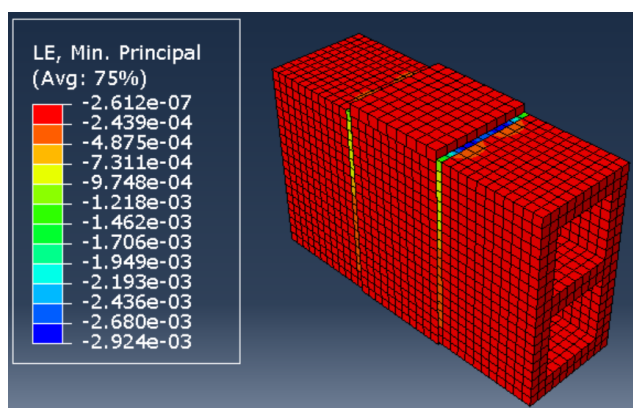


Figura 156 - Distribuição de Tensão de Cisalhamento – pré-compressão 0.6MPa

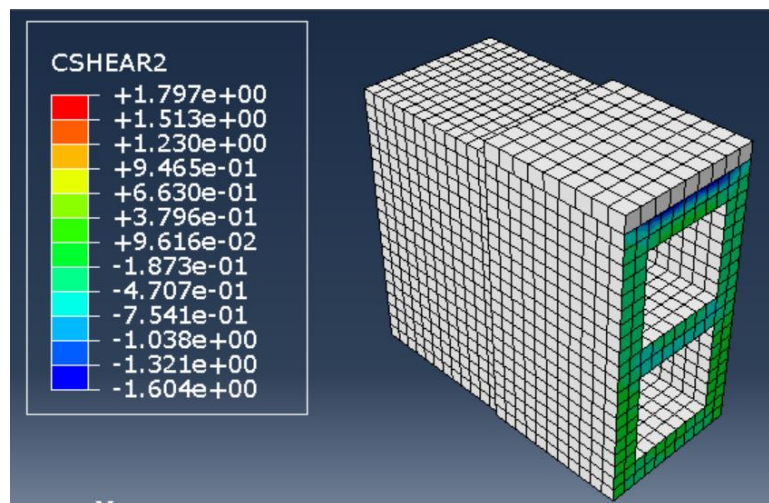


Figura 157 - Distribuição de Tensão – Tensão de pré-compressão 1.0MPa

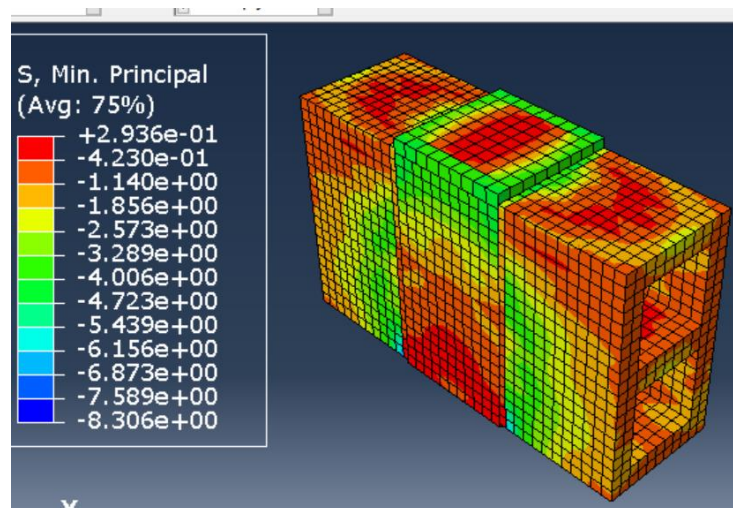


Figura 158 - Distribuição de Deformação – Tensão de pré-compressão 1.0MPa

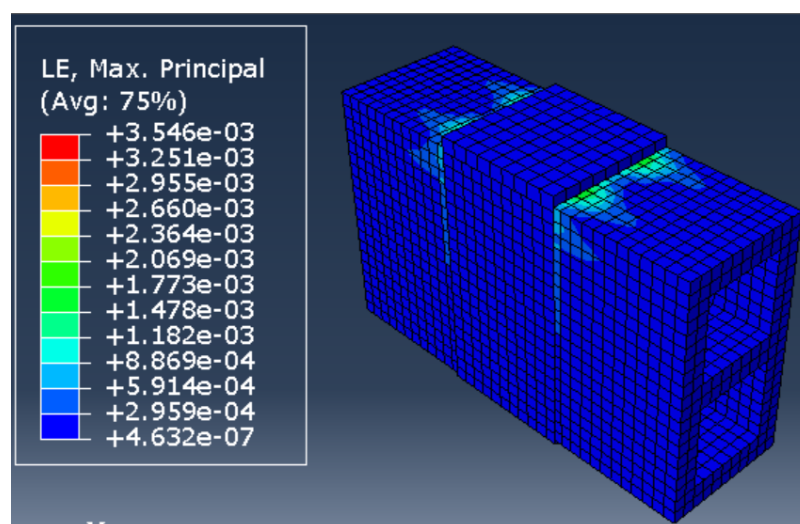
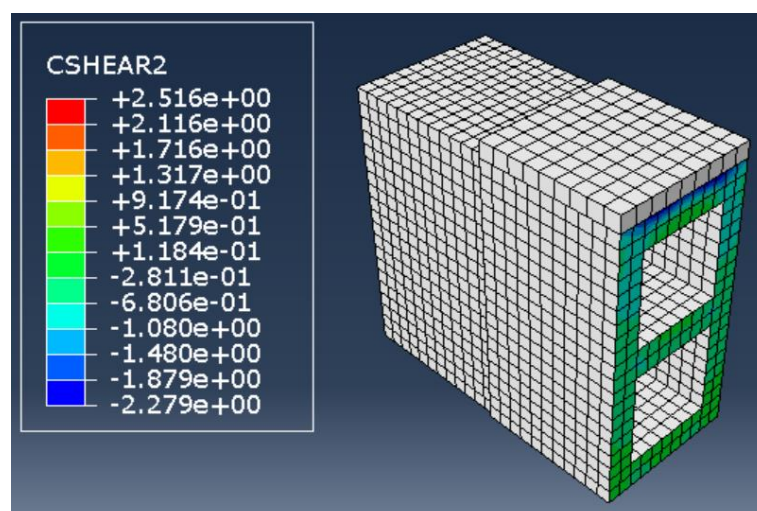


Figura 159 - Distribuição de Tensão de Cisalhamento – Tensão de pré-compressão 1.0MPa



Ao final da análise é apresentado, na tabela 120, um comparativo dos valores de resistência ao cisalhamento do modelo numérico e mlodeos experimentais considerando rigidez ao cisalhamento igual a 0,62MPa/mm. E comoresultado final dessa análise as propriedades de contato da interface bloco-argamassa são apresentados na tabela 121.

Tabela 120 – Compração entre os Modelos Numéricos e Experimental – Ks=0,62MPa/mm

Força 0,2 Mpa	Força 0,6MPa	Força 1,0MPa
9348,92	10598,4	15008,7
Tensão 02MPa	Tensão 06MPa	Tensão 1 Mpa
0,568599927	0,644593115	0,912826907
Pré Compressão		
0,2	0,6	1
Tensão Experimental		
0,516	0,699	1,009
0,907492202	1,084405005	1,105357426
Deslizamento Experimental Médio		
1,42	2,09	1,76
Deslizamento Numérico		
1,34	1,50	1,29
<u>Relação deslizamento Experimental e Numérico</u>		
1,05	1,39	1,36

Tabela 121 - Propriedades de Contato

Comportamento Normal (Normal Behavior)	Comportamento Tangencial (Tangential Behavior)		Comportamento Coesivo(Cohesive Behavior)			Dano (Damage)			Energia de Fratura
Contato Rígido (Hard Contact)	Coeficiente de Atrito	Tensão de Cisalhamento Limite	Kn	Ks	Kt	tn	ts	tt	Evolução do Dano
	0,61	Sem Limite	196	0,63	0,63	0,0853	0,37	0,37	0,9

8.6.7 Calibração do Modelo – Modelo Numérico sem Argamassa

O tópico anterior apresentou a modelagem considerando a presença da argamassa como elemento sólido e a interface foram elaborados considerando bloco – argamassa. No entanto, de acordo com o manual do Abaqus que diz que ao considerar o comportamento coesivo no modelo de dano, é semelhante a utilização de um elemento coesivo na construção do modelo numérico. A partir disso, nesse tópico é apresentada uma análise do mesmo modelo numérico criado no item 8.6, desconsiderando a argamassa como elemento constituinte do modelo e averiguando se os parâmetros de

propriedade de contato são suficientes para representação do comportamento tensão de cisalhamento vs deslizamento do modelo.

Algumas considerações sobre essa tentativa são apresentadas a seguir:

- a) Foi apenas retirado do modelo numérico a argamassa;
- b) As dimensões do bloco e suas propriedades elásticas e plásticas se mantiveram inalteradas;
- c) Para representação da propriedade de contato se utilizou os parâmetros finais apresentados na tabela 118;
- d) Foi considerando o mesmo deslocamento utilizado no processamento com a junta de argamassa que o foi o valor de 3mm.

Analogamente ao que foi aplicado no item 8.6, são apresentados a seguir os gráficos 69 a 73 que representam o comportamento para cada tensão de pré-compressão com e sem argamassa no modelo numérico.

Gráfico 69 - Tensão de Cisalhamento vs Deslizamento - Modelo com Argamassa

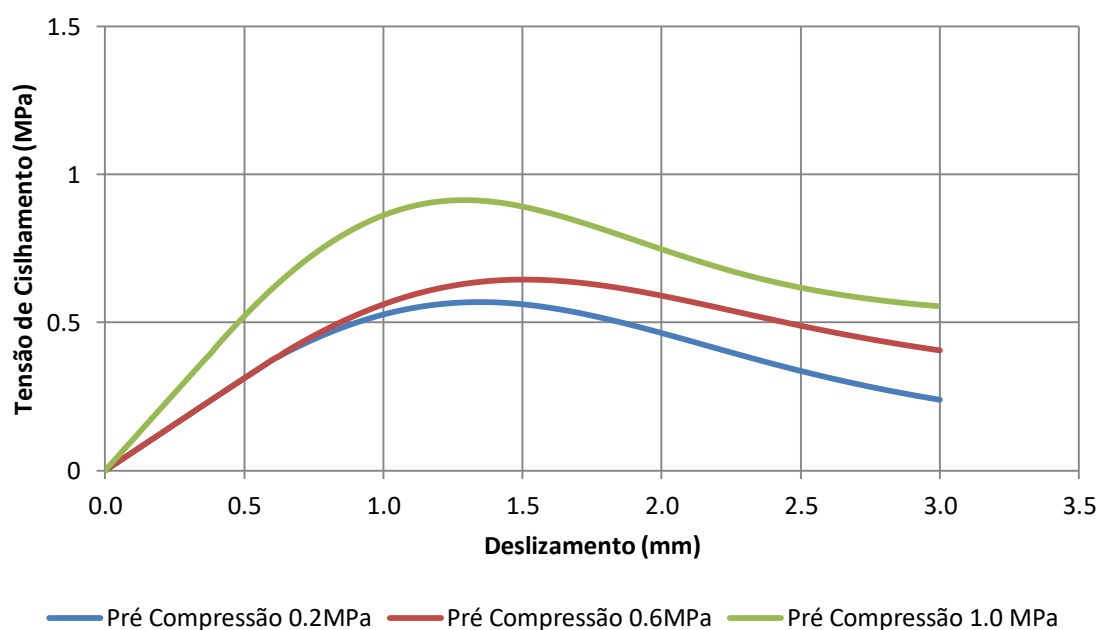


Gráfico 70 - Tensão de Cisalhamento vs Deslizamento - Modelo com Argamassa

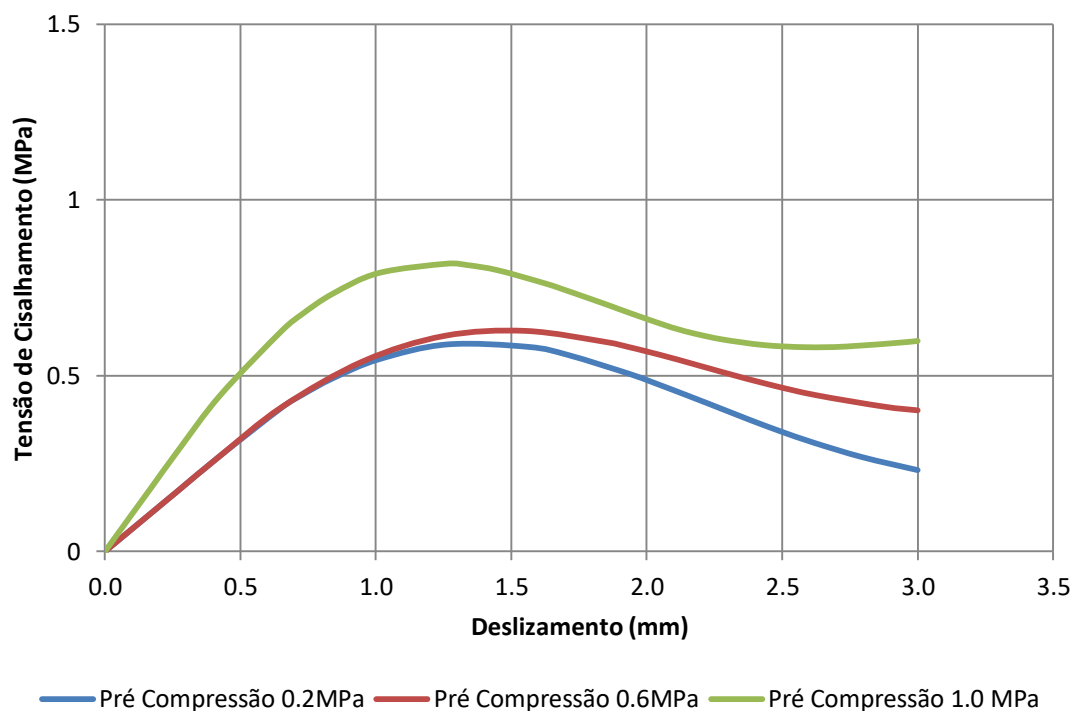


Gráfico 71 - Comparação entre Tensão de Cisalhamento vs Deslizamento – pré-compressão 0.2MPa

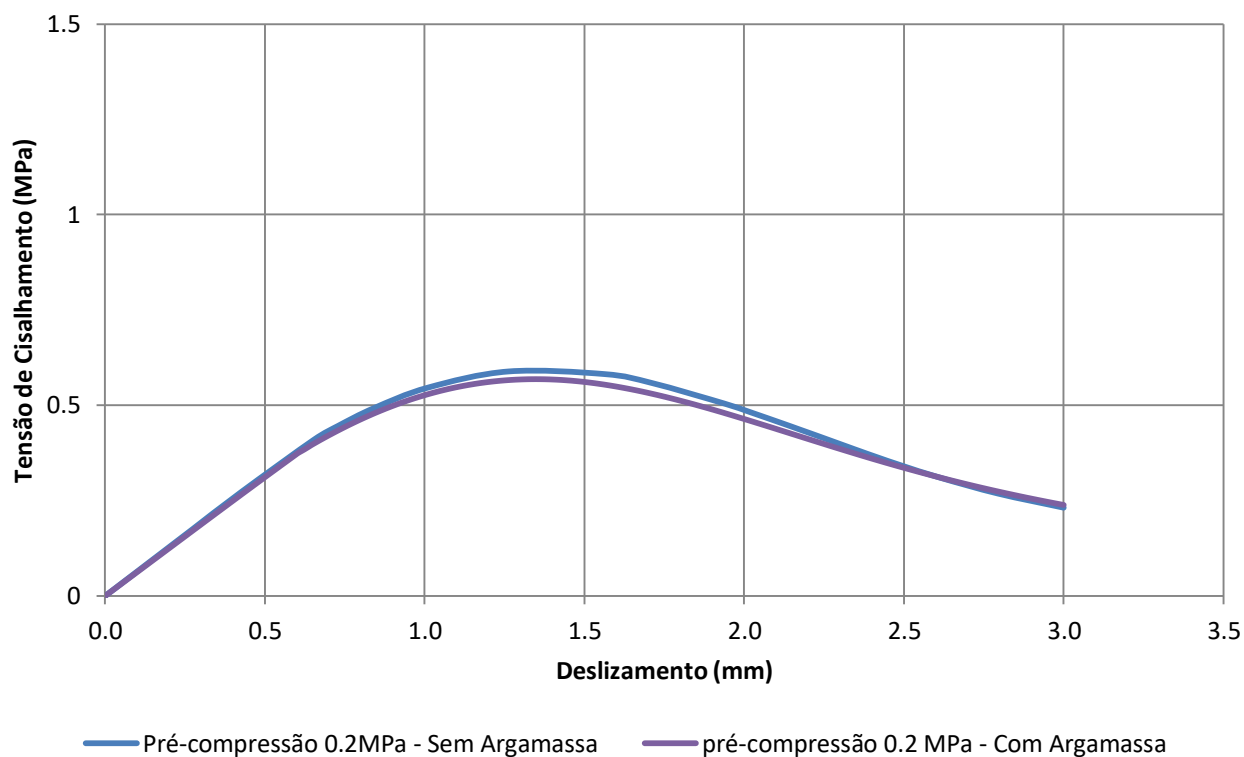


Gráfico 72 - Comparação entre Tensão de Cisalhamento vs Deslizamento – pré-compressão 0.6MPa

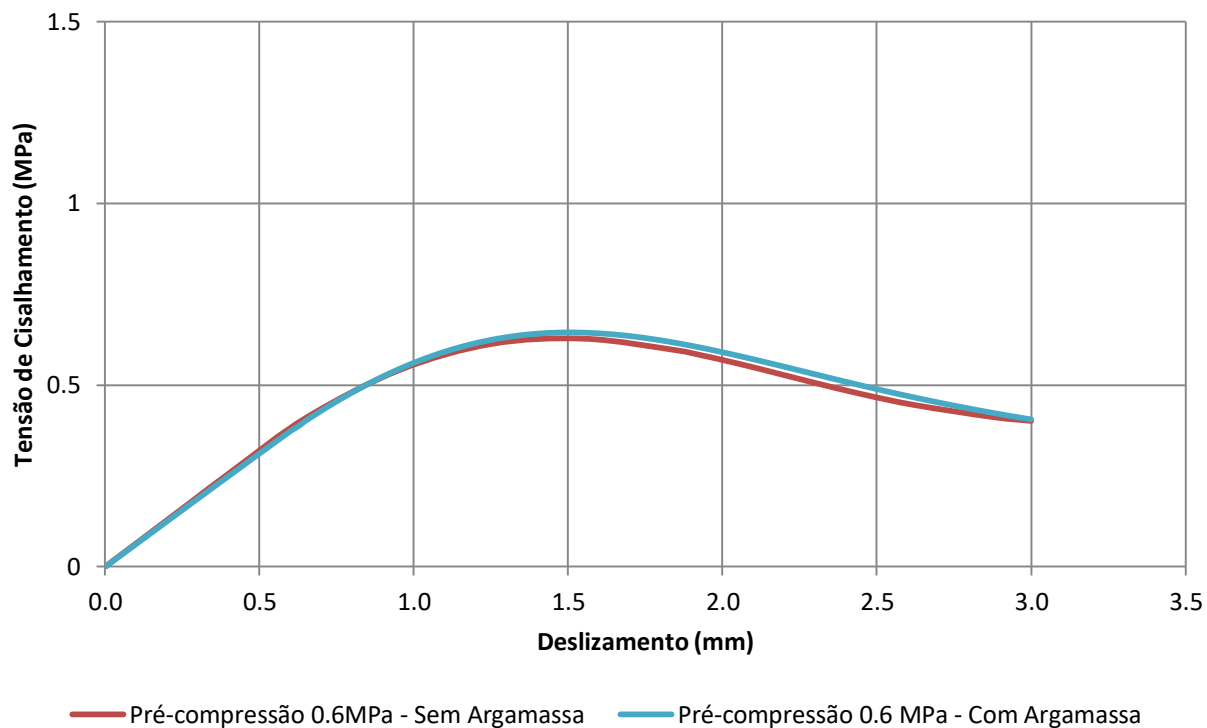
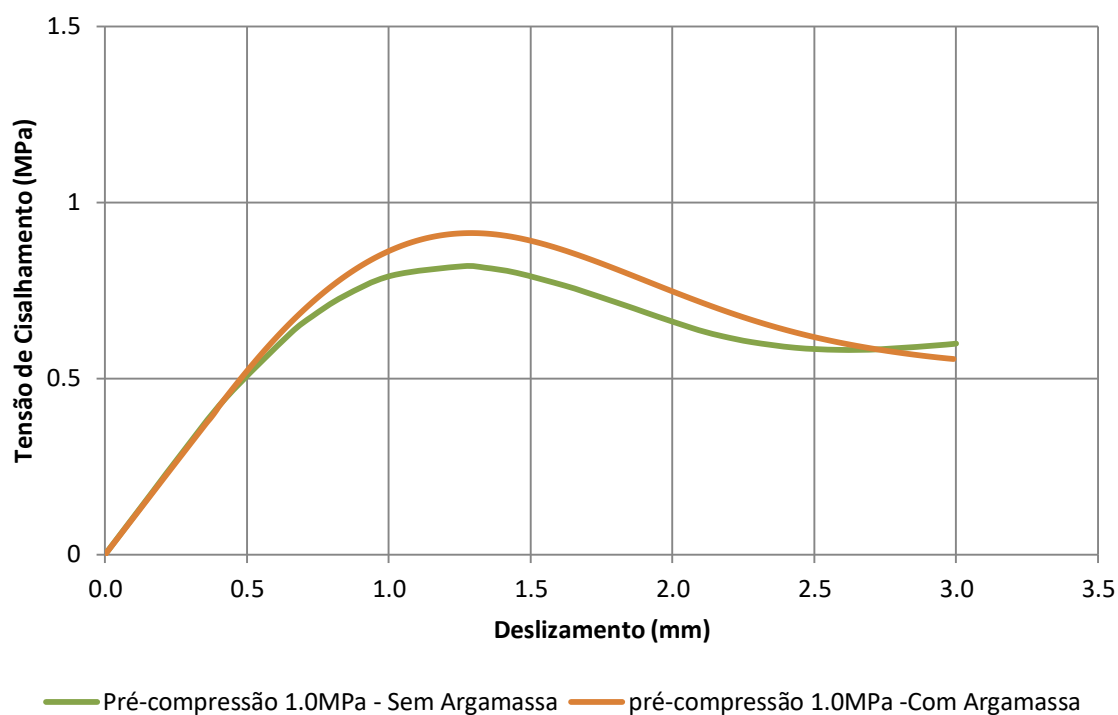


Gráfico 73 - Comparação entre Tensão de Cisalhamento vs Deslizamento – pré-compressão 1.0MPa



É possível notar que o modelo não apresentou grandes diferenças numéricas no que diz respeito ao comportamento das curvas de tensão de cisalhamento vs deslizamento. As diferenças, que foram poucas, se apresentam quando se analisa a distribuição de tensões e deformações no mo-

delo bem como o a distribuição de tensão de cisalhamento na face do bloco, as figuras 160 a 168 apresentam essas distribuições.

Figura 160 - Distribuição de Tensão - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 0.2MPa

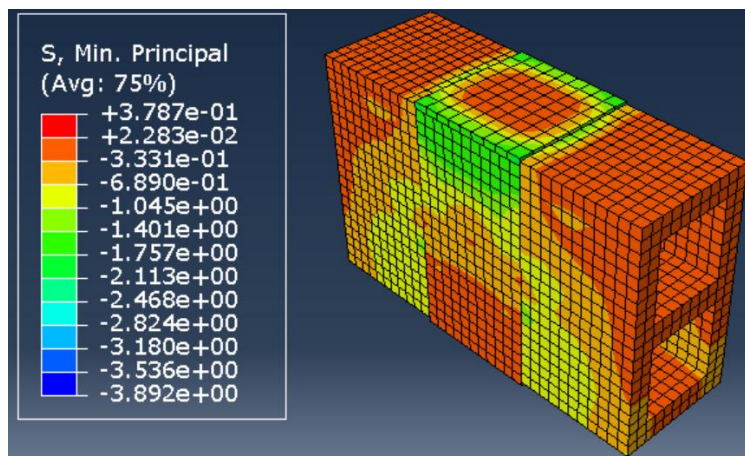


Figura 161 - Distribuição de Deformação - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 0.2MPa

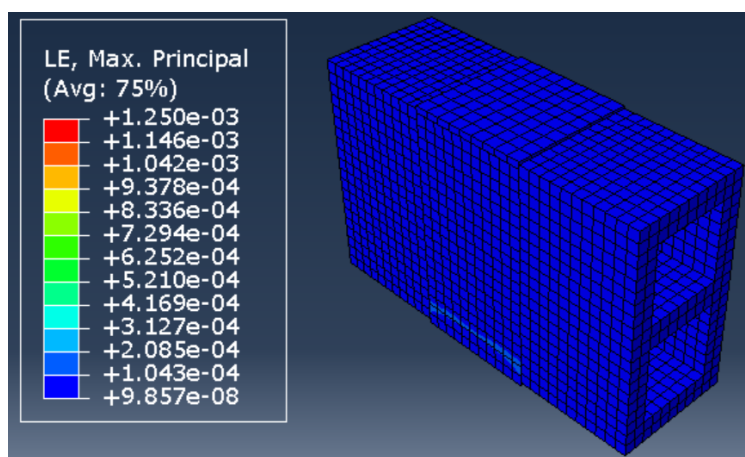


Figura 162 - Distribuição de Cisalhamento - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 0.2MPa

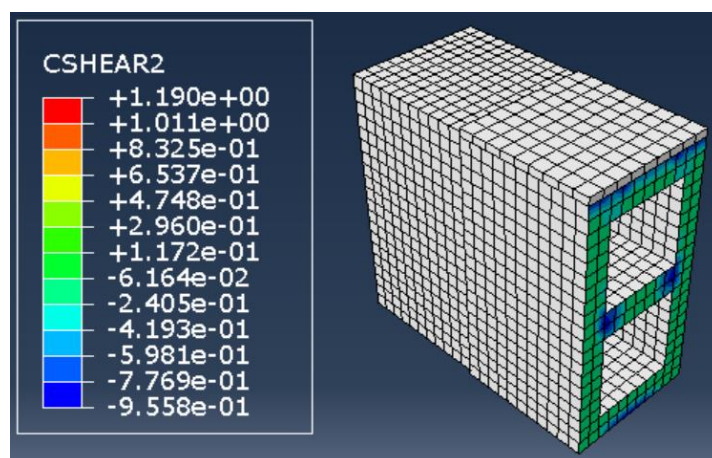


Figura 163 - Distribuição de Tensão - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 0.6MPa

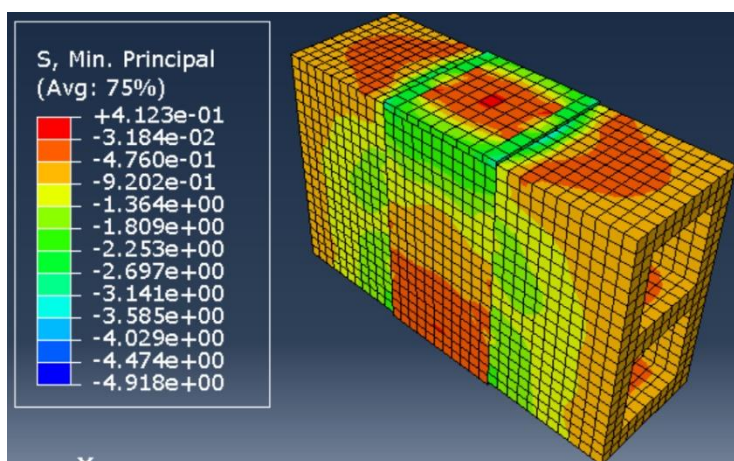


Figura 164 - Distribuição de Deformação - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 0.6MPa

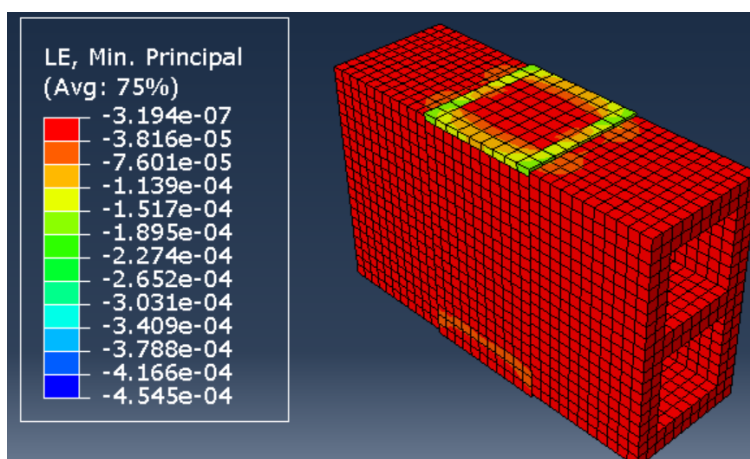


Figura 165 - Distribuição de Cisalhamento - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 0.6MPa

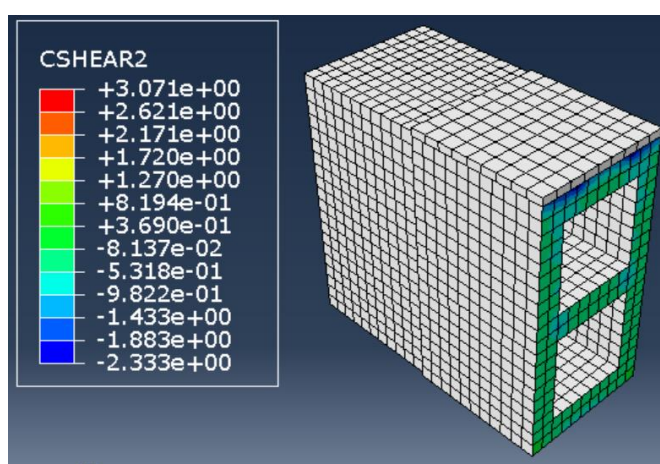


Figura 166 - Distribuição de Tensão - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 1.0MPa

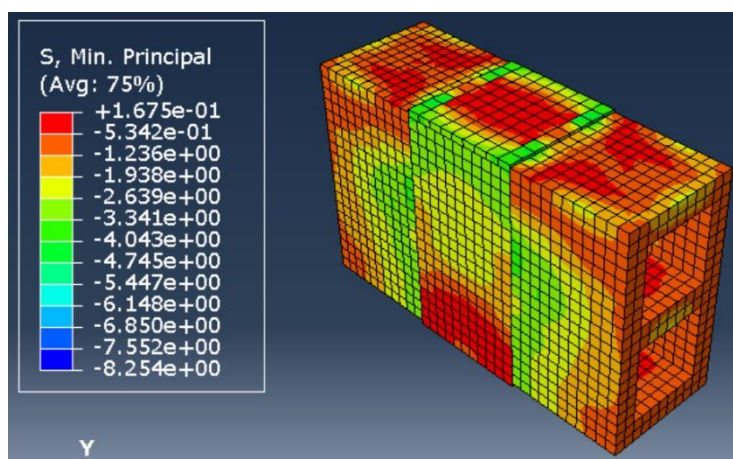


Figura 167 - Distribuição de Deformação - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 1.0MPa

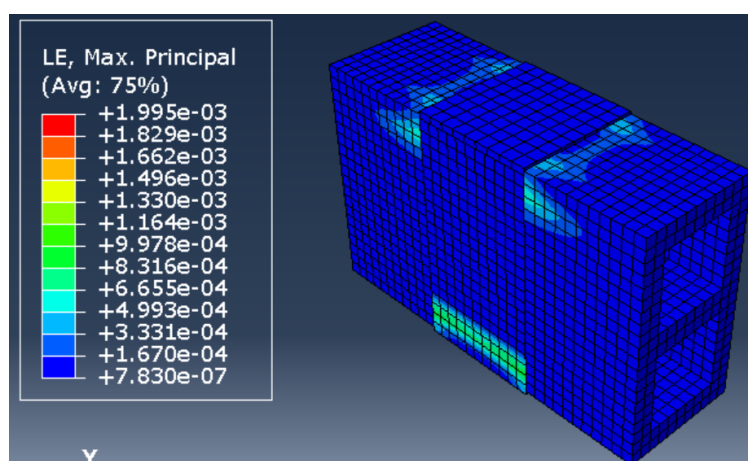
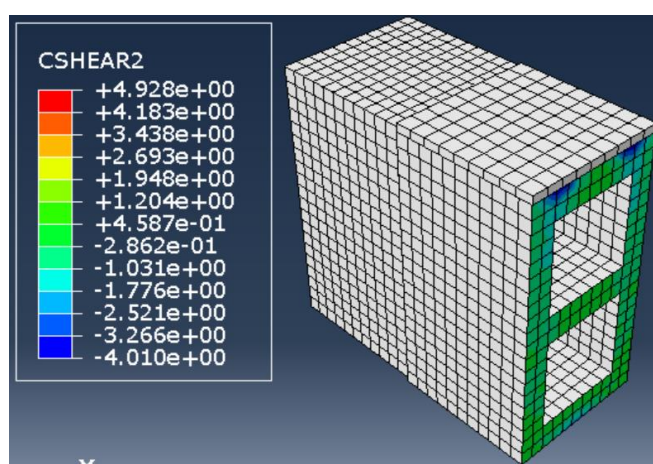


Figura 168 - Distribuição de Cisalhamento - Modelo Sem Argamassa – Tensão de pré-compressão 1.0MPa



Considerando as figuras apresentadas, é possível notar que há uma semelhança entre os modelos com e sem argamassa, com isso se verifica que existe a possibilidade de representação numérica da alvenaria conside-

rando a argamassa como propriedade de contato ao invés de compor o modelo como elemento sólido.

Realizando uma análise comparativa com os valores máximos numéricos (com e sem argamassa) e o resultado médio alcançado nos ensaios, tabela 122, observa-se que o comportamento coesivo apresenta uma boa aproximação para representação da interface entre bloco e argamassa.

Tabela 122 - Análise Comparativa dos Valores Experimentais e Modelos Numéricos Com e Sem Argamassa

		Experimental	Numérico com Argamassa	Numérico Sem Argamassa
Pré-compressão 0,2MPa	Tensão de cisalhamento	0,516	0,569	0,577
	Relação Tn/Tex	Não se Aplica	1,102	1,118
	Deslocamento	1,42	1,35	1,26
	Relação Dnum/Dex		0,949	0,889
	Relação Tnsa/Tncsa	Não se Aplica	1,015	1,723
	Relação Dnsa/Dnca		0,937	0,937
Pré-compressão 0,6MPa	Tensão de cisalhamento	0,699	0,645	0,606
	Relação Tn/Tex	Não se Aplica	0,922	0,867
	Deslocamento	2,09	1,50	1,25
	Relação Dn/Dex		0,719	0,883
	Relação Tnsa/Tncsa	Não se Aplica	0,940	0,940
	Relação Dnsa/Dnca		0,834	0,834
Pré-compressão 1,0MPa	Tensão de cisalhamento	1,009	0,913	0,640
	Relação Tn/Tex	Não se Aplica	0,905	0,634
	Deslocamento	1,76	1,29	1,25
	Relação Dn/Dex		0,735	0,712
	Relação Tnsa/Tncsa	Não se Aplica	0,701	0,701
	Relação Dnsa/Dnca		0,969	0,969

Onde:

Tn – tensão de cisalhamento referente ao modelo numérico;

Tex – tensão de cisalhamento referente ao modelo experimental;

Dn – deslocamento referente ao modelo numérico;

Dex – deslocamento referente ao modelo experimental;

Tnsa – tensão de cisalhamento referente ao modelo numérico sem argamassa;

Tncsa – tensão de cisalhamento referente ao modelo numérico com argamassa;

Dnsa – deslocamento referente ao modelo numérico sem argamassa

Dnca – deslocamento referente ao modelo numérico com argamassa.

Do ponto de vista computacional houve um ganho de processamento de aproximadamente 50% do tempo de processamento, considerando a configuração do computador a mesma para os dois modelos numéricos.

Sendo assim, evidencia-se as vantagens da simplificação do modelo são atrativas pois não apresentam comprometimento significativos no com-

portamento do modelo e ao mesmo tempo há um ganho de processamento que torna a análise mais viável e aplicável para estudo de estruturas maiores, como por exemplo, compressão diagonal que é próximo modelo a ser validado no item 8.7.

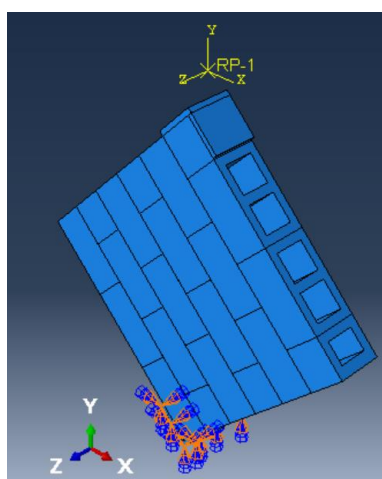
8.7 Modelos Numéricos – Ensaio de Compressão Diagonal

Neste item é apresentado o processo de validação do ensaio de compressão diagonal. De maneira análoga se segue a mesma estrutura textual utilizadas nos demais processos de calibração, porém apresentando em cada subitem as particularidades para o modelo em questão.

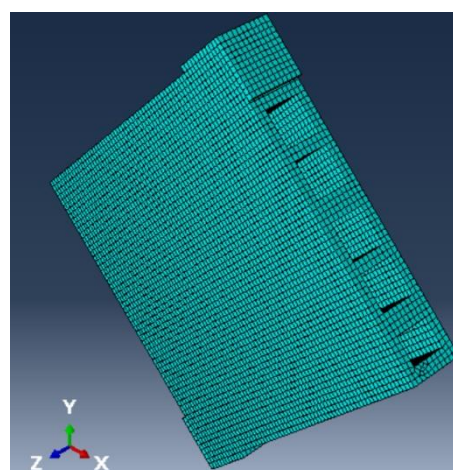
8.7.1 Criação do Modelo Parede Oca

Quanto à dimensão do modelo, se construiu uma parede com três blocos de largura por seis blocos de altura, conforme a figura 169.a a seguir. Além disso, o modelo foi rotacionado em 45° para que se pudesse considerar o deslocamento vertical do modelo. Considerando a mesma figura 169.a, observa-se que na base e no topo foi simulada a presença de um prato rígido, que assim como nos ensaios físicos, tem por objetivo uniformizar o deslocamento no modelo e não haver concentração de tensão. Ainda considerando a mesma figura 169.a há uma indicação de RP-1, semelhante ao que foi considerado nos demais modelos.

Figura 169 - Criação do Modelo - Condições de Contorno (a) e Estudo de Malha (b)



(a)



(b)

No que diz respeito as vinculações do modelo, foi considerado que as chapas da base não poderia, em nenhuma direção, transladar e rotacionar.

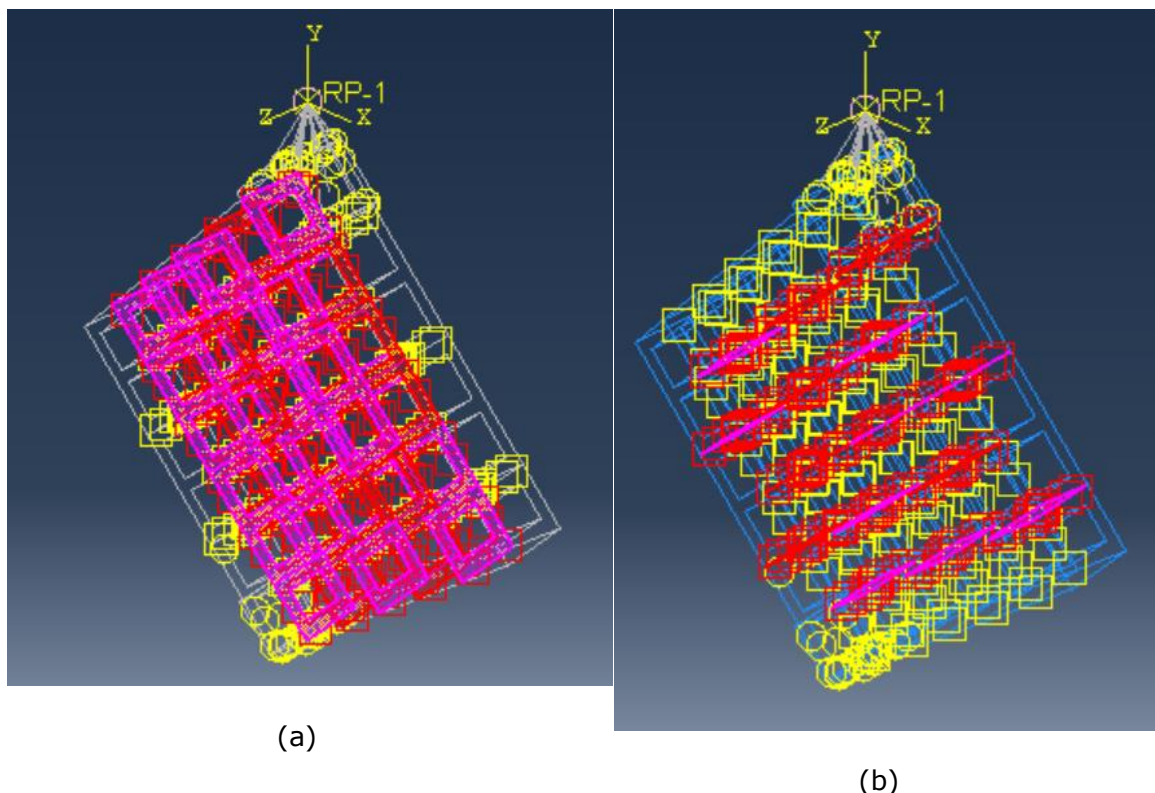
As propriedades de contato utilizadas no modelo foram às obtidas no último processo de validação do ensaio de cisalhamento da junta horizontal e são apresentados na tabela 123, a seguir.

Tabela 123 - Propriedades de Contato

Comportamento Normal (Normal Behavior)	Comportamento Tangencial (Tangential Behavior)		Comportamento Coesivo (Cohesive Behavior)			Dano (Damage)			
Contato Rígido (Hard Contact)	Coeficiente de Atrito	Tensão de Cisalhamento Limite	Kn	Ks	Kt	tn	ts	tt	Energia
	0,61	Sem Limite	196	0,63	0,63	0,0853	0,37	0,37	0,9

Na elaboração do modelo não foi considerado a argamassa como elemento sólido, mas que as propriedades da argamassa, seria considerada como parte constituinte da interface, a figura 170 apresenta as interfaces criadas.

Figura 170 - Elementos de Interface - Junta Horizontal (a) e Vertical (b)



Prosseguindo na criação da interface dos modelos, foi imposto ao modelo, análogo ao que foram realizados no modelo de junta horizontal, alguns contatos considerando a função *tie* para criação de contato entre as

chapas da base e parede e da mesma forma com as chapas do topo. Sobre as chapas de topo foi criado uma interação de contato, através da função *coupling*(acoplamento), para que o deslocamento aplicado no ponto RP-1 fosse aplicado nas duas chapas de topo.

8.7.2 Calibração do Modelo - considerando a mesma propriedade de contato considerada no ensaio de cisalhamento junta horizontal

Antes de apresentar o procedimento para calibração do modelo de compressão diagonal são mostrados os gráficos de tensão vs deformação dos ensaios de parede oca, gráfico 74, sujeita a compressão diagonal, e a tabela 124 apresenta os valores referentes ao deslocamento horizontal e vertical de cada corpo de prova

Gráfico 74 - Compressão Diagonal Parede Oca - Força x Deslocamento

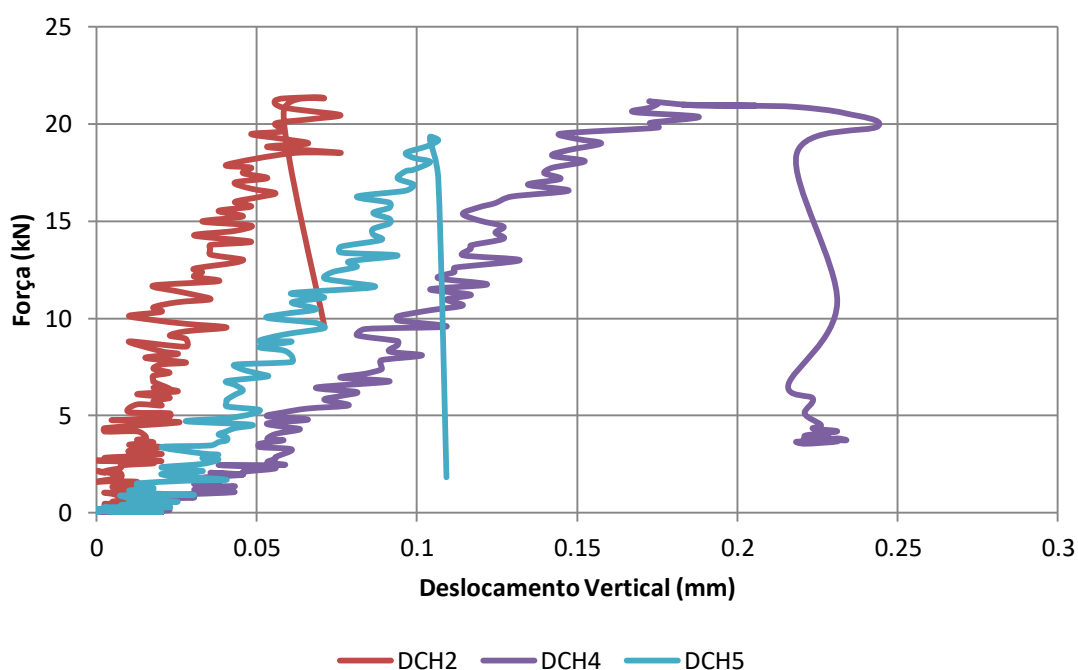


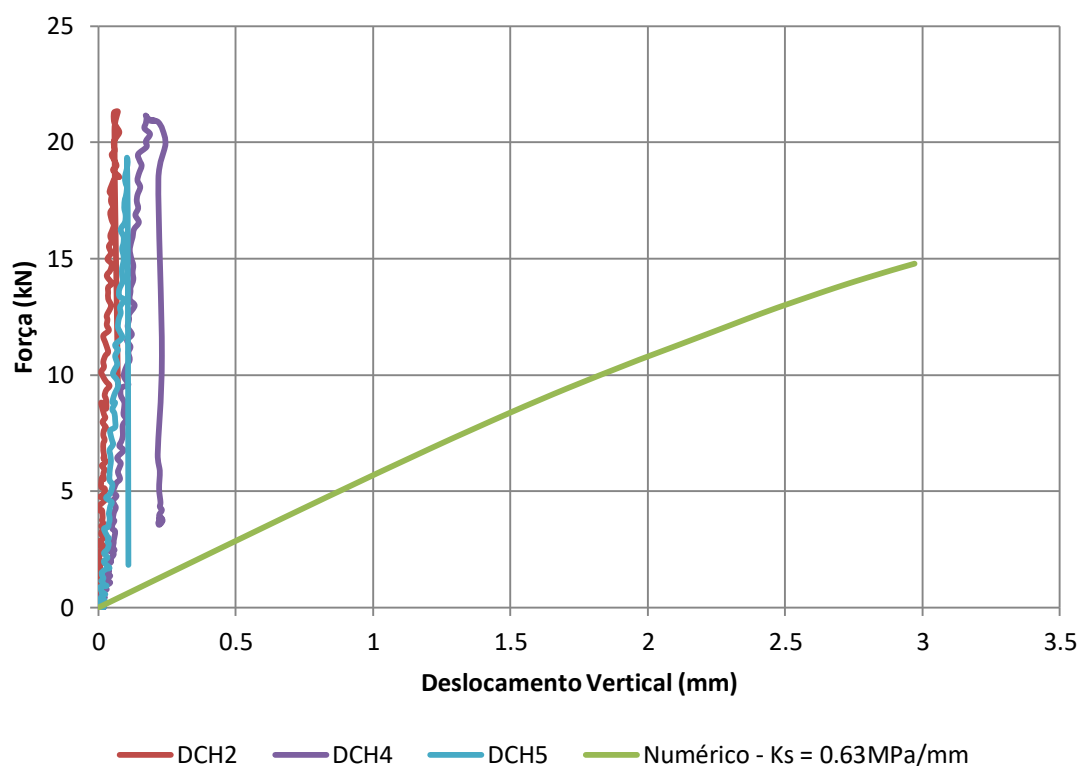
Tabela 124 – Resultados da ruptura dos corpos de prova

Amostra	Força Máxima (kN)	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)
dch2	21,47	0,01016	0,07112
dch4	21,35	0,12192	0,17272
dch5	19,87	0,07112	0,11938
Média	20,90	0,06773	0,12107

Em todos os modelos numéricos que serão apresentados a partir de agora foi considerado um deslocamento maior ao que foi alcançado nos ensaios experimentais para que, de alguma forma, pudesse verificar após a tensão de pico e em todos os casos foi considerado um deslocamento de 1mm, considerando que deslocamento médio na tensão de pico dos ensaios foi de 0,18mm.

Com base no gráfico 75 e na tabela 124 apresentada anteriormente, observa-se que força máxima alcançada no modelo foi de aproximadamente 20kN para um deslocamento de 0.12mm. Como primeira tentativa de calibração foi considerada o conjunto de informações sobre contato obtido no item anterior 8.6, conforme tabela 124, porém o gráfico 75 de força vs deslocamento do modelo numérico apresentou o seguinte comportamento para esse conjunto de propriedade de contato.

Gráfico 75 – Comparação Experimental e Numérico - Força vs Deslocamento - $K_s=0.63\text{MPa/mm}$



A força máxima obtida foi de aproximadamente 5,7kN e um deslocamento de 1mm. Destaca-se que com esses valores de propriedades de contato o modelo não chegou a apresentar algum trecho inelástico considerando o deslocamento de 1mm, tendo em vista que o modelo experimental apresenta um deslocamento de médio de 0,12mm.

8.7.3 Calibração do Modelo - considerando equação proposta por Lourenço et al (2005)

Conforme comentado no processo de calibração anterior o conjunto de parâmetro que apresenta grande relevância no comportamento inelástico do modelo numérico são as propriedades coesivas. Fez-se necessário uma análise dos parâmetros do comportamento coesivo (K_s e K_t) novamente, mas agora para o modelo de compressão diagonal. Seguindo o procedimento semelhante ao que foi realizado no modelo numérico de validação dos ensaios de cisalhamento da junta horizontal, foi considerado o valor de rigidez ao cisalhamento obtido através da equação proposta por Lourenço et al (2005), cujo valor foi de 117MPa/mm, o gráfico 74 apresenta o comportamento do modelo numérico considerando $K_s=117\text{MPa/mm}$ e as figuras 171.a a 171.d, apresentam a distribuição de tensão, deformação, dano à compressão e a tração, respectivamente, considerando o valor de força máxima que foi de 22,6kN com um deslocamento de 0,1154mm, considerando os valores experimentais se alcançou uma ótima aproximação, cerca de 92%, na força aplicada, porém o deslocamento ficou relativamente distante do valor alcançado com uma aproximação de 95%.

Gráfico 76 - Comparação Experimental e Numérico - Força vs Deslocamento - $K_s=117\text{MPa/mm}$

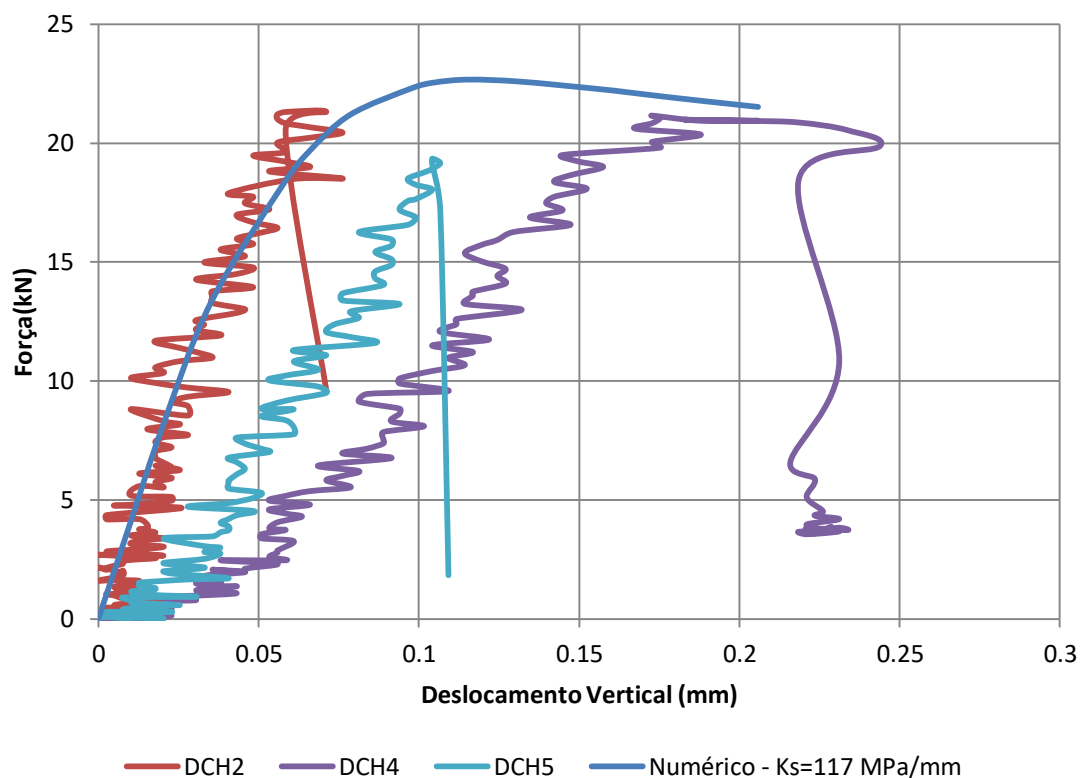
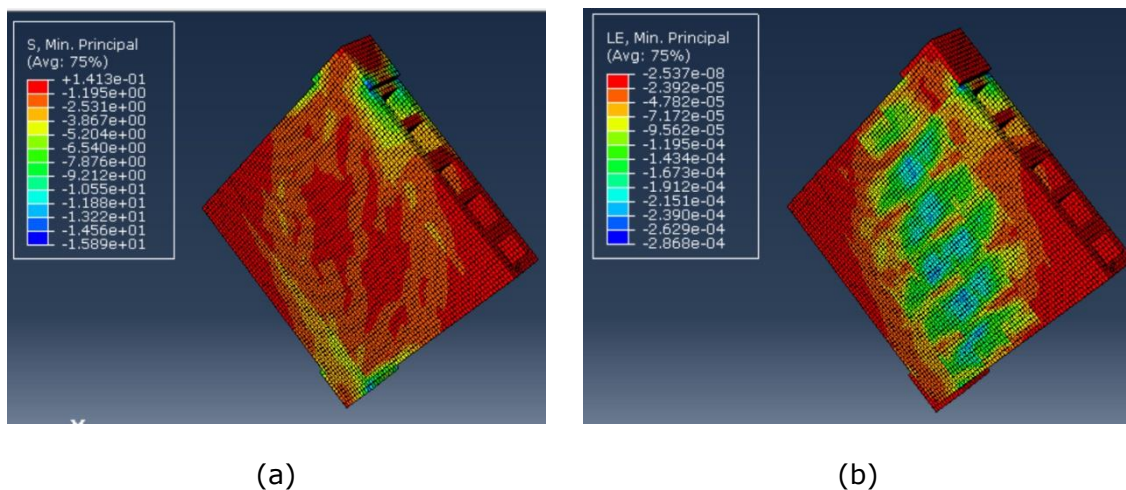
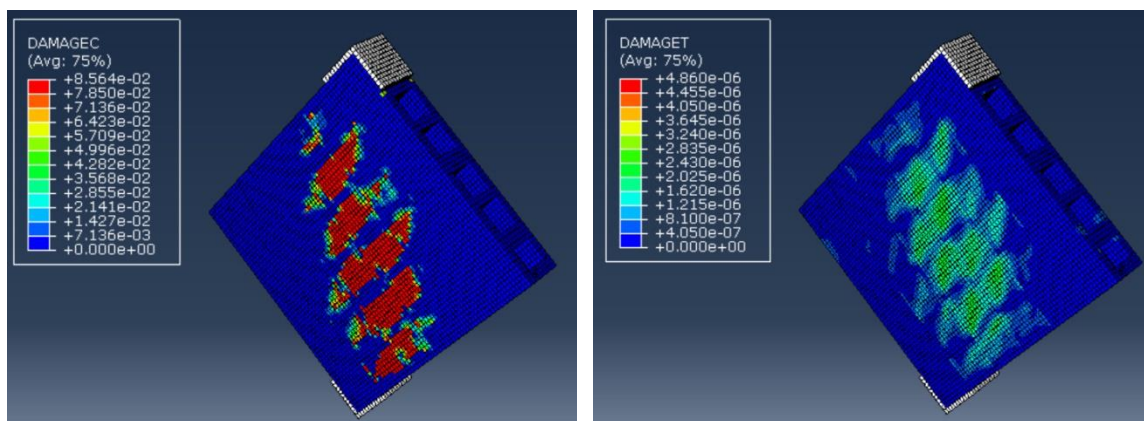


Figura 171 – Distribuição de Tensão (a) – Deformação (b) – Dano a Compressão (c) e Dano a Tração (d) – considerando deslocamento de 0.1154mm





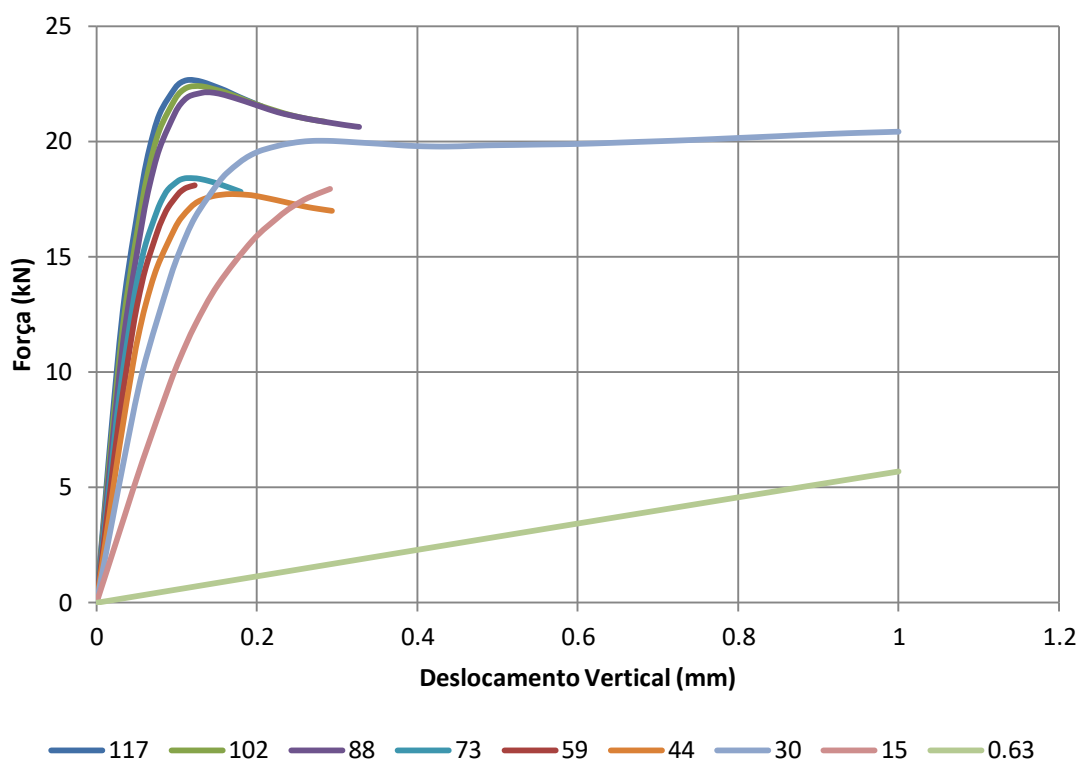
(c)

(d)

Analisando o comportamento das curvas do gráfico X e X, nota-se que o valor de parâmetro de rigidez ao cisalhamento apresenta um impacto significativo no comportamento do modelo considerando uma análise global do mesmo. Tendo em vista isso foi analisado um conjunto de valores rigidez ao cisalhamento considerando como limites os valores que foram utilizados nessa primeira modelagem que foram 0,63MPa/mm, obtido a partir da modelagem numéricos dos ensaios de cisalhamento da junta horizontal, e 117 MPa/mm, obtido por meio da equação de Lourenço et al (2005).

8.7.4 Análise do Valor de Ks

Para essa análise foram considerados 8 valores de rigidez ao cisalhamento de maneira que o limite inferior foi 0,63MPa/mm e o limite superior de 117MPa/mm. Sendo assim, os valores de rigidez ao cisalhamento foram os seguintes: 0.63, 15, 30, 45, 58, 73, 88, 102 e 117, todos os valores são expressos em MPa/mm. O gráfico 77, demonstra as curvas de força vs deslocamento do modelo numérico considerando cada um dos parâmetros de rigidez ao cisalhamento e tabela 125 apresenta um comparativo entre os dados experimentais (força máxima e deslocamento último) com os valores obtidos numericamente.

Gráfico 77 - Análise Ks - Força vs Deslocamento**Tabela 125 - Comparação entre os valores de força última, deslocamento último e módulo de elasticidade secante - Experimental e Numérico.**

Ks	Fmn (kN)	Dmn (mm)	Esec, mn (kN/mm)	Fexp (kN)	Fmn/Fexp	dexp	dmn/dexp	Esec, exp (kN/mm)	ln/le
0,63	5,69	1	5,69		0,248		5,375		0,046
15	18,74	0,441	42,48		0,816		2,370		0,344
30	20,03	0,278	72,15		0,873		1,492		0,585
44	17,72	0,169	104,64		0,772		0,910		0,848
59	18,12	0,138	131,63		0,789		0,740		1,067
73	18,41	0,112	163,94	20,90	0,802	0,12107	0,604	173	1,329
88	22,13	0,137	161,08		0,964		0,738		1,306
102	22,39	0,131	170,40		0,975		0,706		1,381
117	22,67	0,115	196,47		0,988		0,620		1,593
70	21,70	0,155	140,13		0,945		0,832		1,136

Onde:

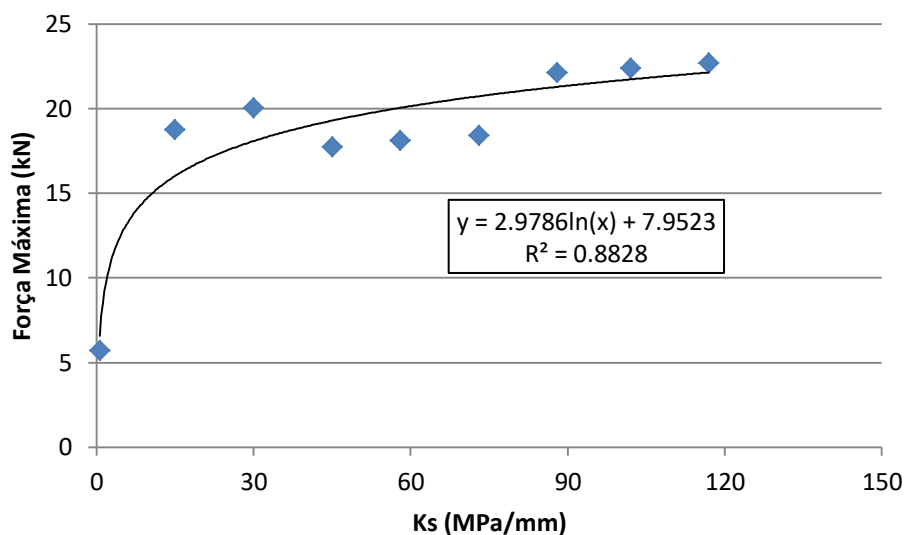
mn – modelo numérico

exp – modelo experimental

Observa-se, pela tabela 125, que a relação de aproximação entre força e deslocamento são inversamente proporcionais, ou seja, ao aumentar o Ks ocorre um aumento na força alcançada porém o deslocamento do modelo é restringido, porém essa variação não compromete o aumento do valor da inclinação considerando que com o aumento da rigidez aumento grada-

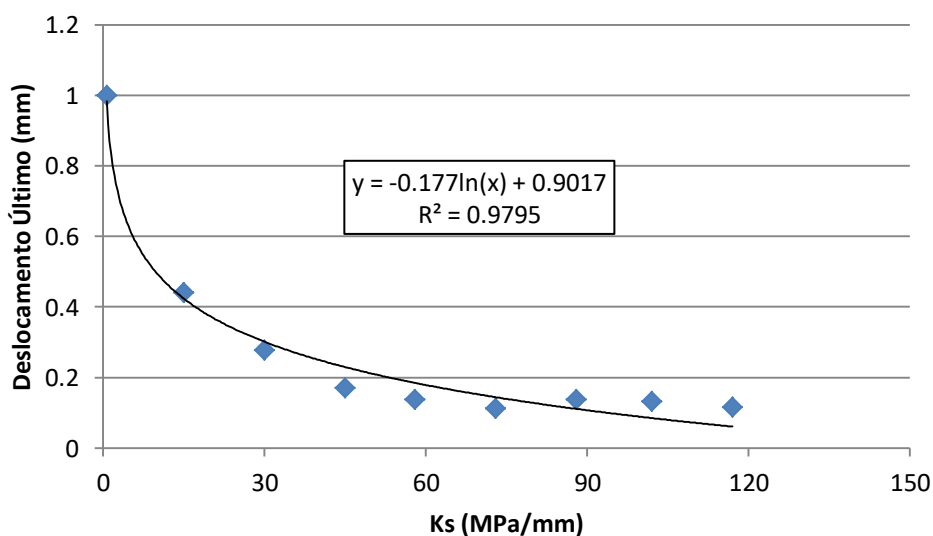
tivamente. A partir dos dados alcançados na tabela 125 plotou-se três gráficos, 78 a 80, que apresentam a maneira como os parâmetros de força máxima, deslocamento, e módulo de elasticidade secante se relacionam com os valores de K_s .

Gráfico 78 - Força Última x K_s



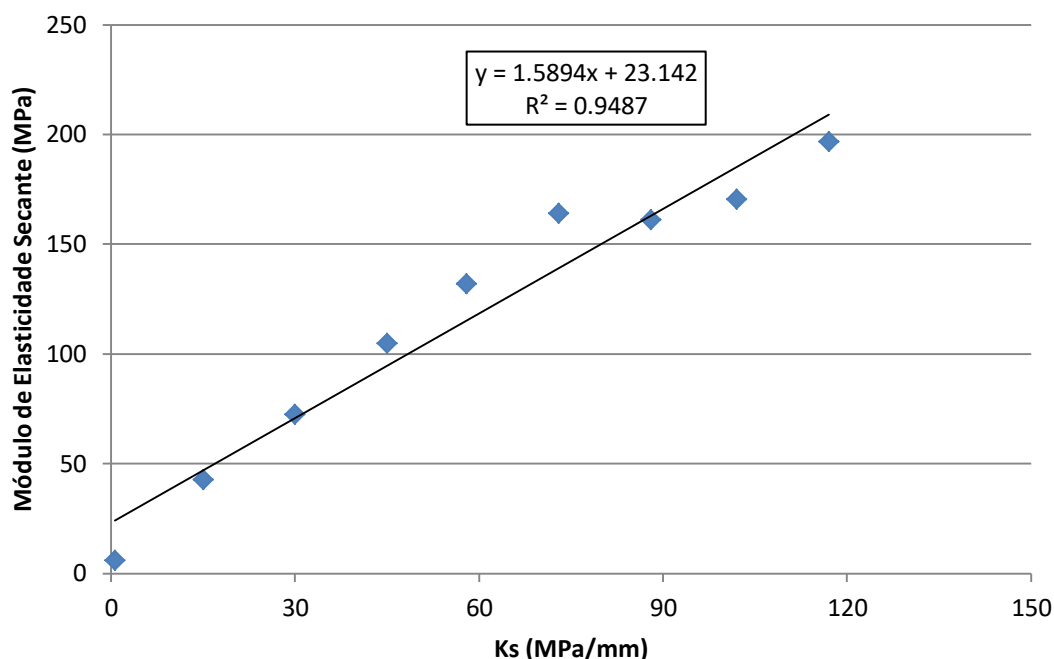
A partir da análise do gráfico 77, observa-se que a partir do valor de $K_s = 50 \text{ MPa/mm}$ os valores de força não apresentam grandes diferenças no valor da força a ser obtido por meio da equação. Além disso, o valor de R^2 é considerado satisfatório tendo em vista a análise de um parâmetro que apresenta, na literatura, uma diversidade nos valores.

Gráfico 79 - Deslocamento Último x K_s



Quanto ao deslocamento, gráfico 79, é possível afirmar que os valores apresentaram boa correlação com os parâmetros de rigidez ao cisalhamento, uma vez que foi obtido um R^2 igual a 0,9795.

Gráfico 80 - Módulo de Elasticidade Secante x Ks



Quanto ao módulo de elasticidade secante do modelo, gráfico 80, é possível notar que a influência do Ks apresenta um comportamento linear e crescente. A razão para isso é devido ao comportamento dos gráficos 77 e 78, uma vez que ao aumentar o valor de Ks tem – se que o valor da força de ruptura aumenta enquanto que o valor do deslocamento diminui. Sendo assim, o módulo de elasticidade secante apresentará um aumento a medida que se aumenta o valor de Ks.

Para melhor análise das equações é apresentado nas tabelas 126 a 128, comparação entre os valores numéricos (força de ruptura, deslocamento último e módulo de elasticidade secante) para cada valor de Ks com os valores obtidos através das equações das linhas de tendência dos gráficos 78 a 80.

Tabela 126 - Comparação entre os valores de forças últimas - Experimental, Numérico e Analítico

Ks	Força Média de Ruptura	Força de Ruptura - Modelo Numérico	Força de Ruptura - Linha de Tendência	Fmn/Fexp	Flt/Fexp	Flt/Fmn
0,63	20,90	5,69	6,58	0,272	0,315	1,155
15		18,74	16,02	0,896	0,766	0,855
30		20,03	18,08	0,958	0,865	0,903
44		17,72	19,29	0,848	0,923	1,089
59		18,12	20,15	0,867	0,964	1,112
73		18,41	20,73	0,881	0,992	1,126
88		22,13	21,29	1,059	1,019	0,962
102		22,39	21,73	1,071	1,040	0,970
117		22,67	22,14	1,085	1,059	0,977
70		21,70	20,61	1,038	0,986	0,950

Tabela 127 - Comparação entre os valores de deslocamento último - Experimental, Numérico e Analítico

Ks	Deslocamento último de Ruptura	Deslocamento - Modelo Numérico	Deslocamento - Linha de Tendência	Dmn/Dexp	Dlt/Dexp	Dlt/Dmn
0,63	0,12107	1,000	0,983	8,260	8,123	0,983
15		0,441	0,422	3,643	3,489	0,958
30		0,278	0,300	2,293	2,475	1,079
44		0,169	0,228	1,399	1,883	1,346
59		0,138	0,177	1,137	1,462	1,286
73		0,112	0,142	0,928	1,175	1,267
88		0,137	0,109	1,135	0,902	0,795
102		0,131	0,083	1,085	0,686	0,632
117		0,115	0,059	0,953	0,486	0,510
70		0,155	0,150	1,279	1,237	0,967

Tabela 128 - Comparação entre os valores de módulo de elasticidade secante - Experimental, Numérico e Analítico

Ks	Módulo de Elasticidade Secante Médio	Módulo de Elasticidade Secante Numérico	Módulo de Elasticidade Secante - Linha de Tendência	Emn/Eexp	Elt/Eexp	Elt/Emn
0,63	173	6	7	0,033	0,039	1,175
15		42	38	0,246	0,220	0,893
30		72	60	0,418	0,350	0,836
44		105	85	0,606	0,490	0,809
59		132	114	0,763	0,659	0,865
73		164	146	0,950	0,844	0,889
88		161	195	0,933	1,129	1,210
102		170	262	0,987	1,515	1,535
117		196	377	1,138	2,181	1,916
70		140	138	0,812	0,797	0,982

Onde:

mn – modelo numérico

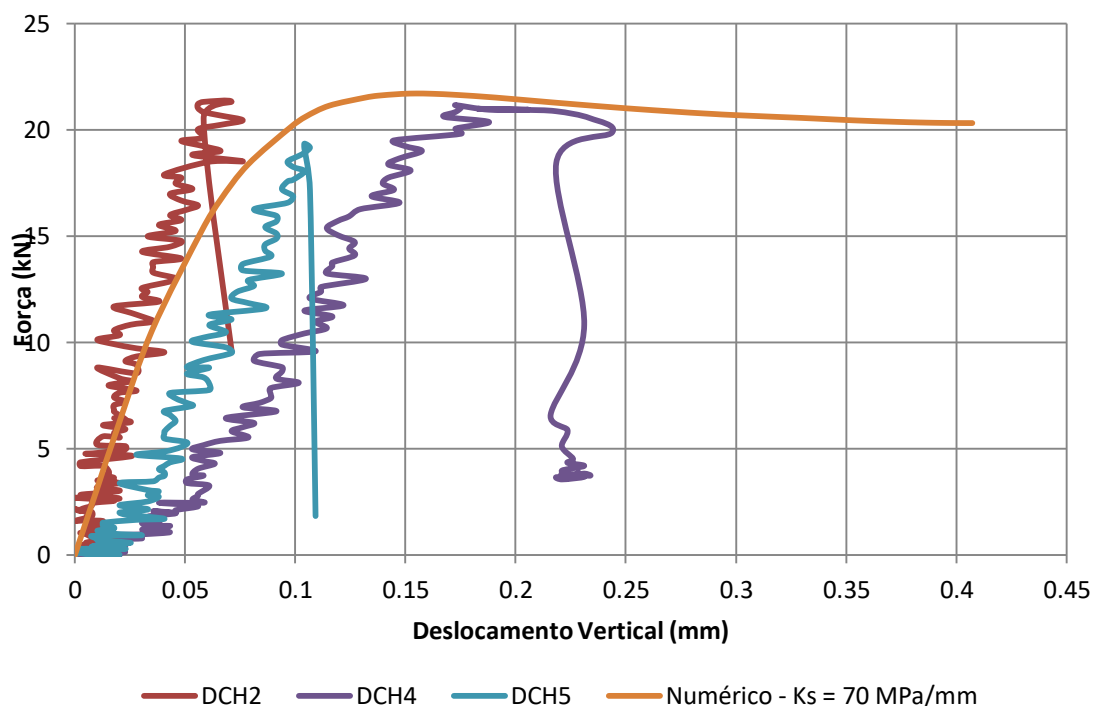
exp – modelo experimental

lt – linha de tendência

Com base nas tabelas é possível notar uma boa aproximação dos valores numéricos em comparação com os valores obtidos pelas equações. Além disso considerando as equações propostas se chegou no valor de parâmetros de rigidez 70MPa/mm e com esse valor de parâmetro se alcançou o seguinte gráfico de força vs deslocamento, gráfico 81.

Por essa razão, o valor do parâmetro de rigidez ao cisalhamento para paredes de compressão diagonal oco utilizado para representação dos modelos numéricos para esse tipo de ensaio é 70MPa/mm. A seguir são apresentadas as figuras, 172 a 175, que representam a distribuição de tensão, deformação, dano à compressão e à tração, respectivamente.

Gráfico 81 - Comparação Experimental e Numérico - Força vs Deslocamento - $K_s=70\text{MPa/mm}$



Considerando o $K_s=70\text{MPa/mm}$ se alcançou o valor de força de ruptura igual 21,7kN enquanto que o valor de força ruptura média experimental foi de 20,9kN e a relação entre os valores é de aproximadamente 95%. Quanto ao deslocamento a aproximação foi de aproximadamente 83%, uma vez que os valores de deslocamento numérico e experimental foram de 0,15mm e 0,12mm, respectivamente.

Figura 172 - Distribuição de Tensão

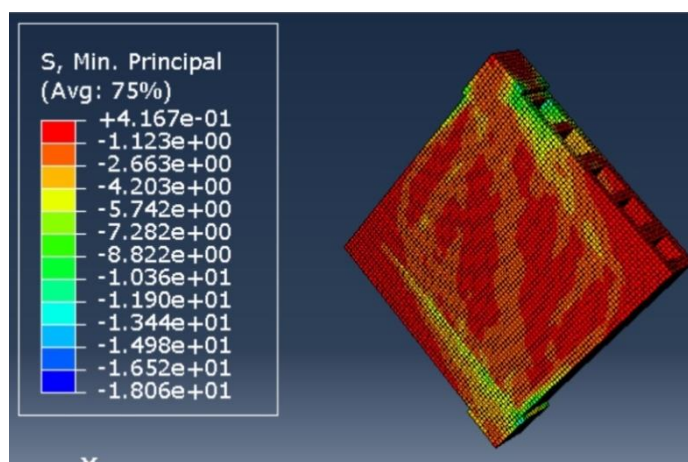
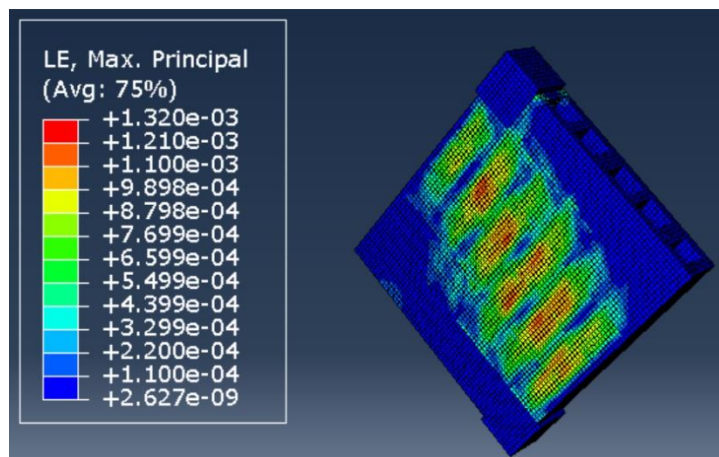
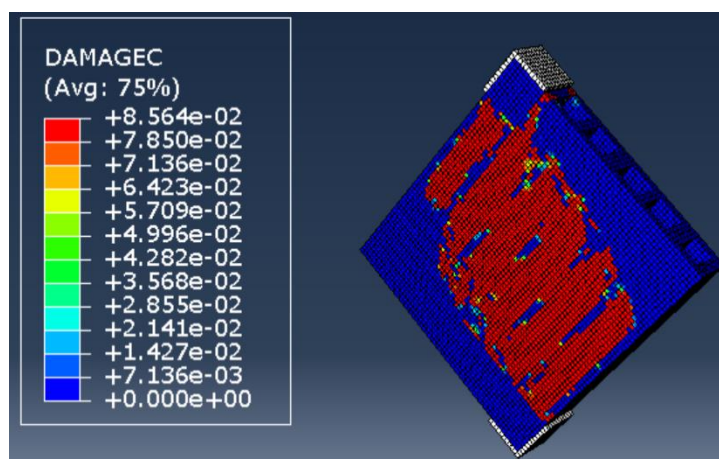
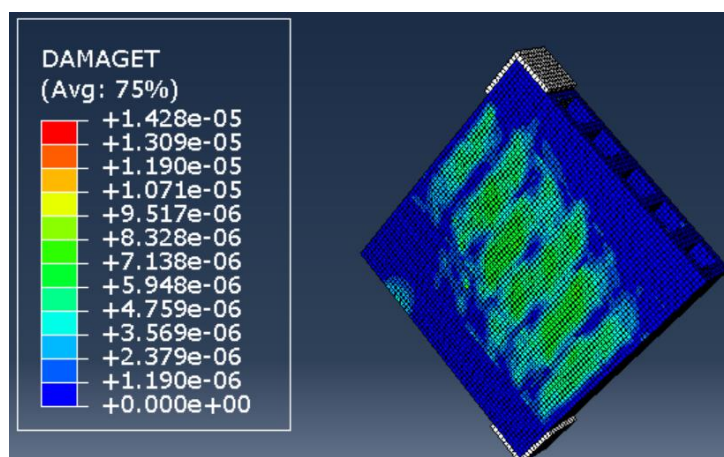


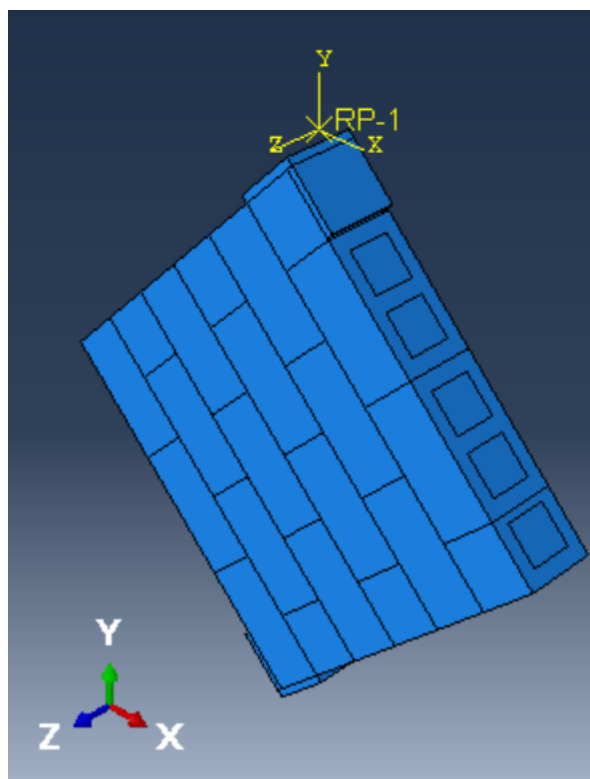
Figura 173 - Distribuição de Deformação**Figura 174 - Distribuição de dano à compressão****Figura 175 - Distribuição de dano à tração**

8.7.5 Calibração do Modelo de Ensaio de Compressão Diagonal - Parede Totalmente Grauteada

Quanto ao modelo das paredes grauteadas, conforme figura 176, foi necessário algumas adaptações no modelo, como por exemplo, na criação

da interface entre bloco e graute que foi considerado os valores 885MPa/mm para rigidez normal da interface e 370MPa/mm para rigidez ao cisalhamento (esses valores foram obtidos através da equação proposta por Lourenço et al (2005)).

Figura 176 – Modelo de Parede Grauteada

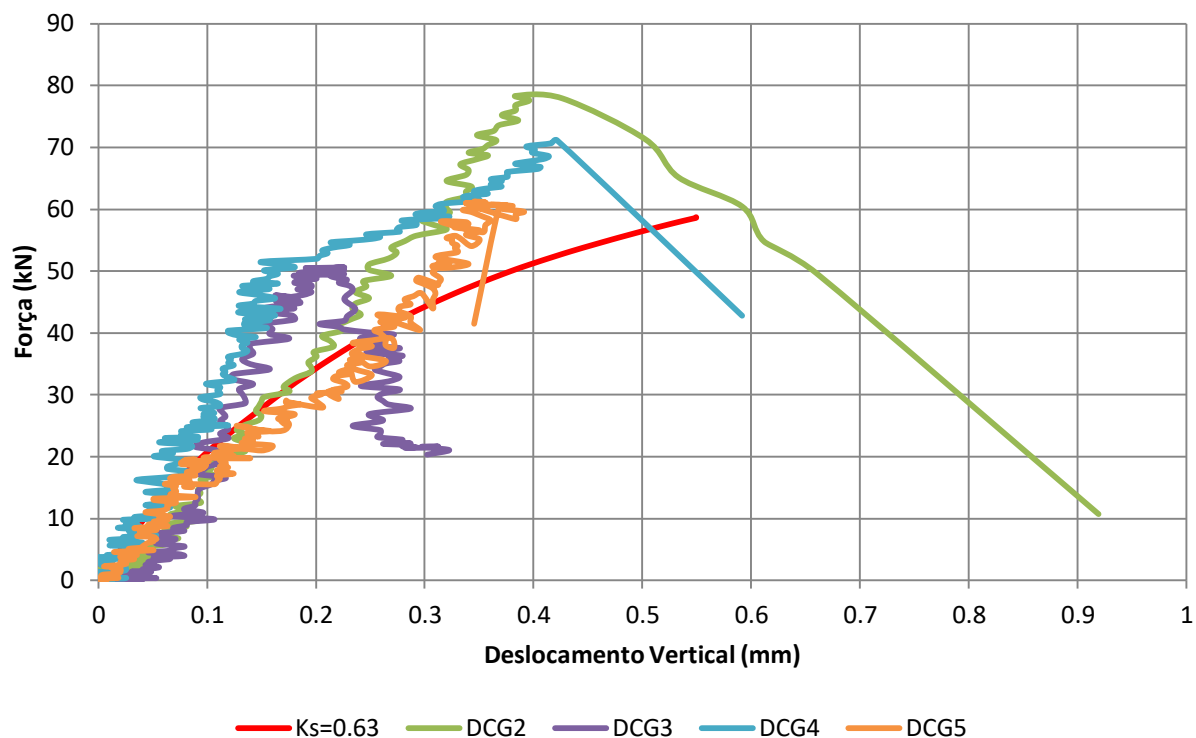


Além disso para análise do comportamento da curva de tensão vs deformação, se utilizou em um primeiro momento os valores obtido no processo de calibração do numérico da parede oca que se alcançou para rigidez ao cisalhamento o valor de 70MPa/mm. No entanto o modelo não completou o processamento. Por essa motivo foi considerado para representação da interface bloco e graute o mesmo conjunto de dados. Essa consideração foi utilizada por Bolhassani(2015) para representação dos modelos numéricos das paredes de alvenaria parcialmente grauteadas em seu trabalho.

Por essa razão, foi realizada de maneira análoga ao processo de validação dos modelos de ensaio de cisalhamento da junta horizontal bem como do ensaio de compressão diagonal de parede oca, foi analisado os parâmetros de rigidez ao cisalhamento considerando o intervalo de 0,63 a 70 MPa/mm, porém ao considerar o valor de 0,63MPa/mm, foi obtido um gráfico de força vs deslocamento em comparação com os modelos experimentais

um comportamento relativamente consistente com os modelos experimentais, conforme o gráfico 82 a seguir.

Gráfico 82 – Força vs Deslocamento – Modelo Numérico ($K_s=0.63\text{MPa/mm}$) e Modelos Experimentais



É possível notar que com o valor obtido na parametrização do modelo referente ao ensaio de cisalhamento da junta horizontal o comportamento da curva do modelo numérico apresentou, razoavelmente, uma aproximação satisfatória entre os dois tipos de ensaios. Entretanto, a partir do modelo numérico não foi possível obter a curva de força vs deslocamento

Figura 177 - Distribuição de Tensão – $K_s=0,63\text{MPa/mm}$

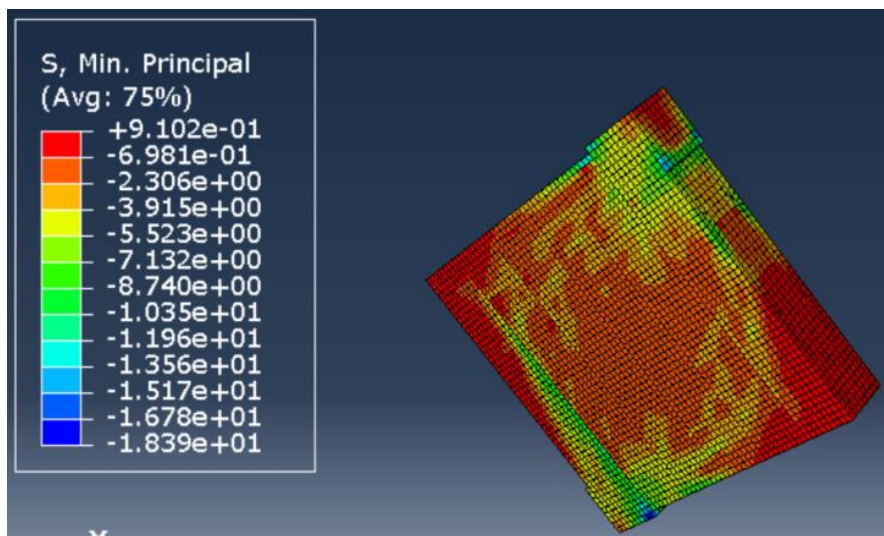


Figura 178 - Distribuição de Deformação - $K_s=0,63\text{MPa/mm}$

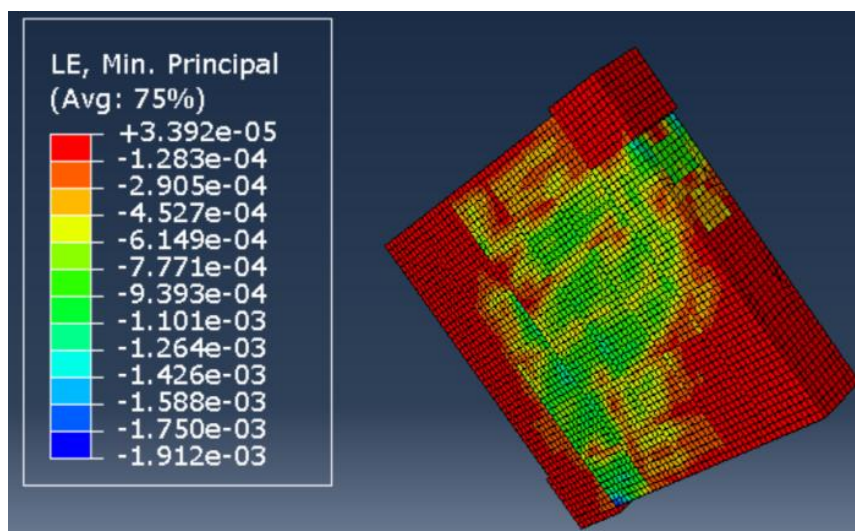


Figura 179 - Distribuição de Dano à Compressão - $K_s=0,63\text{MPa/mm}$

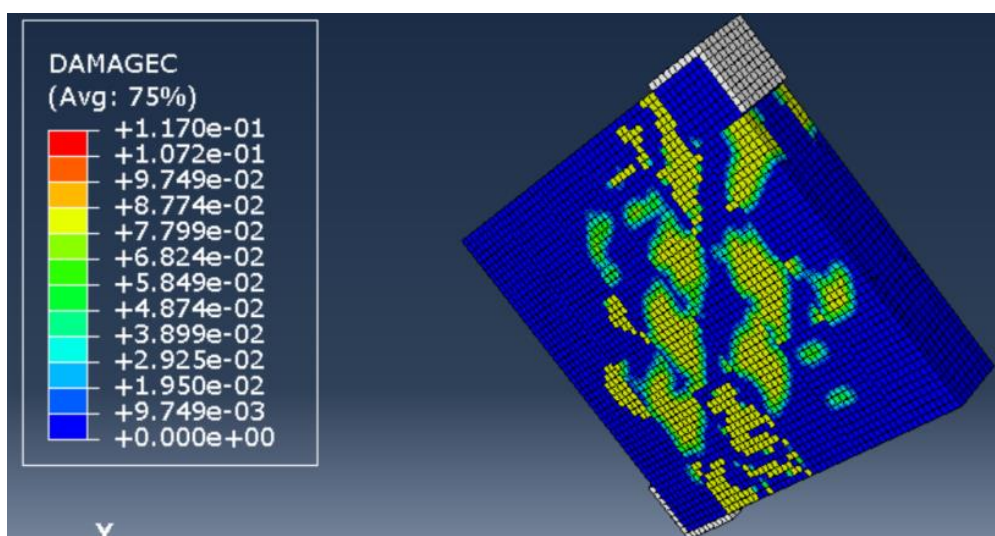
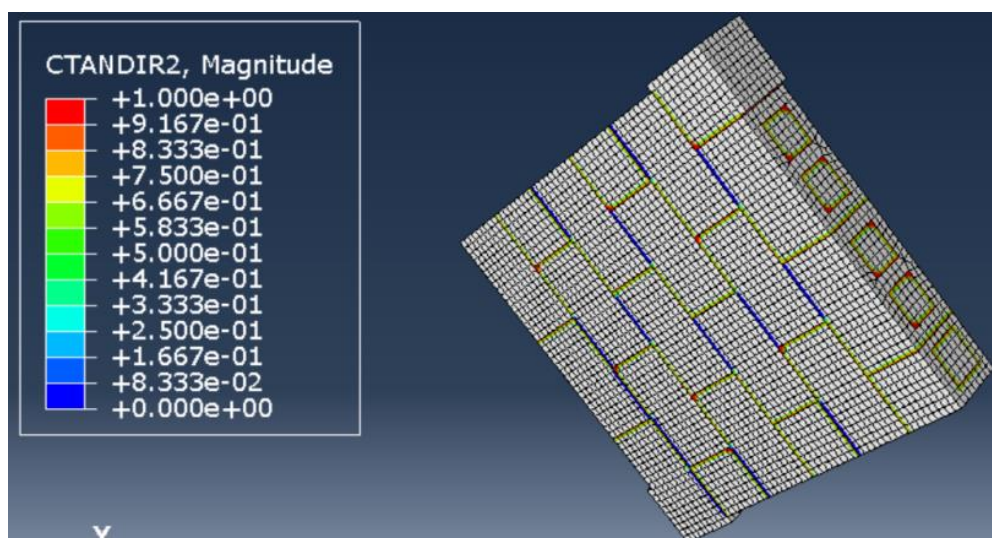
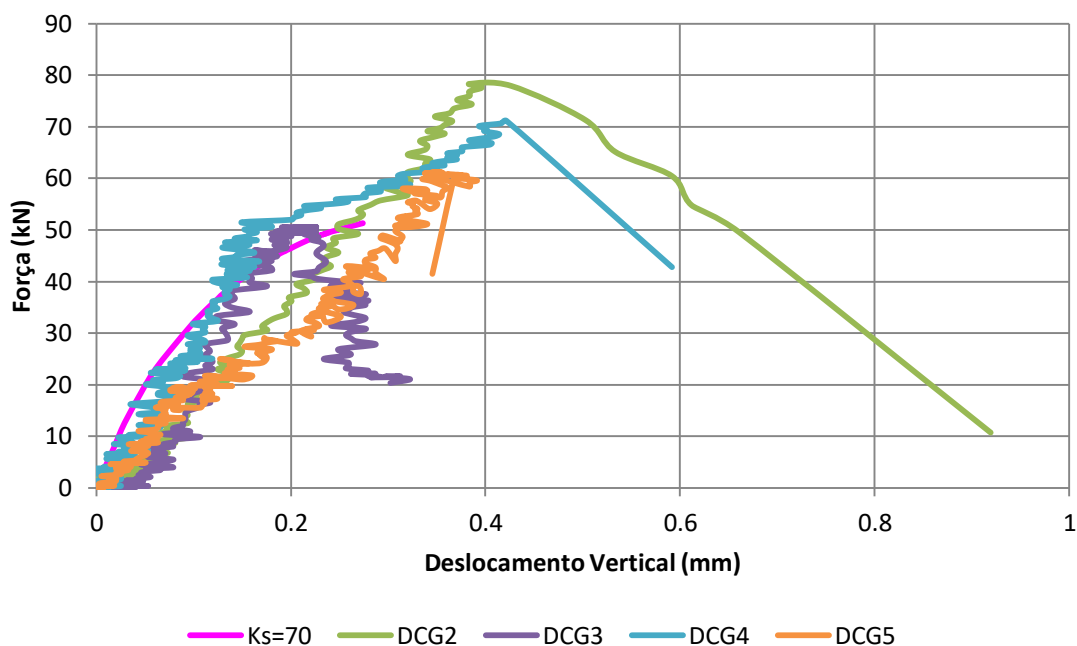


Figura 180 - Distribuição de Tensão Tangencial – Direção X - $K_s=0,63\text{MPa/mm}$



Prosseguindo com a análise entre os parâmetros, foi considerado como rigidez ao cisalhamento, valor que foi obtido para parametrizar os ensaios de compressão diagonal das paredes oca, de 70MPa/mm . Foi aplicado, assim como na primeira tentativa, um deslocamento de 0.5mm . Considerando o novo valor de rigidez se obteve a seguinte curva força vs deslocamento, conforme o gráfico 83.

Gráfico 83 - Força vs Deslocamento – Modelo Numérico ($K_s=70\text{MPa/mm}$) e Modelos Experimentais



Observando o gráfico 83, é possível perceber que foi possível realizar a representação de duas das três fases do ensaio de compressão. A primei-

ra fase representada pelo modelo numérico foi trecho elástico dos ensaios. Já segunda fase que o modelo conseguiu uma boa representação foi do trecho plástico antes da ruptura do modelo. Uma das possíveis razões para não se alcançar o comportamento pós pico do ensaio, se deve ao fato da adaptação do modelo de interface graute e bloco considerado o mesmo para representação da interface bloco e argamassa, as figuras

Figura 181 - Distribuição de Tensão – $K_s=70\text{MPa/mm}$

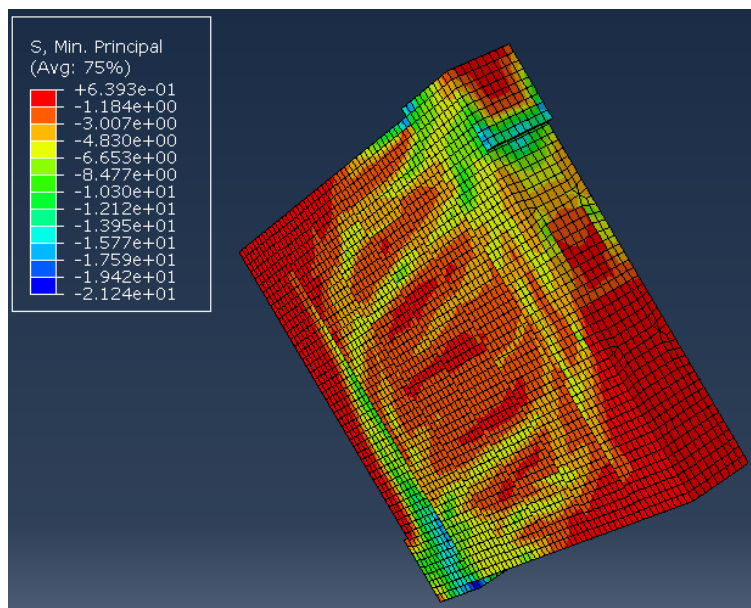


Figura 182 - Distribuição de Deformação - $K_s=70\text{MPa/mm}$

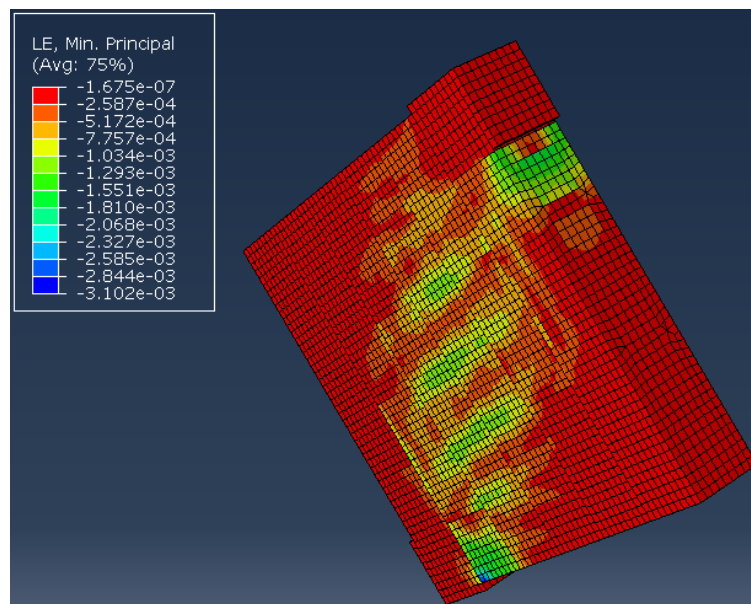


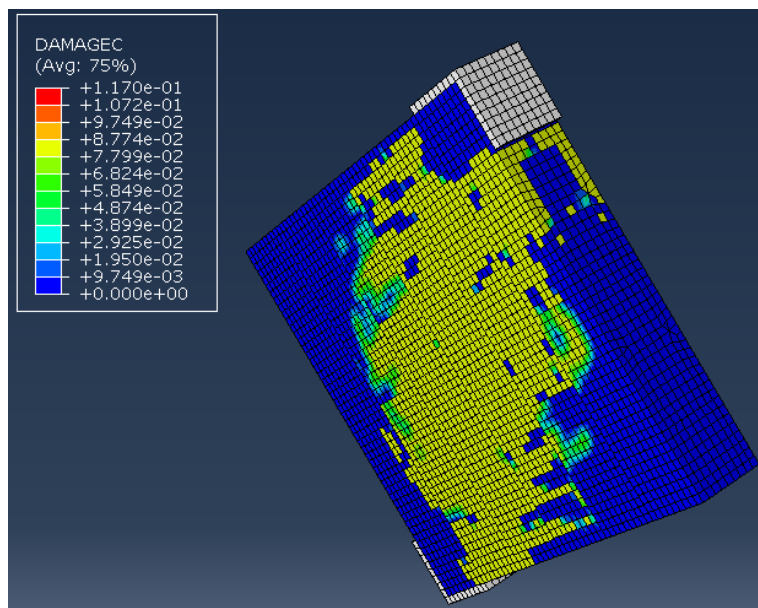
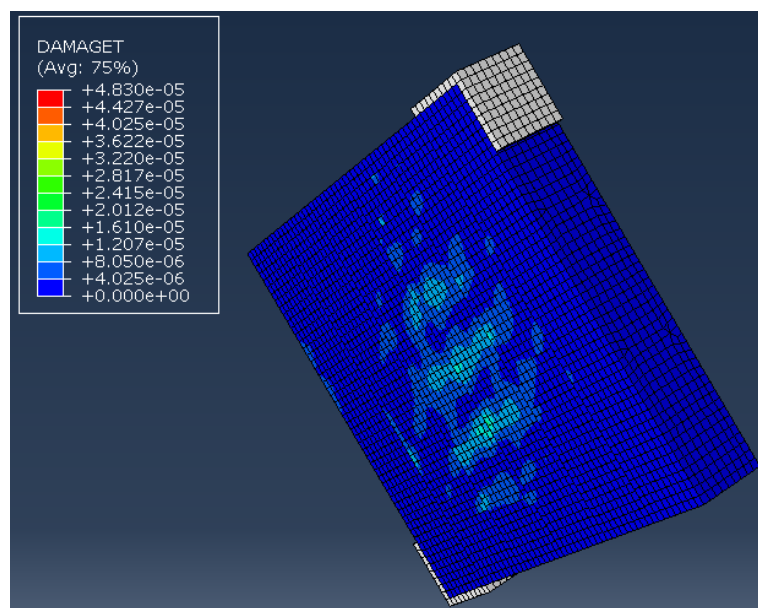
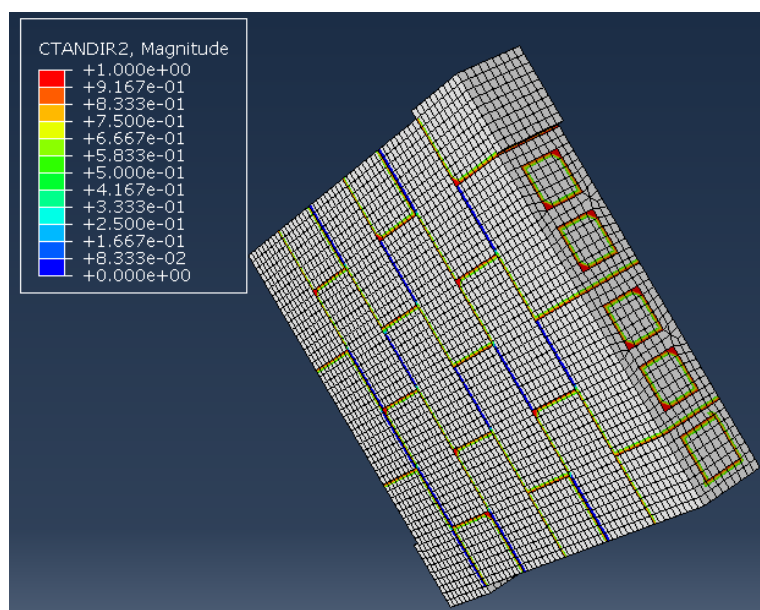
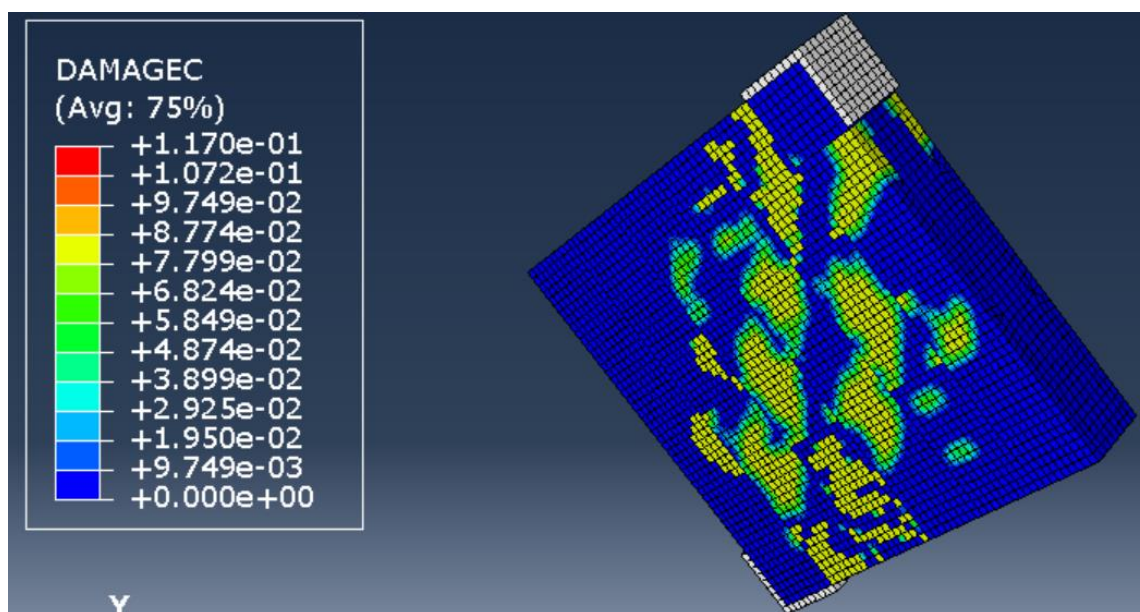
Figura 183 - Distribuição de Dano à Compressão - $K_s=70\text{MPa/mm}$ **Figura 184 - Distribuição de Dano à Tração - $K_s=70\text{MPa/mm}$** 

Figura 185 - Distribuição de Tensão Tangencial – Direção X - $K_s=70\text{MPa/mm}$

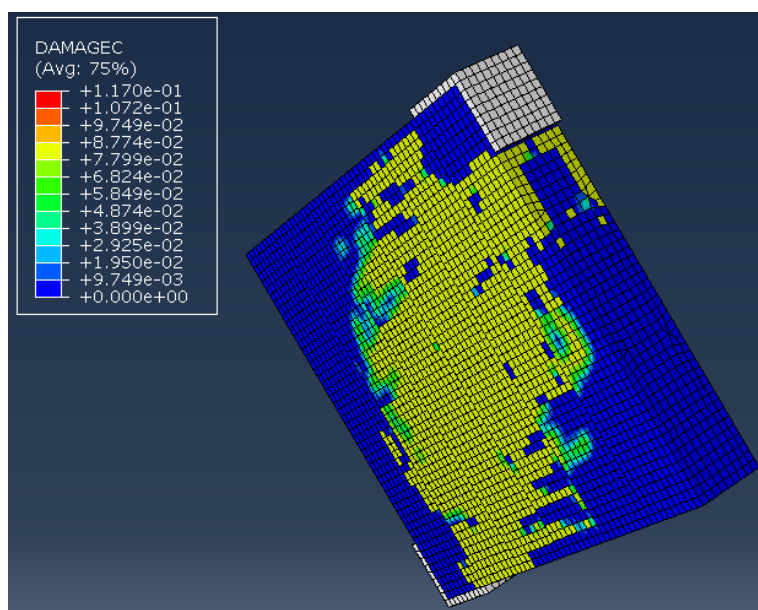


A partir das figuras apresentadas anteriormente, é possível notar que ao aumentar o valor da rigidez, há uma influência em todo o modelo numérico e não apenas na interface. Isso porque com o valor de rigidez ao cisalhamento de 70MPa/mm foi possível observar alguns pontos de distribuição de dano à tração do modelo, fator esse que não foi verificado ao analisar o comportamento do modelo considerando a rigidez da interface igual $0,63\text{MPa/mm}$. Além disso, a distribuição de dano à compressão, foi potencializada com a rigidez de 70MPa/mm , conforme é o possível visualizar na figura 186.

Figura 186 - Comparativo da Distribuição de Dano à Compressão - $K_s=0,63\text{MPa/mm}$ (a) - $K_s=70\text{MPa/mm}$ (b)



(a)



(b)

A tabela 129 apresenta um comparativo entre o valor de deslocamento médio e força máxima média referente ao ensaio experimental com os valores obtidos numericamente para cada uma das rigidez ao cisalhamento.

Tabela 129 – Comparativo entre os força máxima e deslocamento último entre os modelos experimentais e os modelos numéricos

Amostra	Força (kN)	Deslocamento (mm)
DCG 1	76.31	0.218

DCG 2	78.32	0.919
DCG 3	50.58	0.302
DCG 4	71.15	0.591
DCG 5	61.26	0.345
Media	67.53	0.475
Numérico 1*	58.72	0.549
Numérico 1*/Média	95.86	159.0757
Numérico 2**	61.455	0.5
Numérico 2**/Média	104.64	105.15

*Numérico 1 – Referente ao $K_s=0,63\text{MPa/mm}$

**Numérico 2 – Referente ao $K_s=70\text{MPa/mm}$

É possível notar que o modelo considerando a rigidez ao cisalhamento de 70MPa/mm considerando o exposto na tabela 129 apresenta uma melhor aproximação considerando os valores de ruptura. E como o comportamento do modelo numérico, graficamente, também apresenta boa correlação com os modelos experimentais verifica-se dessa forma que, a partir dos resultados dessa pesquisa é possível adotar o mesmo parâmetro de rigidez ao cisalhamento para os ensaios de compressão diagonal parede oca e grauteada.

8.8 Análise dos resultados

Com base nas modelagens realizada é possível extrair as seguintes conclusões:

a) Blocos:

- A proposta de aumentar o trecho linear, conforme Kaaki (2013), do comportamento do bloco possibilitou a melhor representação do gráfico de tensão vs deformação;
- A curva de tensão vs deformação numérica ficou muito próxima da curva experimental e isso pode ser visto tanto visualmente no gráfico como também por meio dos valores de tensão de pico e a deformação;
- Através da variável de saída DAMAGEC e DAMAGET, foi possível observar que os pontos de ruptura do bloco foram próximos ao observado nos ensaios;

- Analisando o comportamento pós pico, apresentou grande diferença a partir de um certo trecho da curva. Essa variação se deve ao fato de não ser possível adicionar mais pontos da curva tensão vs deformação experimental por uma limitação do software;

b) Argamassa:

- O modelo numérico apresentou um comportamento muito próximo a curva experimental, de maneira análoga aos blocos, foi possível verificar semelhança entre os gráficos bem como os valores de resistência máxima à compressão, deformação última e módulo de elasticidade;
- Considerando a variável de saída DAMAGEC, se observou um comportamento relativamente próximo ao que foi observado nos ensaios de compressão da argamassa.

c) Graute

- De maneira análoga aos modelos numéricos de bloco e argamassa, se observou que o comportamento da curva numérica se assemelhou com a curva experimental;
- Além disso, foi possível verificar o dano do modelo numérico tanto a tração como a compressão por meio das variáveis de saída, respectivamente, DAMAGET e DAMAGEC;

d) Ensaio de Bond Wrench;

- Apesar de se alcançar a resistência média a tração alcançada nos ensaios experimentais, não foi possível uma análise mais detalhada do modelo numérico uma vez que o próprio se demonstrou muito sensível a taxa mínima de deslocamento que poderia ser aplicado através da máquina de ensaio e devido a isso o ensaio foi realizado conforme detalhado no capítulo 8;

e) Ensaio de cisalhamento da junta horizontal

- Os modelos numéricos que foram criados considerando o corpo de prova com argamassa, ou seja, bloco-interface-argamassa-interface-bloco-interface-argamassa-interface-bloco, apresentaram um comportamento muito semelhante

ao observado nos ensaios experimentais, independente do nível pré compressão aplicada;

- Os modelos numéricos que foram criados considerando o corpo de prova sem argamassa, ou seja, bloco-interface-bloco-interface-bloco, apresentaram um comportamento bem próximo ao observado nos ensaios experimentais, independentemente do nível pré compressão aplicada;
- Além disso, através da curva experimental foi possível obter três conjuntos de parâmetros de rigidez da interface que para fins práticos não apresentou grande alteração nos resultados tanto para o sistema com argamassa e sem argamassa;
- Ao analisar o comportamento tensão de cisalhamento x deslizamento dos dois modelos numéricos (com argamassa e sem argamassa) foi possível notar que, assim como referenciado na literatura desse trabalho, ao criar o elemento de interface entre os sólidos, essa interface funciona como elemento ligante entre os elementos sólidos e a partir disso é possível a criação de modelos de alvenaria sem a representação da argamassa como elemento sólido e sim como elemento de interface do modelo numérico;
- Quanto aos parâmetros de rigidez, foi possível encontrar os parâmetros a partir dos ensaios experimentais;
- Considerando a análise do parâmetro K_s , observa-se que para a representação do comportamento do modelo numérico o valor de K_s apresenta grande relevância na caracterização da interface. No entanto foi obtido um valor de $K_s = 0.63 \text{ MPa/mm}$ que representou satisfatoriamente o modelo numérico apesar da variação da tensão de pré-compressão.

f) Compressão Diagonal

- Os modelos numéricos apresentaram boa correlação com os resultados experimentais;
- Analogamente aos modelos de compressão do bloco, da argamassa e do graute, foi possível notar a partir da variável de saída DAMAGEC que o comportamento das fissuras se

apresentou semelhante ao que foi observado nos resultados experimentais;

- Para representação dos modelos de compressão diagonal parede oca foi utilizado o valor de $K_s=70\text{MPa/mm}$, sendo este valor obtido através da análise de um conjunto de 8 valores de K_s , considerando como valores extremos 0.63MPa/mm (valor obtido na calibração do modelo de ensaio de cisalhamento da junta horizontal) e 117MPa/mm (valor obtido através da equação de Lourenço et al (2005)).
- Com base nas imagens do modelo numérico, DAMAGEC e DAMAGET, foi possível notar uma semelhança com as imagens dos ensaios experimentais.
- Considerando o modelo numérico de parede grauteada foi possível a utilização dos mesmos parâmetros para representação da interface bloco e argamassa utilizado na representação do modelo numérico de parede oca;

g) Conclusões gerais sobre o estudo dos parâmetros de rigidez

- A partir do que é apresentado na literatura e correlacionando com os resultados experimentais bem como os modelos numéricos aqui tratados se verificou que o parâmetro de rigidez apresenta, de certa forma, uma relação com as dimensões do modelo a ser ensaiado.
- Além disso, a combinação de esforços exigirá de maneira distinta o elemento de interface, como por exemplo, nos modelos referente ao ensaio de cisalhamento da junta horizontal o cisalhamento no plano, direção longitudinal da seção transversal, é que atuava predominante a rigidez referente a essa direção, enquanto que nos modelos de compressão diagonal a interface deve resistir a uma combinação desses esforços de cisalhamento e tração.

9 Considerações Finais

O objetivo do trabalho é apresentar contribuições para modelagem numérica de alvenaria estrutural com um foco na análise de interface entre bloco e argamassa utilizando blocos de concreto de escala reduzida 1:2.

Para se alcançar tal objetivo foi realizado um conjunto de ensaios para caracterização dos elementos básicos da alvenaria, bloco, argamassa e graute, e também parâmetros para representação da interface entre bloco e argamassa. E por fim foi realizado ensaios em paredes de compressão diagonal com e sem graute.

A partir dos ensaios é possível inferir que:

- a) Os resultados obtidos, de maneira geral, foram coerentes e coesos com a literatura.
- b) As análises considerando diferentes escalas, foi possível notar que grande parte dos resultados encontrados apresentou pouca disparidade com resultados de escala 1:1, como por exemplo, ensaios de compressão e tração dos blocos, e também a resistência ao cisalhamento da junta horizontal;

Os resultados de resistência à tração da argamassa, obtidos através do ensaios de bond wrench, apresentaram grande disparidade entre os exemplares. O motivo dessa amplitude nos resultados, é que o tipo de ensaio apresenta fragilidades quanto a forma de mensurar os resultados obtidos, isso porque, devido a sensibilidade do ensaio não foi possível obter, por exemplo, informações sobre o deslocamento de cada amostra. Essa informação seria importante para a compreensão dos valores de força encontrado para cada corpo de prova;

- c) Já os resultados referente a tensão de cisalhamento, apresentaram boa consistência nos resultados para cada nível de pré-compressão como também ao analisar os parâmetros obtidos através dos resultados dos ensaios (coeficiente de atrito e tensão de cisalhamento inicial) comparados com a literatura.
- d) Os ensaios de compressão diagonal, tanto os de parede oca quanto grauteada, tiveram resultados razoáveis entre si, apresentando pouca variação tanto na força de ruptura como no deslocamento

vertical. Porém o mesmo, não é possível afirmar a respeito do deslocamento horizontal que apresentou grande variação nos valores.

- e) De forma geral os ensaios foram importantes para o entedimento do comportamento da alvenaria de blocos de concreto de escala reduzida, pois apesar de alguns valores de resistência como de deformação não estarem tão próximos dos resultados observados na literatura. No decorrer dos ensaios foi possível verificar que a fissuração das amostras foram muito semelhantes as amostras de escala 1:1 que contém na literatura.

Considerando os modelos numéricos de maneira geral pode se dizer que:

- a) Foi de fundamental importância a análise detalhada dos elementos principais da alvenaria (bloco, argamassa e graute) e isso porque com uma boa representação numérica desses elementos torna a avaliação do processo de validação de modelos numéricos maiores mais fáceis de ser observado como foi o caso de ensaio de cisalhamento da junta horizontal;
- b) Para um análise mais detalhada dos modelos é importante a inserção de uma grande quantidade de pontos para representação do comportamento plástico (tensão vs deformação) à compressão desses elementos bem como do comportamento à tração, porém devido a alta sensibilidade do ensaio de tração, a representação da fase plástica fica relativamente comprometida;
- c) Quanto a representação do ensaio de bond wrench, foi possível apenas avaliar o valor de resistência à tração máxima uma vez que os ensaios experimentais somente foi possível obter o valor da força aplicada para ruptura da interface bloco e argamassa;
- d) Já para a modelagem do ensaio de cisalhamento da junta horizontal, foram alcançados avanços importantes para a compreensão dos parâmetros de propriedades de contato:
 - A maior parte dos valores utilizados para representação da interface entre bloco e argamassa, com exceção do valor da rigidez ao cisalhamento (K_s e K_t) e normal (K_n), foram obtidos

através dos ensaios realizados e foi possível manter todos os demais valores constantes e os ajustes dos modelos numéricos foi realizado a partir dos valores de K_s e K_t .

- Os valores relacionados aos parâmetros de rigidez ao cisalhamento obtidos por meio da equação proposta por Lourenço et al (2005) não proporcionou uma boa aproximação dos resultados para os ensaios de cisalhamento da junta horizontal;
 - A partir dos ensaios foi possível a obtenção dos parâmetros para representação do comportamento tangencial e normal da interface bem como do comportamento do dano. Para ajustes do processo de validação foram alterados os dados referentes ao comportamento coesivo da interface;
 - Além disso, foi possível avaliar que a interface criada no programa é suficiente para representação da interface bloco e argamassa sem inserir a argamassa no modelo numérico, ou seja, a interface faz o papel da argamassa e também representa a interface entre o bloco e argamassa.
- e) A modelagem numérica dos ensaios de compressão diagonal sem grauteamento, assim como no modelo numérico de ensaio de cisalhamento da junta horizontal, foi possível realizar as seguintes considerações:
- A distribuição de dano (compressão e tração) no modelo numérico se assemelhou ao que foi observado nos ensaios experimentais;
 - Se alcançou equações para representação dos parâmetros de rigidez e os valores alcançados pelas equações apresentou boa aproximação tanto com o modelo numérico quanto com os resultados experimentais;
- f) Para cada grupo de ensaios se conseguiu obter parâmetros que representassem de maneira satisfatória o comportamento das curvas, tensão vs deformação, dos modelos experimentais e também observar nos modelos numéricos o comportamento averiguado no andamento dos ensaios;
- Além das considerações finais a respeito dessa pesquisa seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- ✓ Estudo da interação bloco e argamassa, considerando outros tipos de corpos de prova, como por exemplo, fazer uma variação maior da tensão de pré compressão considerada no modelo de ensaio de cisalhamento da junta horizontal;
- ✓ Análise do coeficiente de atrito, considerando a influência do graute do corpo de prova;
- ✓ Verificação detalhada do comportamento da resistência à tração da flexão da argamassa.
- ✓ Quanto ao comportamento do coesivo da alvenaria, a realização de um estudo apresentando uma variação maior dos modelos experimentais. Nesse trabalho foram realizados ensaio de cisalhamento de junta horizontal e testes em paredes de 1200mm de altura e comprimento, no entanto para entendimento do comportamento coesivo é de extrema importância o estudo de modelos experimentais intermediários ao que foram estudados nessa pesquisa.
- ✓ Estudos de implementação de modelos numéricos ao invés da utilização de softwares comerciais, uma vez que esses softwares apresentam algumas restrições de utilização, como por exemplo, a representação do comportamento plástico pós-pico.

10 Referências Bibliográficas

- Abdou L., Ami Saada, R., Meftah F., Mebarki A. Experimental investigations of the joint-mortar behaviour. **Mechanics Research Communications**. V33. 370-384. 2006.
- Abdulla, K.F., Cunningham L.S., Gillie M. **Non-linear simulation of masonry behaviour under cyclic loads**. University of Manchester. 2017b.
- Abdulla, K.F., Cunningham L.S., Gillie M. **Simulating masonry wall behaviour using a simplified Micro-model approach**. University of Manchester. 2017.
- Ahmad AH, Ambrose OC. Compressive behavior of concrete masonry prisms. **Journal Structural Engineering** 1986;112(3):605-13
- Alecci V.,Fagone M.,Rotunno T., Stefano M. de, Shear strength of brick masonry walls assembled with different types of mortar, **Construction and Building Materials**. 40 (Mar. 2013) 1038-1045
- Almeida J.A.P.P., Bordigoni D., Pereira E.B., Barros J.A.O. e Aprile A. Assessment of the properties to characterise the interface between clay brick substrate and strengthening mortar. **Construction and Building Materials**. v103. p47-66. 2016.
- Alotaibi, K.S., Galal, K. Experimental Study of CFRP-confined Reinforced Concrete Masonry Columns Tested Under Concentric and Eccentric Loading. **Composites Part B**. v155, p257-271, 2018.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) – **ACI 318**: Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills, Michigan, 2008.
- Araújo A.F. **Metodologia para Avaliação da Resistência de Aderência ao Cisalhamento de Prismas para Alvenaria Estrutural**. Dissertação (Mestrado). 149p. Programa de Pós – Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12118** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Métodos de ensaio, Rio de Janeiro 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14321** Paredes de alvenaria estrutural – Determinação da resistência ao cisalhamento, Rio de Janeiro 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15961-1** Alvenaria Estrutural — Blocos de Concreto - Parte 1: Projeto., Rio de Janeiro 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15961-2** Alvenaria Estrutural — Blocos de Concreto - Parte 2: Execução e Controle de Obras., Rio de Janeiro 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118** Projeto e Execução de Estruturas em Concreto Armado., Rio de Janeiro 2017.

Banting, B.R., El-Dakhakhni, W.W.(2014). Seismic Performance Quantification of Reinforced Masonry Structural Walls with Boundary Elements. **Journal Structural Engineering**. American Society of Civil Engineers.

Baraldi D. e Cecchi A. A full 3D rigid block model for the collapse behavior of masonry walls. **European Journal of Mechanics A/Solids**. v64. p11-28.2017

Barbosa, C.S. (2008). **Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto, prismas e paredes e suas correlações com as propriedades mecânicas dos materiais constituintes**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 262p.

Barbosa, K.C. **Avaliação Experimental do Fenômeno de Retração em Alvenaria de Blocos de Concreto**.2005.252p Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – SP, 2005.

Barbosa, P. C. (2000). **Estudo da interação de paredes de alvenaria estrutural com vigas de concreto armado**. 110p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

Barr S., McCarter W.J., Suryanto B. Bond-strength performance of hydraulic lime and natural cement mortared sandstone masonry. **Construction and Building Materials**. V84, 2015, p128-135.

Basha, S.H., Kaushik, H.B. Behavior and failure mechanisms of masonry-infilled RC frames (in low-rise buildings) subject to lateral loading. **Engineering Structures**. v111, p233-245, (2016).

Bedeir H., Shedid M., Okail H., Hamdy O. Numerical modeling of a two story third-scale reinforced masonry shear wall building subjected to quasi-static lateral loading. **Engineering Structures**. v181, 2019, p310-323.

Binda L, Fontana A, Frigerio G. Mechanical behaviour of brick masonries derived from unit and mortar characteristics. **Brick and block masonry, vol. 1**. London: Elsevier Applied Science; 1988. p. 205–16 (8th IB-MAC)

Bolhassani M. **Improvement of Seismic Performance of Ordinary Reinforced Partially Grouted Concrete Masonry Shear Walls**. Tese (Doutorado). 401p. Faculty of Drexel University, Drexel University, 2015.

Bolhassani M., Hamid A.A., Lau A.C.W. e Moon F. Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages. **Construction and Building Materials**. v83. p159-173. 2015.

Brencich A, Felice GD. Brickwork under eccentric compression: experimental results and macroscopic models. **Construction and Building Materials** 2009;23(5):1935-46.

British Standard (BS) – **EN 1052-3**: Methods of test for Masonry: Part 3: Determination of Initial Shear Strength, Brussels, Brussels, 2002.

Bruedern A., Abecasis D., Mechtcherine V., Development of strain-hardening cement-based composites for the strengthening of masonry, in: Concrete. Repair (Ed.), **Rehabilitation and Retrofitting II – Proceedings...Retrofitting**, ICCRRR, 2009, pp. 887-894.

Bustamante, A.O, 2003. **Seismic Assessment of Ancient Masonry Structures by Rigid Blocks Limit Analysis**. Tese (Doutorado), Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Capuzzo Neto, V. (2000). **Estudo teórico e experimental da interação de paredes de alvenaria estrutural submetidas a ações verticais**. 111p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

Contadini, L. F., **Análise teórica e experimental do comportamento de vigas de alvenaria estrutural armada sujeitas à flexão simples**. 2014. 151p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho (UNESP) – SP, 2014.

Dehghani A., Fischer G., Alahi F., Strengthening masonry infill panels using engineered cementitious composites, **Material and Structures**. (2013).

Drougkas A, Roca P, Molins C. Numerical prediction of the behavior, strength and elasticity of masonry in compression **Material Structures** 2015.p15-28

Drysdale R.G., Hamid, A.A., Anisotropic Tensile Strength Characteristics of Brick Masonry. **6th International Brick and Block Masonry Conference**. Roma. 1982.

Drysdale, R. G., Hamid, A. A., and Baker, L.R., **Masonry Structures Behavior and Design**. Prentice Hall, New Jersey, 1999.

Elshafie, H, Hamid, A., Nasr. A., **"Strength and Stiffness of Masonry Shear Walls with Openings"**, The Masonry Society Journal, Volume 20, Number 1, December 2002.

Fortes, E. S. **Caracterização da alvenaria estrutural de alta resistência. Tese (doutorado)**. Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (UFSCar), 2017. 350p.

Furtmüller T, Adam C. Numerical modeling of the in-plane behavior of historical brick masonry walls. **Acta Mech** 2011;221:65–77.

Fusco, P. B. **Estruturas de Concreto: Solicitações Tangenciais**, 1ª Edição, São Paulo, Pini, 2008. 328p

Gabor A., Bennani A., Jacquelin E., Lebon F., Modelling approaches of the inplane shear behaviour of unreinforced and FRP strengthened masonry panels, Compos. Struct. 74 (2006) 277–288

Ghanem, G., Sheirf, A., e Honsy, H. (1994). Suggested Modifications to the Diagonal Tension Test Calculation for Masonry Assemblages. **Proceedings of 10th International Brick/Block Masonry Conference**. Calgary

Gumaste K.S., Nanjunda Rao K.S., Reddy B.V.V., Jagadish K.S. Strength and elasticity of brick masonry prisms and wallettes under compression. **Material and Structures** 2007;40:241–53.

Haach, V.G., Vasconcelos, G., Lourenço P.B. Experimental Analysis of Reinforced Concrete Block Masonry Walls Subjected to In-Plane Cyclic Loading. **Journal Structural Engineering**. American Society of Civil Engineers.

Hofmann J., Stöckl P., Mainz S., A comparative finite element evaluation of mortar joint shear tests, **Mason. Int.** 3 (3) (1990) 101–104. [26]

Hossain MM, Ali SS, Azadur Rahman M. Properties of masonry constituents. J Civ Eng Inst Eng Bangladesh 1997;CE 28:135–55.

Hughes, K.J. (2010). **Behaviour of Reduced-Scale Reinforced Concrete Masonry Shear Walls and Components**. Dissertação (Mestrado). Macmaster University, Hamilton, Ontario, Canadá. 216p.

Izquierdo, O.S. (2015). **Estudo da interface bloco/graute em elementos de alvenaria estrutural**. 290p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Kaaki, T. (2013). **Behavior and Strength of Masonry Prisms Loaded in Compression**. Dissertação(Mestrado). Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canadá. 112p.

Kaushik HB, Rai DC, Jain SK. Stress–strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression. **Journal Material Civil Engineers** 2009;21:535–42. 2007:728–39.

Kaushik HB, Rai DC, Jain SK. Stress–strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression. **Journal Material Civil Engineers** 2007;19(9):728–39

Khalaf, F.M. New Test for Determination of Masonry Tensile Bond Strength. **Journal Structural Engineering**. American Society of Civil Engineers.

Knox C.L., Dizhur D., Ingham J.M. Experimental study on scale effects in clay brick masonry prisms and wall panels investigating compression and shear related properties. **Construction and Building Materials**. V163, 2018, p706-713.

Kowalewska Ł., Gajewska M, Determination of failure modes in brick walls using cohesive elements approach. **Procedia Engineering**. v 111, 2015, p454-461.

Landini, F.S. **Comportamento à flexão e ao esforço cortante de vigas em alvenaria estrutural**. 2001. 135p. Dissertação (Mestrado). Faculdade Engenharia Civil – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) – SP, 2001.

Leiva G. e Klingner R.E. **Behavior and Design of Multi-Story Masonry Walls under In-Plane Seismic Loading**. The Masonry Society Journal, v.13, n.01, p.15-24, 1994.

Lizárraga J.F. e Pérez-Gavilán. Parameter estimation for nonlinear analysis of multi-perforated concrete masonry walls. **Construction and Building Materials**. v141. 353-365.2017.

Long, L., Hamid, A. A., Drysdale, R.G. Small-Scale Modelling of Concrete Masonry Using 1/2 - Scale Units: A Preliminary Study. **10th Canadian Masonry Symposium**. Banff, Alberta. 2005

Lopes, G.L., **Estudo teórico e experimental de paredes esbeltas de alvenaria estrutural**. 2014. 133p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – SP, 2014.

Lourenço P. B. e Rots J.G. Multisurface Interface Model for Analysis of Masonry Structures. **The Journal of Engineering Mechanics**, v.123, n.07, p.660-668, 1997.

Lourenço P.B, Barros J.A.O., Oliveira J.T. Shear testing of stack bonded masonry, **Construction and Building Materials**. V18. 125–132. 2004.

Lourenço P.B. **Analysis of Masonry Structures with Interface Elements: Theory and Applications**. Delft University of Technology. 1994

Lourenço P.B., Barros J.A.O, Oliveira J.T., Shear testing of stack bonded masonry, **Construction and Building Materials**.. 18 (2) (Mar. 2004) 125–132.

Lourenço, P. B., and Ramos, L. F. 2004. "Characterization of cyclic behavior of dry masonry joints." **Journal Structural Engineering** v130, 2004, 779–786.

Lourenço, P. J. B. **Computacional strategies for masonry structures**. 1996. 210p. Delf University Press. – III. Thesis Delft University of Technology.

Madia, F.C.A.R. **Estudo de Pórticos Preenchidos com Alvenaria**. 2012.146p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – SP, 2012.

Maluf D.R., **Estudo de Painéis de Alvenaria Estrutural Sujeitos a Ações Perpendiculars ao Plano**. 2007. 120p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – SP, 2007.

Massart. T.J., Peerlings, R.H.J., Geers, M.G.D. Mesoscopic modeling of failure and damage-induced anisotropy in brick masonry. **European Journal of Mechanics A/Solids**. v23. 2004.

McNary WS, Abrams DP. Mechanics of masonry in compression. **Journal Structural Engineering** 1985;111:857–70.

Minaie E. **Behavior and Vulnerability of Reinforced Masonry Shear Walls**. Phd Thesis. 488p. Faculty of Drexel University, Drexel University, 2009.

Mohammed A., Hughes T.G., Mustapha A., The effect of scale on the structural behaviour of masonry under compression. **Construction and Building Materials**. V25, 2011, p303-307.

Moon, F et al. Large-scale tests of an unreinforced masonry low-rise building. **In: North American Masonry Conference**, 9., jun.2003, Clemson. *Proceedings...*Clemson: Clemson University, jun 2003.

Moradabadi E., Laefer D.F., Clarke J.A., Lourenço P.B. A semi-random field finite element method to predict the maximum eccentric compressive load for masonry prisms. **Construction and Building Materials**. V77, 2015, p489-500.

Nascimento Neto, J. A. **Estudo de painéis com abertura constituídos por alvenaria estrutural de blocos**. São Carlos, 2003. 320p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2003.

Nasiri E. e Liu Y. Development of a detailed 3D FE model for analysis of the in-plane behaviour of masonry infilled concrete frames. **Engineering Structures**. v143. p603-616. 2017.

Oliveira D.V. de C, Lourenço PB, Roca P. Cyclic behaviour of stone and brick masonry under uniaxial compressive loading. **Material and Structures** 2006;39:247–57.

Oliveira, D. V., 2003. **"Experimental and numerical analysis of block masonry structures under cyclic loading."** Tese (Doutorado), Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Oliveira, F. L. (2001). **Reabilitação de paredes de alvenaria pela aplicação de revestimentos resistentes de argamassa armada.** São Carlos, 2001. 203p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Oliveira, L. M. F. **Estudo Teórico E Experimental Do Comportamento Das Interfaces Verticais De Paredes Interconectadas De Alvenaria Estrutural.** 2014. 272 p. Tese de Doutorado – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2014.

Page, A.W., Finite element model for masonry. **ASCE J. Struct. Div.**, 1978 104 (8), 1267-1285.

Panizza M, Garbin E, Valluzzi MR, Modena C. Experimental investigation on bond of FRP/SRP applied to masonry prisms. **In: 6th International conference FRP composites civil engineering** 2012; 2012. p. 13–5.

Parsekian, G. A., Hamid, A. A. e Drysdale, R. G. **Comportamento e Dimensionamento de Alvenaria Estrutural**, 1ª Edição, São Carlos, EdUFSCar, 2012. 625p.

Pasquantonio, R.D., **Análise teórica e experimental de vigas de alvenaria estrutural sujeitas ao cisalhamento.** 2015. 179p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – SP, 2015.

Paulo B. Lourenço P.B., Oliveira D.V., Roca P. e Orduña A. (2014). Dry Joint Stone Masonry Walls Subjected to In-Plane Combined Loading. **Journal Structural Engineering.** American Society of Civil Engineers.

Pavía S., Hanley R. Flexural bond strength of natural hydraulic lime mortar and clay brick. **Material and Structures** 2006;39:247–57.

Peleteiro, S.C. (2002). **Contribuições à modelagem numérica de alvenaria estrutural.** São Carlos, 2002. 143p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Prakash S.S., Alagusundaramoorthy P., Load resistance of masonry wall-ettes and shear triplets retrofitted with GFRP composites, **Cem. Concr. Compos.** 30 (8) (Sep. 2008) 745–761.

Priestley M.J.N. e Hon C.Y. **Seismic Design of Reinforced Concrete Masonry Moment Resisting Frames.** The Masonry Society Journal, v.04, n.01, p.01-18, 1985.

Ramos, L. F. (2002). **Experimental and numerical analysis of historical masonry structures.** Dissertação (Mestrado), Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Reddy BVV, Lal R, Nanjunda Rao KS. Influence of joint thickness and mortarblock elastic properties on the strength and stresses developed in soil-cement block masonry. **Journal Material Civil Engineers** 2009;21:535-42.

Riddington J. R e Naom N. F., Finite Element Prediction of Masonry Compressive Strencgth. **Computers & Structures**, v52, 1994, p113-119

Samarasinghe W., Lawrence S e Page A. Improvements to the Bond Wrench Test.**11th International Brick and Block Masonry Conference**. Shangai. 1997.

Santos, C.F.R. (2016). **Avaliação numérica da interação de paredes de alvenaria estrutural submetidas às ações verticais**. Viçosa, 2016. 213p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa.

Santos, E. A. F. **Estudo da influência das propriedades elásticas da interface bloco-argamassa na rigidez de paredes de alvenaria**. Dissertação (Mestrado) 277p. – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Sarhat, S.R. e Sherwood, E.G. Shear Design of Reinforced Masonry Beams. In: THE ELEVENTH NORTH AMERICAN MASONRY CONFERENCE, 3.04-2, 2011, Minneapolis, **Proceedings of The Eleventh North American Masonry Conference**, Minneapolis: University de Minnesota, 2011.

Schlegel R. **Numerische Berechnung von Mauerwerkstrukturen in homogenen und diskreten Modellierungsstrategien**. Bauhaus University, Weimar, Germany. PhD dissertation; 2004.

Shabdin, M. Zargarán, M. Attari N.K.A. Experimental diagonal tension (shear) test of Un-Reinforced Masonry (URM) walls strengthened with textile reinforced mortar (TRM) **Construction and Building Materials**. V77, 2015, p489-500.

Silva, W. J. da. **Análise experimental e numérica da distribuição das ações verticais entre paredes de alvenaria estrutural com a utilização de modelo físico reduzido na escala 1:5**. 2014. 331 p. Tese de Doutorado – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2014.

SIMULIA. Abaqus Analysis. **User´s Manual**. Volume III. 2017.692p.

Thamboo J.A., Dhanasekar M., Yan C. Flexural and Shear Bond Characteristics of Thin Layer Polymer Cemented Mortared Concrete Masonry. **Construction and Building Materials**. V46, 2013, p104-113.

Valluzzi M.R, Tinazzi D., Modena C., Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates, **Construction and Building Materials**. 16 (7) (Oct. 2002) 409– 416

Vandoren B., Proft K., Simone A. e Sluys L.J. Mesoscopic modelling of masonry using weak and strong discontinuities. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**. v255. p167-182. 2013.

Vasconcelos G.F.M., Lourenço P.B., Experimental characterization of stone masonry in shear and compression, **Construction and Building Materials**. 23 (11) (Nov. 2009) 3337–3345

Vermeltfoort AT, Martens DRW, van Zijl GPAG. Brick–mortar interface effects on masonry under compression. **Canadian Journal Civil Engineering** 2007;34:1475–85.

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**. Florianopolis. 2012

Vyas C.V.U., Reddy B.V.V. Prediction of solid block masonry prism compressive strength using FE model. **Material and Structures** 2010;43:719–35.

Wierzbicki, J.C. (2010). **Behavior of Reduced-Scale Fully Grouted Concrete Block Shear Walls**. Dissertação (Mestrado). Macmaster University, Hamilton, Ontario, Canadá. 205p.

11 Anexo - Modelagem Numérica – Abaqus

Nesse capítulo é apresentado a transcrição de partes do manual do Abaqus para se obter um melhor entendimento do funcionamento do programa a respeito de pontos relevantes para o desenvolvimento da pesquisa, uma vez que, grande parte do trabalho será realizado com o Abaqus/2017.

Sendo assim, é apresentado os seguintes parâmetros das seguintes partes do manual do Abaqus:

- a) Modelo CDP
- b) Superfícies de Contato
- c) Propriedades de Contato

11.1 Modelo CDP

De acordo com o manual do Abaqus é possível afirmar que o modelo CDP é capaz de realizar uma modelagem genérica em concreto e para outros materiais quase-brittle em qualquer tipo de estrutura, como por exemplo, vigas, treliças, placas e sólidos. Além disso, se utilizam da combinação de conceitos entre os danos na fase elástica com a plasticidade à tração e à compressão para representar o comportamento inelástico do concreto.

O modelo ainda pode ser usado para análise de estruturas de concreto armado, foi projetado para aplicações em que o concreto estaria sujeito a carregamentos estático, cíclico e ou dinâmico sob baixas pressões de confinamento, consiste em uma combinação de plasticidade não associada a multi-rigidez e a elasticidade escalar do dano para descrever os danos irreversíveis que podem ocorrer durante o processo de fratura e por último permite controlar os efeitos de recuperação da rigidez durante o carregamento cíclico.

A seguir serão discutidos alguns pontos importantes a respeito do modelo CDP, que são os seguintes pontos:

- a) Comportamento Mecânico;
- b) Armadura;
- c) Definição da Rigidez a Tração;
- d) Definição do Comportamento a Compressão;
- e) Definição de Dano e Rigidez Recuperada
- f) Plasticidade do Concreto

- g) Visualização da Direção das Fissuras
- h) Elementos

11.1.1 Comportamento Mecânico

O modelo CDP é definido como um modelo contínuo, baseado na plasticidade, e um modelo de dano para o concreto. O CDP assume que os dois tipos principais de falha são fissuração por tração e ruptura a compressão do concreto. Quanto a evolução da superfície de falha ou escoamento é controlado por duas variáveis de rigidez que são ε_t^{pl} (deformação plástica a tração) e ε_c^{pl} (deformação plástica a compressão) são ligadas ao mecanismo de ruptura sob carregamento a tração e compressão, respectivamente.

Quanto ao comportamento mecânico é importante apresentar uma análise mais detalhada de cada um dos modos possíveis de ruptura que são representados por este modelo, por essa razão a seguir será discutido as principais hipóteses sobre comportamento mecânico do concreto.

O CDP considera que a resposta do concreto a compressão e tração uniaxiais são caracterizadas pelo dano plástico, como mostra a figura 187 e 188 a seguir.

Figura 187 - Curva Tensão vs Deformação a Tração do Concreto sob Carregamento Uniaxial

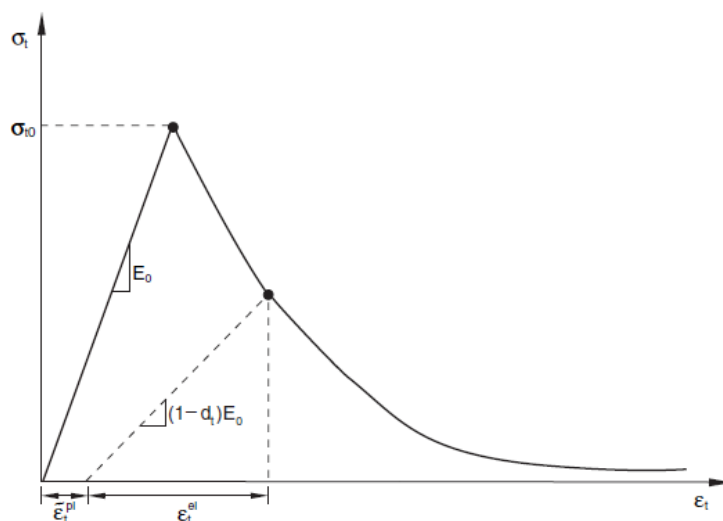
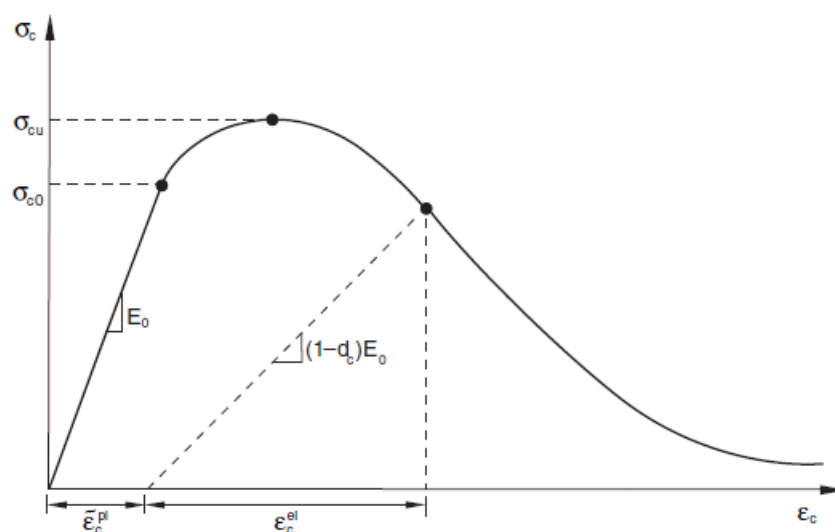


Figura 188 - Curva Tensão vs Deformação a Compressão do Concreto sob Carregamento Uniaxial



Em que:

σ_{t0} – resistência a tração do concreto;

E_0 – módulo de deformação longitudinal;

d_t – parâmetro de dano a tração;

ε_t^{pl} – deformação plástica a tração

ε_t^{el} – deformação elástica a tração

σ_{c0} – resistência a compressão do concreto – fase elástica;

σ_{cu} – resistência máxima a compressão do concreto;

d_c – parâmetro de dano a compressão;

ε_c^{pl} – deformação plástica a compressão

ε_c^{el} – deformação elástica a compressão

O gráfico da figura 187 apresenta um comportamento linear na relação tensão e deformação até se alcançar o valor da tensão de ruptura alcançada σ_{t0} . A tensão de ruptura corresponde ao início de micro-fissuras no material. Além da tensão de ruptura, a formação de micro fissuras é representada macroscopicamente com o amortecimento da resposta da relação tensão x deformação que induz a deformações localizadas nas estruturas de concreto.

Já o gráfico 188, que representa o comportamento a compressão do concreto, apresenta um comportamento linear até o valor de σ_{c0} . A resposta

no regime plástico é tipicamente caracterizada pelo ganho de resistência seguido pelo amortecimento da deformação além da tensão máxima. Esta representação, apesar de ser um pouco simplificada, captura característica e comportamento do concreto.

Conforme apresenta as figuras 187 e 188, quando o corpo de prova é descarregado a partir de qualquer ponto sobre a curva tensãoxdeformação, a resposta do descarregamento apresenta uma redução do E_0 . A degradação da rigidez elástica é devido a dois parâmetros que são d_c e d_t , que de acordo com o Abaqus, esses parâmetros dependem das seguintes variáveis:

- a) Deformação plástica;
- b) Temperatura
- c) Campos variáveis.

No entanto, para análise que será realizada neste trabalho será considerando apenas como variável deformação plástica. A variação desses dois parâmetros é de 0 a 1, onde os valores mais próximos de 0 apresentam pouca degradação e quando mais próximo de 1 apresenta uma degradação do corpo de prova.

$$0 \leq d_c \leq 1$$

$$0 \leq d_t \leq 1$$

De acordo com o programa, o cálculo da tensão, tanto a tração e compressão, respectivamente, com base nas seguintes equações.

$$\sigma_t = (1 - d_t) * E_0 * (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl})$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) * E_0 * (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl})$$

O valor da tensão, tanto de tração ou compressão, após a tensão máxima foi calculado de acordo com as seguintes equações.

$$\bar{\sigma}_{ti} = \frac{\sigma_t}{(1 - d_{ti})}$$

$$\bar{\sigma}_{ci} = \frac{\sigma_c}{(1 - d_{ci})}$$

Com base na equação anterior é possível calcular os parâmetros de dano, tração e compressão, respectivamente, isolando o parâmetro de dano em cada uma das equações.

$$d_{ti} = 1 - \frac{\bar{\sigma}_{ti}}{\sigma_t}$$

$$d_{ci} = 1 - \frac{\bar{\sigma}_{ci}}{\sigma_c}$$

11.1.2 Armadura

No Abaqus, a armadura em estruturas de concreto é tipicamente por meio de barras de aço, que são consideradas como unidimensionais que pode ser definido individualmente, envolvido em superfícies orientadas.

Para barras são tipicamente utilizados modelos de metal para plasticidade para descrever o comportamento do material e são superpostas sobre a malha de um elemento padrão utilizada para o modelo do concreto.

Quanto a abordagem da modelagem, o comportamento do concreto é considerado independentemente da barra. Os efeitos são associados com a interface armadura/concreto, como aderência e efeito pino, são modelados aproximadamente pela introdução de uma rigidez a tração dentro da modelagem de concreto para simular a transferência de carregamento através das fissuras sobre as barras.

Informações sobre a rigidez a tração será apresentado no tópico a seguir.

11.1.3 Definição da Rigidez a Tração

O comportamento pós – falha para deformações diretas é modelada com rigidez a tensão, que permite definir a suavização da deformação do comportamento do concreto fissurado. Este comportamento também permite os efeitos da interação da armadura – concreto para ser simulado de uma maneira simples. É possível implementar essa rigidez de duas maneiras que são por meio da relação tensão x deformação ou por meio da aplicação do critério de energia de fratura a fissuração.

11.1.3.1 Relação Tensão – Deformação Pós – Pico

A especificação de concreto armado para o comportamento pós – pico geralmente é dado por meio da tensão de pós – pico como uma função da deformação de fissuração, ε_t^{ck} . O valor de ε_t^{ck} é dado por:

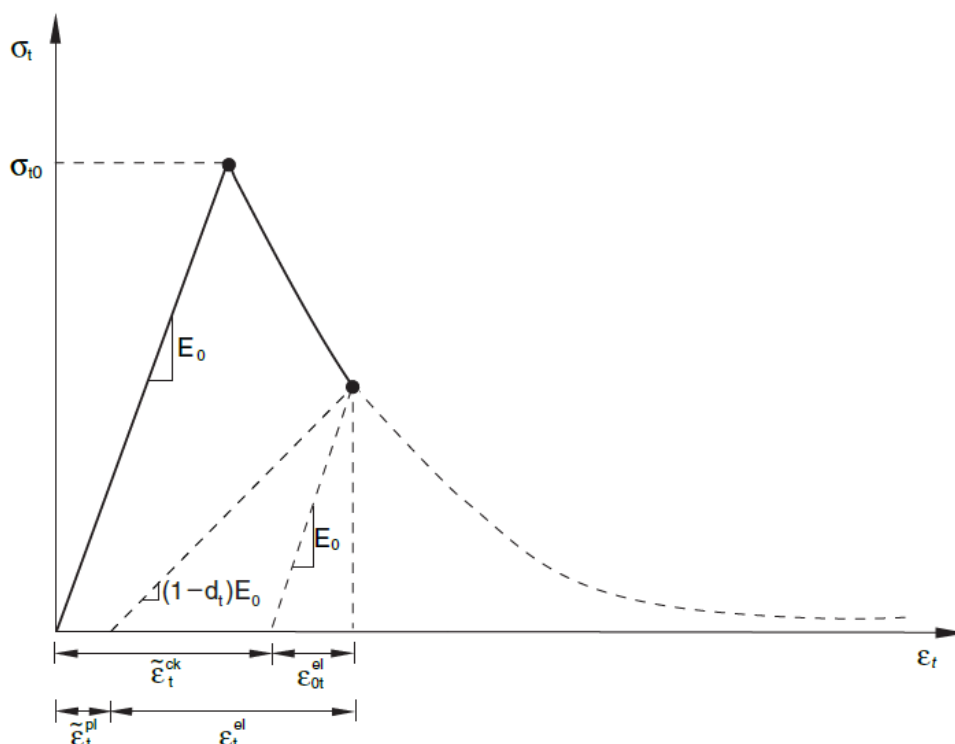
$$\varepsilon_{ti}^{ck} = \varepsilon_{ti} - \varepsilon_t^{el}$$

Vale destacar que a deformação elástica ε_t^{el} , corresponde ao material sem o dano que pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\varepsilon_t^{el} = \frac{\sigma_t}{E_0}$$

A figura 189 ilustra os parâmetros explicados, bem como a maneira de considerar o parâmetro de dano.

Figura 189 - Ilustração da Deformação de Fissuração



Para prevenir problemas numéricos, o Abaqus recomenda um limite inferior sobre a tensão pós – pico igual ao centésimo da tensão inicial de pico, ou seja:

$$\sigma_t \geq \frac{\sigma_{t0}}{100}$$

Os dados sobre rigidez a tração são obtidos por meio da deformação de fissuras (ε_t^{ck}). Quando os dados de descarregamento estão disponíveis, os dados do Abaqus são fornecidos ao Abaqus por meio da curva de dano a tração por deformação da fissuração ($d_t \times \varepsilon_t^{ck}$), conforme a equação a seguir.

$$\varepsilon_t^{pl} = \varepsilon_t^{ck} - \frac{d_t}{(1 - d_t)} * \frac{\sigma_t}{E_0}$$

O Abaqus realiza esse cálculo automaticamente a conversão da deformação de fissuração para deformação plástica conforme a equação anterior.

Ao inserir os dados de dano a tração e as respectivas deformações de fissuração, é importante verificar se os valores inseridos não resultaram em valores negativos ou decrescentes em relação ao valor de deformação de fissuração.

Nas situações em que há pouca ou nenhuma armadura, a especificação da relação tensão x deformação no trecho pós-pico apresenta uma sensibilidade nos resultados devido a malha, no sentido que a previsão dos elementos finitos é que o resultado não convirja para um único solução para malha

refinada porque o refinamento conduz a faixas mais estreitas de fissuras. Esse problema normalmente ocorre se as fissuras ocorrem apenas em regiões pontuais na estrutura e o refinamento da malha não resulta na formação de fissuras adicionais.

No cálculo prático de concreto armado, a malha geralmente é utilizada de tal modo que cada elemento contenha a barra. A interação entre armadura e concreto tende a reduzir a sensibilidade da malha, fornecendo uma taxa razoável de rigidez a tração que é introduzida no modelo de concreto para simular essa situação. Isto requer uma estimativa do efeito da rigidez tração, o qual depende de vários fatores como: densidade da armadura, a qualidade da aderência entre a barra e concreto, o tamanho relativo do agregado do concreto com o diâmetro da barra e a malha. Um ponto de partida razoável para o concreto armado, modelado com uma malha bastante detalhada, é assumir que a suavização da deformação após a falha reduz linearmente a tensão para zero para uma deformação total de cerca de 10 vezes a deformação ruptura.

11.1.4 Definição do Comportamento a Compressão

É possível definir uma curva tensão vs deformação para o comportamento a compressão uniaxial fora do trecho elástico. Os dados de tensão a compressão, assim como no comportamento a tração, devem ser fornecidos ao programa em forma de tabela os valores de deformação inelástica. Além disso, tanto a tensão quanto a deformação devem ser inseridos em módulo. Da mesma maneira que no comportamento a tração, a curva de tensão x deformação do comportamento a compressão do concreto pode ser inserida a curva mesmo após a tensão máxima que seria o regime de suavização da deformação.

A redução da tensão após alcançar a tensão máxima é dada a partir da deformação inelástica (ε_c^{in}), ao invés de deformação plástica (ε_c^{pl}). A deformação inelástica é definida como a deformação total menos a deformação elástica do material antes de ocorrer o dano, conforme a equação a seguir.

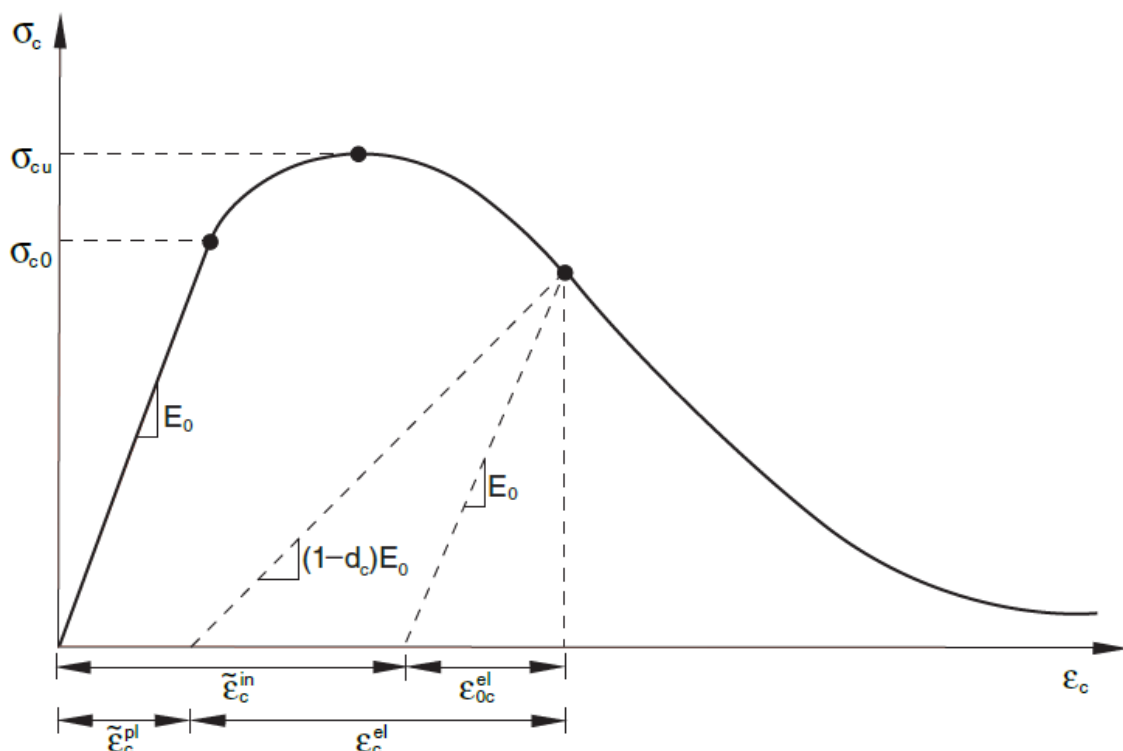
$$\varepsilon_{ci}^{pl} = \varepsilon_{ci} - \varepsilon_c^{el}$$

Como dito anteriormente a deformação elástica ε_c^{el} corresponde ao material sem o dano que pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\varepsilon_c^{el} = \frac{\sigma_c}{E_0}$$

A figura 190 ilustra os parâmetros explicados, bem como a maneira de considerar o parâmetro de dano.

Figura 190 - Interpretação Gráfica da Deformação Inelástica a Compressão



Os dados para representar a suavização da curva de tensão x deformação após a tensão máxima são obtidos por meio da curva de dano a compressão x deformação inelástica ($d_c \times \varepsilon_c^{in}$). O Abaqus realiza o cálculo automaticamente da conversão da deformação inelástica para deformação plástica conforme a equação a seguir.

$$\varepsilon_{ci}^{pl} = \varepsilon_{ti}^{in} - \frac{d_c}{(1 - d_c)} * \frac{\sigma_c}{E_0}$$

11.1.5 Definição de Dano e Rigidez Recuperada

Os parâmetro de dano d_c e d_t , podem ser inserido no Abaqus por meio de tabelas. Vale destacar que se o os parâmetros de dano não são informados o programa considerará que o modelo se comporta da seguinte maneira:

$$\varepsilon_{ci}^{pl} = \varepsilon_{ti}^{in}$$

$$\varepsilon_t^{pl} = \varepsilon_t^{ck}$$

No Abaqus, as variáveis de dano são tratadas como quantidades pontuais de materiais não decrescentes. Dado qualquer incremento durante a análise, o novo valor de cada variável de dano é obtida por como o valor máximo entre o incremento anterior e o valor correspondente ao estado padrão, interpolado a partir dos dados tabulares.

A escolha das propriedades de dano é importante já que, geralmente, um dano excessivo pode criar um efeito crítico na taxa de convergência. É recomendado evitar o uso de variáveis de dano próximo de 0,99, que representa 99% na redução da rigidez.

11.1.6 Plasticidade do Concreto

Neste tópico deve se definir o potencial de fluidez, superfície de escoamento, e os parâmetros de viscosidade para o Abaqus/Standard para o modelo CDP do concreto.

Para se calcular a plasticidade do concreto é necessário a definição da tensão efetiva no material. Essa definição é feita baseada na seguinte equação:

$$\bar{\sigma} = D_0^{\text{el}} : (\epsilon - \epsilon^{\text{pl}})$$

O fluxo do potencial plástico e a superfície de escoamento faz uso de duas tensões variantes de um tensor de tensão efetiva, denominado tensão hidrostática ($\bar{p}$) e a tensão equivalente de von Mises ($\bar{q}$), através das respectivas equações:

$$\bar{p} = -\frac{1}{3} \text{tr}(\bar{\sigma})$$

$$\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2} (\bar{S} : \bar{S})}$$

Onde $\bar{S}$ é desvio da tensão efetiva que é definido como:

$$\bar{S} = \bar{\sigma} + \bar{p}I$$

Para o modelo CDP é considerado que o potencial de fluidez plástica não é associado. O potencial de fluidez (G) para este modelo é a função hiperbólica de Drucker – Prager que é definida como:

$$G = \sqrt{(\epsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi$$

Onde:

ϵ – é um parâmetro referente a excentricidade que define a taxa em que a função aproxima a uma assíntota, com isso o potencial de fluidez tende a uma reta quando a excentricidade tende a zero.

σ_{t0} – é a tensão uniaxial de ruptura a tração, tomado a partir dos dados de rigidez a tração especificada.

ψ – ângulo de dilatância medido entre o plano de tensão $\bar{p} - \bar{q}$ em uma alta pressão de confinamento.

O fluxo de potencial, que é contínuo e suave, assegura que a direção do fluxo é sempre definida com exclusividade. A função aproxima-se assintoticamente do potencial de fluxo linear de Drucker-Prager a uma alta pressão de confinamento e intercepta o eixo de pressão hidrostática a 90° .

A excentricidade padrão do potencial de fluxo é o que implica que o material tem quase a mesmo ângulo de dilatância sobre um grande intervalo dos valores de tensão de compressão. Com o aumento do valor providencia uma maior curvatura do potencial de fluxo, implicando que o aumento do ângulo de dilatância mais rapidamente com a redução do confinamento. Valores que são significativamente menores do que o valor padrão podem conduzir para um problema de convergência do material quando aplicada uma baixa pressão confinante devido a curvatura muito ajustada do potencial de fluxo localmente onde ele intercepta o eixo p .

Quanto a superfície de escoamento, o modelo usa a função de Lubliner et al (1989), com as modificações propostas por Lee e Fenves (1998) que considera para diferentes evoluções de tensões de tração e compressão. A evolução da superfície de escoamento é controlada pelas variáveis de enrijecimento, ϵ_t^{pl} e ϵ_c^{pl} . Em termo de tensão efetiva, a função de escoamento (F) conforme a seguinte equação:

$$F = \frac{1}{1 - \alpha} * [\bar{q} - 3 * \alpha * \bar{p} + \beta(\epsilon^{pl})(\overline{\sigma_{m\acute{a}x}}) - (-\overline{\sigma_{m\acute{a}x}})] - \overline{\sigma_c}(\epsilon_c^{pl}) = 0$$

Onde:

$$\alpha = \frac{(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}{2 * (\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}; 0 \leq \alpha \leq 0,5$$

$$\beta = \frac{\overline{\sigma_c}(\epsilon_c^{pl})}{\overline{\sigma_t}(\epsilon_t^{pl})} * (1 - \alpha) - (1 + \alpha)$$

$$\gamma = \frac{3 * (1 - K_c)}{2 * K_c - 1}$$

Em que:

$\widehat{\sigma_{\text{máx}}}$ – é a máxima tensão efetiva principal

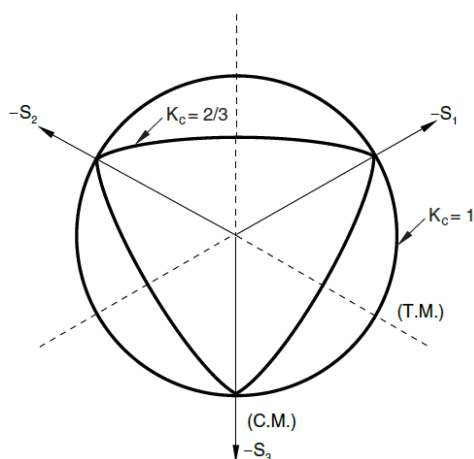
σ_{b0}/σ_{c0} – é uma relação entre tensão de compressão de escoamento biaxial e tensão de compressão de escoamento uniaxial, o valor padrão do programa é 1,16.

$\overline{\sigma_c}(\epsilon_c^{pl})$ – é a tensão de coesão efetiva de compressão

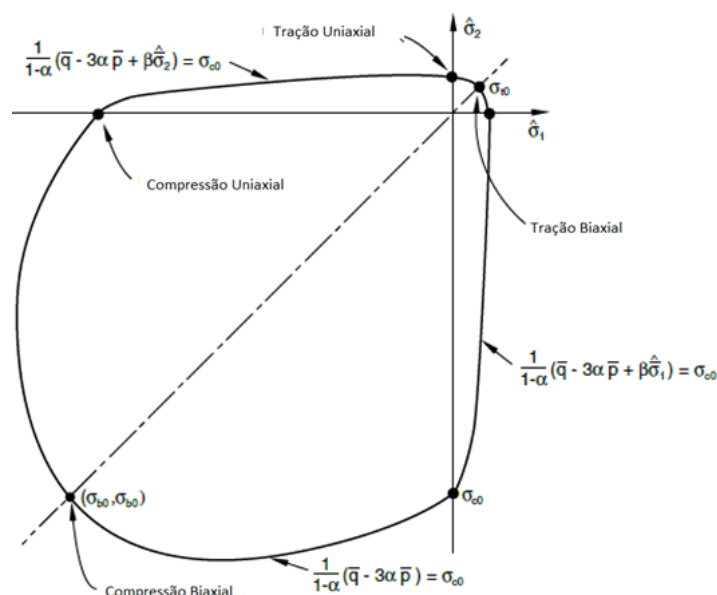
$\overline{\sigma_t}(\epsilon_t^{pl})$ – é a tensão de coesão efetiva de tração

K_c – é a relação entre a segunda tensão invariante sobre o meridiano de tração, $q_{(TM)}$, com o meridiano de compressão, $q_{(CM)}$, no escoamento inicial para qualquer valor dado da invariante pressão (p) de tal modo que tensão máxima principal é negativa, $\widehat{\sigma_{\text{máx}}} < 0$, conforme figura 191. É necessário que seja satisfeita a seguinte condição, $0,5 < K_c \leq 1,0$ e o valor padrão do programa é 2/3.

Figura 191 - Superfície de Escoamento dentro de planos desviante, correspondentes a diferentes valores de K_c



Na figura 191 é apresentado as superfícies de escoamento típicas sobre uma variação de plano já a figura 192 para uma condição do plano de tensão.

Figura 192 - Superfície de Escoamento no Plano de Tensão

Outro aspecto sobre o modelo CDP é a regularização viscoplástica em que os modelos dos materiais exibem um comportamento de amolecimento e degradação da rigidez frequente que conduzem a uma dificuldade severa de convergência em programas de análise implícita como é o caso do Abaqus. Uma técnica comum para superar algumas dessas dificuldades de convergência é o uso de uma regularização viscoplástica das equações constitutivas, que causa uma rigidez tangencial consistente do amolecimento do material para tornar positivos incrementos suficientemente pequenos.

O modelo CDP pode ser regularizado no Abaqus/Standard usando viscoplasticidade permitindo que as tensões que estejam fora da superfície de escoamento. No Abaqus, de acordo com o manual, é utilizada uma generalização da regularização de Duvaut-Lions, de acordo com o qual o tensor da taxa de deformação viscoplástica, ε_v^{pl} , é definido como:

$$\varepsilon_v^{pl} = \frac{1}{\mu} (\varepsilon^{pl} - \varepsilon_v^{pl})$$

Onde:

μ – é o parâmetro de viscosidade representando o tempo de relaxação do sistema viscoplástico;

Semelhantemente, a variável de degradação da rigidez de viscosidade, d_v , para o sistema viscoplástico é definida como:

$$d_v = \frac{1}{\mu} (d - d_v)$$

A relação tensão por deformação do modelo viscoplástico é dado por:

$$\sigma = (1 - d_v) D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon_v^{pl})$$

Utilizando a regularização viscoplástica com um valor pequeno para o parâmetro de viscosidade (pequenas comparações para o tempo de incremento característico) geralmente melhora a taxa de convergência do modelo em um regime de amolecimento, sem comprometer os resultados. A ideia básica é que a solução do sistema viscoplástico relaxa para o caso $t/\mu \rightarrow \infty$, onde t representa o tempo. É possível especificar o valor do parâmetro de viscosidade como definição do comportamento do material no CDP. Se o parâmetro de viscosidade é diferente de zero, os resultados de saída da deformação plástica e a degradação da rigidez referem aos valores viscoplástico, ε_v^{pl} e d_v . No Abaqus o valor padrão do parâmetro de viscosidade é zero, para que não seja realizada a regularização viscoplástica.

11.1.7 Visualização da Direção das Fissuras

Ao contrário do modelo baseado em uma abordagem de espalhamento das fissuras (smeared crack), o modelo CDP não tem uma noção de desenvolvimento de fissuras no material no ponto de integração. Contudo é possível introduzir o conceito de direcionar uma fissura efetiva com o propósito de obter uma visualização gráfica das fissuras padrões em uma estrutura de concreto. É possível adotar um critério diferente com uma estrutura de uma plasticidade de dano escalar para a definição da direção das fissuras. É possível considerar que o início das fissuras são nos pontos onde a deformação plástica a tração é maior do que zero, $\varepsilon_t^{pl} > 0$, e a deformação plástica máxima principal é positiva. A direção do vetor normal para o plano de fissura é considerado paralelo a direção da deformação plástica máxima principal. A direção pode ser visualizada no módulo "Visualization" do Abaqus/CAE.

11.1.8 Elementos

O Abaqus oferece uma variedade de elementos para uso do modelo CDP, como por exemplo:

- a) Treliça (Truss);
- b) Placa (Shell);
- c) Plano de Tensão (Stress Plane);
- d) Plano de Deformação (Strain Plane);

- e) Plano Generalizado de Deformação (Generalized Plane Strain);
- f) Assimetria (Axisymmetric);
- g) Elementos de Três Dimensões (Three-Dimensional Elements).

Ainda nesse grupo é possível utilizar o elemento viga (beam). Contudo o elemento de viga no espaço que incluem tensão de cisalhamento causada por torção e não inclui tensão radial ou circunferencial (como B31, B31H, B32, B32H, B33 e B33H) não pode ser utilizado em paredes esbeltas, elemento de viga com a seção aberta e elemento de tubo (PIPE) pode ser utilizado com o modelo CDP no Abaqus/Standard.

Além disso, há identificadores de saída padrão disponíveis no Abaqus que são apresentando na tabela 130. Vale destacar que essas variáveis são específicas para o modelo CDP do concreto.

Tabela 130 – Dados de Saída

Variável	Simbologia	Definição
DAMAGEC	d_c	Dano a Compressão
DAMAGET	d_t	Dano a Tração
PEEQ	ε_c^{pl}	Deformação Plástica Equivalente a Compressão
PEEQT	ε_t^{pl}	Deformação Plástica Equivalente a Tração
SDEG	d	Degradação da Rigidez
DMENER	Não se aplica	Energia Dissipada por Unidade de Volume pelo Dano
ELDMD		Energia Total Dissipada no Elemento pelo Dano
ALLDMD		Energia Dissipada no Modelo Total (ou Parcial) pelo Dano. A contribuição a partir do ALLDMD está incluída na Energia Total de Deformação (ALLIE)
EDMDDEN		Energia Dissipada por Unidade de Volume no Elemento pelo Dano
SENER		Recuperação Parcial da Energia por Unidade de Volume no Elemento pelo Dano
ELSE		Recuperação Parcial da Energia no Elemento
ALLSE		Recuperação Parcial da Energia no Modelo Total (ou Parcial)
ESEDEN		Recuperação Parcial da Energia por Unidade de Volume no Elemento

11.2 Superfícies de Contato

Muitos problemas de engenharia envolvem o contato de dois ou mais componentes. Nestes problemas a força normal para superfície de contato atuam em dois corpos quando eles tocam um ao outro. Se há o atrito entre as superfícies, forças de cisalhamento podem ser criadas para resistir ao deslizamento tangencial entre os corpos. De maneira geral o objetivo das

simulações de contato e para identificar as áreas sobre as superfícies que estão em contato é calcular a pressão do contato gerado.

A análise da condição de contato por elementos finitos é uma classe especial de restrição descontínua, permitindo que as forças possam ser transmitidas a partir de uma parte do modelo para outra. A restrição é descontínua porque é aplicada somente quando duas superfícies estão em contato. Quando as duas superfícies separadas, não se aplica essas restrições. As análises têm que ser para detectar quando duas superfícies estão em contato e se aplica as devidas restrições de contato. Semelhantemente, a análise deve ser capaz de detectar qual das duas superfícies se separam e removem as restrições de contato.

11.2.1 Visão Geral da Aplicabilidade de Contato no Abaqus

Simulações de contato no Abaqus/Standard podem tanto ser baseada em superfície ou baseadas em elementos de contato. Simulações de contato no Abaqus/Explicit são baseadas somente em superfície. Neste manual, será discutida o contato definido como Surface-Based.

Este tipo de contato pode utilizar tanto o algoritmo de contato geral como contato por par de algoritmo. O algoritmo de contato geral permite a definição de contato fortemente automatizada, onde o contato é baseado em uma definição de superfície abrangente gerada automaticamente. Por outro lado, o par de algoritmo requer que o usuário selecione explicitamente um par de superfícies que podem potencialmente entrar em contato.

A discussão de contato no manual é endereçada a abordagem de par de algoritmo e contato geral no Abaqus/Standard e contato geral em Abaqus/Explicit.

11.2.2 Definindo Superfícies

Superfícies são criadas a partir das faces dos elementos de um material subjacente. A discussão a seguir assume que as superfícies serão definidas no Abaqus/CAE. Restrições sobre os tipos de superfícies que podem ser criadas no Abaqus são apresentadas no tópico "Surface Definition".

11.2.3 Superfícies sobre Elementos Contínuos

Para sólidos contínuos de duas e três dimensões o usuário especifica quais regiões de uma parte formará o contato por meio da seleção de regiões de uma parte do(s) modelo(s).

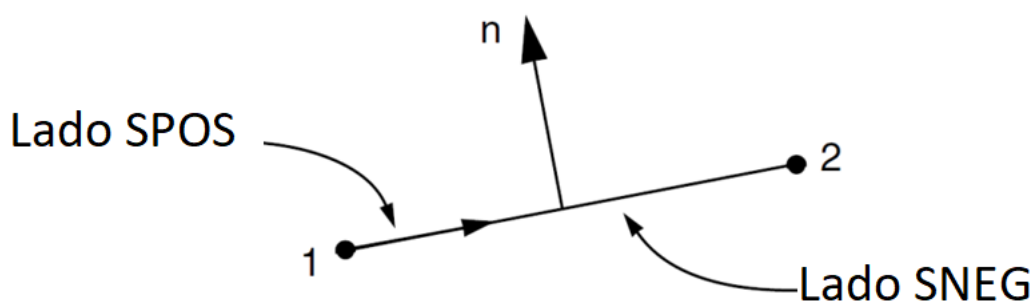
11.2.4 Superfícies sobre Estruturas, Superfície e Elementos Rígidos

Há quatro maneiras de se definir superfície sobre estruturas, superfícies, e elementos rígidos que são as seguintes:

- a) Single-Sided Surfaces – SSS;
- b) Double-Sided Surfaces – DSS;
- c) Edge-Based Surfaces – EBS;
- d) Node-Based Surfaces – NBS;

Para o tipo SSS, o usuário especifica qual lado do elemento forma a superfície de contato. O lado da direção positiva do elemento normal é denominada como SPOS, enquanto que o lado da direção negativa do elemento normal é denominada SNEG, como apresenta a figura 193 a seguir.

Figura 193 - Superfícies de um Elemento de Placa ou Elemento Rígido

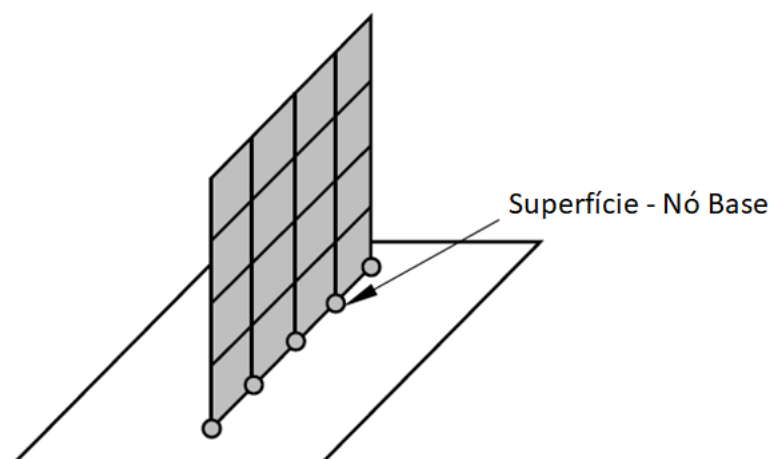


Ja o tipo DSS apresenta uma abordagem mais geral porque tanto a face SPOS quanto SNEG e todas as arestas livres são incluídas automaticamente como parte da superfície de contato. O contato pode ocorrer tanto sobre uma face quanto sobre arestas dos elementos que formam a DSS. Por exemplo, um nó de sacrifício pode iniciar de um lado de um DSS e então percorrer ao redor do perímetro para outro lado durante o curso da análise. De maneira geral, DSS pode ser definida somente para placas tri-dimensionais, membrana, superfícies, e elementos rígidos. Dentro do modo Abaqus/Explicit o algoritmo de contato geral é auto-contato dentro do con-

tato do tipo par de algoritmo reforça o contato entres as faces mesmo que sejam definidos como de um lado (SSS). O DSS não pode ser utilizada com a formulação padrão do Abaqus/Standard, mas elas podem ser utilizadas com uma opção certa para formulações de contato. Maiores explicações sobre essa formulação é possível encontrar no item: Defining contact pairs in Abaqus/Standard,” Section 35.3.1 of the Abaqus Analysis User’ s Manual.

Além dessas duas maneiras de considerar o contato, existe a EBS que considera o contato do perímetro das arestas do modelo. Esse tipo de formulação pode ser utilizada para modelar o contato sobre as arestas de uma placa. Por último, tem se a NBS, a qual é definida como o contato entre um conjunto de nós e uma superfície, pode ser utilizada para alcançar o mesmo efeito de EBS, como mostra a figura 194.

Figura 194 - Exemplo de Contato do Tipo NBS



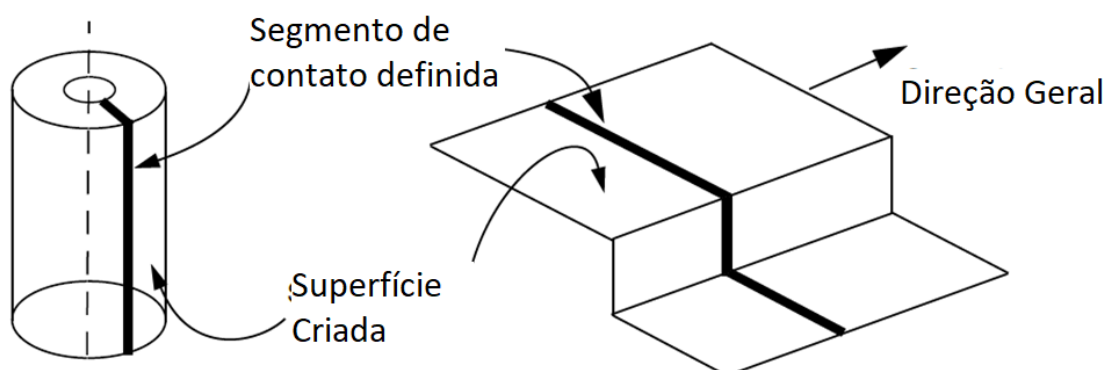
11.2.5 Superfícies Rígidas

Superfícies rígidas são superfícies de corpos rígidos. Elas podem ser definidas de forma analítica, ou podem ser baseadas sobre superfícies subjacentes dos elementos associados com o corpo rígido.

A superfície analítica rígida tem três formas básicas. Considerando o campo bidimensional, a forma específica de um superfície analítica rígida é um segmento de superfícies rígidas. A seção transversal de uma superfície é definida em duas dimensões no plano do modelo usando linhas retas, arcos circulares ou arcos parabólicos. A seção transversal de uma superfície rígida tridimensional é definida por um plano especificado pelo usuário da mesma maneira utilizada para definir superfícies bidimensionais. Então, esta seção transversal é obtida a partir da revolução ao redor do eixo ou ao longo da

extrusão de um vetor para formar uma superfície tridimensional, como apresenta a figura 195.

Figura 195 - Superfícies Analíticas Rígidas



A vantagem das superfícies analítica rígida é que elas são definidas somente para um pequeno número de pontos geométricos e são eficientes computacionalmente. Contudo, dentro do campo tridimensional o intervalo de formas que pode ser criado é limitado.

Superfícies rígidas discretizadas são baseadas em elementos subadjacentes que compõe o corpo rígido; portanto, elas podem ser mais complexas geometricamente do que as superfícies rígidas analíticas. As superfícies rígidas discretizadas são definidas exatamente da mesma maneira que as superfícies sobre corpos deformáveis.

11.3 Interação entre Superfícies

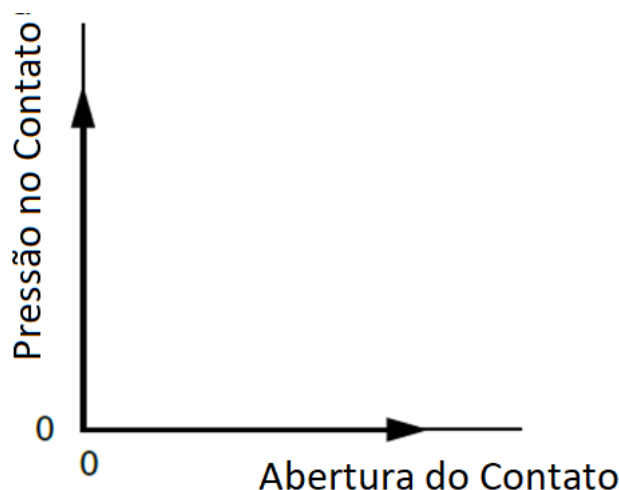
A interação entre superfícies de contato consiste de dois componentes: um normal para superfície e outro tangencial. A componente tangencial consiste no movimento relativo, ou seja, escorregamento das superfícies e, possivelmente, tensões de cisalhamento a partir do atrito. Cada interação de contato pode se referir a uma propriedade de contato que especifica um modelo para interação entre as superfícies de contato. Existem vários modelos de interações de contato no Abaqus; o modelo padrão é o contato "Frictionless" sem aderência.

11.3.1 Comportamento Normal para Superfícies

O afastamento entre duas superfícies é denominada por *clearance*. A restrição do contato é aplicado no Abaqus quando o *clearance* entre duas superfícies é zero. Não há limite na formulação do contato sobre a magnitu-

de da pressão do contato que pode ser transmitido entre duas superfícies. As superfícies separadas quando se tem o contato por pressão entre elas se torna zero ou negativa, e a restrição é removida. Este comportamento, se refere ao "Hard Contact", que é o padrão no comportamento de contato no Abaqus e é resumido na relação de contato *pressure-clearance*, conforme a figura 196 a seguir.

Figura 196 - Relação de contato Pressão-Clearance



Pelo default do programa, "Hard Contact" é aplicado diretamente quando se utiliza contato em pares do Abaqus/Standard. A mudança repentina no contato sob pressão que ocorre quando um contato muda de aberto (*clearance* positivo) para fechado (*clearance* igual a zero) algumas vezes traz dificuldades para completar simulações de contato no Abaqus/Standard. O mesmo não ocorre para o Abaqus/Explicit uma vez que a iteração não é necessária para métodos explícitos. Uma alternativa relevante é o contato tipo "Penalty" que é disponível para contato em pares, como discutido em "Contact constraint enforcement methods in Abaqus/Standard," seção 37.1.2 do *Abaqus Analysis User's Manual*. A execução da restrição de contato tipo "Penalty" é uma opção somente disponível para contato geral. Outras fontes de informações incluem "Common difficulties associated with contact modeling in Abaqus/Standard," Section 38.1.2 of the *Abaqus Analysis User's Manual*; "Common difficulties associated with contact modeling using contact pairs in Abaqus/Explicit," Section 38.2.2 of the *Abaqus Analysis User's Manual*; the "Modeling Contact with Abaqus/Standard" lecture notes; and the "Advanced Topics: Abaqus/Explicit" lecture notes.

11.3.2 Deslizamento entre Superfícies

Além do mais para se determinar se um contato ocorre em um ponto particular, a análise do Abaqus também precisa calcular o deslizamento relativo entre as duas superfícies. Este pode ser um cálculo muito complexo, portanto, o Abaqus faz uma distinção entre as análises quando a magnitude do deslizamento é pequena e aqueles onde a magnitude do deslizamento pode ser limitado. É muito menor o custo computacional para modelos onde o deslizamento entre superfícies é pequeno. O que constitui "*Small Sliding*" é muitas vezes difícil de definir, mas uma orientação geral é que os modelos podem usar a aproximação "*Small Sliding*" se um ponto de contato na superfície não desliza mais do que uma pequena fração de uma dimensão do elemento tipo do modelo.

Vale destacar que o modo de deslizamento "*Small sliding*" não está disponível para contato geral.

11.3.3 Modelos de Atrito

Quando superfícies estão em contato, elas geralmente transmitem esforços de cisalhamento bem como esforço normal através de suas interfaces. Portanto, a análise pode precisar de forças de atrito, que resistam ao deslizamento relativo das superfícies. A equação de atrito proposto por Coulomb é o modelo de atrito mais comum utilizado para descrever as superfícies utilizando o coeficiente de atrito, μ .

O coeficiente de atrito padrão é zero. O movimento tangencial é zero até a superfície de tração alcançar um valor crítico de tensão de cisalhamento, que depende da força normal, de acordo com a equação a seguir:

$$\tau_{crit} = \mu * p$$

Onde:

τ_{crit} – tensão de cisalhamento crítica

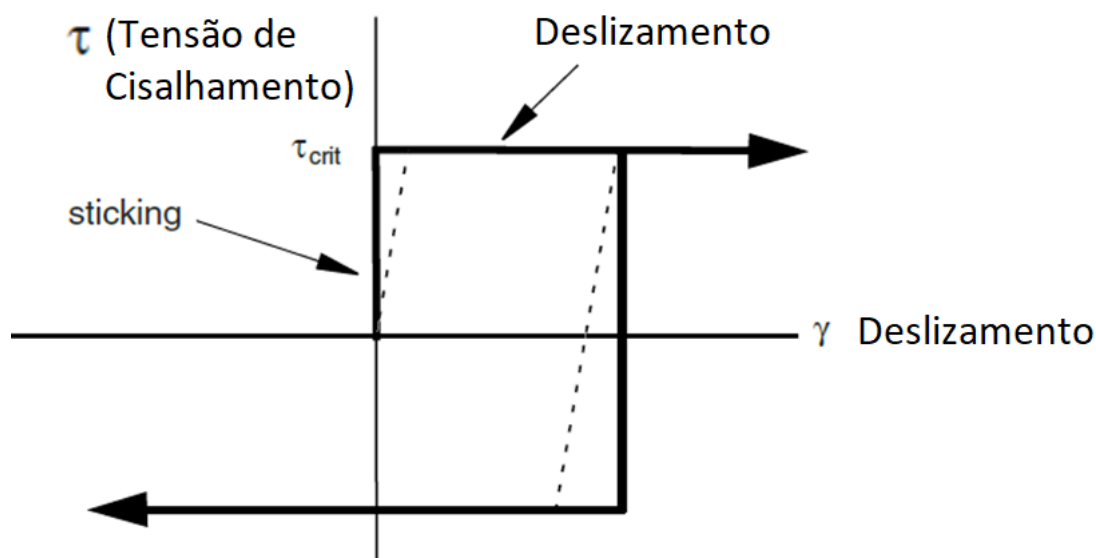
μ – coeficiente de atrito

p – pressão de contato entre as duas superfícies.

Esta equação fornece o limite da tensão de cisalhamento devido ao atrito para as superfícies em contato. As superfícies de contato não deslizarão até a tensão de cisalhamento ultrapassar o valor limite estabelecido pela equação anterior. Para maior parte das superfícies, o valor do coeficiente

de atrito é menor que 1. A equação de atrito proposta por Coulomb pode ser definida com os valores de μ e τ_{crit} . A linha contínua da figura 197 representa o comportamento do modelo de atrito de Coulomb: aqui está o deslizamento relativo zero das superfícies quando estão aderindo (tensão de cisalhamento está abaixo da tensão de cisalhamento crítica) opcionalmente, o limite de tensão de atrito pode ser especificada tanto para superfícies em contato como para superfícies de elementos de base (element-based surface).

Figura 197 - Comportamento ao Atrito das Superfícies



No Abaqus/Standard a descontinuidade entre os dois estados – aderido e deslizamento – pode resultar em um problema de convergência durante a simulação. O usuário deverá incluir o atrito em suas simulações no Abaqus/Standard somente quando elas tem uma influência significativa para a resposta do modelo. Se a simulação de contato com atrito encontrar problemas de convergência, uma das primeiras modificações deve ser tentar diagnosticar a dificuldade e reiniciar a análise sem o atrito. No geral, a presença do atrito não adiciona dificuldades computacionais ao Abaqus/Explicit.

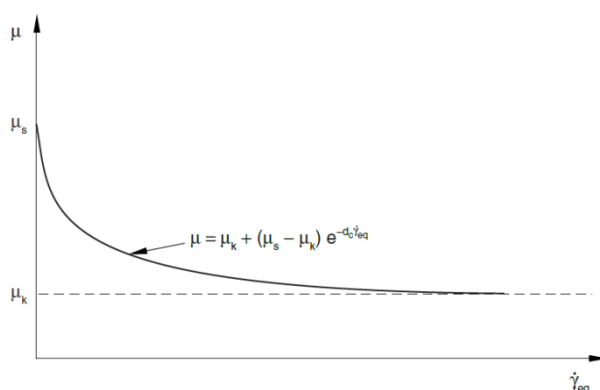
A simulação ideal do comportamento do atrito pode ser muito difícil, assim sendo, por padrão na maioria dos casos, o Abaqus utiliza formulação de atrito "Penalty" considerando um "elastic slip", conforme está representado pelas linhas pontilhadas do gráfico da figura 5. O "deslizamento elástico" é um pequeno valor do deslizamento relativo entre as superfícies que ocorre quando as superfícies devem estar aderindo. Automaticamente o

Abaqus escolhe uma penalidade para a rigidez, que é inclinação da linha pontilhada, de modo que este “elastic slip” permitido seja uma fração muito pequena do comprimento do elemento característico. A formulação de penalidade do atrito trabalha bem para maioria dos modelos, incluindo a maioria das aplicações de formulação para metais.

Naqueles problemas onde precisa ser incluído um comportamento adesão-deslizamento de atrito, a formulação de atrito de Lagrange pode ser utilizada no Abaqus/Standard e a formulação cinemática pode ser utilizada no Abaqus/Explicit. A formulação de atrito de Lagrange é mais “cara” em termos de recursos computacionais utilizados porque o Abaqus/Standard utiliza variáveis adicionais para cada nó da superfície em contato por atrito. Somado a isso, a solução converge mais lentamente de modo a adicionar iterações que são requeridas geralmente. Esta formulação de atrito não é discutida no manual do Abaqus.

Muitas vezes, o coeficiente de atrito no início do deslizamento de uma condição de aderência é diferente do coeficiente de atrito durante o deslizamento estabelecido. O primeiro se refere ao coeficiente de atrito estático, já o segundo se refere ao coeficiente de atrito dinâmico. No Abaqus está disponível uma lei de decaimento exponencial para modelar a transição entre o atrito estático e dinâmico, conforme a figura 198, no entanto esta formulação não é discutida no manual.

Figura 198 - Formulação Exponencial de Decaimento do Coeficiente de Atrito



Dentro do Abaqus/Standard a inclusão do atrito dentro de um modelo acrescenta termos não simétricos ao sistema de equações a ser resolvido. Se o valor do coeficiente de atrito for menor que 0.2, a magnitude e a influência desses termos serão bem pequenas e regulares, a resolução simé-

trica trabalha bem(a menos que a superfície de contato tenha alta curvatura). Para coeficientes de atritos altos, a solução não simétrica é automaticamente utilizada porque melhorará a taxa de convergência. A resolução não simétrica requer duas vezes mais memória do computador e espaço no HD do que a resolução simétrica. Valores altos de coeficiente de atrito não causam quaisquer dificuldades para o Abaqus/Explicit.

11.3.4 Outras opções de Interação

Outro modelo de contato de interação disponível no Abaqus depende do produto da análise e o algoritmo utilizado e pode incluir o comportamento adesivo de contato, comportamento de contato amolecido, fixadores, e amortecimento viscoso do contato. Essas opções não são discutidas neste guia. Detalhes sobre esses itens podem ser encontrados no manual Abaqus Analysis User's.

11.3.4.1 Restrições Surface-Based

As restrições de ligação são utilizados para ligações de duas superfícies para duração da simulação. Cada nó sobre a superfície de sacrifício é restringida para ter o mesmo movimento que um ponto sobre a superfície mestre que é mais próxima. Para uma análise estrutural isto significa que os graus de liberdade translacional, e opcionalmente rotacional, são restringidos.

O Abaqus utiliza as configurações indeformadas do modelo para determinar que os nós de sacrifícios são ligados a superfície mestre. Por meio do padrão do programa, todos os nós de sacrifícios que estão dentro da distância dada da superfície mestre estão amarrados. A distância padrão é baseada na dimensão do elemento padrão da superfície mestre. Este padrão pode ser substituído de duas formas que são:

- a) Especificando a distância com que os nós de sacrifícios precisam encontrar a partir da superfície mestre para ser restringida;
- b) Especificando o nome de um conjunto contendo os nós que serão restritos.

Nós de sacrifícios podem também ser ajustado de modo que encontrem exatamente sobre as superfícies mestre. Se os nós de sacrifícios tem que ser ajustado por distâncias que são uma grande fração do tamanho do

comprimento do elemento(para que os nos de sacrifícios esteja ligado), o elemento pode se tornar distorcido consideravelmente; se possível deve se evitar estes tipos de ajustes.

11.4 Definição de Contato no Abaqus/Standard

O primeiro passo para definição dos pares de contato, é opcionalmente o contato geral, no Abaqus/Standard é definir as superfícies dos corpos que poderiam potencialmente entre em contato. O próximo passo é especificar as superfícies que interagem com cada superfície, estas são as interações de contato. O passo final é definir o modelo mecânico de propriedade que governa o comportamento das superfícies quando estiver em contato.

A definição das superfícies é opcional para contato geral desde que todas as superfícies EBS são automaticamente criadas quando o contato geral é utilizado. O usuário pode utilizar superfícies de emparelhamento para incluir regiões não incluídas nas superfícies padrão, para impedir interações entre regiões diferentes do modelo, ou para substituir as atribuições de propriedades de contatos globais. Por exemplo, se o usuário quiser aplicar um certo coeficiente de atrito para maioria das superfícies mas poucas superfícies no modelo, pode-se atribuir o coeficiente de atrito primário globalmente e então substituir esta propriedade para um dado par de superfícies definida pelo usuário.

11.4.1 Interações de Contato

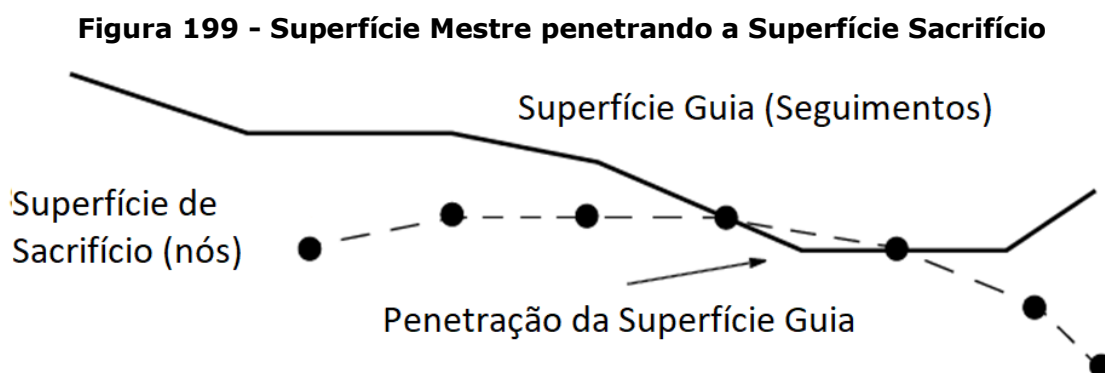
Em uma simulação de Abaqus / Standard, o contato possível é definido ao atribuir os nomes das superfícies a uma interação de contato (abordagem de pares de contato) ou invocando um EBS com tudo incluído como definido automaticamente como o domínio de contato(abordagem contato geral). Para ambas as abordagens, cada interação de contato precisa referenciar a uma propriedade de contato, da mesma maneira que é necessário referenciar para um elemento a propriedade do elemento. O comportamento constitutivo, como relação com contato pressure-clearance e atrito, pode ser incluído nas propriedades de contato.

Quando o usuário define um interação de contato, é preciso decidir se a magnitude do deslizamento relativo será pequeno ou grande. O padrão do

programa é a formulação mais geral denominada *finite-sliding*. A formulação *Small-Sliding* (disponível somente contato em pares) é apropriado se o movimento relativo das duas superfícies for menor que um pequena fração do comprimento característico de um tamanho de elemento. Utilizando a formulação *Small-Sliding* quando aplicável resulta em uma análise mais eficiente.

11.4.2 Superfícies Mestre e Sacrício

Por padrão, os pares de contato do Abaqus/Standard utiliza um algoritmo de contato puro Mestre-Sacrício: nós sobre uma superfície (sacrício) não podem penetrar os segmentos que compõe a outra superfície (mestre), como apresentado na figura 199. O algoritmo não coloca restrições sobre a superfície mestre; ela pode penetrar a superfície de sacrifício entre os nós de sacrifício, como mostra figura 199.



Devido a formulação estrita Mestre-Sacrício, o usuário deve ter cuidado para selecionar as superfícies mestre e sacrifício corretamente em ordem para alcançar a melhor simulação de contato possível. Algumas regras simples estão a seguir:

- a) A superfície de sacrifício dever ter a superfície mais fina;
- b) Se a densidade das malhas forem similares, a superfície de sacrifício deve ser a superfície com o material subjacente mais suave.

O algoritmo de contato geral no Abaqus/Standard reforça o contato em um sentido médio entre as superfícies de interação; Abaqus/Standard automaticamente atribui as funções mestre e sacrifício.

11.4.3 Discretização do Contato

Abaqus/Standard oferece dois métodos de discretização que são os seguintes:

- a) Método tradicional *Node-to-Surface*
- b) Método *Surface-to-Surface*

O método de discretização *node-to-surface* define condições entre cada nó de sacrifício e a superfície mestre. O método de discretização *Surface-to-Surface* considera a forma das superfícies mestre e sacrifício quando define as restrições de contato. O algoritmo de contato em par pode utilizar qualquer um dos métodos de discretização; contato geral utiliza somente a abordagem *Surface-to-Surface*.

11.4.4 Small and Finite Sliding

Quando se utiliza a formulação *Small-Sliding*, Abaqus/Standard estabelece relações entre os nós de sacrifícios e as superfícies mestre no início da formulação. O Abaqus/Standard determina qual o segmento sobre a superfície mestre interagirá com cada nó da superfície de sacrifício. O programa mantém estas relações ao longo da análise, nunca mudando os segmentos que interagem com as superfícies mestre com os nós de sacrifício. Se a não linearidade geométrica está incluída no modelo, o algoritmo *Small-Sliding* considera para qualquer rotação e deformação da superfície mestre e atualiza o caminho da carga através do qual as forças de contato são transmitidas. Se a não linearidade geométrica não está incluída no modelo, qualquer rotação ou deformação da superfície mestre é ignorada e o caminho de carga permanece fixo.

A formulação de contato *Finite-Sliding* requer para o Abaqus/Standard um caminho continuamente que a parte da superfície mestre está em contato com cada nó de sacrifício. Este é um cálculo muito complexo, especialmente se os dois corpos em contato são deformáveis. As estruturas em tais simulações pode ser bi ou tridimensional. Abaqus/Standard também pode modelar o auto-contato *Finite-Sliding* de um corpo deformável. Essa situação ocorre quando uma estrutura se dobra sobre si mesma.

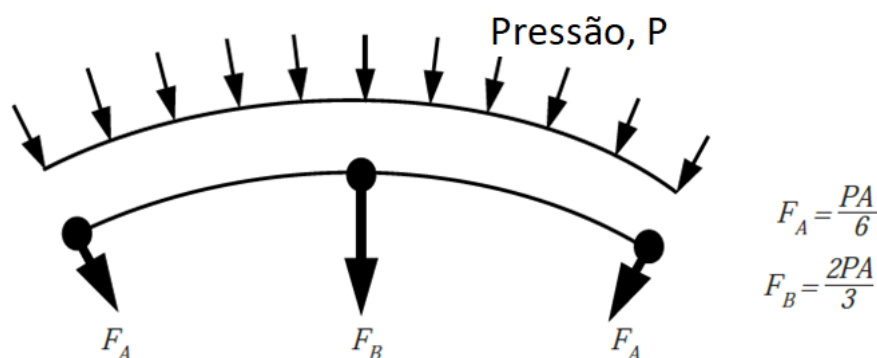
A formulação *Finite-Sliding* para contato entre corpos deformáveis é uma superfície não rígida e tão complexa quanto para formulação para dois corpos deformáveis. As simulações onde a superfície mestre é rígida pode ser realizado tanto para modelos bi e tridimensionais.

O algoritmo pares de contato pode considerar tanto efeitos de *Small* ou *Finite Sliding*; contato geral somente considera efeitos do *Finite-Sliding*.

11.4.5 Seleção de Elemento

A seleção de elementos para contato depende fortemente da aplicação de contato utilizada. Por exemplo, para formulação de contato tradicional (ou seja, discretização *Node-to-Surface*) e geralmente melhor para elementos de primeira ordem para as partes de um modelo que formará a superfície de sacrifício. Elementos de segunda ordem às vezes podem causar problemas neste caso por causa da forma como esses elementos calculam cargas nodais consistentes para uma pressão constante. O nó consistente carrega por uma pressão constante, P , de uma segunda ordem, elementos bidimensional com área A como mostrado na figura 200.

Figura 200 - Carregamento de no equivalente para uma pressão constante em duas dimensões - elementos de segunda ordem



A formulação de contato *Node-to-Surface* é baseado em decisões importantes sobre as forças atuantes sobre os nós de sacrifícios. Uma dificuldade ao algoritmo é informar a distribuição de forças apresentada na figura 8 que representa uma pressão de contato constante ou uma atual variação através do elemento. As forças nodais equivalentes para tridimensional, elementos de bloco de segunda ordem são ainda mais confusos porque nem sequer tem o mesmo sinal para uma pressão constante, tornando muito difícil ao algoritmo para trabalhar corretamente, especialmente para um contato não uniforme. Sendo assim, para evitar esses problemas, o Abaqus

qus/Standard automaticamente adiciona um nó no meio da face para qualquer face de segunda ordem, blocos tridimensionais ou elementos de cunha que definem a superfície de sacrifício quando são utilizados com a formulação *Node-to-Surface*. As forças nodais equivalentes para elementos de face de segunda ordem com o nó de um meio da face tem o mesmo sinal para uma pressão constante, apesar delas ainda diferir consideravelmente na magnitude.

As forças nodais equivalentes são aplicadas para pressões sobre elementos de primeira ordem sempre tem um sinal e magnitude consistente; apesar, que existe uma ambiguidade sobre o estado de contato que é dado a distribuição que representa as forças nodais.

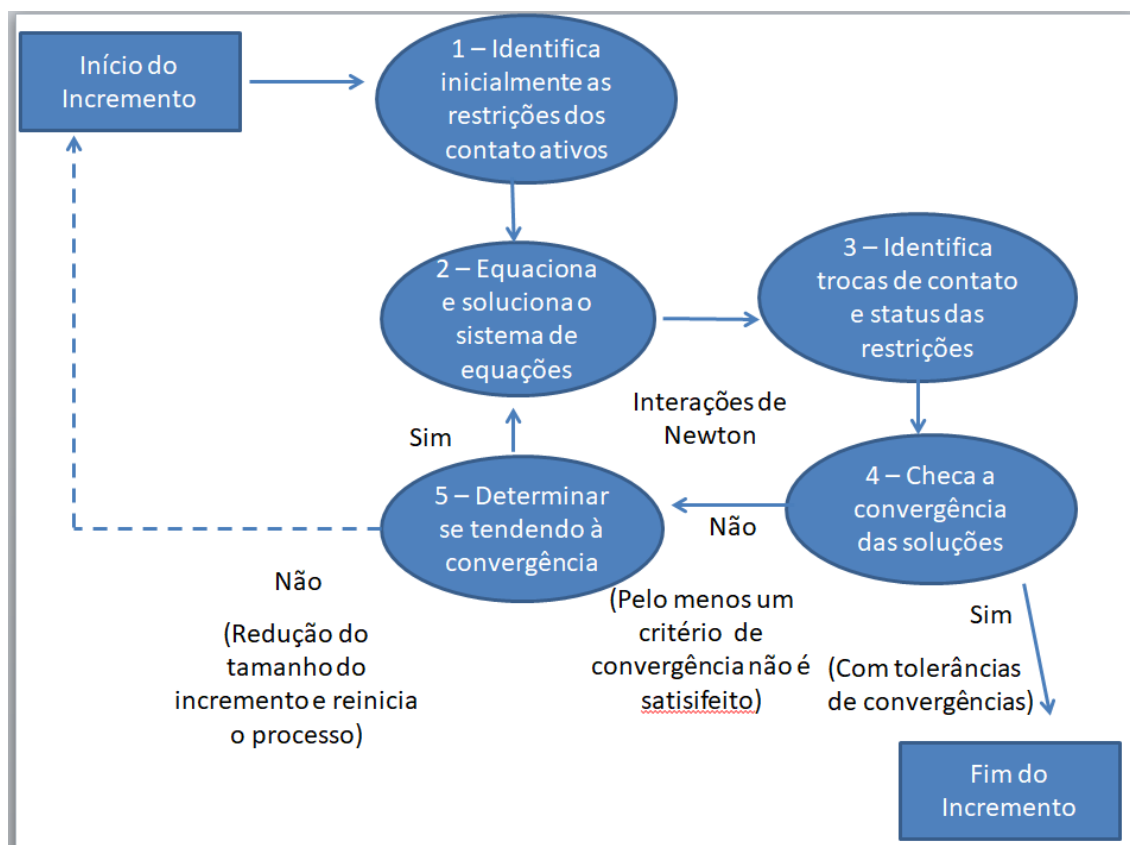
Se o usuário utilizar a formulação *Node-to-Surface* e a geometria estiver complicada requer o uso de um gerador automático de malha, neste caso se recomenda utilizar elementos tetraedricos de segunda ordem que e C3D10M.

Elementos regulares de segunda ordem podem geralmente ser utilizado sem nenhuma dificuldade com a formulação *Surface-to-Surface*.

11.4.6 Algoritmo de Contato

A compreensão do algoritmo utilizado no Abaqus/Standard para resolver os problemas de contato auxiliará o usuário a entender o diagnóstico de saída no arquivo de mensagens e executar as simulações de contato satisfatório.

O algoritmo de contato no Abaqus/Standard, que é apresentado na figura 201, é construído em torno da técnica de *Newton-Raphson* discutida no capítulo de Não – Linearidade. Abaqus/Standard examina o estado de todas interações de contato no começo de cada incremento para estabelecer se os nós de sacrifício estão abertos ou fechados. Se um nó é fechado, Abaqus/Standard determina se está deslizando ou aderindo. Abaqus/Standard aplica uma restrição para nó fechado e remove as restrições a partir de qualquer nó onde o estado de contato troca a partir de fechado para aberto. Então Abaqus/Standard executa uma iteração e atualiza a configuração do modelo utilizando correções calculadas.

Figura 201 - Algoritmo de Contato no Abaqus/Standard

A configuração atualizada do Abaqus/Standard checa para as trocas nas condições de contato nos nós de sacrifício. Qualquer nó onde a folga após a iteração se tornar negativa ou zero mudou de status de aberto para fechado. Qualquer nó em que a pressão de contato se torne negativo muda de status de fechado para aberto. Se qualquer alteração de contato for detectada na iteração atual, Abaqus/Standard rotula como *severe discontinuity iteration*.

Abaqus/Standard continua iterar até as grandes discontinuidades serem suficientemente pequenas, ou não ocorrerem grandes discontinuidades, e a tolerância do equilíbrio ser satisfeito. Alternativamente, o usuário pode escolher uma abordagem na qual o Abaqus/Standard continuará para iterar até não ocorrer grandes discontinuidades antes de checar o equilíbrio.

Em resumo para cada incremento completo na mensagem e nos arquivos de status mostra quantas iterações foram iterações de grande descontinuidade e quantas foram iterações de equilíbrio (uma iteração de equilíbrio é o único que não ocorre grandes descontinuidades). O número total

de iterações para um incremento é a soma desses dois. Para alguns incrementos, o usuário deve encontrar que todas iterações são intituladas de grandes descontinuidades (isso ocorre quando pequenas mudanças de contato são detectadas em cada iteração e o equilíbrio é finalmente satisfeito)

Abaqus/Standard aplica um critério sofisticado envolvendo alterações na penetração, alterações na força residual, e o número de grandes descontinuidades a partir de uma iteração para a próxima para determinar se continuaria a iteração ou pararia. Consequentemente, é um princípio desnecessário para limitar o número de iterações de grandes descontinuidades. Isto o torna possível para processar problemas de contato que requerem um grande número de alterações de contato sem ter que alterar os parâmetros de controle. O limite padrão para um número máximo de iterações de grandes descontinuidades é 50, que na prática seria sempre mais que o número atual de iterações em um incremento.

11.5 Propriedades de Contato

Neste tópico aborda-se as propriedades utilizadas para caracterização da interface entre bloco e argamassa. De acordo com o estudo todas as propriedades de contato que serão consideradas neste trabalho são de natureza mecânica e um total de quatro propriedades, que serão discutidas a seguir, que são;

- a) Normal Behavior – comportamento normal, ou seja, este tipo de contato é criado para resistir a esforços perpendiculares a seção a ser analisada;
- b) Tangential Behavior – comportamento tangencial e também denominado como modelo isotrópico de atrito de Coulomb;
- c) Cohesive Behavior – comportamento coesivo
- d) Damage – com esta propriedade de contato é para representação do dano da interface para isso é necessário representar o início e evolução do dano;

11.5.1 Tangential Behavior

Quando superfícies são de contato geralmente transmite cisalhamento assim como força normal através de suas interfaces. Existe geralmente

uma relação entre as duas componentes de força. A relação, conhecida como atrito entre corpos em contato, é usualmente expresso em termos de tensões na interface dos corpos. Os modelos de atrito disponíveis no Abaqus:

- a) Inclui o modelo clássico isotrópico de Coulomb;
- b) Permite considerar tensão de cisalhamento limite que é o valor máximo da tensão de cisalhamento que pode ser levado pela interface antes da superfície iniciar o deslizamento;
- c) Inclui uma extensão anisotrópica da modelo básico de Coulomb no Abaqus/Standard;
- d) Inclui um modelo que elimina o deslizamento devido ao atrito quando as superfícies estão em contato;

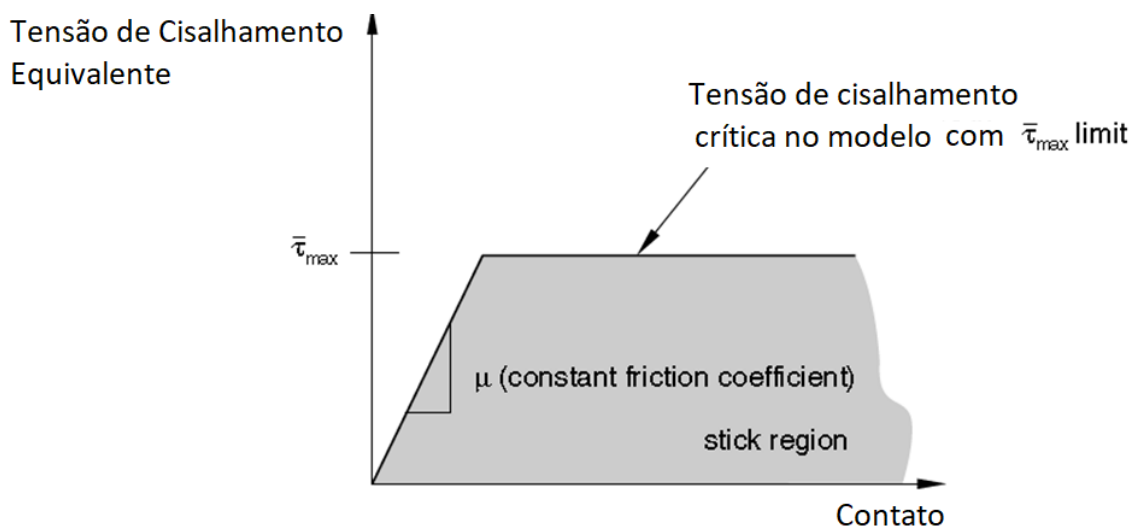
O conceito básico do modelo de atrito de Coulomb é relacionado com tensão de cisalhamento máximo devido ao atrito entre as interfaces de contato dos corpos. De maneira básica este modelo de atrito, duas superfícies de contato podem suportar tensões de cisalhamento até uma certa magnitude através de sua interface antes de começar a deslizar em relação ao outro, este estado é conhecido como STICKING. O modelo de atrito de Coulomb define a tensão de cisalhamento crítica, τ_{crit} , em que o deslizamento das superfícies começa uma fração da pressão de contato, p , entre as superfícies $\tau_{crit} = \mu p$. Esta equação determina quando um ponto de transição de STICKING para escorregamento ou vice-versa. O termo μ é o coeficiente de atrito.

A forma básica do modelo assume que μ é o mesmo em todas as direções, ou seja, atrito isotrópico. Para a simulação em três dimensões, que foi utilizada nesse trabalho, existe dois componentes da tensão de cisalhamento, τ_{crit} e τ_{crit} , ao longo da interface entre os dois corpos. Estes componentes atuam na direção do escorregamento entre as superfícies de contato ou elementos de contato.

O Abaqus permite a utilização limitar a tensão de cisalhamento, τ_{crit} , de modo que, independentemente da intensidade da tensão de pressão do contato, o deslizamento ocorrerá se a magnitude da tensão de cisalhamento

equivalente alcançar este valor, conforme figura 202. Vale destacar que não é permitido utilizar o valor nulo para tensão limite.

Figura 202 - Regiões de Deslizamento para o modelo de atrito com um limite para tensão de cisalhamento



O Abaqus informa que a tensão limite é tipicamente utilizada em situações que a tensão de contato pode ser tornar muito alta, fazendo com a teoria de Coulomb forneça uma tensão de cisalhamento crítica na interface que excede a tensão de escoamento no material sob contato da superfície.

Quanto as variáveis de interação de superfície para atrito, o Abaqus fornece de saída os pontos sobre superfície de sacrifício que utiliza a interação de superfície contendo características de atrito. As tensões de cisalhamento, CSHEAR1 e CSHEAR2, fornecem o escorregamento nas duas direções ortogonais, que são contruídas sobre a superfície mestre.

11.5.2 Cohesive Behavior

As características descritas nesta seção permitem a especificação do comportamento generalizado de separação de tração para superfícies. Este comportamento oferece a capacidade que são muito semelhante para elementos coesivo (cohesive element) que são definido utilizando a lei de separação por tração (traction-separation). Contudo, o comportamento coesivo base-superfície é tipicamente mais fácil para definir e permite simulação de um intervalo maior para interações coesivas, tal com duas superfícies de cola entrar em contato durante a análise.

Comportamento coesivo base-superfície é primeiramente considerado para situações em que a espessura de interface é muito pequena. Se a ca-

mada adesiva de interface tem uma espessura finita e propriedades macroscópicas (tal como rigidez e tensão) do material aderente são disponíveis, pode ser mais apropriado para o modelo a resposta utilizando elemento coesivo convencional.

Para o Abaqus/Standard, o comportamento coesivo é definido como parte da propriedade da superfície de interação que são atribuídas a pares de contato. O comportamento coesivo não pode ser atribuído para pares de contato que utilizam o escorregamento finito (finite sliding), formulação surface-to-surface.

No contato na direção normal, a relação pressão – overclosure governando o comportamento a compressão entre as superfícies não interagem com o comportamento coesivo, desde que cada um descreva a interação entre as superfícies em diferentes regimes de contato. A relação pressão – overclosure governa o comportamento somente quando o nó de sacrifício está fechado, ou seja, está em contato com a superfície mestre, o comportamento coesivo contribui para tensão normal de contato somente quando o nó de sacrifício é aberto, isto é, não há contato. No caso de considerar como cola o comportamento coesivo, onde duas superfícies não estão inicialmente em contato, o efeito coesivo é ativado no incremento depois da troca de status do nó de sacrifício de aberto para fechado.

Na direção tangencial, se a rigidez coesiva está sem dano, é considerado que o modelo coesivo é ativo e o modelo de atrito é dominante. Qualquer deslizamento tangencial é assumido como sendo de natureza puramente elástica e é resistido pela força coesiva da ligação, resultando em forças de cisalhamento. Se o dano foi definido, a contribuição coesiva para as tensões de cisalhamento começa a degradar com a evolução do dano. Uma vez que a degradação da rigidez inicia, o modelo de atrito ativa e inicia a contribuição para tensão de cisalhamento. A rigidez elástica do modelo de atrito é aumentada proporcionalmente à degradação da rigidez elástica coesiva. Antes da falha final da ligação coesiva, e após o início da degradação da ligação coesiva, a tensão de cisalhamento é uma combinação da contribuição coesiva e da contribuição do modelo de atrito. Uma vez atingida a degradação máxima, a contribuição coesiva para as tensões de cisalhamento

to é zero, e a única contribuição para as tensões de cisalhamento é do modelo de atrito.

A formula e leis que governam o superfície do comportamento coesivo são muito similares aquelas utilizadas para elementos coesivos com comportamento constitutivo separação por tração (traction – separation). As similares se estendem para:

- a) Modelo linear e elástico separação por tração (traction – separation);
- b) Critério de iniciação de dano;
- c) Leis de evolução de dano.

Contudo, é importante reconhecer que o dano do comportamento coesivo da separação por tração é uma propriedade de interação e não propriedade do material. Conceitos de deformação e deslocamento (utilizados em elementos coesivos) são reinterpretados como separação de contato. A separação de contato consiste em um deslocamento relativo entre os nós da superfície de sacrifício correspondendo a projeção de pontos da superfície mestre ao longo do contato nas direções normais e tangenciais. Tensões são definidas para o comportamento coesivo para base – superfície (based – surface) como forças coesivas atuando ao longo do contato nas direções normal e tangencial dividida pela área padrão para cada ponto de contato.

O modelo de traction – separation disponível no Abaqus considera inicialmente o comportamento linear elástico seguido pelo inicio e evolução do dano. O comportamento elástico é escrito em termos de uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensão normal e cisalhamento para separações normal e tangencial através da interface.

O vetor tensão de tração nominal, t , consiste em três componentes (dois componentes em problemas bi-dimensionais): t_n , t_s , e problemas tri-dimensionais t_t que representam o normal (ao longo da direção local de 3 em três dimensões e ao longo da direção de 2 locais em duas dimensões) e as duas trações de cisalhamento (ao longo das direções locais de 1 e 2 em três dimensões e ao longo da direção 1 local em duas dimensões), respectivamente. As separações correspondentes são denotadas por δ_n , δ_s , e δ_t . O comportamento elástico pode então, ser escrito da seguinte maneira.

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K \delta$$

A especificação mais simples do comportamento coesivo gera penalidades de contato que impõem à coesão restrição em ambas as direções normal e tangencial. Por padrão, a rigidez normal e tangencial os componentes não serão acoplados: a separação normal pura por si só não dá origem a forças de coesão as direções de cisalhamento, e deslizamento de cisalhamento puro com separação normal zero não dá origem a forças coesivas na direção normal.

Para o comportamento de separação de tração desacoplado, os termos K_{nn} , K_{ss} e K_{tt} precisam ser definidos assim como qualquer dependência com temperatura ou campos variáveis. Se estes parâmetros não forem definidos, o Abaqus utiliza como padrão o contato com penalidades para o comportamento do modelo traction – separation.

Para limitar a restrição coesiva para atuar apenas ao longo do contato normal, define o comportamento coesivo desacoplado a especificar para as componentes de rigidez tangencial igual a zero ($K_{ss} = K_{tt} = 0$). Analogamente, se apenas restrições coesivas tangenciais forem aplicadas, a rigidez normal, $K_{nn} = 0$. Nesse caso, as "separações" normais não serão restringidas. Forças compressivas normais são resistidas conforme o comportamento usual de contato.

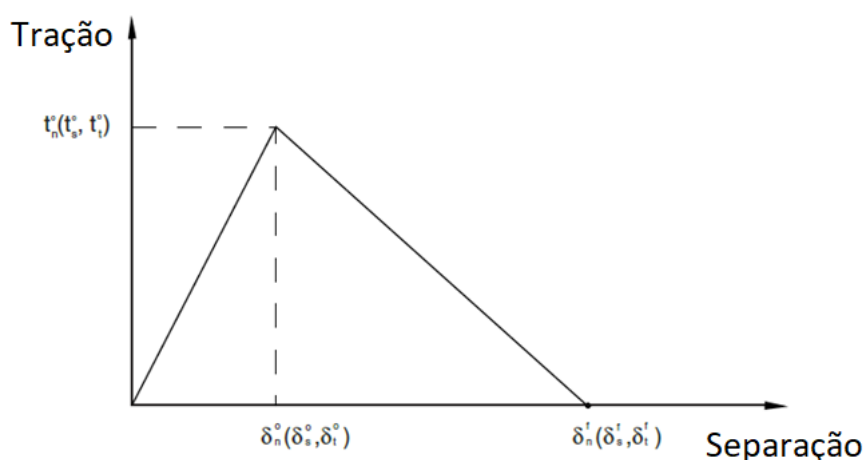
11.5.3 Modelagem do Dano

A modelagem do dano permite simular a degradação e eventual falha da adesão entre duas superfícies coesivas. O mecanismo de falha consiste em dois itens: critério para início do dano e lei de evolução do dano. O comportamento inicial é considerado linear como será discutido a seguir. Contudo, uma vez que o critério de início do dano acontece, o dano ocorre de acordo com lei de evolução do dano considerada. A figura 203 apresenta um comportamento típico para traction – separation com o mecanismo de falha. Se o critério de início de dano é especificado sem um modelo de evolução correspondente, o Abaqus avalia o critério de início de dano apenas para finalidades de saída. Não há efeito sobre a resposta das superfícies

coesivas, ou seja, nenhum dano ocorrerá. Superfícies coesas não sofrem danos sob compressão pura.

O dano da resposta de separação de tração para superfícies coesas é definido dentro do mesma estrutura usada para materiais convencionais, exceto o comportamento do dano é especificado como parte da interação para superfícies. O mecanismo de resposta do dano múltiplo não são disponíveis para superfícies coesas: superfícies coesas pode ter somente um critério de início de dano e também apenas uma lei de evolução do dano, conforme figura 203.

Figura 203 - Modelo de Dano - Tração x Separação



11.5.3.1 Início do Dano

O início de dano se refere ao começo da degradação da resposta coesiva no ponto de contato. O processo de degradação começa quando a tensão de contato e/ou separação do contato satisfaz o critério de início do dano que foi especificado. O Abaqus fornece quatro critérios de dano disponíveis e serão discutidos a seguir.

Cada critério de início do dano também tem variáveis de saída associada para indicar se o critério é cumprido. O valor de 1 ou maior indica que o critério de início foi alcançado. Os critérios de início de dano que não possuem uma lei de evolução associada afetam apenas a saída. Assim, é possível utilizar esses critérios para avaliar a propensão do material a sofrer danos sem realmente modelar o processo de dano, ou seja, sem especificar a evolução do dano.

Para discussão dos critérios de início é importante explicar as variáveis que serão utilizadas nos critérios. As variáveis t_n^0 , t_s^0 e t_t^0 representam

os valores de pico da tensão de contato onde a separação é puramente normal à interface ou puramente na primeira ou na segunda direção de cisalhamento, respectivamente. Da mesma forma δ_n^0 , δ_s^0 e δ_t^0 representa os valores de pico da separação de contato, quando a separação é puramente ao longo do contato normal ou puramente na primeira ou segunda direção de cisalhamento, respectivamente. O símbolo $\langle \rangle$ utilizado nas discussões a seguir representa o Macaulay bracket com interpretação usual. A Macaulay bracket são utilizadas para significar que o deslocamento de compressão pura, ou seja, ou um estado de tensão puramente compressivo não inicia dano.

11.5.3.1.1 Critério de Tensão Máxima

Neste critério se considera para iniciar quando taxa de tensão máxima de contato, como apresentado na equação a seguir, alcança o valor de 1. Este critério é representado como:

$$\text{máximo} \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1$$

11.5.3.1.2 Critério de Separação Máxima

Neste critério se considera para iniciar quando taxa de separação máxima de contato, como apresentado na equação a seguir, alcança o valor de 1. Este critério é representado como:

$$\text{máximo} \left\{ \frac{\langle \delta_n \rangle}{\delta_n^0}, \frac{\delta_s}{\delta_s^0}, \frac{\delta_t}{\delta_t^0} \right\} = 1$$

11.5.3.1.3 Critério Tensão Quadrática

Assume-se que o dano inicia quando uma função de interação quadrática envolve as relações de tensão de contato, como definido na equação a seguir, alcança o valor de 1. Este critério pode ser representado como:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1$$

11.5.3.1.4 Critério de Separação Quadrática

Assume-se que o dano inicia quando uma função de interação quadrática envolve as relações separações de contato, como definido na equação a seguir, alcança o valor de 1. Este critério pode ser representado como:

$$\left\{ \frac{\langle \delta_n \rangle}{\delta_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\delta_s}{\delta_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\delta_t}{\delta_t^0} \right\}^2 = 1$$

11.5.3.2 Evolução do Dano

A lei de evolução do dano descreve a taxa com que a rigidez coesiva é degradada uma vez que corresponde ao início do critério que é alcançado. A estrutura geral para descrever a evolução do dano em materiais bulk, em oposição a interfaces modeladas usando superfícies coesivas. Conceitualmente, há ideias similares para descrição da evolução do dano em superfícies coesivas.

A variável escalar de dano, D , representa o dano geral do ponto de contato. Inicialmente tem o valor 0(zero). Se a evolução do dano é modelada, D evolui monotonicamente de 0 a 1 após carga adicional após o início do dano. As componentes de tensão de contato são afetadas pelo dano de acordo com:

$$t_n = \begin{cases} (1 - D)\bar{t}_n, & \bar{t}_n \geq 0 \\ \bar{t}_n, & \text{sem dano para rigidez a compressão} \end{cases}$$

$$t_s = (1 - D)\bar{t}_s$$

$$t_t = (1 - D)\bar{t}_t$$

Onde, $\bar{t}_n, \bar{t}_s$, e $\bar{t}_t$, são os componentes de tensão de contato previstos pelo comportamento elástico de tração-separação para as separações de corrente sem danos.

A evolução do dano pode ser definida por deslocamento de ruptura ou por energia de fratura. Pelo método de energia de fratura é definida a energia que é dissipada como um resultado do processo de dano, energia essa que denominada como energia de fratura. Para o Abaqus a energia de fratura é igual à área sob o gráfico de traction – separation da figura 203. Além disso, a energia de fratura é especificada como propriedade da interação coesiva e deve ser escolher comportamento de suavização da curva será linear ou exponencial. O Abaqus assegura que a área do gráfico quer seja linear ou exponencial a resposta apresentará o mesmo valor de energia.