

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

**FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ESPUMA DE GESSO PARA
APLICAÇÕES TÉRMICAS E ACÚSTICAS**

Felipe Nascimento Arroyo

São Carlos
2017

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

**FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ESPUMA DE GESSO PARA
APLICAÇÕES TÉRMICAS E ACÚSTICAS**

Felipe Nascimento Arroyo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos para a obtenção do título de Mestre em Estruturas e Construção Civil

Área de Concentração: Sistemas Estruturais

Orientador: André Luís Christoforo

Coorientadora: Vânia Regina Salvini

São Carlos
2017

Nascimento Arroyo, Felipe

Fabricação e caracterização de espuma de gesso para aplicações térmicas e acústicas / Felipe Nascimento Arroyo. -- 2017.
144 f. : 30 cm.

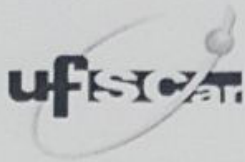
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador: André Luis Christoforo

Banca examinadora: Francisco Antonio Rocco Lahr, Fernando Menezes de Almeida Filho

Bibliografia

1. espuma de gesso. 2. aplicações térmicas. 3. aplicações acústicas. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Felipe Nascimento Arroyo, realizada em 12/12/2017:

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo
UFSCar

Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr
USP

Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho
UFSCar

DEDICATÓRIA

Dedico esta monografia aos meus pais, irmão e minha namorada Rafaela Ghessi.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, André Christoforo, por toda dedicação e atenção dada a esta pesquisa. Você foi uma pessoa muito marcante nesta minha passagem pela UFSCar. Me acolheu com muito carinho, fazendo com que eu me sentisse em casa. Aprendi muito contigo em todos os sentidos. Hoje sou uma pessoa diferente e com visão diferente do mundo, graças a ti. É uma pessoa que levarei comigo pelo resto da vida, não tenho dúvidas. Sempre lembrarei de ti!

A Vânia Salvini, pela paciência em ensinar como funciona um laboratório de Engenharia de Materiais para um Engenheiro Civil. Seu carinho e atenção foram importantes para esta pesquisa.

Agradeço ao Victor Pandolfelli, por ceder seu laboratório, onde foi realizado todas as composições e ensaios mostrados nesta pesquisa.

Ao Cláudio Cardoso, por dispor de seu tempo para realizar os ensaios de absorção acústica, sendo esta a propriedade mais relevante da pesquisa.

Ao Pedro Pelissari, por fazer a predição acústica do material e, dessa forma, poder analisar ainda mais a absorção acústica.

Ao Guilherme, chefe do laboratório, por dispor de seu tempo em me ajudar quando foi necessário, assim como no ensino do manuseio dos equipamentos utilizados.

Agradeço a todos os professores que participaram das minhas bancas, seja na defesa ou qualificação. Fernando Menezes, Victor Pandolfelli e Francisco Rocco, meus sinceros agradecimentos por todas as contribuições que foram feitas por vocês, fazendo com que meu trabalho ficasse ainda melhor. Agradeço também por todas as dicas profissionais, que irei levar comigo o resto da vida.

E por fim, a todos meus familiares e namorada (Rafaela Ghessi), por acreditarem na minha capacidade e sempre quererem minha evolução. Não tenho dúvidas de que isso fez com que eu me tornasse uma pessoa melhor.

EPÍGRAFE

“Se você conta com alguém que tem menos qualidades que você, isso levará à sua degeneração. Se você conta com alguém com qualidades iguais às suas, você permanece onde está. Somente quando conta com alguém cujas qualidades são superiores às suas é que você atinge uma condição sublime.”
Dalai Lama

RESUMO

ARROYO, Felipe Nascimento. **Fabricação e Caracterização de Espuma de Gesso para Aplicações Térmicas e Acústicas**. 2017. 139. Dissertação (Mestrado em Sistemas Estruturais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

Por existir em abundância no Brasil, baixo consumo energético, menor quantidade de combustível em seu processo de produção, não ser inflamável e possibilidade de reciclagem, o gesso é extremamente viável na construção civil. Dentre suas aplicações, é utilizado como isolante acústico e térmico devido a porosidade natural deste material. Uma maneira de melhorar estas aplicações é com a adição de poros no material. Entretanto, com a adição de poros neste material, sua resistência mecânica decai significativamente, necessitando a adição de micro sílica. Desta forma, o estudo de espumas de gesso para isolamento acústico e térmico juntamente com porcentagens de micro sílica, para ampliar a resistência mecânica, se apresentam como importante e original do ponto de vista técnico e científico. O presente estudo abrangeu duas etapas importantes: planejamento experimental preliminar e planejamento experimental definitivo. O planejamento experimental preliminar foi importante para definir as porcentagens do aditivo base, assim como a melhor relação água/gesso a ser utilizada e tempo de cura ideal. No planejamento experimental definitivo variou-se as porcentagens de micro sílica e foi realizada análise estatística (modelos de regressão), definindo assim a melhor porcentagem de micro sílica para se atingir o melhor resultado de cada propriedade. Os resultados das espumas de gesso foram satisfatórios, atingindo uma porosidade de 87,88% e excelentes absorções acústicas e térmicas. A micro sílica também mostrou sua efetividade, melhorando 200% a resistência à compressão uniaxial e mantendo a efetividade na absorção acústica e condutividade térmica. Os modelos de regressão utilizados possuíram representatividade, ou seja, com a porcentagem de micro sílica, foi possível estimar as propriedades da espuma de gesso, permitindo extrapolar a porcentagem de micro sílica para valores não utilizados nesta pesquisa.

Palavras-chave: Espuma de gesso, propriedades térmicas, propriedades acústicas, propriedades mecânicas, modelos de regressão.

ABSTRACT

ARROYO, Felipe Nascimento. **Gypsum foam production and characterization for thermal and acoustic applications.** 2017. 139. Dissertation (Master's Degree in Structural Systems) - Federal University of São Carlos, São Carlos, 2017.

Due to existence in abundance in Brazil, low energy consumption, less fuel quantity in its production process, not being flammable and recycling possibility, gypsum is extremely viable in civil construction. Among its applications, it is used as acoustic and thermal insulation due to the natural porosity of this material. One way to improve these applications is by adding pores. However, with pores addition in this material, its mechanical resistance decays significantly, necessitating the addition of micro silica. In this way, the study of gypsum foams for acoustic and thermal insulation together with micro silica percentages, to increase mechanical resistance, are presented as important and original from a technical and scientific point of view. The present study covered two important steps: preliminary experimental planning and definitive experimental planning. The preliminary experimental planning was important to define the base additive percentages, as well as the best water/gypsum ratio to be used and the ideal cure time. In the definitive experimental planning, the micro silica percentages were varied and statistical analysis (regression models) was performed, thus defining the best percentage of micro silica in order to reach the best result of each property. The gypsum foams results were satisfactory, reaching 87.88% porosity and excellent acoustic and thermal absorption. The micro silica also showed its effectiveness, improving 200% the uniaxial compression resistance and maintaining the effectiveness in acoustic absorption and thermal conductivity. The regression models used had representativity, in other words, with micro silica percentage, it was possible to estimate gypsum foam properties, allowing to extrapolate micro silica percentage to values not used in this research.

Key-words: Plaster foaming, thermal properties, acoustic properties, mechanical properties, regression models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Micro morfologia dos tipos de poros: Fechado (a) e Aberto (b).....	5
Figura 2: Densidade da espuma de gesso influenciando na resistência à compressão.	13
Figura 3: Posições das leituras de temperatura.	14
Figura 4: Diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo.....	15
Figura 5: Efeito de aditivos de alta densidade na densidade aparente da espuma de gesso de composição A.....	18
Figura 6: Efeito de aditivos de alta densidade na resistência à compressão da espuma de gesso de composição A.....	18
Figura 7: Efeito do perlita na densidade aparente da espuma de gesso de composição B.....	19
Figura 8: Efeito do perlita na resistência à compressão da espuma de gesso de composição B.....	19
Figura 9: Análise da microestrutura das composições G, B e BP.....	20
Figura 10: Distribuição do tamanho dos poros nas espumas de gesso fabricadas. ...	21
Figura 11: Valor da absorção acústica em função da densidade.....	22
Figura 12: Influência da concentração das fibras na densidade da espuma de gesso.	22
Figura 13: Resistência à flexão em função da concentração das fibras.	23
Figura 14: Resistência à compressão em função da concentração das fibras.	23
Figura 15: Influência da relação água/gesso e porcentagem do aditivo espumante na densidade aparente.....	24
Figura 16: Influência da relação água/gesso e porcentagem do aditivo espumante na porosidade.	25
Figura 17: Influência da relação água/gesso e porcentagem do aditivo espumante na resistência à compressão.....	25
Figura 18: Influência da relação água/gesso e porcentagem do aditivo espumante na condutividade térmica.	26
Figura 19: Microestrutura dos poros.....	26

Figura 20: Influência da concentração da fibra de cânhamo na densidade da espuma de gesso.....	28
Figura 21: Influência da fibra de cânhamo na resistência à flexão.	28
Figura 22: Influência da fibra de cânhamo na resistência à compressão.	29
Figura 23: Influência da fibra de cânhamo na condutividade térmica.....	29
Figura 24: Distribuição do tamanho dos poros.	32
Figura 25: Efeito do agente espumante na densidade volumétrica e condutividade térmica.....	40
Figura 26: Efeito do agente espumante na resistência à compressão.....	41
Figura 27: Micro morfologia das amostras com 4% (a) e 5% (b) do agente espumante.	41
Figura 28: Influência da fibra de vidro na resistência mecânica da espuma de gesso com 4% de agente espumante.....	42
Figura 29: Porosidade de 15% de $Al_2(SO_4)_3 + CaCO_3$ como agente espumante.....	45
Figura 30: Poros para composição de 2.5% de $Al_2(SO_4)_3$ e 0,70% ácido cítrico.....	47
Figura 31: Poros para composição com 3% $NaHCO_3$ como agente espumante.....	48
Figura 32: Resistência à compressão e condutividade térmica das espumas de gesso fabricadas com $NaHCO_3$; $Al_2(SO_4)_3 + CaCO_3$;e $Al_2(SO_4)_3 +$ ácido cítrico.	49
Figura 33: Efeito dos tipos de surfactantes e suas concentrações na porosidade e diâmetro médio dos macroporos.....	51
Figura 34: Macroestrutura da espuma de gesso com 1,3% de (a) catiônico (BC), (b) aniônico (SDS) e (c) não iônico (P80).....	52
Figura 35: Efeito da velocidade de preparo na porosidade e no tamanho médio dos macro poros.....	53
Figura 36: Macroestrutura dos poros formados com velocidade de mistura de 300 e 1000 rpm.	53
Figura 37: Efeito do tempo de preparo na porosidade e no tamanho médio dos macros poros.....	54
Figura 38: Macroestrutura dos poros formados com tempo de mistura de 1, 2, 3 e 4 minutos.	54

Figura 39: Efeito da relação água/gesso na porosidade e no tamanho médio dos macro poros.....	55
Figura 40: Macroestrutura dos poros formados com relação água/gesso de 0,60 e 0,80.	55
Figura 41: Maiores porosidades obtidas com seus respectivos valores de resistência à compressão.	59
Figura 42: Batedores necessários para realização da espuma de gesso: (a) misturar os aditivos e a espuma de gesso e (b) e (c) fabricação da espuma.	63
Figura 43: Mistura dos aditivos com agitação constante para não segregar.	64
Figura 44: Diferença entre as espumas: (a) espuma com bolhas maiores e (b) espuma final com bolhas menores.	64
Figura 45: Espuma de gesso pronta para moldar.	65
Figura 46: Moldes utilizados para a realização dos ensaios.	67
Figura 47: Trinca no molde com travamento inadequado.	67
Figura 48: Variação do módulo elástico em função do tempo para determinar o tempo de cura.	68
Figura 49: Variação da temperatura em função do tempo para determinar o tempo de cura.....	69
Figura 50: Perda de massa.....	69
Figura 51: Marcação no diâmetro e altura dos corpos de prova.	70
Figura 52: (a) MTS 810 com dispositivo para ensaio, (b) corpo de prova com saliência na parte superior e (c) corpo de prova retificado.....	71
Figura 53: Corpo de prova rompido no ensaio de resistência à compressão diametral.....	72
Figura 54: Dispositivo da MTS 810 para ensaio de compressão uniaxial e corpo de prova rompido.	72
Figura 55: Dispositivo da MTS 810 para ensaio de resistência à flexão.....	73
Figura 56: Corpo de prova rompido no ensaio de resistência à flexão.	74
Figura 57: (a) Equipamento ScanElastic-02 e (b) programa ScanElastic Interface 1.0.	75
Figura 58: Posicionamento característico dos picos flexurais e torcionais.	76

Figura 59: Ensaio de Ultrassom.	76
Figura 60: Dados extraídos do ensaio de ultrassom.	77
Figura 61: Tudo de impedância para cálculo da absorção acústica.	78
Figura 62: Software para processamento de sinais acústicos.	79
Figura 63: Equipamento do ensaio de condutividade térmica.	80
Figura 64: Amostras para ensaio de porosidade (Método de Arquimedes).	80
Figura 65: Ensaio para obtenção da porosidade - Método de Arquimedes.	81
Figura 66: Composições que falharam.	84
Figura 67: Corpos de prova com 0,19% de ácido cítrico.	84
Figura 68: Corpos de prova produzidos (a) e diferença de cor entre eles (b).	86
Figura 69: Não homogeneização da composição com 3,5% de micro sílica.	87
Figura 70: Configuração geométrica dos poros.	92
Figura 71: Comparação entre a absorção acústica medida pelo tubo de impedância e pelo modelo de Biot-Allard.	95
Figura 72: Absorção acústica.	99
Figura 73: Microtomografia das composições realizadas - (a) 0% de micro sílica, (b) 2% de micro sílica, (c) 3,5 de micro sílica e (d) 5% de micro sílica.	100
Figura 74: Resultado Compressão Uniaxial.	101
Figura 75: Resultado Compressão Diametral.	101
Figura 76: Resultado Resistência à Flexão.	102
Figura 77: Resultado Módulo de Elasticidade.	102
Figura 78: Porosidade da espuma de gesso criada.	103
Figura 79: Resultado densidade aparente.	104
Figura 80: Média das curvas de absorção acústica por composição.	105
Figura 81: Valores de NRC e SRA das espumas de gesso criadas.	106
Figura 82: Resultado Condutividade Térmica.	107
Figura 83: Maiores valores de porosidade com seus respectivos valores de resistência à compressão.	108

Figura 84: NRC e SRA de excelentes absorvedores acústicos e espumas de gesso.	109
Figura 85: Condutividade térmica de materiais isolantes e espumas de gesso.	110
Figura 86: Representação dos melhores ajustes obtidos das propriedades mecânicas.....	113
Figura 87: Representação dos melhores ajustes obtidos das propriedades físicas.	114
Figura 88: Método de formação de espuma direta, desenvolvido para produzir cerâmicas macro porosas.	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Densidade volumétrica (ρ_V) e resistência à compressão ($\sigma_{c.a}$) da espuma de gesso com sulfato de alumínio e alúmen de potássio.	8
Tabela 2: Densidades e porosidade (ϕ) da espuma de gesso com sulfato de alumínio e alúmen de potássio.	9
Tabela 3: Densidade volumétrica (ρ_V) e resistência à compressão ($\sigma_{c.a}$) da espuma de gesso com bicarbonato de amônio.	10
Tabela 4: Densidades e porosidade (ϕ) da espuma de gesso com bicarbonato de amônio.	11
Tabela 5: Densidade volumétrica (ρ_V) e resistência à compressão ($\sigma_{c.a}$) da espuma de gesso com laurilsulfato de sódio e nonilfenol etoxilado.	12
Tabela 6: Densidades e porosidade (ϕ) da espuma de gesso com laurilsulfato de sódio e nonilfenol etoxilado.	12
Tabela 7: Densidade da espuma de gesso influenciando na condutividade térmica.	14
Tabela 8: Condutividade térmica (k) dos materiais.	15
Tabela 9: Composições das misturas A, B e G.	16
Tabela 10: Composições das misturas A, B e G.	16
Tabela 11: Propriedades básicas da análise das espumas de gesso A e B e do gesso sem espuma (G).	17
Tabela 12: Propriedades básicas da análise das espumas de gesso B e BP.	20
Tabela 13: Produtividade e composição química do cânhamo.	27
Tabela 14: Composições das misturas testes.	30
Tabela 15: Propriedades mecânicas e físicas da espuma de gesso.	31
Tabela 16: Influência da relação água/gesso nas resistências e densidade da espuma de gesso.	33
Tabela 17: Influência da relação do agente espumante (H_2O_2) nas propriedades mecânicas, densidades e porosidade da espuma de gesso.	33
Tabela 18: Influência da temperatura da água nas propriedades mecânicas e na densidade da espuma de gesso.	34
Tabela 19: Fórmula ótima da espuma de gesso.	34

Tabela 20: Resultados das resistências mecânicas, densidades e porosidade da formulação ótima.	34
Tabela 21: Tempo de cura inicial e final da espuma de gesso.	36
Tabela 22: Tempo de cura inicial e final da espuma de gesso.	36
Tabela 23: Porosidade da espuma de gesso em porcentagem.	37
Tabela 24: Densidade volumétrica da espuma de gesso em quilograma por metro cúbico.	38
Tabela 25: Resistência à compressão da espuma de gesso em MPa.	38
Tabela 26: Composição química do gesso dessulfurizado.	39
Tabela 27: Propriedades físicas e mecânicas do gesso fabricado com diferentes relações água/gesso.	43
Tabela 28: Propriedades físicas e mecânicas da espuma de gesso fabricada com $Al_2(SO_4)_3$ como agente espumante.	43
Tabela 29: Propriedades físicas e mecânicas da espuma de gesso fabricada com $Al_2(SO_4)_3 + CaCO_3$ como agente espumante.	44
Tabela 30: Densidades e porosidade da espuma de gesso fabricada com $Al_2(SO_4)_3 +$ $CaCO_3$ como agente espumante.	45
Tabela 31: Propriedades físicas e mecânicas da espuma de gesso fabricada com $Al_2(SO_4)_3 +$ ácido cítrico como agente espumante.	46
Tabela 32: Densidades e porosidade da espuma de gesso fabricada com $Al_2(SO_4)_3 +$ ácido cítrico como agente espumante.	46
Tabela 33: Propriedades físicas e mecânicas da espuma de gesso fabricada com NaHCO ₃ como agente espumante.	47
Tabela 34: Densidades e porosidade da espuma de gesso fabricada com NaHCO ₃ como agente espumante.	48
Tabela 35: Mínima condutividade térmica com os correspondentes valores analisados.	49
Tabela 36: Análise química das micro sílicas 971 e 955.	57
Tabela 37: Tempo de mistura e batedor utilizado para a mistura dos aditivos e finalização da espuma de gesso.	65
Tabela 38: Tempo de mistura e batedores utilizados na fabricação da espuma.	66

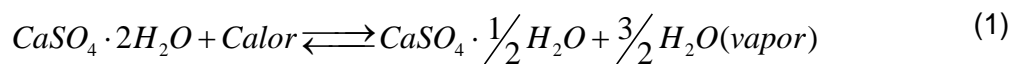
Tabela 39: Composição (COMP.) base e composições dos testes preliminares que obtiveram sucesso na fabricação.....	82
Tabela 40: Composições que falharam.	83
Tabela 41: Composições experimentais definitivas.....	85
Tabela 42: Modelos de regressão a serem utilizados na estimativa das propriedades.	96
Tabela 43: Média e desvio padrão (CV) das propriedades mecânicas da espuma de gesso.	97
Tabela 44: Classificação do Coeficiente de Variação segundo Silva et al. (2011).....	98
Tabela 45: Média e desvio padrão (CV) das propriedades físicas da espuma de gesso.	98
Tabela 46: Qualidade da absorção acústica em função do NRC.....	106
Tabela 47: Resultado das propriedades da espuma de gesso criada.....	108
Tabela 48: Melhores ajustes com seus respectivos R^2	111
Tabela 49: Valor de X para obter Y máximo.	112
Tabela 50: Resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas.....	114
Tabela 51: Resultados do teste de Tukey das propriedades físicas.....	115

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.2 Justificativa.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Espuma de Gesso	7
2.2 Micro Sílica.....	56
2.3 Conclusões da Revisão Bibliográfica.....	57
3. MATERIAL E MÉTODOS	61
3.1 Processo de Fabricação da Espuma de Gesso	61
3.2 Determinação das Propriedades Mecânicas.....	70
3.2.1 Resistência à Compressão Diametral	70
3.2.2 Resistência à Compressão Uniaxial.....	72
3.2.3 Resistência à Flexão	73
3.2.4 Módulo de Elasticidade Dinâmico	75
3.2.5 Ultrassom (Módulo de Elasticidade Dinâmico e Variação da Temperatura).....	76
3.3 Determinação das Propriedades Físicas	77
3.3.1 Absorção Acústica.....	77
3.3.2 Condutividade Térmica	79
3.3.3 Porosidade	80
3.4 Planejamento Experimental Preliminar.....	82
3.5 Planejamento Experimental Definitivo.....	85
3.6 Análise dos Resultados	87
3.6.1 Predição Acústica	87
3.6.2 Modelos de Regressão d Teste de Tukey	95
4. RESULTADOS.....	97
4.1 Resultado do Planejamento Experimental Preliminar.....	97
4.1.1 Propriedades Mecânicas	97
4.1.2 Propriedades Físicas	98
4.2 Resultados do Planejamento Experimental Definitivo.....	100
4.2.1 Propriedades Mecânicas	101
4.2.2 Propriedades Físicas	103
4.2.3 Comparativo dos Resultados do Planejamento Experimental Definitivo com Literatura	107
4.3 Resultados da Análise Estatística	110
5. CONCLUSÕES.....	116
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	117
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

1. INTRODUÇÃO

O gesso é um material bastante antigo, sendo utilizado há cerca de 8.000 anos antes de Cristo segundo alguns arqueólogos (PERES et al., 2008). A obtenção do gesso, segundo Peres et al. (2008), é proveniente da calcinação do mineral gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) com temperatura de 150 a 350°C. Dependendo do processo de calcinação, é possível obter variedades de hemidrato, sendo mais conhecidos como: gesso alfa (obtidos em fornos do tipo autoclave), utilizados na odontologia; e gesso beta (obtidos em calcinação sob pressão atmosférica), que pode ser classificado também como gesso para revestimento e gesso para fundição, utilizados na construção civil.



Após a mistura com a água, o gesso alfa adquire maior resistência mecânica, menor consistência e necessita de menos água comparando-se com o gesso beta. Já o gesso beta, seus cristais malformados e heterogêneos formam um produto de menor resistência e com um tempo de pega menor. Ambos os gessos liberam calor (energia) após entrarem em contato com a água, voltando a sua forma bi hidratada (MUNHOZ; RENÓFIO, 2007).

Atualmente, por possuir baixo consumo energético, quantidade de matéria prima existente, menor quantidade de combustível em seu processo de produção e possibilidade de reciclagem, o gesso é extremamente viável nas construções (JOHN; CINCOTTO, 2007). Segundo o Diário de Pernambuco, desde a década de 1960 Pernambuco assumiu e mantém a posição de maior produtor nacional de gesso, abastecendo 97% do mercado nacional e produzindo 3,02 milhões t/ano de gesso calcinado.

De acordo com Karni e Karni (1995), o gesso passou a ser utilizado mundialmente a partir do século XX como revestimento (acabamento), componentes para construção e elementos decorativos. Além destas aplicações, é empregado em portas corta-fogo, na mineração de carvão para vedar lâmpadas e onde há perigo de explosão de gases, devido à

sua resistência ao fogo (KARNI; KARNI, 1995). Pode ser utilizado como isolamento acústico também, devido à porosidade natural deste material (~40%) (ISERN; MESSING, 2016).

Além do gesso, existem outros materiais porosos com excelente absorção acústica e condutividade térmica (k), como: espuma de poliuretano ($k = 0,030 \text{ W/m}^\circ\text{C}$); poliestireno ($k = 0,035$ a $0,040 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), que seria o isopor; e as lãs de vidro, rocha ou mineral ($k = 0,045 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) (JEON et al., 2017). Entretanto, a espuma de poliuretano, embora seja o melhor isolante, possui uma grande desvantagem: ser inflamável assim como o poliestireno. As lãs, de acordo com o grupo Heme Isolantes, necessitam da utilização de máscaras para a sua aplicação e fabricação, as roupas devem ser lavadas após o manuseio e podem causar coceiras e irritação na pele, devido às fibras que soltam do material. Além disto, o isolamento acústico e térmico não possui tanta efetividade comparando-se com os outros materiais (JEON et al., 2017).

À vista disso, o gesso pode ser considerado um excelente isolante térmico e acústico, por ser um material não inflamável, não ser prejudicial à saúde e dispor em abundância no Brasil (KARNI; KARNI, 1995). Isto posto e visando um gesso com melhores propriedades, criou-se uma espuma de gesso. Este material é produzido de forma manual ou mecânica, sendo constituído de gesso, aditivos e o agente espumante (JOST et al., 1975). Seu principal objetivo é tornar o gesso mais poroso e, desta forma, melhorar suas propriedades térmicas e acústicas (ISERN; MESSING, 2016). Existem vários tipos de aditivos que podem ser utilizados na espuma de gesso, sendo que cada um levará a vantagem característica (JOST et al., 1975).

Além do mais, existem outras formas de obter poros no gesso, como alterando a relação água/gesso. Quanto maior a quantidade de água adicionada no gesso, mais poroso esse material ficará, porém implica uma resistência mecânica inferior. Analogamente, quanto menor a quantidade de água, menos poroso o gesso fica e mais resistente será. Embora esta técnica seja mais simples e barata do que o uso de aditivos, seu resultado final não será tão prodigioso comparando-se com o uso de aditivos (SOUZA, 2006).

É importante ressaltar também que: a quantidade de poros e, conseqüentemente o seu tamanho, podem afetar nas propriedades mecânicas (SOUZA, 2006) e na condutividade térmica e absorção acústica (ROUSSEL et al., 2016); e uma espuma de gesso criada com agitação mecânica não se tem controle da uniformidade e distribuição limitada do tamanho dos poros (MAGRABI et al., 1999). Outras desvantagens seriam a grande existência de espaços vazios nas paredes dos poros e ser estruturado de paredes não densas (SALVINI et al., 2016).

Os aditivos utilizados neste trabalho são todos provenientes de fontes naturais e não prejudiciais à saúde, sendo eles: Lutensol, Dextrina, Goma Arábica, hidróxi-propil-metil-celulose (HPMC), espumante (Vinapor GYP 3550) e o Ácido Cítrico. O Lutensol é utilizado em detergentes e shampoo. O hidróxi-propil-metil-celulose (HPMC) é utilizado em alguns alimentos e pílulas para emagrecer (SALVINI et al., 2016). A Goma é extraída de alvores e utilizada em tintas e colas (AKTHAR; EVANS, 2010, SALVINI et al., 2016). A Dextrina é obtida através da hidrólise do amido (MITTAL et al., 2016). O espumante é fabricado pela BASF, sendo próprio para fabricar espumas de gesso. O Ácido Cítrico é um dos aditivos mais utilizados para retardar a cura do gesso (GOGTAS et al., 2010).

Como dito anteriormente, com a produção de poros no gesso, seja pela alteração da relação água/gesso ou pelo uso dos aditivos, a resistência mecânica deste material declina (SOUZA, 2006). Uma maneira de resolver este problema seria com a adição de micro sílica na composição, bastante utilizado na fabricação de concreto, refratários, entre outros (AHMADI et al., 2016). Com a adição de micro sílica, espera-se obter uma espuma de gesso de excelente resistência mecânica e, possivelmente, absorção acústica e condutividade térmica.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho visa o desenvolvimento de espumas de gesso fabricadas com agitação mecânica, assim como da inclusão de micro sílica (MS) como forma de aumentar as propriedades mecânicas.

Testes preliminares foram desenvolvidos para determinar as porcentagens de aditivos, provenientes de fontes naturais para não prejudicar o meio ambiente e à saúde, e espuma a serem utilizadas na formulação base. Posteriormente, foram variadas as frações de micro sílica, visando obter melhoras nas propriedades mecânicas. Devido a espuma de gesso possuir baixa resistência mecânica, o aperfeiçoamento nesta propriedade pode resultar em um material de diversas aplicações, como, por exemplo, em forros suspensos.

Tais propriedades analisadas foram avaliadas neste trabalho por meio de metodologia estatística (modelos de regressão baseados em análise de variância). Estes modelos têm como função determinar as composições ótimas para cada propriedade analisada, considerando as frações de micro sílica como variável independente.

1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo sobre o gesso, no Brasil, é muito escasso. Por ser um material de fácil obtenção e com propriedades acústicas e térmicas boas mesmo na forma usual (água + gesso), o foco na melhora dessas propriedades com o acréscimo da espuma torna-se importante para a construção civil. Dessa forma, o estudo da investigação das frações de aditivos, relações água/gesso e frações de micro sílica se apresentam como importante e original do ponto de vista técnico e científico. Além do mais, espumas de gesso não propagam fogo como acontece com as espumas de poliuretano.

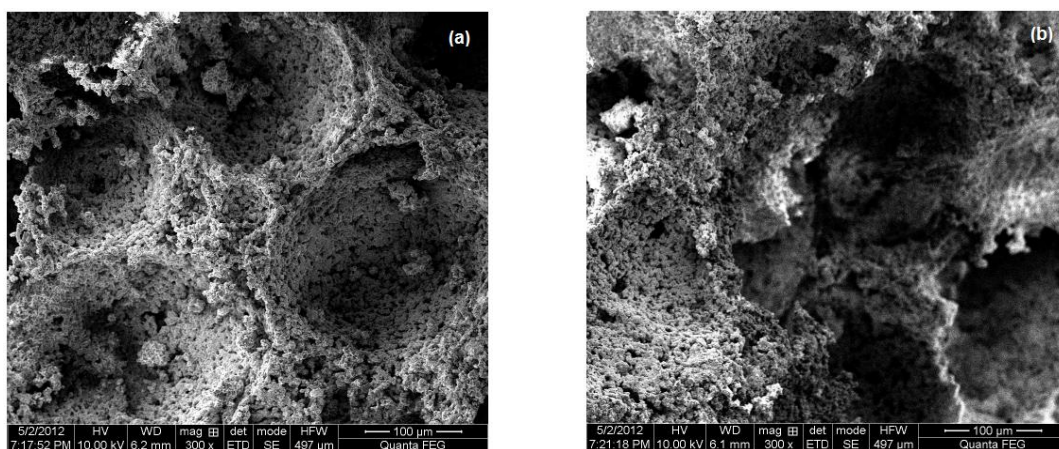
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica a ser desenvolvida procurará apresentar as pesquisas mais relevantes desenvolvidas nos últimos anos a respeito de espumas de gesso, objetivando evidenciar as técnicas até então utilizadas, as relações água/gesso e os aditivos juntamente com as respectivas frações responsáveis pela obtenção das propriedades físicas e mecânicas obtidas. Estes trabalhos foram comparados com os resultados do presente trabalho, possibilitando julgar a eficiência da metodologia proposta.

Primeiramente, deve-se entender como os poros se comportam na condutividade térmica, resistência mecânica e absorção acústica. Os poros são de extrema importância para as propriedades acústicas e térmicas, entretanto, desfavoráveis para a resistência mecânica (AKTHAR; EVANS, 2010).

Segundo Akthar e Evans (2010), os poros produzidos necessitam ter diâmetros inferiores a 4 milímetros e serem fechados, desta forma impedindo a transferência de calor por convecção e tornando melhor a condutividade térmica. O ar contido nos poros ajuda em tal propriedade, posto que a condutividade térmica do ar seja de $0,026 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$. A Figura 1 apresentada por Li e Li (2014) mostra a diferença da estrutura de um poro fechado (a) e de um poro aberto (b).

Figura 1: Micro morfologia dos tipos de poros: Fechado (a) e Aberto (b).



(a)

(b)

Fonte: Adaptado de Li e Li (2014).

Poros fechados possuem as paredes entre as células mais grossas, podendo distinguir os poros facilmente nas imagens. Já os poros abertos possuem as paredes entre as células mais finas e em algumas células conectadas, ou seja, a estrutura do poro é rompida (LI; LI, 2014).

Doutres et al. (2011) estudaram como os poros influenciam na absorção acústica em espumas de poliuretano. Em materiais parcialmente reticulados (poros fechados e membranas finas), que possuem maior resistividade do fluxo de ar, tortuosidade e melhor relação entre os comprimentos característicos térmicos e viscosos, possuem melhor absorção acústica em baixas frequências e podem possuir piores absorções em altas frequências. Entretanto, materiais totalmente reticulados (poros abertos) e com poros de menores dimensões, a diminuição do tamanho da célula aumenta a resistividade do fluxo de ar e diminuem os dois comprimentos característicos, melhorando assim a absorção acústica em maiores frequências. Contudo, o tamanho dos poros não pode ser demasiadamente pequeno.

Vimmrová et al. (2011) explicitam em seu artigo que, quando o agente formador de espuma gera poros de várias ordens de grandeza, ou seja, tanto poros grandes como poros pequeno, isto afeta negativamente nas propriedades mecânicas do material. Espuma de gesso que possui tamanho e distribuição dos poros uniformes tendem a ter um melhor comportamento nas propriedades mecânicas.

Uma das propriedades mais relevantes para este estudo é a porosidade (ϕ). Entretanto, muitos autores não informam tal valor, sendo necessário estimar a porosidade com as Equações (2), (3), (4) e (5) a seguir. Para a estimativa da porosidade, utiliza-se a densidade relativa (ρ_R), sendo esta igual à densidade volumétrica (ρ_V) da espuma de gesso sobre a densidade da mistura (ρ_M), que seria o gesso sem espuma.

$$\phi = (1 - \rho_R) \cdot 100[\%] \quad (2)$$

$$\rho_R = \frac{\rho_V}{\rho_M} \quad (3)$$

$$\rho_M = \frac{1}{\frac{\%_{Gesso}}{\rho_{Gesso}} + \frac{\%_{MicroSílica}}{\rho_{MicroSílica}}} \quad (4)$$

$$\rho_v = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} [\text{kg} / \text{m}^3] \quad (5)$$

2.1 ESPUMA DE GESSO

Çolak (2000) realizou uma espuma de gesso utilizando três técnicas diferentes (três tipos de agentes produtores de espuma), sendo eles: sais de sulfeto, bicarbonato de amônio e utilizando agentes ativos de superfície que serão citados posteriormente.

A primeira técnica utilizada, com sais de sulfeto, foi produzida com gesso beta (β -gesso), água (de 37°C a 38°C e 55% a 70%), pó de mármore, ácido cítrico, carboximetilcelulose (CMC) e sais de sulfeto, assim como sulfato de alumínio e alúmen de potássio. O sulfato de alumínio (1%) e o alúmen de potássio (1%) têm como função beneficiar a resistência mecânica e a dureza do gesso. Os sais de sulfeto são dissolvidos na água. A porosidade é obtida através do dióxido de carbono que aparece quando o ácido sulfúrico, produzido devido aos sais dissolvidos, é misturado com o pó de mármore. Ácido cítrico (de 4% a 6%) foi adicionado como agente retardador e o carboximetilcelulose (de 0,1% a 0,4%) para ampliar a viscosidade da espuma de gesso.

A segunda técnica utilizada, com bicarbonato de amônio, foi produzida com gesso beta (β -gesso), água (de 37°C a 38°C e 57,5% a 85%), ácido cítrico (de 0,5% e 1%), carboximetilcelulose (de 0,1% a 0,2%) e o bicarbonato de amônio (de 0,8% a 2% em relação ao peso do gesso). A porosidade é obtida através do dióxido de carbono, originado da reação entre a água e o bicarbonato de amônio.

A terceira e última técnica utilizada, com agentes ativos de superfície, foi produzida com gesso beta (β -gesso), água, laurilsulfato de sódio e nonilfenol etoxilado, que são produtos utilizados na produção de detergentes. A espuma de gesso foi preparada de 0,1% a 0,4% por peso do pó de laurilsulfato de sódio ou de 0,1% a 0,6% por peso de nonilfenol etoxilado, misturados em 70% de água. A pasta de gesso foi agitada bidireccionalmente de 3 a 5 minutos.

As amostras foram mantidas dentro dos moldes até atingirem resistência, em um ambiente com 60% a 80% de umidade relativa do ar e a 22°C. Após isto, ficaram por 24h em uma estufa a 40°C antes de medir as propriedades (resistência à compressão e densidade). O tempo de cura das espumas de gesso fabricada foi medida com o aparelho Vicat seguindo

as premissas da norma Turca TS 370 (1989), chegando à conclusão que o tempo de cura foi de 10 minutos iniciais e 20-25 minutos finais.

A Tabela 1 representa a resistência à compressão da espuma de gesso com sulfato de alumínio e alúmen de potássio como agentes produtores de espuma.

Tabela 1: Densidade volumétrica (ρ_v) e resistência à compressão ($\sigma_{c.a}$) da espuma de gesso com sulfato de alumínio e alúmen de potássio.

Aditivo	Água/Gesso (%)	Ác. Cítrico (%)	CMC (%)	ρ_v (kg/m³)	$\sigma_{c.a}$ (MPa)
Sulfato de Alumínio	55	4	0,1	909	1,24
	55	4	0,2	929	1,80
	55	4	0,3	878	1,33
	55	4	0,4	913	1,42
	55	5	0,1	852	1,38
	55	5	0,2	868	1,46
	55	5	0,3	863	1,31
	55	5	0,4	870	1,02
	55	6	0,1	832	0,55
	55	6	0,2	839	1,12
	55	6	0,3	918	0,81
	55	6	0,4	812	1,09
	60	4	0,4	841	1,10
	60	5	0,4	762	0,49
	60	6	0,4	782	0,41
	65	4	0,4	667	0,88
	65	5	0,4	694	0,63
	65	6	0,4	763	0,75
	70	4	0,4	685	0,41
	70	5	0,4	712	0,65
70	6	0,4	761	0,54	
Alúmen de Potássio	57,5	-	0,1	821	1,20
	57,5	-	0,2	809	0,59
	60	-	0,1	843	1,65
	60	-	0,2	835	0,87
	62,5	-	0,2	924	0,99
	65	-	0,2	981	1,29

Fonte: Adaptado de Çolak (2000).

A Tabela 2 representa as densidades e as porosidades (ϕ), calculadas com as Equações (2), (3), (4) e (5), da espuma de gesso com sulfato de alumínio e alúmen de potássio como agentes produtores de espuma.

Tabela 2: Densidades e porosidade (ϕ) da espuma de gesso com sulfato de alumínio e alúmen de potássio.

Aditivo	Água/Gesso (%)	Ác. Cítrico (%)	CMC (%)	ρ_v (kg/m³)	ρ_R	ϕ (%)
Sulfato de	55	4	0,1	909	0,402	59,83
Alumínio	55	4	0,2	929	0,410	58,98
	55	4	0,3	878	0,387	61,28
	55	4	0,4	913	0,402	59,78
	55	5	0,1	852	0,373	62,74
	55	5	0,2	868	0,379	62,08
	55	5	0,3	863	0,377	62,34
	55	5	0,4	870	0,379	62,07
	55	6	0,1	832	0,360	64,00
	55	6	0,2	839	0,363	63,73
	55	6	0,3	918	0,396	60,36
	55	6	0,4	812	0,350	64,98
	60	4	0,4	841	0,359	64,11
	60	5	0,4	762	0,322	67,82
	60	6	0,4	782	0,327	67,32
	65	4	0,4	667	0,276	72,40
	65	5	0,4	694	0,284	71,58
	65	6	0,4	763	0,309	69,08
	70	4	0,4	685	0,275	72,48
	70	5	0,4	712	0,283	71,70
	70	6	0,4	761	0,299	70,07
Alúmen de	57,5	-	0,1	821	0,372	62,80
Potássio	57,5	-	0,2	809	0,366	63,48
	60	-	0,1	843	0,376	62,40
	60	-	0,2	835	0,372	62,80
	62,5	-	0,2	924	0,405	59,47
	65	-	0,2	981	0,424	57,62

Fonte: Próprio Autor.

A Tabela 3 representa a resistência à compressão da espuma de gesso com bicarbonato de amônio como agente produtor de espuma.

Tabela 3: Densidade volumétrica (ρ_v) e resistência à compressão ($\sigma_{c.a}$) da espuma de gesso com bicarbonato de amônio.

Água/Gesso (%)	Ác. Cítrico (%)	CMC (%)	ρ_v (kg/m ³)	$\sigma_{c.a}$ (MPa)
57,5	0,5	0	1086	2,22
57,5	0,5	0,1	1040	1,60
60	0,5	0	1010	1,97
60	0,5	0,1	972	1,34
62,5	0,5	0	980	1,93
62,5	0,5	0,1	972	1,25
62,5	0,5	0,2	1024	1,82
65	0,5	0	925	1,69
65	0,5	0,1	962	0,85
65	0,5	0,2	972	1,24
62,5	1,0	0	1060	-
62,5	1,0	0,1	1026	-
62,5	1,0	0,2	1000	-
65	1,0	0	1020	-
65	1,0	0,1	978	-
65	1,0	0,2	946	-
70	0,5	0,2	850	0,95
75	0,5	0,2	780	0,63
80	0,5	0,2	770	0,48
85	0,5	0,2	756	0,35

Fonte: Adaptado de Çolak (2000).

A Tabela 4 representa as densidades e as porosidades (ϕ), calculadas com as Equações (2), (3), (4) e (5), da espuma de gesso com bicarbonato de amônio como agente produtor de espuma.

Tabela 4: Densidades e porosidade (ϕ) da espuma de gesso com bicarbonato de amônio.

Água/Gesso (%)	Ác. Cítrico (%)	CMC (%)	ρ_v (kg/m ³)	ρ_R	ϕ (%)
57,5	0,5	0	1086	0,490	50,99
57,5	0,5	0,1	1040	0,469	53,12
60	0,5	0	1010	0,448	55,18
60	0,5	0,1	972	0,431	56,87
62,5	0,5	0	980	0,429	57,14
62,5	0,5	0,1	972	0,425	57,53
62,5	0,5	0,2	1024	0,447	55,30
65	0,5	0	925	0,398	60,16
65	0,5	0,1	962	0,414	58,60
65	0,5	0,2	972	0,418	58,22
62,5	1,0	0	1060	0,461	53,87
62,5	1,0	0,1	1026	0,446	55,40
62,5	1,0	0,2	1000	0,434	56,57
65	1,0	0	1020	0,437	56,29
65	1,0	0,1	978	0,419	58,13
65	1,0	0,2	946	0,409	59,13
70	0,5	0,2	850	0,355	64,54
75	0,5	0,2	780	0,316	68,39
80	0,5	0,2	770	0,303	69,66
85	0,5	0,2	756	0,290	71,02

Fonte: Próprio Autor.

A Tabela 5 representa a resistência à compressão da espuma de gesso com laurilsulfato de sódio e nonilfenol etoxilado como agentes produtores de espuma.

Tabela 5: Densidade volumétrica (ρ_v) e resistência à compressão ($\sigma_{c.a}$) da espuma de gesso com laurilsulfato de sódio e nonilfenol etoxilado.

Aditivo	Aditivo (%)	Alúmen de Potássio (%)	ρ_v (kg/m³)	$\sigma_{c.a}$ (MPa)
Laurilsulfato de Sódio	0,1	0	821	0,76
	0,2	0	780	0,76
	0,3	0	746	1,43
	0,4	0,5	683	1,50
	0,4	0,7	708	0,44
Nonilfenol Etoxilado	0,1	0	1093	1,96
	0,2	0	897	0,86
	0,3	0	857	0,82
	0,4	0,5	872	1,48
	0,6	0,6	828	0,49

Fonte: Adaptado de Çolak (2000).

A Tabela 6 representa as densidades e as porosidades (ϕ), calculadas com as Equações (2), (3), (4) e (5), da espuma de gesso com laurilsulfato de sódio e nonilfenol etoxilado como agentes produtores de espuma.

Tabela 6: Densidades e porosidade (ϕ) da espuma de gesso com laurilsulfato de sódio e nonilfenol etoxilado.

Aditivo	Aditivo (%)	Alúmen de Potássio (%)	ρ_v (kg/m³)	ρ_R	ϕ (%)
Laurilsulfato de Sódio	0,1	0	821	0,175	82,46
	0,2	0	780	0,166	83,40
	0,3	0	746	0,158	84,19
	0,4	0,5	683	0,142	85,82
	0,4	0,7	708	0,150	85,01
Nonilfenol Etoxilado	0,1	0	1093	2,34	76,65
	0,2	0	897	0,191	80,91
	0,3	0	857	0,182	81,84
	0,4	0,5	872	0,181	81,90
	0,6	0,6	828	0,170	82,96

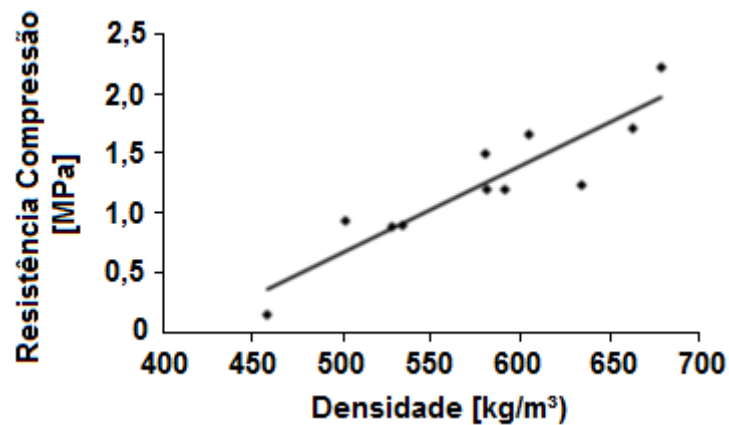
Fonte: Próprio Autor.

Desta forma, é possível concluir que: quanto maior a porcentagem de CMC, menor a densidade da espuma de gesso; o oposto ocorre com o ácido cítrico, quanto maior a sua porcentagem, maior será a densidade; o agente produtor de espuma laurilsulfato de sódio foi

o melhor aditivo utilizado, atingindo porosidades até 85,82%; e a resistência à compressão para a maior porosidade foi de 1,50 MPa.

Skujans et al. (2007) realizaram uma espuma de gesso utilizando substâncias ativas de superfície (surface active substance - SAS). A porcentagem desta substância foi de 0,1% a 0,2%, que influenciou na densidade e, conseqüentemente, na condutividade térmica e resistência mecânica do material. A Figura 2 mostra como a densidade do material influencia na condutividade térmica e na resistência à compressão do mesmo.

Figura 2: Densidade da espuma de gesso influenciando na resistência à compressão.



Fonte Adaptado de Skujans et al. (2007).

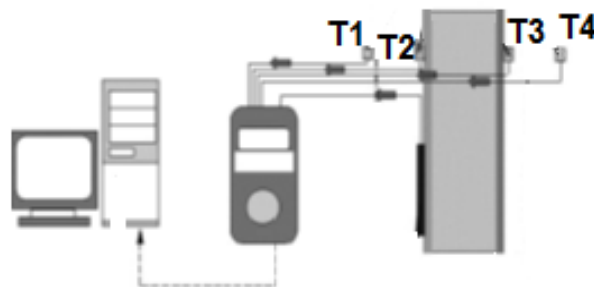
Como o intuito de melhorar a porosidade deste material, tornando-o menos denso, utilizou um produtor de espuma concentrado de espuma multi-gama sintética para a geração de uma espuma expansiva para o equipamento de combate a incêndios. Com esta tecnologia empregada no material, obteve-se uma densidade inferior a obtida anteriormente, chegando a 200 kg/m³. A Tabela 7 mostra a nova densidade aparente influenciando na condutividade térmica.

Tabela 7: Densidade da espuma de gesso influenciando na condutividade térmica.

Densidade Volumétrica [kg/m³]	200	400	500	600	700
Condutividade Térmica [W/(m.K)]	0.07	0.13	0.16	0.20	0.24

Fonte: Adaptado de Skujans et al. (2007).

Os ensaios realizados por Skujans et al. (2007) foram para analisar a condutividade térmica da espuma de gesso. Para isso, utilizou-se um equipamento que registra o fluxo de calor através dos elementos estudados (Figura 3). Desta forma, obtêm-se a temperatura nas duas faces do material (T2 e T3) e a temperatura do ambiente interno e externo (T1 e T4) durante um período de vários dias.

Figura 3: Posições das leituras de temperatura.

Fonte: Skujans et al. (2007).

Entretanto, o ensaio não foi realizado com cada material individualmente e sim com eles em camadas consecutivas. Na Tabela 8 estão representadas as camadas de cada material com suas respectivas condutividades térmicas. De acordo com a EN ISO 6946:1996, adiciona-se uma proporção de aperfeiçoamento para equiparar com a situação real.

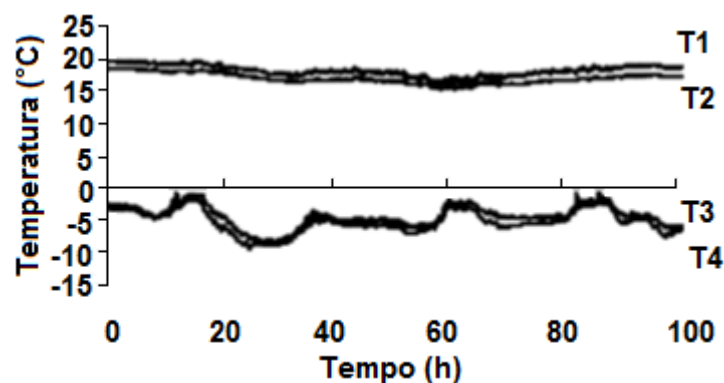
Tabela 8: Condutividade térmica (k) dos materiais.

No	Camada	Espessura [m]	k [W/(m.K)]	Proporção de Aperfeiçoamento [W/(m.K)]	k _{Total} [W/(m.K)]
1	Prancha de Gesso	0,0125	0,25	0,00	0,25
2	Barreira de Vapor	0,0002	0,50	0,00	0,50
3	Espuma de Gesso	0,15	0,18	0,08	0,26
4	Espuma de Poliestireno	0,10	0,039	0,015	0,054

Fonte: Adaptado de Skujans et al. (2007).

A Figura 4 mostra a diferença de temperatura entre o lado de dentro da parede (T1 no ambiente interior e T2 na superfície do material no interior) e o lado de fora (T3 na superfície do material no exterior e T4 no ambiente exterior).

Figura 4: Diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo.



Fonte: Adaptado de Skujans et al. (2007).

Desta forma, é possível concluir que: a espuma de poliuretano é melhor isolante comparando-se com a espuma de gesso produzida.

Vimmrová et al. (2011) analisou dois tipos de espumas de gesso, sendo o primeiro de baixa densidade (maior relação água/gesso) com agregados de maior densidade, e o segundo de alta densidade (menor relação água/gesso) com agregados de baixa densidade. Desta forma, objetivou aumentar a porosidade da espuma de gesso de maior densidade e melhorar a resistência mecânica da espuma de gesso de menor densidade.

Os corpos de prova foram mantidos em estufa a 50 °C até sua massa não sofrer mais alteração. A espuma de gesso de baixa densidade (composição A), a de alta densidade (composição B) e a sem espuma (composição G) estão explícitas na Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 9: Composições das misturas A, B e G.

	Água/Gesso	Ácido Cítrico	Sulfato de Alumínio	Carbonato de Cálcio	Silipon RN 7001
G	0,93				
A	1,07		11,36	2,87	0,02
B	0,53	3,67	7,33	2,34	

Fonte: Adaptado de Vimmrová et al. (2011).

Tabela 10: Composições das misturas A, B e G.

	Água/Gesso	Walocel MKX	Melment F10G	Vinnapas RI 551Z	Retardan P
G	0,93				0,10
A	1,07	0,34	0,53	6,25	0,10
B	0,53	0,20		8,35	

Fonte: Adaptado de Vimmrová et al. (2011).

Para a preparação da composição A, homogeneizou todos os componentes sólido e posteriormente adicionado à água juntamente com a mistura seca. Misturou-se por 30 segundos em uma velocidade baixa, retirou as partes que ficam grudadas no recipiente com uma espátula e voltou a mexer por mais 30 segundos na mesma velocidade.

Já para a composição B, homogeneizou todos os componentes secos com o pó de gesso. A quantidade medida do agente ácido foi cheia até ao volume necessário de água e os componentes secos foram adicionados. O processo de mistura foi a mesma que no caso de misturas de composição A.

O sulfato de alumínio e o carbonato de cálcio foram os responsáveis pela formação de poros no gesso. Silipon RN 7001 é um agente que permite as bolhas de ar serem incorporadas no gesso. Melment F10G é um agente plastificante. Vinnapas RI 551Z um polímero dispersante, que melhora as propriedades mecânicas da espuma de gesso. Walocel MKX é a celulose, que melhora a estabilidade da espuma. Retardan P tem a mesma função do Ácido Cítrico, agindo como agente retardador da cura do gesso.

A distribuição do volume dos poros foi determinada pelo método Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (aparato de Pascal 140 + 440). Este método detecta poros com raio menor que 50 μm , desta maneira, os poros maiores foram estimados calculando a diferença do volume total de poros e o volume de poros detectados por este método.

Resistência à flexão foi seguindo as premissas da norma Checa CSN 72 2301, utilizando o dispositivo de três pontos. Resistência à compressão respeitou as premissas da mesma norma utilizada na resistência à flexão, tendo como diferencia o tipo de dispositivo utilizado. A condutividade térmica foi obtida utilizando um dispositivo comercial chamado ISOMET[®] 2014, que trabalha com o princípio do impulso.

Na Tabela 11 constam as propriedades encontradas das composições A e B e do gesso sem espuma (G), sendo " σ_f " a resistência à flexão

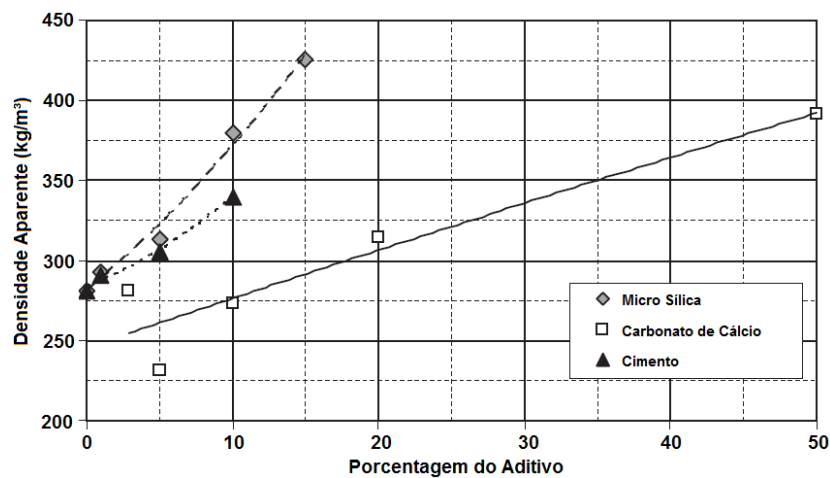
Tabela 11: Propriedades básicas da análise das espumas de gesso A e B e do gesso sem espuma (G).

	ρ_M (kg/m^3)	ρ_V (kg/m^3)	ϕ (%)	Volume do Poro (m^3/kg)	k (W/(m.k))	σ_f (MPa)	$\sigma_{c.a}$ (MPa)
G	2314	945	59,20	$0,62 \times 10^{-3}$	0,39	4,00	12,00
A	2207	281	87,30	$3,10 \times 10^{-3}$	0,08	0,25	0,30
B	2193	661	69,40	$1,04 \times 10^{-3}$	0,16	1,33	2,70

Fonte: Adaptado de Vimmrová et al. (2011).

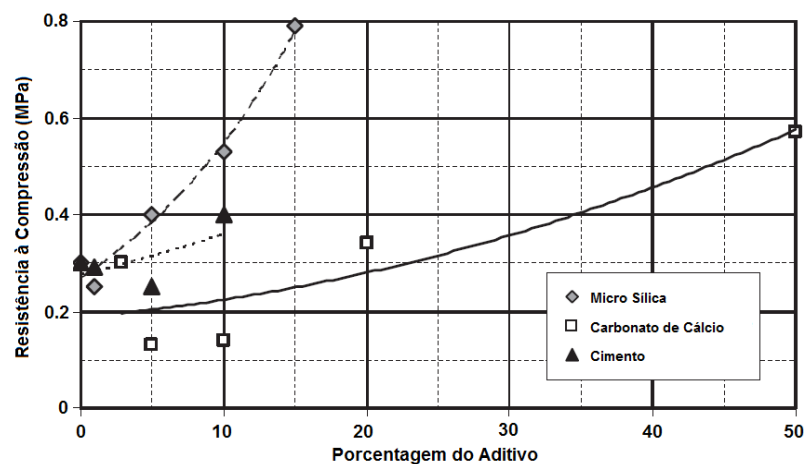
Como dito anteriormente, foi analisada a influência de agregados de maior densidade (micro sílica, carbonato de cálcio e cimento) na espuma de gesso de menor densidade (composição A), assim como o uso de agregados de baixa densidade (perlita expandida) na espuma de gesso de maior densidade (composição B). Na Figura 5 e Figura 6 são analisados os agregados de maior densidade na composição A e na Figura 7 e Figura 8 a perlita expandida na composição B.

Figura 5: Efeito de aditivos de alta densidade na densidade aparente da espuma de gesso de composição A.



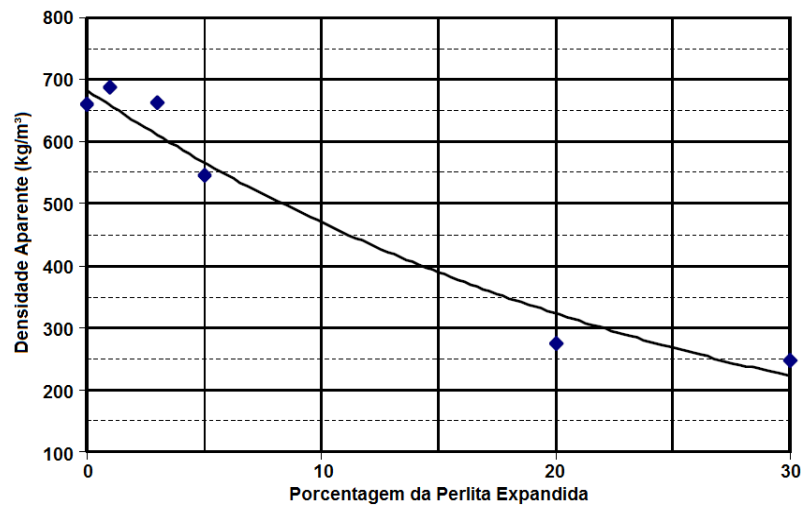
Fonte: Adaptado de Vimrová et al. (2011).

Figura 6: Efeito de aditivos de alta densidade na resistência à compressão da espuma de gesso de composição A.



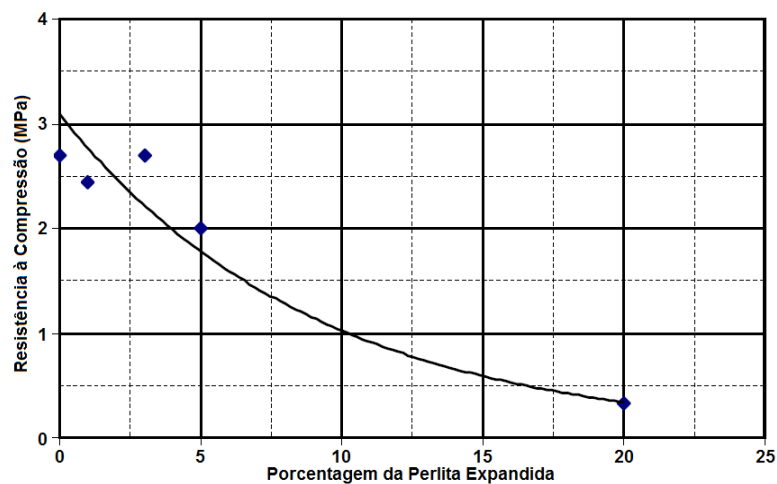
Fonte: Adaptado de Vimrová et al. (2011).

Figura 7: Efeito do perlita na densidade aparente da espuma de gesso de composição B.



Fonte: Adaptado de Vimrová et al. (2011).

Figura 8: Efeito do perlita na resistência à compressão da espuma de gesso de composição B.



Fonte: Adaptado de Vimrová et al. (2011).

Vimrová et al. (2011) concluíram que, com a perlita expandida obteve melhores resultados para a condutividade térmica (composição BP mostrada na Tabela 12 a seguir). A composição ideal foi com 5% de perlita, que além de melhorar a condutividade térmica, obteve poros de menores dimensões e mais uniformes (Figura 9), comparando-se com a composição B. Na Tabela 12 constam os resultados das propriedades da composição BP, assim como a

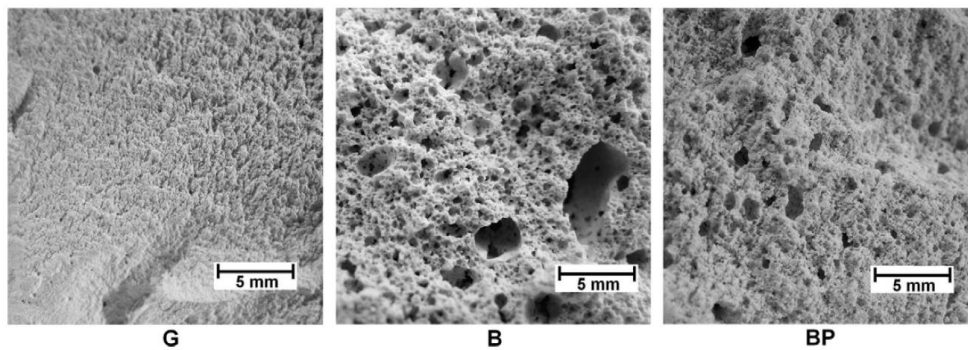
sua composição sem a perlita (composição B) como forma de comparação. A Figura 10 mostra a distribuição do tamanho dos poros nas composições realizadas. Lembrando que a composição G é de gesso puro.

Tabela 12: Propriedades básicas da análise das espumas de gesso B e BP.

	ρ_M (kg/m ³)	(ρ_v) (kg/m ³)	ϕ (%)	Volume do Poro (m ³ /kg)	k (W/(m.k))	σ_f (MPa)	$\sigma_{c,a}$ (MPa)
G	2314	945	59,20	$0,62 \times 10^{-3}$	0,39	4,00	12,00
B	2193	661	69,40	$1,04 \times 10^{-3}$	0,16	1,33	2,70
BP	1940	547	71,10	$1,27 \times 10^{-3}$	0,12	1,44	2,00

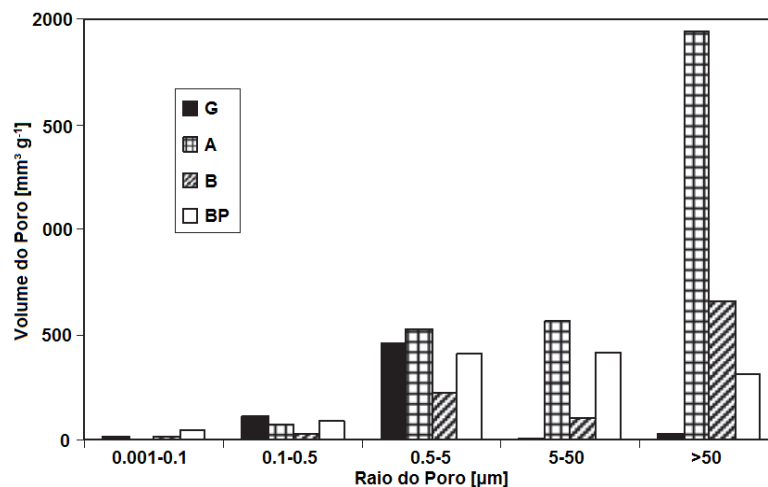
Fonte: Adaptado de Vimrová et al. (2011).

Figura 9: Análise da microestrutura das composições G, B e BP.



Fonte: Adaptado de Vimrová et al. (2011).

Figura 10: Distribuição do tamanho dos poros nas espumas de gesso fabricadas.



Fonte: Adaptado de Vimrová et al. (2011).

Desta forma, é possível concluir que: micro sílica é o aditivo que possui melhor efetividade para melhorar a resistência mecânica do material, visto que aumentou 2,67 vezes a resistência à compressão com 15% de adição em relação à massa de gesso; perlita expandida também mostrou efetividade, reduzindo 60% a densidade da espuma de gesso com 30% de perlita e, conseqüentemente, aumentando a porosidade e melhorando isolamento térmico do material; e a perlita deixou a distribuição dos poros mais uniformes, melhorando assim as propriedades mecânicas deste material.

Brencis et al. (2011) analisaram a efetividade da fibra da Cannabis, um aditivo natural e que não polui o meio ambiente, na resistência mecânica da espuma de gesso, por ser uma propriedade que possui bastante déficit neste tipo material. Além disto, analisou se irá afetar na propriedade acústica, que é uma das propriedades mais relevantes.

A espuma de gesso analisada foi a mesma utilizada por Skujans et al (2007), também citado nesta revisão bibliográfica e com uma relação água/gesso de 0,70. Esta espuma consta com substâncias ativas de superfície (surface active substance - SAS) até 6 ml, e foi adicionada a fibra da maconha em gramas por quilo de gesso (c, g/kg), de 15÷50 g/kg. Foi utilizado 2 comprimentos de fibras, uma longa de comprimento 5÷10 mm e uma curta de comprimento 2,5÷5 mm.

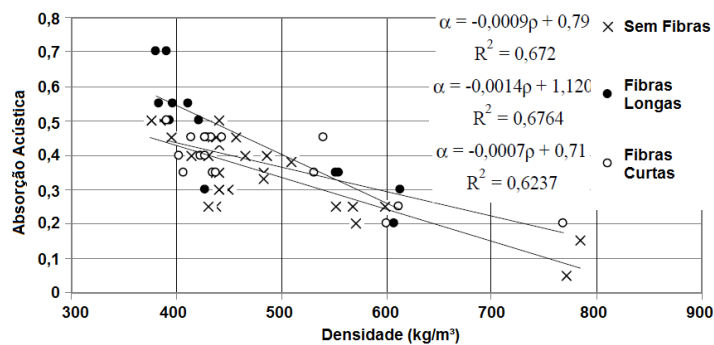
Para medir a absorção acústica, foi utilizado um tubo de impedância que mede frequências de 250 Hz a 4000 Hz. O tubo de impedância possuía dois diâmetros: de 100 mm e 40 mm. No diâmetro maior, é colocada a fonte de som e no tubo de menor diâmetro os dois

microfones para medição e a amostra de 40 mm de diâmetro na ponta. A medição seguiu as premissas da norma da União Europeia EN ISO 11654:1997.

A resistência à compressão e flexão foram medidas utilizando o dispositivo Zwick Roell 2.5 TS e os resultados processados no programa Test Xpert V9.01. O ensaio de flexão foi realizado em três pontos, com os apoios distantes de 100 mm.

Na Figura 11 exibe a influência da densidade da espuma de gesso produzida com fibras da Cannabis (fibras curtas e longas) na absorção acústica.

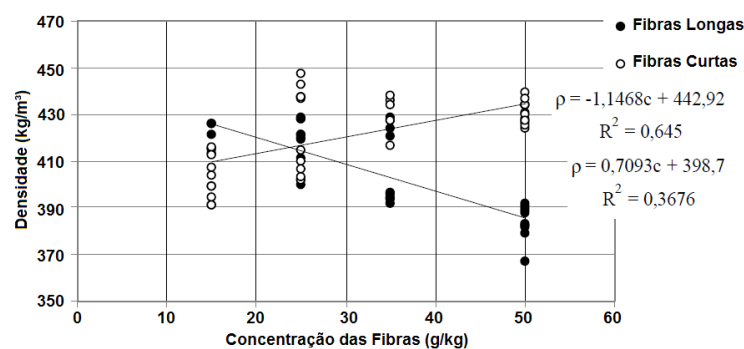
Figura 11: Valor da absorção acústica em função da densidade.



Fonte: Adaptado de Brencis et al. (2011).

Na Figura 12 mostra a influência da concentração das fibras na densidade da espuma de gesso.

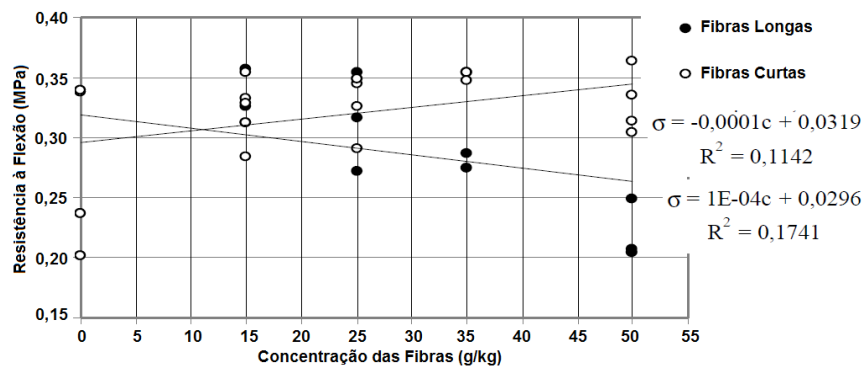
Figura 12: Influência da concentração das fibras na densidade da espuma de gesso.



Fonte: Adaptado de Brencis et al. (2011).

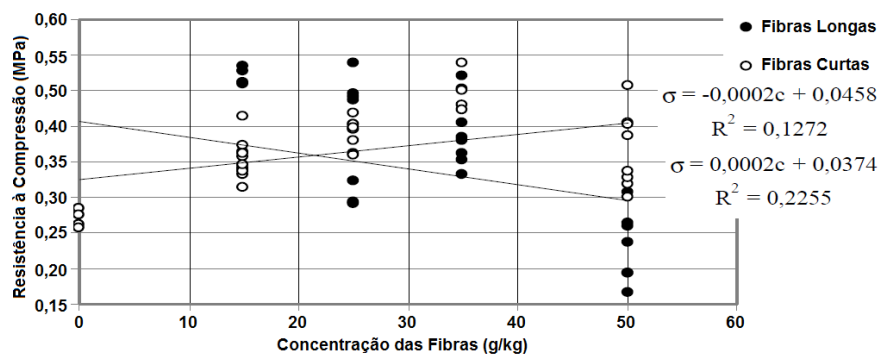
Através desta figura é possível encontrar a maior e menor porosidade, uma vez que a menor densidade é resultado da maior porosidade e a maior densidade da menor porosidade. Entretanto, os autores não informam a relação água/gesso e nem as porcentagens de possíveis aditivos, tornando impossível a obtenção da porosidade. Nas Figura 13 e Figura 14 mostram a resistência à flexão e a compressão, respectivamente, de acordo com a concentração das fibras.

Figura 13: Resistência à flexão em função da concentração das fibras.



Fonte: Adaptado de Brencis et al. (2011).

Figura 14: Resistência à compressão em função da concentração das fibras.



Fonte: Adaptado de Brencis et al. (2011).

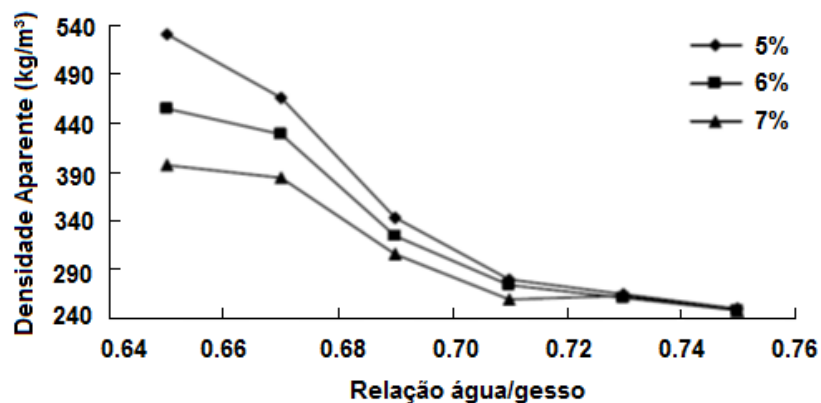
Desta forma, é possível concluir que: fibras longas melhoram a absorção acústica, para densidade de 380 kg/m³ até 550 kg/m³, sendo considerado um material isolante acústico pela norma Europeia EN ISO 11654:1997; as fibras longas obtiveram melhores valores de

resistência quando a porcentagem de fibra é baixa (até 20 g/kg); e as fibras curtas obtiveram melhores resultados de resistência quando a sua porcentagem é maior (20 a 50 g/kg).

Huang et al. (2013) realizaram uma espuma de gesso utilizando peróxido de hidrogênio (H_2O_2) sendo catalisado por MnO_2 ao invés de ser catalisado por água morna. Quando o peróxido de hidrogênio é adicionado à massa de gesso produz inúmeras bolhas, assim o material adquire uma auto formação de espuma. Foi avaliada a relação água/gesso de 0,65; 0,67; 0,69; 0,71; 0,73; e 0,75, utilizando uma porcentagem de 5, 6 e 7% de H_2O_2 . Os corpos de provas foram mantidos em uma estufa a $40^\circ C$ até seu peso não sofrer mais alteração.

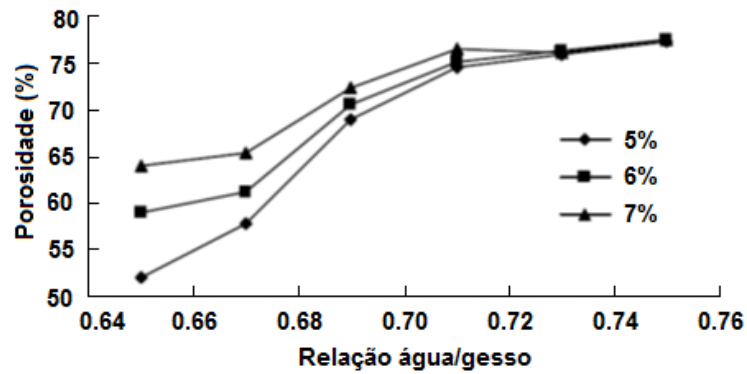
A Figura 15 seguir mostra a influência das relações água/gesso e porcentagem de H_2O_2 na densidade aparente, seguida da Figura 16 mostrando a influência das relações água/gesso e porcentagem de H_2O_2 na porosidade do material.

Figura 15: Influência da relação água/gesso e porcentagem do aditivo espumante na densidade aparente.



Fonte: Adaptado de Huang et al. (2013).

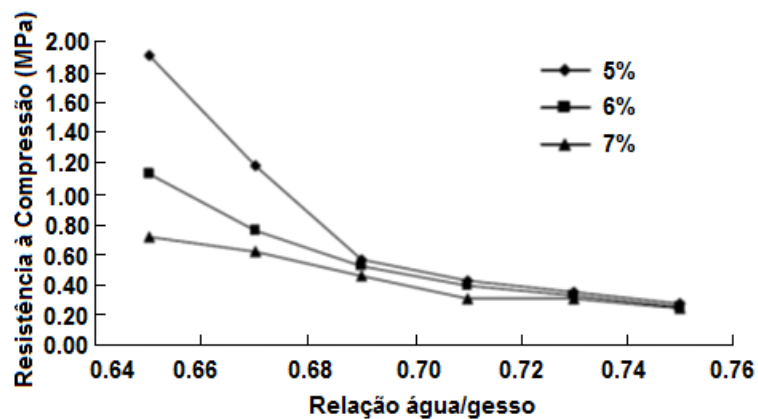
Figura 16: Influência da relação água/gesso e porcentagem do aditivo espumante na porosidade.



Fonte: Adaptado de Huang et al. (2013).

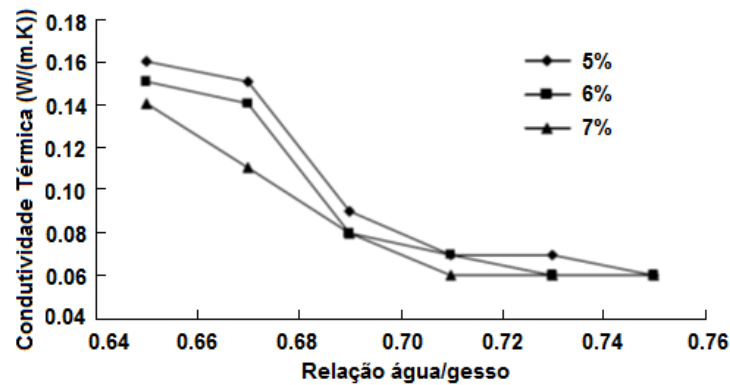
Finalmente, nota-se a influência da relação água/gesso e a porcentagem do peróxido de hidrogênio na resistência à compressão (Figura 17) e na condutividade térmica (Figura 18).

Figura 17: Influência da relação água/gesso e porcentagem do aditivo espumante na resistência à compressão.



Fonte: Adaptado de Huang et al. (2013).

Figura 18: Influência da relação água/gesso e porcentagem do aditivo espumante na condutividade térmica.

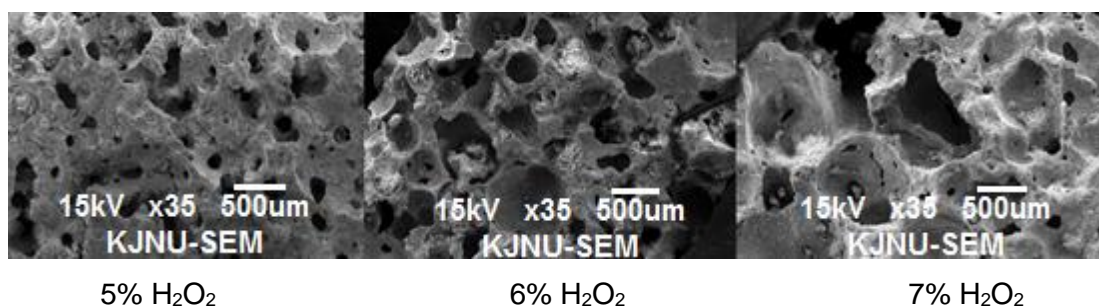


Fonte: Adaptado de Huang et al. (2013).

Como forma de comparação, o gesso sem o aditivo peróxido de hidrogênio possui uma resistência à compressão de 7,5 MPa, isto para a pasta de gesso com uma consistência de 56%.

A Figura 19 a seguir mostra a microestrutura dos poros após a cura para uma relação água/gesso de 0,69.

Figura 19: Microestrutura dos poros.



Fonte: Adaptado de Huang et al. (2013).

Desta forma, é possível concluir que: o peróxido de hidrogênio produziu uma espuma de gesso com alta porosidade, chegando a mais de 75%; quanto maior a porosidade do material, menor a condutividade térmica; quanto maior a porcentagem de água oxigenada,

menor será o tamanho e distribuição dos cristais de gesso formados; e a relação água/gesso é de extrema importância na porosidade do material, variando de 52% de porosidade com água/gesso de 0,65 a mais de 75% com água/gesso de 0,75.

Preikss et al. (2013) analisou a influência da fibra de Cânhamo (*Cannabis Sativa L*) nas resistências mecânica e condutividade térmica da espuma de gesso, tendo como principal objetivo o aumento da resistência mecânica. Os materiais utilizados para a fabricação da espuma de gesso, de relação água/gesso de 0,70, foram os mesmos que Skujans et al. (2007): água, com qualidade bebível; pó de gesso; e substância ativa de superfície (espumante), sendo acrescida as fibras de cânhamo de 'Tygra' (T), 'Futura 75' (F) e 'Bialobrzeskie' (B) na quantidade de 4 ml por quilo de gesso. A produtividade e composição química do cânhamo estão representadas na Tabela 13.

Tabela 13: Produtividade e composição química do cânhamo.

Variedade Cânhamo	Taxa Fertilizante (kg ha ⁻¹)	Biomassa Verde (t ha ⁻¹)	Matéria Seca (t ha ⁻¹)	Conteúdo em Matéria Seca (%)			
				Cinza	C	P	K
Futura75	N0	25,97	5,90	3,19	47,41	0,16	0,25
	N60	53,19	12,09	3,08	45,12	0,13	0,23
	N120	56,64	13,42	2,68	44,43	0,10	0,33
	N150	62,51	14,67	2,50	45,59	0,08	0,29
Bialobrzeskie	N0	23,70	5,56	2,78	40,21	0,12	0,27
	N60	45,80	9,72	2,59	43,26	0,14	0,26
	N120	47,30	10,95	2,43	43,23	0,12	0,29
	N150	51,40	12,09	2,40	42,39	0,10	0,30
Tygra	N0	22,78	5,03	2,57	39,22	0,10	0,32
	N60	41,68	9,72	2,39	41,68	0,08	0,29
	N120	46,33	10,13	2,52	41,14	0,10	0,35
	N150	49,70	11,56	2,50	38,36	0,10	0,34

Fonte: Adaptado de Preikss et al. (2013).

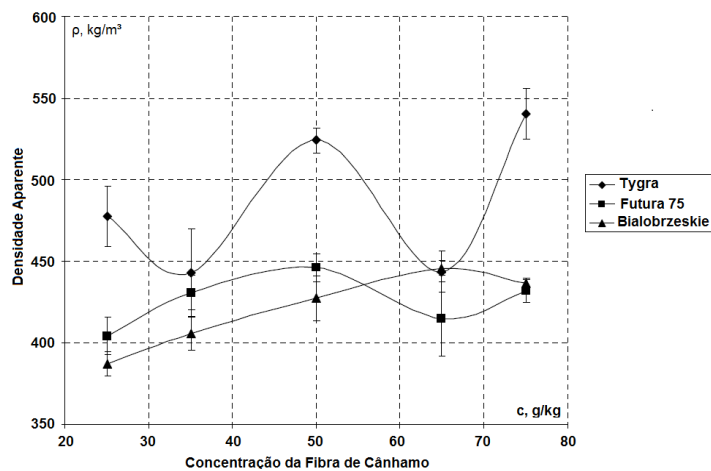
Legenda: 'N' – Nitrogênio;
 'C' – Carbono;
 'P' – Parcela fertilizada;
 'K' – Potássio.

A concentração utilizada da fibra de cânhamo (c, g kg⁻¹) é em relação à porcentagem de gesso, sendo expressa em gramas (de cânhamo) por quilo (de gesso). As amostras foram

secadas de acordo com a norma LVS 150:1998. A Figura 20 mostra a influência da concentração da fibra de cânhamo na densidade da espuma de gesso. Figura 21 e Figura 22 mostram a influência da fibra de cânhamo na resistência à flexão e compressão, respectivamente, e as melhores composições consideradas pelo autor (resultados circulados)

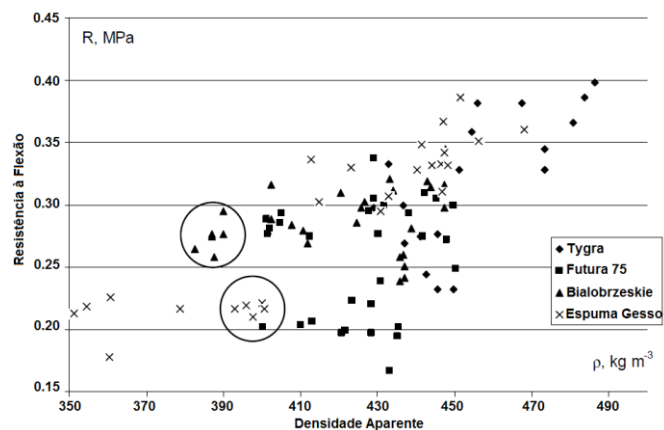
Como forma de comparação, a espuma de gesso sem a fibra de cânhamo possui densidade aparente de 400 kg/m^3 , resistência à flexão de $0,22 \text{ MPa}$ e resistência à compressão de $0,34 \text{ MPa}$.

Figura 20: Influência da concentração da fibra de cânhamo na densidade da espuma de gesso.



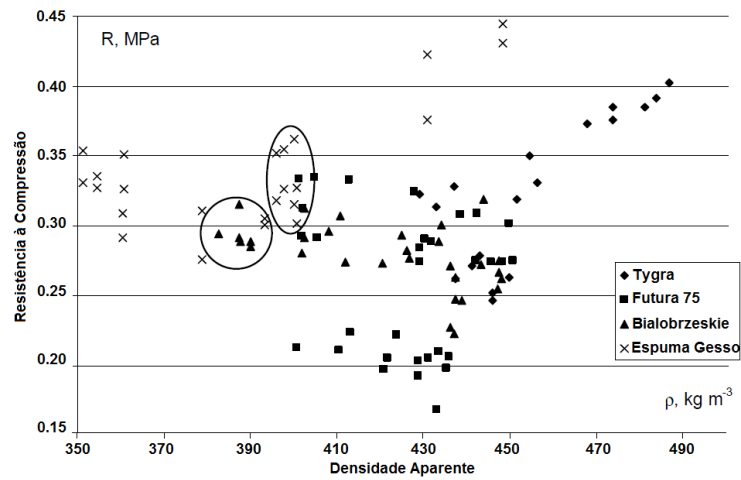
Fonte: Adaptado de Preikss et al. (2013).

Figura 21: Influência da fibra de cânhamo na resistência à flexão.



Fonte: Adaptado de Preikss et al. (2013).

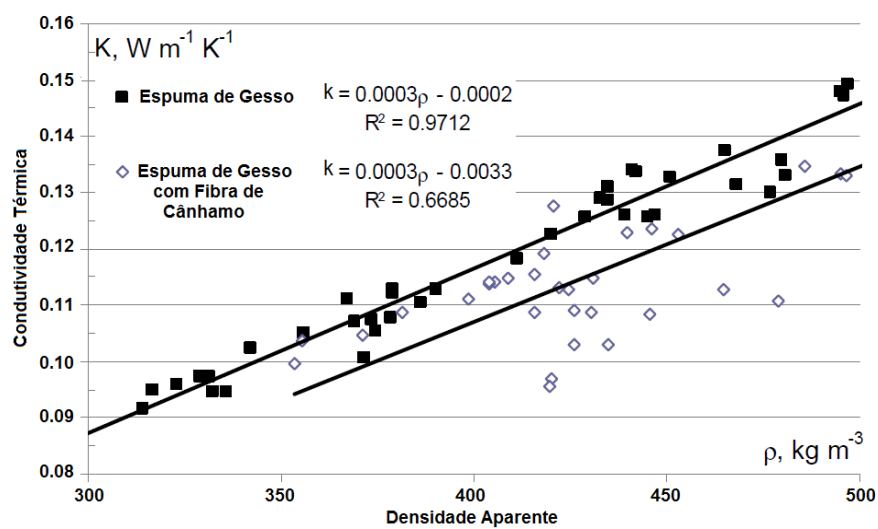
Figura 22: Influência da fibra de cânhamo na resistência à compressão.



Fonte: Adaptado de Preikss et al. (2013).

Por final, a condutividade térmica da espuma de gesso com e sem as fibras de cânhamo é mostrada na Figura 23. É apresentado somente da fibra de cânhamo B, por ser considerada a melhor.

Figura 23: Influência da fibra de cânhamo na condutividade térmica.



Fonte: Adaptado de Preikss et al. (2013).

Desta forma, é possível concluir que: a fibra de cânhamo aumenta a resistência à flexão em densidade de até 400 kg/m³, mas não melhora a resistência à compressão; e a fibra de cânhamo diminui a condutividade térmica da espuma de gesso.

Vimmrová (2014) realizou uma espuma de gesso utilizando pó de alumínio. Primeiramente, misturou o pó de alumínio, cal hidratada e o agente retardante GK (Sika Deutschland GmbH). Posteriormente, adicionou o gesso, misturando todos os aditivos sólidos. Por final, adicionou a água e mexeu por 60 segundos em uma velocidade baixa, misturou com uma espátula para retirar os resquícios que grudam na lateral do recipiente e voltou a mexer por mais 60 segundos na mesma velocidade. As amostras foram mantidas a 50°C constantes até sua massa não se alterar mais. As composições realizadas são mostradas na Tabela 14.

Tabela 14: Composições das misturas testes.

	Gesso	Cal	Retardante	Pó de	Água
	(%)	(%)	(%)	Alumínio (%)	(w/g)
LG1	65	33	1	1	0,5
LG2	85	13	1	1	0,5
LG3	65	32	2	1	0,5
LG4	65	32	1	2	0,5
LG5	65	33	1	1	0,7
LG6	75	22,8	1,1	1,1	0,53
LG7	84,4	13,6	1	1	0,5
LG8	70	28,4	0,1	1,5	0,6
LG9	66,2	31,2	1,5	1,1	0,53
LG10	65,1	31,9	2	1	0,5
LG11	66,4	31,3	1,1	1,2	0,61
GS	69	30	1	0	0,53

Fonte: Adaptado de Vimmrová (2014).

Entretanto, serão analisadas as composições que possuíam maior quantidade de gesso e tiveram melhor trabalhabilidade na fabricação, além da composição sem o pó de alumínio (GS). Estas composições estão destacadas na Tabela 14.

A distribuição do tamanho dos poros foi determinada pela Porosimetria por Intrusão de Mercúrio. Este método detecta somente poros com diâmetros inferiores a 50 μm e o volume dos poros maiores foi estimado como diferença do volume total de poros e volume de poros detectados pela Porosimetria por Intrusão de Mercúrio.

A resistência à flexão determinada de acordo com as premissas da norma Europeia ČSN EN 13279-2, no qual os corpos de provas possuem dimensões 40 x 40 x 160 mm. O teste foi realizado com um teste de flexão comum de três pontos e realizado após 7 dias de cura da espuma de gesso.

A resistência à compressão foi determinada de acordo com as premissas da norma Europeia CSN EN 13279-2, utilizando os pedaços remanescentes da resistência à flexão. Este ensaio também foi realizado com 7 dias.

A condutividade térmica e a capacidade de calor específica foram determinadas utilizando o método de impulso (aparato Isomet 2104). Tal método é baseado na análise da resposta da temperatura do material analisado aos impulsos de fluxo de calor gerados. As amostras utilizadas foram de 70 x 70 x 70 mm.

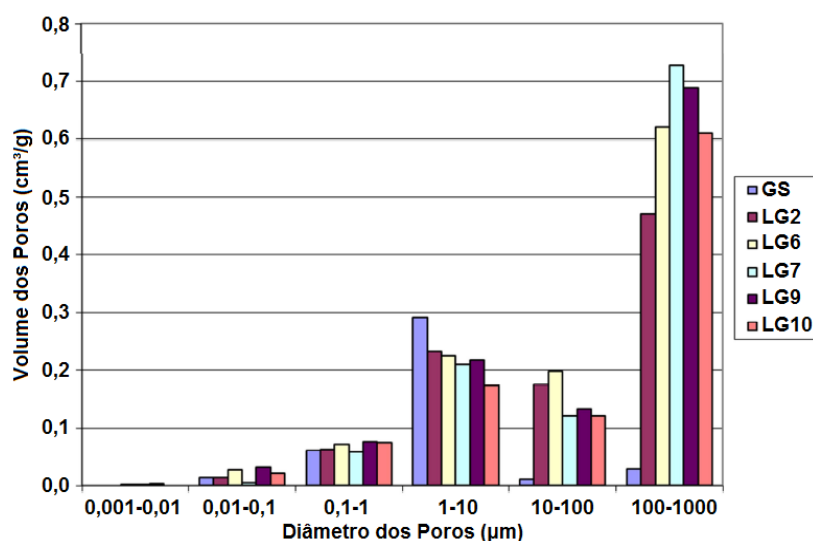
A Tabela 15 mostra as propriedades físicas básicas e as propriedades mecânicas da espuma de gesso obtidas nos ensaios. A Figura 24 mostra a distribuição do tamanho dos poros.

Tabela 15: Propriedades mecânicas e físicas da espuma de gesso.

Mistura	ρ_M (kg/m ³)	ρ_v (kg/m ³)	ϕ (%)	σ_f (MPa)	$\sigma_{c.a}$ (MPa)	k (W/m.k)
LG2	2298	721	68,6	0,93	1,57	0,222
LG6	2324	635	72,7	0,62	0,93	0,221
LG7	2319	641	72,4	0,58	1,15	0,251
LG9	2361	635	73,1	0,57	0,93	0,226
LG10	2312	693	70,0	0,76	1,20	0,226
GS	2389	1214	49,2	3,32	11,57	0,401

Fonte: Adaptado de Vimrová (2014).

Figura 24: Distribuição do tamanho dos poros.



Fonte: Adaptado de Vimmrová (2014).

Desta forma, é possível concluir que: o tempo de cura utilizado neste trabalho foi inferior aos outros, levando somente 7 dias; o pó de alumínio mudou a distribuição dos poros, prevalecendo poros maiores que 10 µm e bolhas com raio acima de 100 µm; e o pó de alumínio mostrou ter potencial, produzindo uma espuma de gesso de condutividade térmica duas vezes menor que o gesso puro.

Wang et al. (2014) produziram uma espuma de gesso utilizando o gesso alfa (α -gesso) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) como agente espumante, assim como Huang et al. (2013) fabricou. Utilizou, também, sabões de cálcio de ácidos graxos como estabilizador da espuma e ácido cítrico como agente retardador de pega. Os ensaios realizados foram de resistência à compressão, flexão e densidade aparente.

A preparação da espuma de gesso foi realizada da seguinte maneira: misturaram-se todos os materiais sólidos (gesso, estabilizador de espumas, aditivos e o retardador de acordo com as proporções desejadas). Posteriormente adicionou-se a água e o peróxido de hidrogênio, misturando em alta velocidade. Com isso temos uma pasta de gesso fluída, necessitando somente colocar nos moldes (40 mm x 40 mm x 160 mm) e esperar 2h para desmoldar. Posteriormente colocaram-se as amostras no forno a 40 °C (± 2 °C) para secar até que a qualidade da amostra não se altere mais.

A Tabela 16 apresenta a influência da relação água/gesso nas resistências e na densidade da espuma de gesso.

Tabela 16: Influência da relação água/gesso nas resistências e densidade da espuma de gesso.

No.	Relação água/gesso	ρ_v (kg/m ³)	σ_f (MPa)	$\sigma_{c.a}$ (MPa)
1	0,39	301,00	0,483	0,626
2	0,40	280,99	0,411	0,534
3	0,41	273,70	0,414	0,578
4	0,42	250,52	0,352	0,433

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2014).

A Tabela 17 mostra a influência da relação do agente espumante (H₂O₂) nas propriedades mecânicas e na densidade da espuma de gesso. Foi utilizado relação água/gesso de 0,41 por julgar ser a melhor, 6,5% de aditivos e 0,70% do estabilizador de espuma.

Tabela 17: Influência da relação do agente espumante (H₂O₂) nas propriedades mecânicas, densidades e porosidade da espuma de gesso.

No.	Agente Espumante	ρ_v (kg/m ³)	ρ_R	ϕ (%)	σ_f (MPa)	$\sigma_{c.a}$ (MPa)
1	4,50%	320,96	0,144	85,64	0,531	0,770
2	4,75%	306,64	0,137	86,32	0,452	0,602
3	5,00%	287,89	0,125	87,55	0,445	0,518
4	5,25%	279,04	0,124	87,62	0,416	0,511

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2014).

A Tabela 18 mostra a influência da temperatura da água nas propriedades mecânicas e na densidade da espuma de gesso, também com relação água/gesso de 41%.

Tabela 18: Influência da temperatura da água nas propriedades mecânicas e na densidade da espuma de gesso.

No.	T (°C)	ρ_v (kg/m ³)	σ_f (MPa)	$\sigma_{c.a}$ (MPa)
1	25	275,39	0,442	0,577
2	28	296,35	0,484	0,600
3	31	300,00	0,484	0,625
4	34	317,32	0,531	0,678

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2014).

Com os dados fornecidos nas Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18, foi possível encontrar a fórmula ótima deste experimento, sendo esta expressa na Tabela 19. A Tabela 20 mostra os resultados obtidos desta formulação considerada ótima.

Tabela 19: Fórmula ótima da espuma de gesso.

Relação água/gesso	Agente Espumante	Aditivos	Estabilizador da Espuma	T (°C)
41%	4,75%	6,5%	0,7%	25

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2014).

Tabela 20: Resultados das resistências mecânicas, densidades e porosidade da formulação ótima.

ρ_v (kg/m ³)	ρ_R	ϕ (%)	σ_f (MPa)	$\sigma_{c.a}$ (MPa)
273,70	0,122	87,79	0,454	0,578

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2014).

Desta forma, é possível concluir que: o aumento do agente espumante (água oxigenada), as resistências mecânicas diminuem; a diferença entre as porosidades é baixa,

podendo utilizar a menor porcentagem de água oxigenada para não afetar as propriedades mecânicas; e com o aumento da temperatura da água, todas as propriedades analisadas também sofreram acréscimo, exceto a porosidade (quanto maior a densidade, menor a porosidade).

Khalil et al. (2014) analisaram uma espuma de gesso composta por: casca de arroz não queimada, escória de alto forno, carbonato de cálcio ou polímero polivinílico de álcool comercial (PVA), nas proporções de 0.2-10%. Os ensaios realizados (consistência, tempo de pega, porosidade aparente, densidade aparente e resistência à compressão) foram medidos após 7 e 28 dias. Serão mostrados, neste capítulo, somente os ensaios relevantes para comparação, que seria: tempo de pega, porosidade, densidade e resistência à compressão.

A preparação da espuma de gesso, que seguiu a Patente U.S. 4040850, foi realizada da seguinte forma: misturou-se de 0.2% até 7% de casca de arroz não queimada, escória de alto forno, carbonato de cálcio ou polímero polivinílico de álcool comercial (PVA) por 15 minutos até atingir boa homogeneidade. A humidade do ambiente era de 60-70% e a temperatura entre 20 e 25 °C. Os corpos de provas não foram levados para uma estufa de secagem, mas mantidos à temperatura ambiente até atingir 7 ou 28 dias para a medição das propriedades do gesso.

A Tabela 21 e Tabela 22 mostram o tempo necessário para a cura total da espuma de gesso criada.

Tabela 21: Tempo de cura inicial e final da espuma de gesso.

Aditivo %	Casca de Arroz				Escória			
	Inicial		Final		Inicial		Final	
	Min.	Seg.	Min.	Seg.	Min.	Seg.	Min.	Seg.
0	8	30	15	00	8	30	15	00
0.2	9	30	14	30	8	30	15	15
0.4	10	17	16	12	9	12	15	12
0.6	12	30	19	30	10	15	16	17
0.8	13	16	21	11	10	00	17	00
1	14	30	23	16	11	8	18	30
3	22	17	32	16	9	13	14	15
5	n.d.		n.d.		7	30	12	00
7	n.d.		n.d.		7	12	11	12
10	n.d.		n.d.		6	30	10	18

Fonte: Adaptado de Khalil et al. (2014).

Legenda: n.d. = não determinado (~35 min).

Tabela 22: Tempo de cura inicial e final da espuma de gesso.

Aditivo %	Carbonato de Cálcio				PVA			
	Inicial		Final		Inicial		Final	
	Min.	Seg.	Min.	Seg.	Min.	Seg.	Min.	Seg.
0	8	30	15	00	8	30	15	00
0.2	10	21	18	12	14	00	20	15
0.4	12	23	20	23	17	12	23	30
0.6	15	00	23	11	19	16	25	14
0.8	15	21	24	17	20	17	26	30
1	17	14	26	18	21	00	27	12
3	16	30	25	14	24	11	31	00
5	16	13	24	12	29	21	35	30
7	15	21	21	8	n.d.		n.d.	
10	14	00	22	13	n.d.		n.d.	

Fonte: Adaptado de Khalil et al. (2014).

Legenda: n.d. = não determinado (~35 min).

Na Tabela 23 estão representadas as porosidades da espuma de gesso, com 7 e 28 dias de cura.

Tabela 23: Porosidade da espuma de gesso em porcentagem.

Aditivo %	Casca de Arroz		Escória		Carbonato de Cálcio		PVA	
	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias
0	40.9	39.1	40.9	39.1	40.9	39.1	40.9	39.1
0.2	36.9	35.2	41.2	38.9	41.5	37.2	40.9	39.1
0.4	37.5	35.0	41.5	37.2	42.0	35.0	39.1	37.0
0.6	38.7	34.7	42.0	36.8	42.5	32.8	38.8	37.0
0.8	39.0	36.9	42.6	35.2	42.6	33.1	40.2	37.0
1	40.9	36.9	43.0	34.7	42.6	32.8	40.3	37.0
3	40.9	35.5	42.0	34.7	42.5	32.4	40.9	34.9
5	40.6	34.5	41.9	35.2	41.5	32.4	38.8	34.8
7	n.d.	n.d.	40.8	34.7	44.1	37.2	39.1	36.0
10	n.d.	n.d.	43.2	34.9	44.8	38.0	39.8	37.0

Fonte: Adaptado de Khalil et al. (2014).

Legenda: n.d. = não determinado.

A Tabela 24 mostra a densidade volumétrica da espuma de gesso com 7 e 28 dias de cura.

Tabela 24: Densidade volumétrica da espuma de gesso em quilograma por metro cúbico.

Aditivo %	Casca de Arroz		Escória		Carbonato de Cálcio		PVA	
	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias
0	1160	1150	1160	1150	1160	1150	1160	1150
0.2	1140	1140	1110	1130	1140	1120	1110	1100
0.4	1130	1130	1110	1130	1140	1120	1190	1130
0.6	1013	1120	1110	1130	1140	1120	1200	1130
0.8	1120	1120	1110	1130	1140	1120	1220	1160
1	1120	1120	1110	1130	1140	1120	1170	1150
3	1130	1140	1110	1100	1170	1120	1130	1150
5	1140	1130	1120	1070	1170	1180	1130	1150
7	n.d.	n.d.	1100	1080	1180	1160	1120	1150
10	n.d.	n.d.	1070	1110	1170	1160	1090	1130

Fonte: Adaptado de Khalil et al. (2014).

Legenda: n.d. = não determinado.

A Tabela 25 apresenta a resistência à compressão da espuma de gesso com 7 e 28 dias de cura.

Tabela 25: Resistência à compressão da espuma de gesso em MPa.

Aditivo %	Casca de Arroz		Escória		Carbonato de Cálcio		PVA	
	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias
0	11.9	14.8	11.9	14.8	11.9	14.8	11.9	14.8
0.2	12.5	15.9	11.1	14.7	11.9	14.0	10.3	14.8
0.4	13.0	16.4	11.2	14.6	11.9	13.8	10.2	14.8
0.6	11.0	13.5	11.3	14.5	11.9	13.7	10.1	14.7
0.8	10.0	12.0	11.4	14.5	11.9	13.6	10.2	15.0
1	10.0	10.8	11.5	14.5	11.9	13.5	10.5	16.4
3	7.5	10.0	12.5	12.2	13.3	16.0	12.0	17.8
5	6.5	7.5	13.0	12.9	11.9	14.5	11.8	16.4
7	n.d.	n.d.	10.8	15.2	11.6	14.0	11.7	16.3
10	n.d.	n.d.	10.0	20.0	11.2	12.3	11.7	16.3

Fonte: Adaptado de Khalil et al. (2014).

Legenda: n.d. = não determinado.

Desta forma, é possível concluir que: a diferença de massa com 7 e 28 dias, em alguns casos, é significativa, desta forma afetando na porosidade e resistência mecânica do material; a diferença entre densidade com 7 e 28 dias ocorrem devido o excesso de água utilizado para dar trabalhabilidade na massa de espuma de gesso e devido a liberação das bolhas de ar aprisionadas na mistura; e os aditivos utilizados melhoraram as propriedades mecânicas das espumas de gesso desenvolvidas, mas não alterou ou chegou a reduzir a porosidade, podendo não ser considerado uma espuma de gesso.

Li e Li (2014) analisaram a influência da fibra de vidro na densidade, resistência mecânica e condutividade térmica da espuma de gesso produzida com gesso dessulfurizado (dessulfuração é o processo de remoção de enxofre). O gesso dessulfurizado possui melhores propriedades térmicas, comparando-se com o gesso comum. Desta forma, adicionando agente espumante neste tipo de gesso é uma forma de obter uma melhor espuma de gesso. Entretanto, por sua resistência mecânica ser mais baixa, é necessário o acréscimo de fibras de vidro para melhorar tal propriedade.

O gesso dessulfurizado, de composição química apresentada na Tabela 26, é um subproduto da dessulfuração úmida da central elétrica de Jinan Huangtai. A fibra de vidro utilizada será a Alkali-resistente, produzida na Nanjing Fiberglass Company, com densidade de 2500 a 2700 kg/m³, módulo de elasticidade de 74 GPa e resistência à tração de 1800 MPa, com alongamento de 2,4%. Será utilizado um agente espumante A e um agente redutor de água, ambos não informados pelo autor.

Tabela 26: Composição química do gesso dessulfurizado.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	L.O.I	Água de Cristalização
1,83	0,28	0,24	32,33	3,85	23,21	24,00	17,28

Fonte: Adaptado de Li e Li (2014).

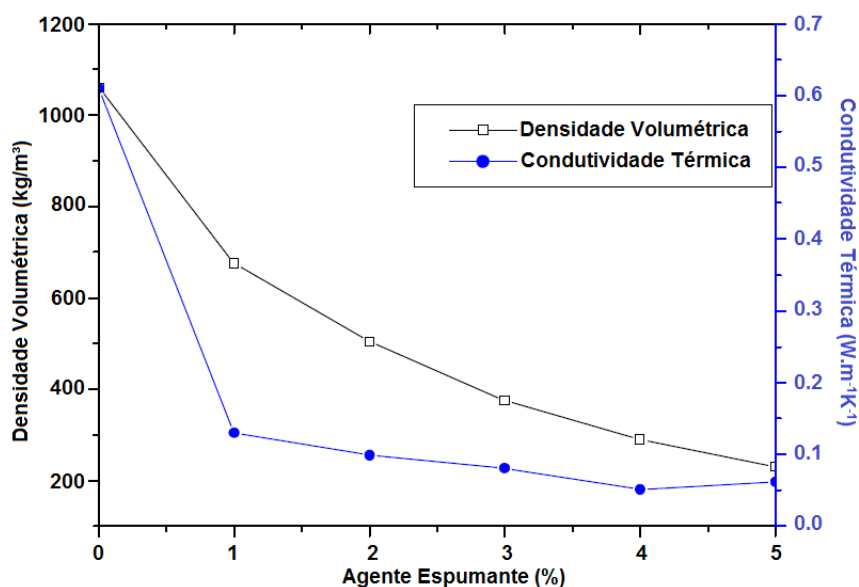
As relações utilizadas foram de 100:10:43:2 de gesso dessulfurizado, cinzas volantes, água e agente redutor de água, respectivamente. Desta forma, foi produzido dois grupos de espuma de gesso: um adicionando o agente espumante (1%, 2%, 3%, 4% e 5%); e outro, com a formulação ótima do agente espumante, contendo a fibra de vidro (0%; 0,5%; 1%; 1,5%; e 2%).

Para a preparação, adicionaram-se as matérias primas na água e esperou 1 minuto. Após este tempo, agitou a mistura por 30 segundos e quando obteve uma massa homogênea, despejou nos moldes necessários. As amostras foram desmoldadas após 2 horas de cura e colocadas em uma estufa a 40°C até o peso não sofrer mais alteração. Em seguida, aumentou a temperatura da estufa para 70°C por uma hora, e depois colocou as amostras em uma sala com temperatura baixa.

As propriedades mecânicas e o coeficiente de condutividade térmica foram obtidos de acordo com as premissas da norma GB/T 5486-2008 e GB/T 10294-2008.

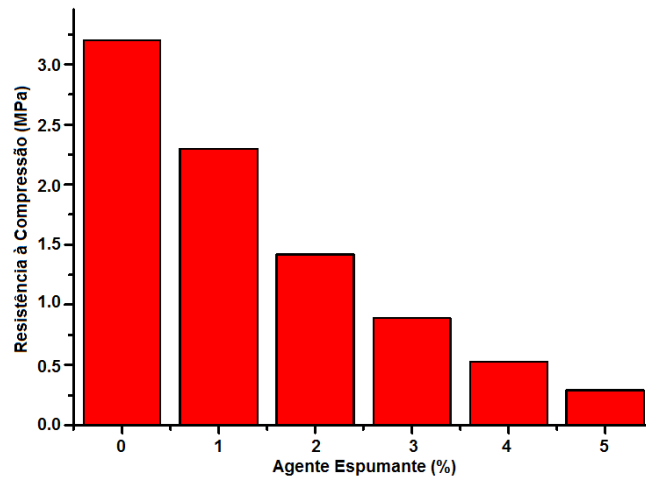
As Figura 25 e Figura 26 mostram a influência do agente espumante na densidade volumétrica, condutividade térmica e resistência à compressão após 7 dias de cura. A Figura 27 mostra a influência do agente espumante na formação dos poros. Através da Figura 25 é possível obter a porosidade (para densidade de 200kg/m³, a porosidade foi de aproximadamente 84,48%).

Figura 25: Efeito do agente espumante na densidade volumétrica e condutividade térmica.



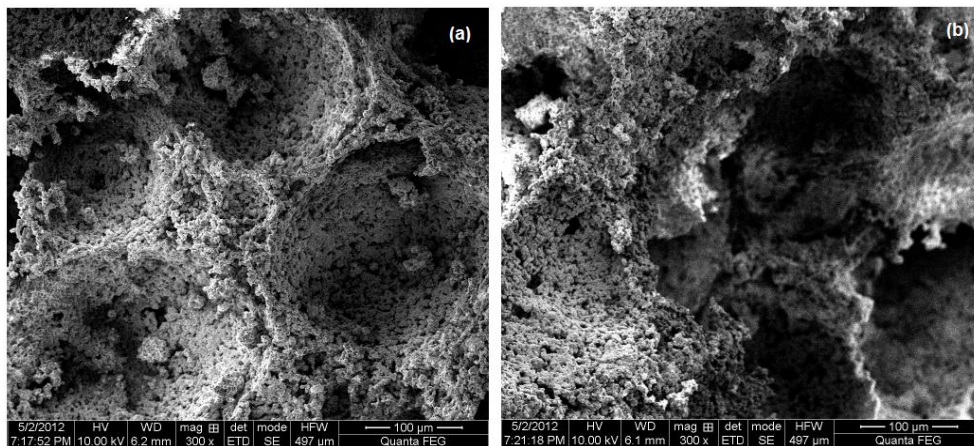
Fonte: Adaptado de Li e Li (2014).

Figura 26: Efeito do agente espumante na resistência à compressão.



Fonte: Adaptado de Li e Li (2014).

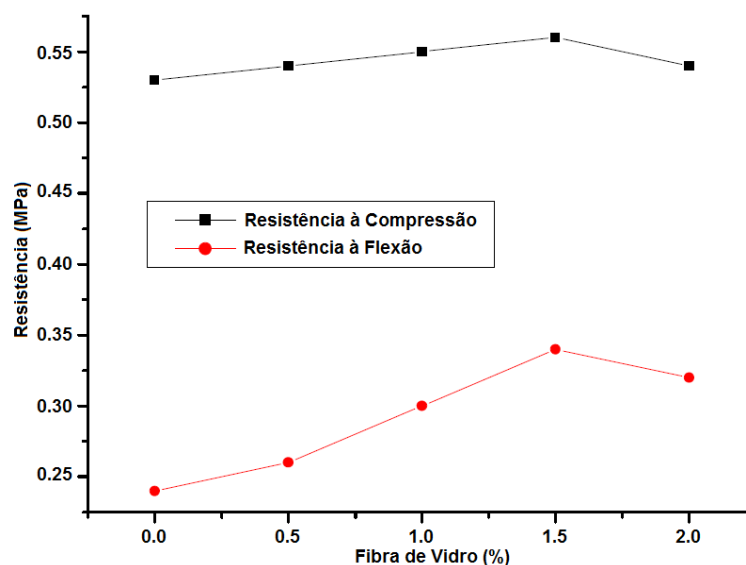
Figura 27: Micro morfologia das amostras com 4% (a) e 5% (b) do agente espumante.



Fonte: Adaptado de Li e Li (2014).

A composição considerada como ótima foi com 4% de agente espumante, sendo esta utilizada para analisar a influência da fibra de vidro. Desta forma, a Figura 28 mostra a influência da fibra de vidro na resistência à compressão e na resistência à flexão.

Figura 28: Influência da fibra de vidro na resistência mecânica da espuma de gesso com 4% de agente espumante.



Fonte: Adaptado de Li e Li (2014).

Desta forma, é possível concluir que: quanto menor a porcentagem do agente espumante é baixa, a parede entre as células dos poros é grossa e com distribuição uniforme, como se pode ver na Figura 27; entretanto, quando a porcentagem do agente espumante é alta, a parede entre as células dos poros é fina e as células são conectadas (quebra da estrutura dos poros – poros abertos), também verificada na Figura 27; e a fibra de vidro obteve melhor efetividade quando se analisa a resistência à flexão, melhorando 41,67% utilizando-se 1,50% de fibra.

Umponpanarat e Wansom (2016) realizaram uma espuma de gesso utilizando gesso beta (β -gesso) com a adição de $Al_2(SO_4)_3$ e $NaHCO_3$ como agentes espumantes. Utilizou, também, ácido cítrico como agente retardador de pega. Os ensaios realizados foram de condutividade térmica, resistência à compressão e tempo de cura.

A preparação da espuma de gesso iniciou-se com a dispersão do gesso em água de torneira em um misturador da marca Hobart, permitindo que a mistura fique de molho por 1 minuto e misturando à velocidade 1 por 2 minutos. Adicionou-se os aditivos formadores de espuma, sendo realizados em 3 tipos de ensaios: $Al_2(SO_4)_3$, $Al_2(SO_4)_3 + CaCO_3$, $Al_2(SO_4)_3 +$ ácido cítrico e $NaHCO_3$. Os corpos de prova permaneceram por 1 dia em uma câmara com 100% de umidade e posteriormente curado a $45^\circ C$ até o peso não sofrer mais alteração.

Na Tabela 27 tem-se a densidade volumétrica, resistência à compressão, condutividade térmica e o tempo de cura do gesso fabricado com diferentes relações de água/gesso.

Tabela 27: Propriedades físicas e mecânicas do gesso fabricado com diferentes relações água/gesso.

Água/gesso	(ρ_v) (kg/m ³)	$\sigma_{c.a}$ (MPa)	k (W/mK)	Tempo de Cura (min)
0,60	1200	11,44	0,498	23
0,70	1100	7,68	0,424	26
0,80	1080	5,74	0,382	32
0,90	940	4,71	0,347	30
1,00	870	3,46	0,313	30

Fonte: Adaptado de Umponpanarat e Wansom (2016).

Na Tabela 28 têm-se a densidade volumétrica, a densidade relativa, a porosidade, a resistência à compressão, a condutividade térmica e o tempo de cura da espuma de gesso fabricada com $Al_2(SO_4)_3$ como agente espumante, com a relação água/gesso de 0,70.

Tabela 28: Propriedades físicas e mecânicas da espuma de gesso fabricada com $Al_2(SO_4)_3$ como agente espumante.

$Al_2(SO_4)_3$ (%)	(ρ_v) (kg/m ³)	(ρ_R)	ϕ (%)	$\sigma_{c.a}$ (MPa)	k (W/mK)	Tempo de Cura (min)
1	1000	0,416	58,40	6,67	0,416	30
2	820	0,338	66,24	2,22	0,298	31
3	860	0,351	64,95	2,34	0,337	29
4	820	0,351	66,92	2,49	0,354	28
5	860	0,343	65,67	2,60	0,316	25
6	790	0,312	68,80	2,65	0,279	19

Fonte: Adaptado de Umponpanarat e Wansom (2016).

A Tabela 29 mostra a densidade volumétrica, resistência à compressão, condutividade térmica e o tempo de cura da espuma de gesso fabricada com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{CaCO}_3$ como agente espumante.

Tabela 29: Propriedades físicas e mecânicas da espuma de gesso fabricada com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{CaCO}_3$ como agente espumante.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (%)	CaCO_3 (%)	Ácido Cítrico	(ρ_v) (kg/m^3)	$\sigma_{c.a}$ (MPa)	k (W/mK)	Tempo de Cura (min)
3	0,4		1020	6,38	0,355	25
5	0,5		730	1,98	0,245	21
7	0,5		780	2,42	0,255	21
9	1,0		810	2,98	0,281	21
11	2,9		780	2,69	0,253	20
13	3,0	0,5	790	2,68	0,259	23
15	3,0	0,7	740	2,40	0,243	23
11*	1,0		640	1,22	0,188	23

Fonte: Adaptado de Umponpanarat e Wansom (2016).

*água/gesso = 1.0 (restante, água/gesso = 0.7)

A Tabela 30 mostra a densidade volumétrica, densidade relativa e porosidade da espuma de gesso fabricada com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{CaCO}_3$ como agente espumante.

Tabela 30: Densidades e porosidade da espuma de gesso fabricada com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ + CaCO_3 como agente espumante.

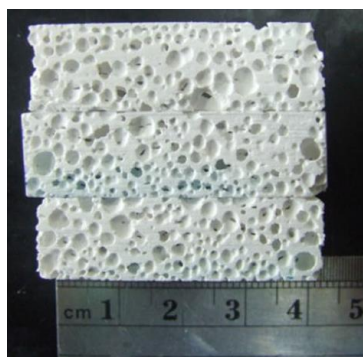
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (%)	CaCO_3 (%)	Ácido Cítrico	(ρ_v) (kg/m^3)	(ρ_R)	ϕ (%)
3	0,4		1020	0,414	58,60
5	0,5		730	0,290	71,01
7	0,5		780	0,303	69,68
9	1,0		810	0,306	69,37
11	2,9		780	0,282	71,78
13	3,0	0,5	790	0,277	72,28
15	3,0	0,7	740	0,253	74,72
11*	1,0		640	0,201	79,89

Fonte: Adaptado de Umponpanarat e Wansom (2016).

*água/gesso = 1.0 (restante, água/gesso = 0.7)

A Figura 29 mostra os poros de 15% de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

Figura 29: Porosidade de 15% de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ + CaCO_3 como agente espumante.



Fonte: Adaptado de Umponpanarat e Wansom (2016).

Na Tabela 31 tem-se a densidade volumétrica, resistência à compressão, condutividade térmica e o tempo de cura da espuma de gesso fabricada com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ + ácido cítrico como agente espumante, com a relação água/gesso de 0,7.

Tabela 31: Propriedades físicas e mecânicas da espuma de gesso fabricada com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ + ácido cítrico como agente espumante.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (%)	Ácido Cítrico	(ρ_v) (kg/m^3)	$\sigma_{c.a}$ (MPa)	k (W/mK)	Tempo de Cura (min)
1,0	0,025	990	5,60	0,408	22
1,5	0,10	870	3,12	0,369	24
2,0	0,60	820	2,12	0,330	23
2,5	0,70	810	2,38	0,313	24
3,0	0,75	810	2,33	0,331	25
4,0	0,90	880	3,69	0,391	22
5,0	1,00	930	4,27	0,404	21
6,0	1,10	980	5,42	0,423	22

Fonte: Adaptado de Umponpanarat e Wansom (2016).

Na Tabela 32 tem-se a densidade volumétrica, densidade relativa e porosidade da espuma de gesso fabricada com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ + ácido cítrico como agente espumante, com a relação água/gesso de 0,7.

Tabela 32: Densidades e porosidade da espuma de gesso fabricada com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ + ácido cítrico como agente espumante.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (%)	Ácido Cítrico	(ρ_v) (kg/m^3)	(ρ_R)	Φ (%)
1,0	0,025	990	0,412	58,83
1,5	0,10	870	0,360	64,03
2,0	0,60	820	0,336	66,44
2,5	0,70	810	0,329	67,06
3,0	0,75	810	0,328	67,24
4,0	0,90	880	0,352	64,84
5,0	1,00	930	0,367	63,27
6,0	1,10	980	0,383	61,75

Fonte: Adaptado de Umponpanarat e Wansom (2016).

A Figura 30 mostra os poros com 2.5% de $Al_2(SO_4)_3$ e 0,70% de ácido cítrico.

Figura 30: Poros para composição de 2.5% de $Al_2(SO_4)_3$ e 0,70% ácido cítrico.



Fonte: Adaptado de Umponpanarat e Wansom (2016).

Na Tabela 33 tem-se a densidade volumétrica, resistência à compressão, condutividade térmica e o tempo de cura da espuma de gesso fabricada com $NaHCO_3$ como agente espumante, com relação água/gesso de 0,70.

Tabela 33: Propriedades físicas e mecânicas da espuma de gesso fabricada com $NaHCO_3$ como agente espumante.

$NaHCO_3$ (%)	(ρ_v) (kg/m^3)	$\sigma_{c.a}$ (MPa)	k (W/mK)	Tempo de Cura (min)
0,50	1030	4,12	0,384	22
0,60	970	2,60	0,333	22
0,80	910	1,74	0,297	24
1,00	870	1,30	0,274	24
1,50	740	0,82	0,244	23,5
2,00	760	0,74	0,225	23
2,50	740	0,72	0,225	22
3,00	750	0,78	0,235	24

Fonte: Adaptado de Umponpanarat e Wansom (2016).

Na Tabela 34 tem-se a densidade volumétrica, densidade relativa e porosidade da espuma de gesso fabricada com NaHCO_3 como agente espumante.

Tabela 34: Densidades e porosidade da espuma de gesso fabricada com NaHCO_3 como agente espumante.

NaHCO_3 (%)	(ρ_V) (kg/m^3)	(ρ_R)	ϕ (%)
0,50	1030	0,431	56,94
0,60	970	0,405	59,49
0,80	910	0,379	62,07
1,00	870	0,362	63,81
1,50	740	0,306	69,37
2,00	760	0,313	68,71
2,50	740	0,303	69,68
3,00	750	0,306	69,43

Fonte: Adaptado de Umponpanarat e Wansom (2016).

A Figura 31 mostra os poros para 3% NaHCO_3 como agente produtor de espuma.

Figura 31: Poros para composição com 3% NaHCO_3 como agente espumante.



Fonte: Adaptado de Umponpanarat e Wansom (2016).

Na Tabela 35 tem-se a comparação da mínima condutividade térmica com os correspondentes valores de resistência à compressão, porosidade e a eficiência da condutividade térmica para cada agente espumante analisado.

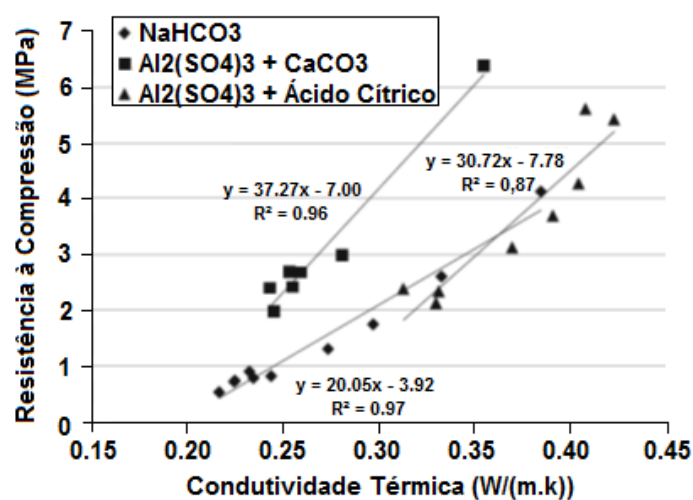
Tabela 35: Mínima condutividade térmica com os correspondentes valores analisados.

Agente Espumante	k (W/mK)	$\sigma_{c.a}$ (MPa)	ϕ (%)	Eficiência (W/mK)/%
$Al_2(SO_4)_3 + CaCO_3$	0,24	2,40	74,72	0,009
$Al_2(SO_4)_3 + \text{ácido cítrico}$	0,31	2,38	67,06	0,060
$NaHCO_3$	0,22	0,72	69,68	0,080

Fonte: Adaptado de Umponpanarat e Wansom (2016).

Na Figura 32 tem-se a comparação da resistência mecânica e da condutividade térmica dos materiais desenvolvidos por Umponpanarat e Wansom (2016), com um tempo de cura de 20 a 25 minutos.

Figura 32: Resistência à compressão e condutividade térmica das espumas de gesso fabricadas com $NaHCO_3$; $Al_2(SO_4)_3 + CaCO_3$; e $Al_2(SO_4)_3 + \text{ácido cítrico}$.



Fonte: Adaptado de Umponpanarat e Wansom (2016).

Desta forma, é possível concluir que: a espuma de gesso com NaHCO_3 forneceu a menor condutividade térmica ($\sim 0,22$ W/mK) e a maior eficiência (maior taxa de redução da condutividade térmica para cada porcentagem de aditivo); também foi o aditivo que melhor preservou a resistência à compressão para cada redução na condutividade térmica, entretanto, sua resistência à compressão (0,72 MPa) é considerada baixa; e $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{CaCO}_3$ alcançou uma menor condutividade térmica (0,24 W/mK) comparando-se com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 +$ ácido cítrico (0,31 W/mK), obtendo a mesma resistência à compressão ($\sim 2,4$ MPa).

Isern e Messing (2016) analisaram os diferentes tipos de surfactantes (produtores de espuma) na espuma de gesso. Os três tipos analisados foram: aniônicos, não iônicos e catiônicos. Desta forma, evidenciou o melhor surfactante em relação à porosidade total e a formação de poros (tamanho e distribuição). Esclareceu, também, como a velocidade e tempo de preparação afeta na porosidade e tamanho dos poros.

O gesso utilizado foi da United States Gypsum Company, de composição química: 99% de sulfato de cálcio hidratado e 1% de cristais de sílica. Os surfactantes foram: aniônico foi o $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}_2$ (dodecilsulfato de sódio), referenciado como SDS (sodium dodecyl sulfate); não iônico $\text{C}_{64}\text{H}_{124}\text{O}_{26}$ (monooleato de sorbitano polioxiétileno), referenciado como P80 (polyoxyethylene sorbitan monooleate); e o catiônico $\text{C}_{27}\text{H}_{42}\text{ClNO}_2$ (cloreto de benzetônio), referenciado como BC (benzethonium chloride).

Foi utilizado de 0,1 a 1,7% de surfactante e água desionizada (água que passou por um processo de remoção dos íons, valendo ressaltar que a água destilada é considerada mais pura). A pasta de espuma de gesso foi misturada por 1 minuto, utilizando relação água/gesso de 0,50; 0,60; 0,70; e 0,80. O processo de mistura foi mecânico, utilizando um misturador elétrico da marca MiTutto, modelo 9090, utilizando uma lâmina de aeração e velocidades de 300 a 1200 RPM.

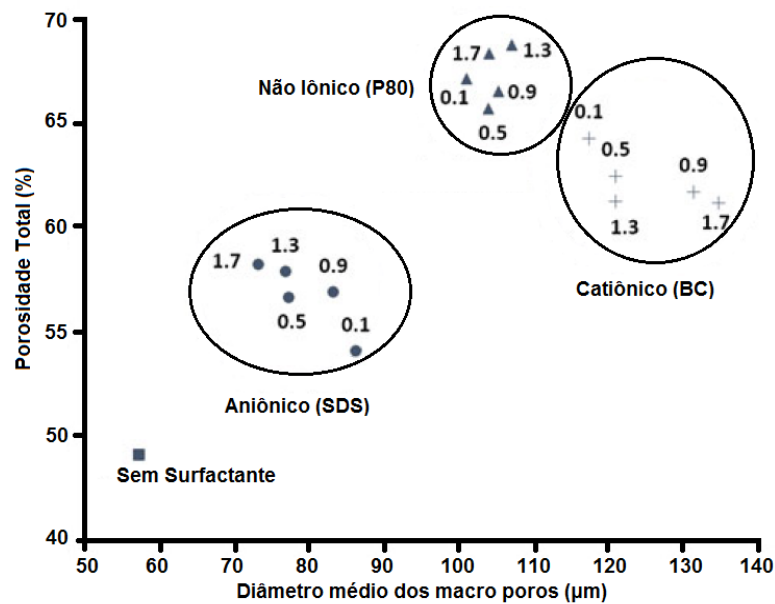
As amostras foram mantidas por 1 hora em uma sala com umidade relativa do ar de 60 a 70%. Posteriormente, foram retiradas e mantidas a temperatura ambiente por três dias para secarem.

Macroestrutura, microestrutura e morfologia dos cristais de gesso foram observadas pela microscopia eletrônica de varredura, depois com um revestimento de carbono ou ouro em uma superfície de fratura da seção transversal da amostra. O tamanho médio dos poros grandes foi determinado medindo o comprimento médio de intercepção de 200 poros e multiplicando o comprimento de intercepção por 1,5.

A densidade aparente foi determinada utilizando 5 amostras nos 3 dias de secagem, analisando desta forma, também, a perda de massa. Foi ressaltado que com 3 dias a massa das amostras não sofreram mais alteração. A porosidade foi calculada assumindo que a densidade do gesso sem espuma é de 2310 kg/m³.

A Figura 33 mostra o efeito dos tipos de surfactantes analisados, assim como sua concentração, na porosidade e diâmetro médio dos macro poros formados. Foi utilizado uma relação água/gesso de 0,60, tempo de mistura de 1 minuto e velocidade de mistura de 1000 rpm.

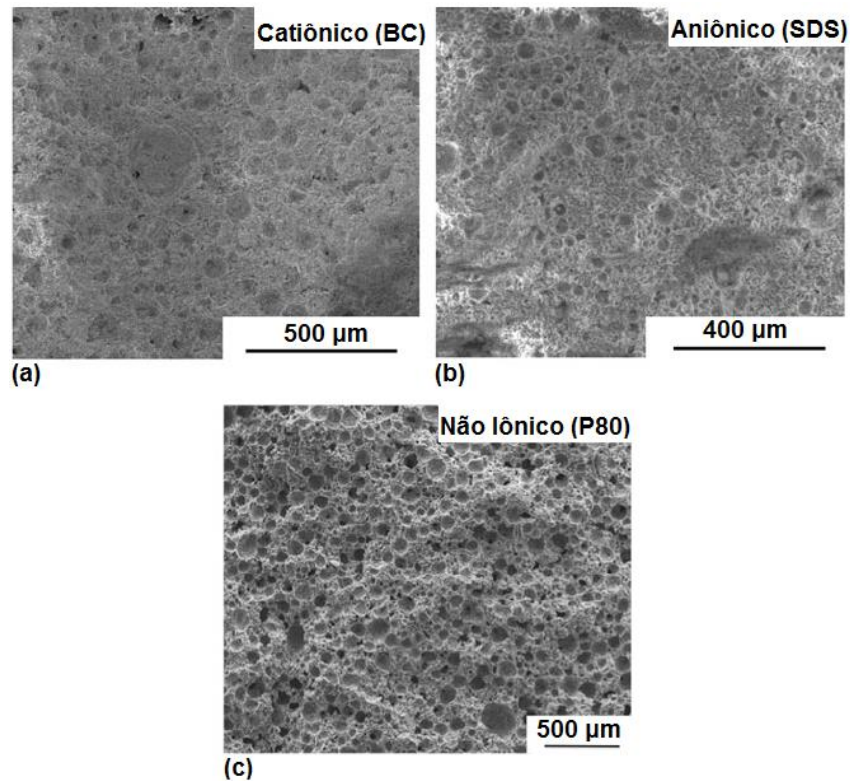
Figura 33: Efeito dos tipos de surfactantes e suas concentrações na porosidade e diâmetro médio dos macroporos.



Fonte: Adaptado de Isern e Messing (2016).

A Figura 34 mostra a macroestrutura dos poros formados com 1,3% dos aditivos espumantes (surfactantes). Foi realizado com uma relação água/gesso de 0,60, tempo de mistura de 1 minuto e com velocidade de mistura de 1000 rpm.

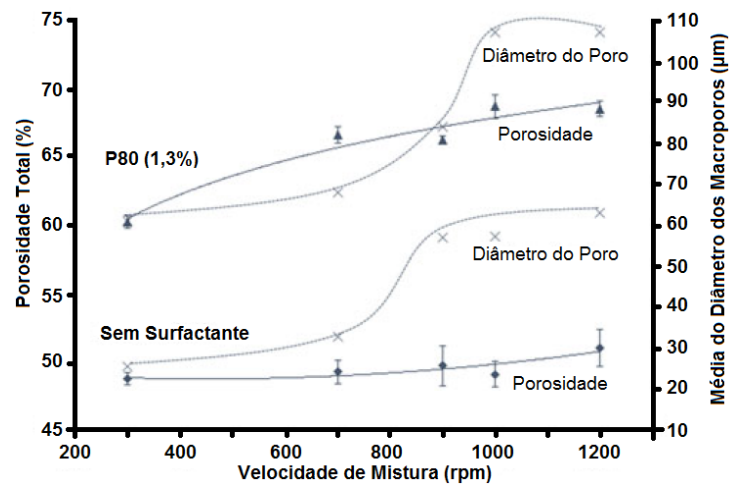
Figura 34: Macroestrutura da espuma de gesso com 1,3% de (a) catiônico (BC), (b) aniônico (SDS) e (c) não iônico (P80).



Fonte: Adaptado de Isern e Messing (2016).

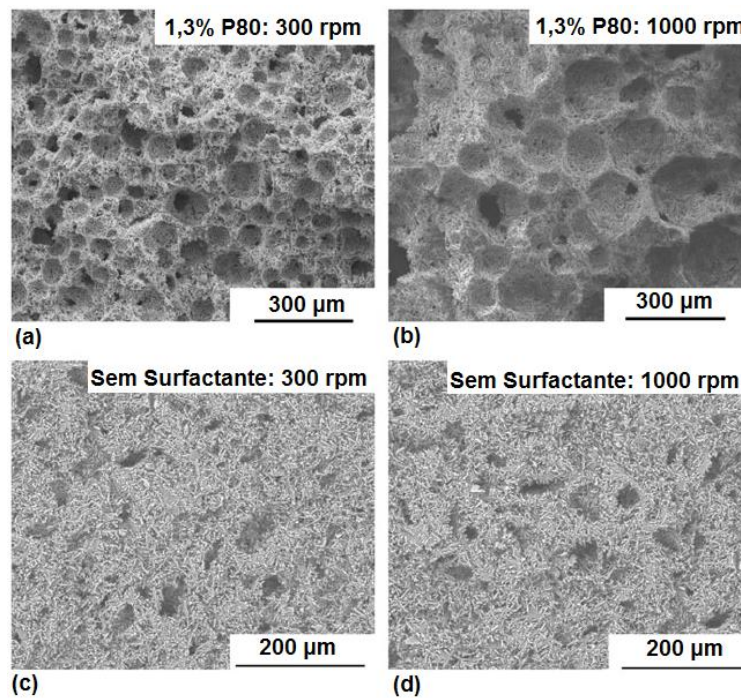
A Figura 35 mostra o efeito da velocidade de preparo na porosidade e no tamanho médio dos macro poros, seguida da Figura 36 mostrando a macroestrutura dos poros formados com velocidade de mistura de 300 e 1000 rpm. A composição utilizada foi a P80 (surfactante não iônico) com 1,3% do aditivo, por ser considerada a melhor espuma de gesso. A relação água/gesso foi de 0,60 com tempo de mistura de 1 minuto.

Figura 35: Efeito da velocidade de preparo na porosidade e no tamanho médio dos macro poros.



Fonte: Adaptado de Isern e Messing (2016).

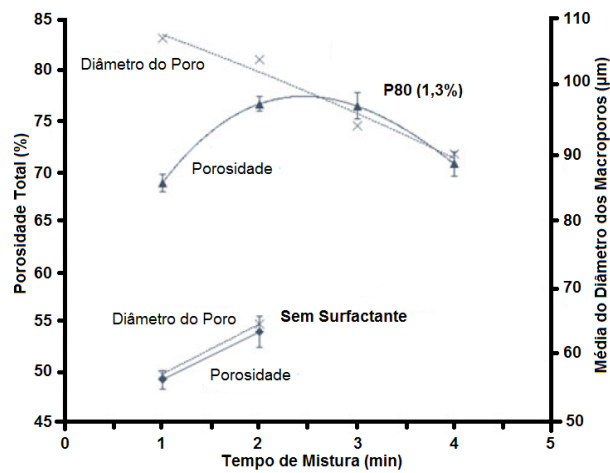
Figura 36: Macroestrutura dos poros formados com velocidade de mistura de 300 e 1000 rpm.



Fonte: Adaptado de Isern e Messing (2016).

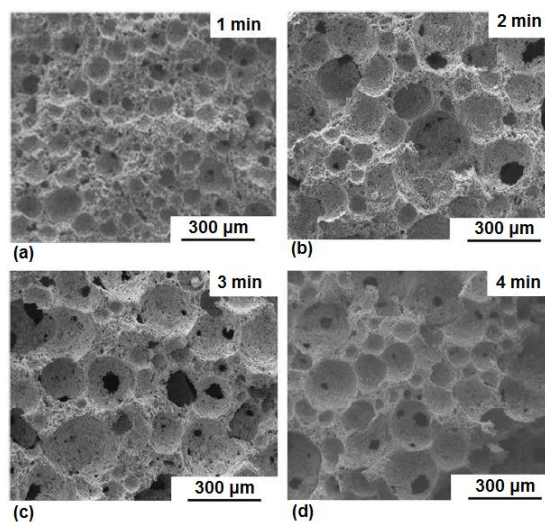
A Figura 37 mostra o efeito do tempo de preparo na porosidade e no tamanho médio dos macro poros, seguida da Figura 38 mostrando a macroestrutura dos poros formados com tempo de mistura de 1, 2, 3 e 4 minutos (somente com 1,3% do surfactante P80). A composição utilizada foi a P80 (surfactante não iônico) com 1,3% do aditivo, por ser considerada a melhor espuma de gesso. A relação água/gesso foi de 0,60 com velocidade de mistura de 1000 rpm.

Figura 37: Efeito do tempo de preparo na porosidade e no tamanho médio dos macros poros.



Fonte: Adaptado de Isern e Messing (2016).

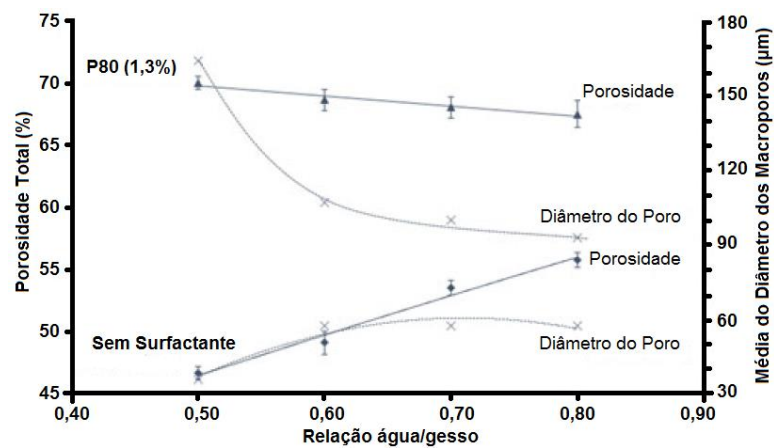
Figura 38: Macroestrutura dos poros formados com tempo de mistura de 1, 2, 3 e 4 minutos.



Fonte: Adaptado de Isern e Messing (2016).

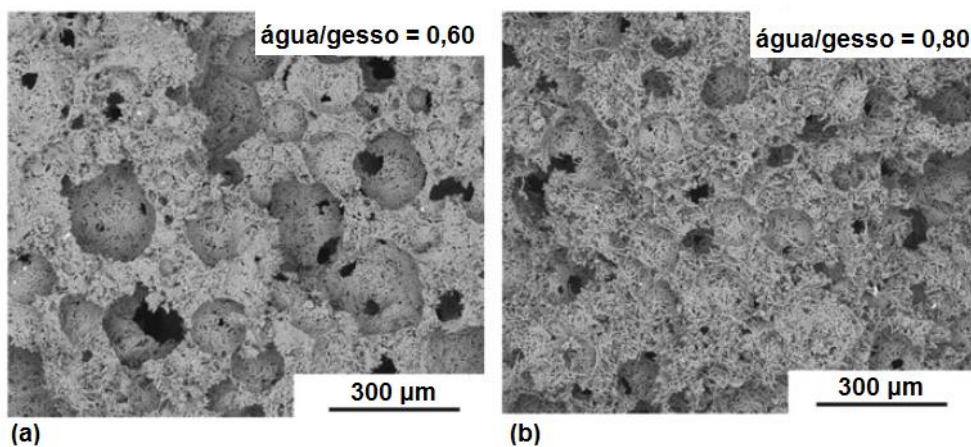
A Figura 39 mostra o efeito da relação água/gesso na porosidade e no tamanho médio dos macro poros, seguida da Figura 40 mostrando a macroestrutura dos poros formados com relação água/gesso de 0,60 e 0,80 (somente com 1,3% do surfactante P80). A composição utilizada foi a P80 (surfactante não iônico) com 1,3% do aditivo, por ser considerada a melhor espuma de gesso, com velocidade de mistura de 1000 rpm.

Figura 39: Efeito da relação água/gesso na porosidade e no tamanho médio dos macro poros.



Fonte: Adaptado de Isern e Messing (2016).

Figura 40: Macroestrutura dos poros formados com relação água/gesso de 0,60 e 0,80.



Fonte: Adaptado de Isern e Messing (2016).

Desta forma, é possível concluir que: o surfactante não iônico (P80) possuiu maior porosidade, chegando a 69% com 1,3% do aditivo espumante e relação água/gesso de 0,60; comparando a microestrutura dos poros para 1,3% de aditivo espumante, o surfactante catiônico e aniônico é composto por uma média de diâmetros dos poros de 120 e 77 μm , respectivamente, enquanto o surfactante não iônico 100 μm ; nota-se uma melhor uniformidade dos poros com o surfactante não iônico (Figura 34); nota-se que a velocidade de mistura tem impacto na fabricação da espuma de gesso, sendo que quanto maior a velocidade utilizada, maior será a porosidade e o diâmetro dos poros (Figura 35 e Figura 36); com a presença do surfactante, o tempo de mistura afeta a porosidade e o tamanho dos poros, sendo que com 2 a 3 minuto a porosidade máxima é atingida (~77%), reduzindo posteriormente quando o tempo de mistura é de 4 minutos; o diâmetro dos poros sofre redução quanto maior for o tempo de mistura (utilizando surfactante); e com o aumento da relação água/gesso, deve uma pequena diminuição na porosidade, de ~70% para ~67%, e uma grande queda no diâmetro dos poros, de ~170 μm para ~90 μm .

2.2 MICRO SÍLICA

A micro sílica é um material, segundo a fabricante Elkem, proveniente de resíduos da indústria de ferro. Antigamente esta era descartada por não saberem suas funções e, após analisarem, foi descoberto sua grande aplicação. Por ser uma esfera pequena (até 100 vezes menor que um grão de cimento), esta preenche melhor os vazios, melhorando assim a resistência mecânica.

Além de ser uma esfera pequena, também é oca. Esta característica foi importante para a pesquisa proposta, sendo que os poros ajudam nas propriedades térmicas e acústicas. Por consequência, com o uso da micro sílica, foi esperado obter uma espuma de gesso de excelentes propriedades mecânicas e térmicas.

A micro sílica utilizada neste trabalho foi a 971U, por ser considerada de alto grau de pureza (maior teor de sílica na composição). A Tabela 36 a seguir mostra a diferença de pureza entre esta micro sílica e a 955. Além da impureza do material, existem dois tipos para cada micro sílica: densificada (D) e não densificada (U). A micro sílica 971U possui densidade de 250 – 350 kg/m^3 , enquanto a 971D 450 – 550 kg/m^3 . A micro sílica 955 U possui densidade de 260 – 380 kg/m^3 , enquanto a 955D 450 – 650 kg/m^3 .

Tabela 36: Análise química das micro sílicas 971 e 955.

Elemento	Micro sílica 971	Micro sílica 955
SiO ₂	98%	95,5%
C	0,7%	1,0%
Fe ₂ O ₃	0,1%	0,3%
Al ₂ O ₃	0,3%	1,0%
CaO	0,3%	0,4%
MgO	0,2%	0,5%
K ₂ O	0,3%	1,0%
Na ₂ O	0,2%	0,4%
H ₂ O	0,5%	1,0%
P ₂ O ₅	0,1%	-
SO ₃	0,3%	-
Cl	0,1%	-

Fonte: Adaptado de Elkem.

2.3 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo fez-se um resumo da revisão bibliográfica, podendo assim tirar conclusões importantes para a pesquisa proposta. Foram pesquisados no total 12 trabalhos considerados importantes para julgar a eficiência da metodologia proposta. Foi notório que muitos desses trabalhos não fornecem resultados importantes para a pesquisa, como a porosidade, condutividade térmica e absorção acústica por exemplo. Dos 12 trabalhos pesquisados, foi possível notar que:

- Todos os trabalhos encontraram a densidade das espumas de gesso fabricadas;
- 10 realizaram ensaio de compressão para determinar a resistência;
- 5 realizaram ensaio de resistência à flexão ou tração;

- 9 realizaram ensaio para obter a porosidade do material, sendo que desses 9 trabalhos, 3 deles (Çolak, 2000; Wang et al., 2014; Li e Li; 2014) não informaram a porosidade, mas foi possível obter através das Equações 2 a 5;
- 7 realizaram ensaio de condutividade térmica;
- 1 realizou ensaio de absorção acústica (250 Hz até 4000 Hz);
- 6 mostraram imagens da macroestrutura dos poros ou gráficos com a distribuição do tamanho dos poros; e
- As relações água/gesso utilizadas foram de 0,39 a 1,07, sendo que a mais utilizada foi de 0,70 a 0,80.

Também foi possível averiguar a escassez de conhecimento sobre o tempo e método ideal da cura do gesso, por não ter um padrão nos processos realizados. Os métodos de cura e tempos de secagem encontrados foram:

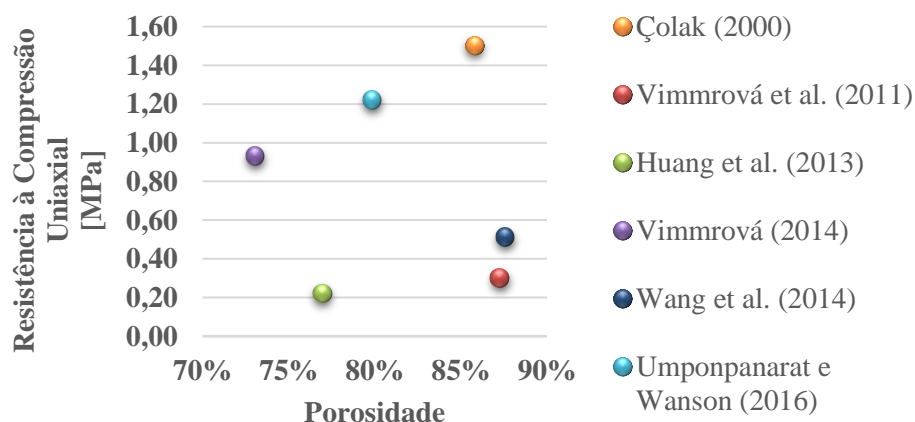
- Manter as amostras de 60 a 80% de umidade relativa do ar e a 22 °C até atingir resistência. Após esse período, mantê-las a 40 °C por 24 horas em uma estufa antes de realizar os ensaios. Este método foi adotado por Çolak (2000);
- Manter as amostras em uma estufa a 50 °C até a massa não sofrer mais alteração antes de realizar os ensaios. Este método foi adotado por Vimmrová et al. (2011) e Vimmrová et al. (2014). Huang et al. (2013) e Wang et al. (2014) também adotaram este método, mas deixaram a 40 °C;
- Manter as amostras em temperatura ambiente e realizar o ensaio com 7 e 28 dias. Este método foi adotado por Khalil et al. (2014);
- Manter as amostras a 40 °C até a massa não sofrer mais alteração e em seguida aumentar a temperatura da estufa para 70 °C por uma hora. Depois, retira-las e colocar em uma sala com temperatura baixa antes de realizar os ensaios. Este método foi adotado por Li e Li (2014);
- Manter as amostras a 100% de umidade relativa do ar por um dia e depois coloca-las em uma estufa a 45 °C até a massa não sofrer mais alteração antes de realizar os ensaios. Este método foi adotado por Umponpanarat e Wansom (2016);
- Manter as amostras de 60 a 70% de umidade relativa do ar por uma hora e depois deixá-las a temperatura ambiente por 3 dias antes de realizar os ensaios. Este método foi adotado por Isern e Messing (2016); e
- Skujans et al. (2007), Brencis et al. (2011) e Preikss et al. (2013) não informaram os processos de cura e secagem realizado.

Os aditivos utilizados para produzir as espumas de gesso foram: pó de mármore (em contato com o ácido sulfúrico gera dióxido de carbono e sendo este o formador de espuma), bicarbonato de amônio, agentes ativos de superfície (laurilsulfato de sódio e nonilfenol etoxilado), sulfato de alumínio, alúmen de potássio, carbonato de cálcio, peróxido de hidrogênio (água oxigenada), pó de alumínio, bicarbonato de sódio, não iônico (monooleato de sorbitano polioxiétileno), catiônico (cloreto de benzetônio) e aniônico (dodecilsulfato de sódio). O espumante utilizado nesta pesquisa (Vinapor GYP 3550) não foi utilizado em nenhum trabalho pesquisado.

A micro sílica foi investigada somente por Vimmrová et al (2011), concluindo que 15% aumentou 0,5 MPa da espuma de gesso produzida. Analisou, também, a influência do cimento, entretanto a micro sílica obteve melhores resultados. Outros autores analisaram a influência da fibra da Cannabis (Brencis et al., 2011; Preikss et al., 2013) ou a fibra de vidro (Li e Li, 2014) para melhorar a resistência mecânica, mas pela micro sílica ser mais efetiva, esta foi a adotada na presente pesquisa.

Como forma de julgar a eficiência da espuma de gesso produzida nesta pesquisa, esta será comparada com as espumas de gesso citadas anteriormente. A Figura 41 a seguir mostra as maiores porosidades obtida com os respectivos valores de resistência à compressão. Quanto maior a porosidade, menor será a resistência à compressão. Entretanto, alguns trabalhos conseguem uma resistência à compressão superior aos outros.

Figura 41: Maiores porosidades obtidas com seus respectivos valores de resistência à compressão.



Fonte: Próprio Autor.

Por final, é possível destacar a originalidade do trabalho proposto, devido a análise completa da espuma de gesso desenvolvida (desde os ensaios das propriedades mecânicas até os ensaios das propriedades físicas). Os aditivos propostos não foram utilizados por nenhum trabalho pesquisado e, devido a estes serem provenientes de fontes naturais, se destacam por não prejudicar o meio ambiente e à saúde. Por final, através da metodologia estatística que nenhuma pesquisa realizou, foi possível extrapolar os valores de micro sílica utilizados e encontrar composições ótimas para cada propriedade.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa tem como fundamento avaliar as propriedades físicas (porosidade, densidade, condutividade térmica e absorção acústica) e mecânicas (resistência à compressão uniaxial, resistência à compressão diametral, resistência à flexão e módulo elástico) da espuma de gesso fabricada com agitação mecânica. Além disso, objetiva a análise da inclusão de micro sílica como forma de melhorar a resistência mecânica, logo melhorando a aplicação deste tipo de material e podendo ser utilizado em forro suspenso, por exemplo.

O desenvolvimento do presente trabalho foi iniciado com ensaios preliminares (planejamento experimental preliminar) para se determinar as melhores frações dos aditivos da composição base a serem utilizados, tempo de cura e a melhor relação água/gesso. Posteriormente (planejamento experimental definitivo) foram investigadas as frações de micro sílica. Em conclusão, foi analisado como essas variações afetam nas propriedades mecânicas e físicas do material desenvolvido com o auxílio de análise estatística.

3.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA ESPUMA DE GESSO

A fabricação da espuma de gesso necessita ser controlada e meticulosa, para que seja possível obter um melhor resultado final. Primeiramente, é realizada a pesagem dos materiais, que serão citados a seguir, colocando-os em recipientes separados e cobrindo com papel alumínio, principalmente o gesso por ser hidrofóbico.

Os materiais utilizados com suas respectivas funções foram:

- Água: foi utilizada água destilada, devido às variações nas propriedades da água comum (não destilada) das regiões brasileiras (a água de São Carlos não é a mesma água de São Paulo, por exemplo). Com a utilização da água destilada, a espuma de gesso produzida nesta pesquisa (na cidade de São Carlos e no laboratório do Alcoa da UFSCar – Universidade Federal de São Carlos) poderá ser replicada em outras regiões do Brasil, conseguindo adquirir resultados próximos dos obtidos nesta pesquisa;
- Ácido Cítrico: fabricado pela SYNTH (Ácido Cítrico Anidro P.A.-A.C.S.), esta matéria prima é a mais utilizada para retardar o tempo de cura do gesso. O aumento da temperatura e o pH da mistura também afeta o tempo de cura, mas não com a efetividade do ácido cítrico (CHINDAPRASERT et al., 2011; COLAK, 2000; VIMMROVA et al., 2011). É importante

ressaltar que a porcentagem utilizada de ácido cítrico é em relação à massa de gesso, e não ao total do material produzido (DENG et al., 2008). A porcentagem não deve ser muito alta pois o material entrará em colapso, ou seja, não cura (UMPONPANARAT; WANSOM, 2016);

- Goma Arábica Senegal 396I: fabricado pela Metachem, é um aditivo ligante natural proveniente da uma árvore, bastante utilizado na fabricação de colas. Sua função é de aumentar a resistência mecânica da peça no manuseio (AKTHAR; EVANS, 2010);

- Lutensol: fabricado pela BASF (Lutensol® AT 50 Pulver), tendo a função de estabilizar suspensões que são feitas com materiais de diferentes densidades. Caso não se utilize este aditivo, tem-se a separação entre as partes e o material não fica homogêneo (os materiais sólidos não se misturam com a espuma) (EL-SUKKARY, 2008);

- Dextrina: é o amido de mandioca, com a função de aumentar a viscosidade do líquido pela hidratação do amido. Após a secagem, este também auxilia na resistência mecânica do material (MITTAL et al., 2016);

- Micro Sílica (MS): foi utilizada a 971U (SiO₂: 98.4 wt-%, H₂O: 0.5, LOI:0.80 wt-%), tendo a função de aumentar a resistência mecânica (AHMADI et al., 2016; WANG et al., 2016). Além disto, diminui a fluidez da mistura e aumenta a demanda de água, devido à alta absorção (GOGTAS et al., 2010). Vale ressaltar que a porcentagem deste aditivo é substituída na porcentagem do gesso, mantendo a relação água/(gesso + micro sílica) desejada;

- Espumante Vinapor GYP 3550: fabricado pela BASF (R+D Vinapor® GYP 3550 – “agente espumante para produção de placas de gesso”), sendo responsável pela criação de poros no material. É recomendada pelo fabricante a utilização de 0,02 a 0,10% deste aditivo em relação à massa de gesso;

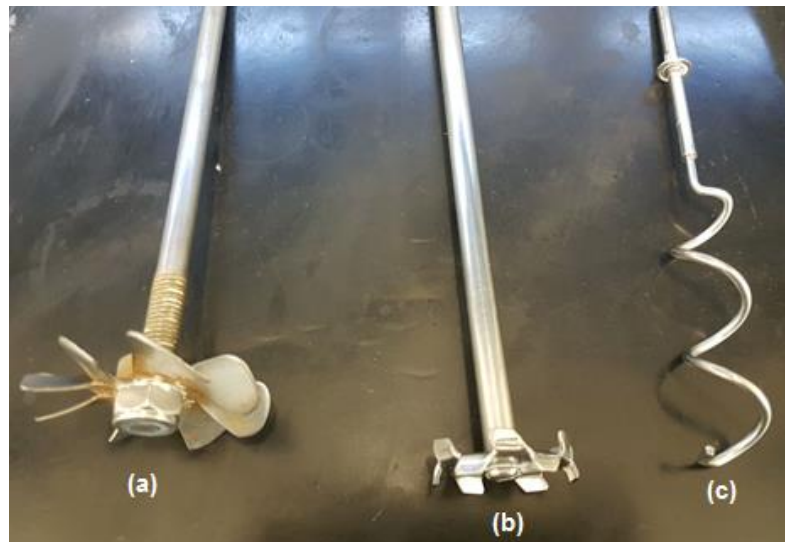
- Hidroxi-propil-metil-celulose (HPMC): fabricado pela DOW (Cellosize® 100 CG FF), tendo como função aumentar a viscosidade média do líquido, diminuir a taxa de drenagem da película e melhorar a estabilidade da espuma (SALVINI et al., 2016); e

- Gesso: fabricado pela Cerâmico Bonito da Calcinadora Gesso Bonito LTDA – Cagel, com sede em Trindade, Pernambuco.

Prosseguindo com o processo de fabricação da espuma de gesso, foram necessários dois recipientes: um para a mistura dos aditivos e o outro para a fabricação da espuma. Importante ressaltar que a espuma, embora seja pouca quantidade, o seu volume gerado é elevado. Para misturar, utilizou-se três tipos de batedores: para misturar os aditivos e

posteriormente a espuma de gesso (Figura 42 a) e os batedores para a realização da espuma (Figura 42 b e Figura 42 c).

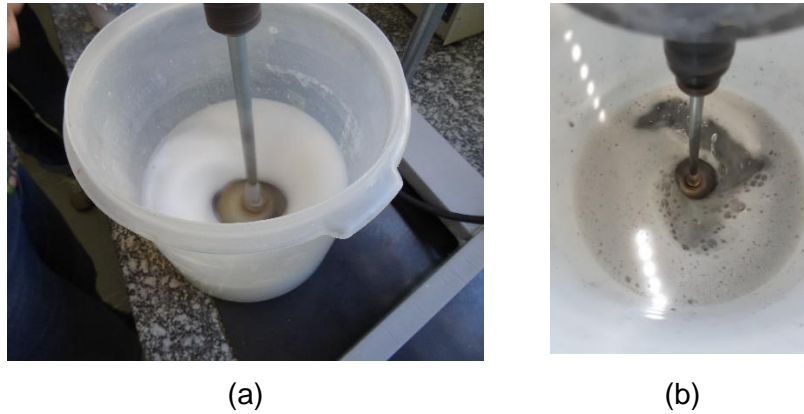
Figura 42: Batedores necessários para realização da espuma de gesso: (a) misturar os aditivos e a espuma de gesso e (b) e (c) fabricação da espuma.



Fonte: Próprio Autor.

Após a pesagem dos materiais e separação dos recipientes, o ácido cítrico é adicionado e dissolvido na água e em seguida a goma arábica, utilizando o batedor dos aditivos (Figura 42 a). Com o ácido cítrico e goma dissolvidos, adiciona-se o lutensol e posteriormente à dextrina. A Figura 43 b a seguir está exibida até a etapa de homogeneização do lutensol. Vale ressaltar que a dextrina é um aditivo de difícil diluição, sendo necessário bater até 5 minutos a mistura. A micro sílica é o último aditivo colocado nesta etapa. Após a adição de micro sílica, realiza-se a fabricação da espuma. É importante não cessar a mistura dos aditivos (Figura 43 b), mantendo a agitação constante e em baixa velocidade. Caso contrário, os aditivos irão segregar no fundo do recipiente. É relevante destacar que todos os aditivos devem ser bem dissolvidos antes de acrescentar o próximo.

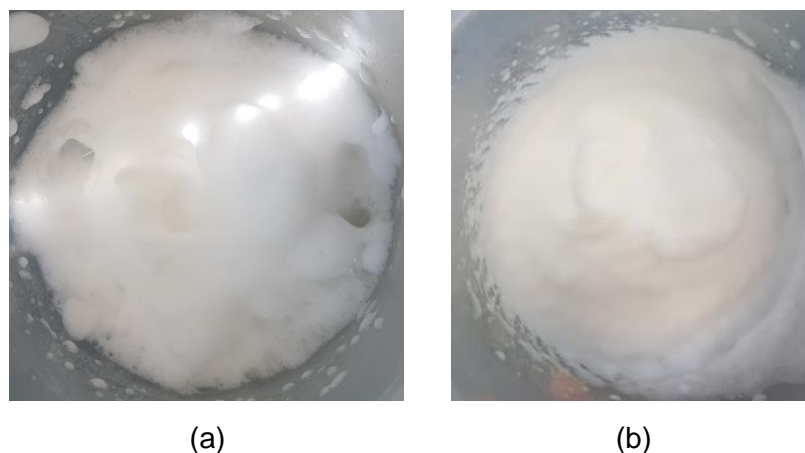
Figura 43: Mistura dos aditivos com agitação constante para não segregar.



Fonte: Próprio Autor.

Na fabricação da espuma, o espumante é colocado no outro recipiente, utilizando o batedor específico para fazer a espuma crescer (Figura 42.b). Uma forma de obter o volume máximo é mexer em todas as direções (movimento circular, para frente e para trás, para os lados e movimento para cima e para baixo), sempre as alternando. Quando o volume da espuma não sofrer mais alteração, foi adicionado o hidróxi-propil-metil-celulose (HPMC). Após a dissolução deste aditivo troca-se o batedor, utilizando o de formato helicoidal (Figura 42.c) para quebrar as bolhas maiores (Figura 44.a) e deixar a espuma firme, consistente e com bolhas menores (Figura 44.b).

Figura 44: Diferença entre as espumas: (a) espuma com bolhas maiores e (b) espuma final com bolhas menores.



Fonte: Próprio Autor.

Para finalizar, a espuma foi adicionada ao recipiente dos aditivos que estavam sendo misturados em uma velocidade baixa para não segregar. Esta etapa necessita de um controle maior, em que se deve mexer em velocidade baixa para evitar que as bolhas da espuma não estourem. Com a mistura homogênea, é acrescentado o HPMC e por último o gesso (Figura 45). Vale evidenciar que esta etapa não se deve demorar em homogeneizar a mistura, pois o gesso possui tempo de pega rápido e ainda possui o processo de moldar os corpos de prova.

Figura 45: Espuma de gesso pronta para moldar.



Fonte: Próprio Autor.

As tabelas a seguir mostram os processos realizados com os devidos tempos de mistura. Importante destacar que as fabricações foram realizadas em temperatura ambiente ($\sim 26^{\circ}\text{C}$) e sem controle de umidade relativa do ar.

Tabela 37: Tempo de mistura e batedor utilizado para a mistura dos aditivos e finalização da espuma de gesso.

Etapa	Aditivo Adicionado	Batedor Utilizado	Tempo de Mistura [min]
1	Água + Ácido Cítrico	Figura 42 a	0,40
2	Goma Arábica	Figura 42 a	1
3	Lutensol	Figura 42 a	2
4	Dextrina	Figura 42 a	5
5	Micro Sílica	Figura 42 a	3
6	Espuma pronta	Figura 42 b	4
7	HPMC	Figura 42 a	0,3
8	Gesso	Figura 42 a	1,5

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 38: Tempo de mistura e batedores utilizados na fabricação da espuma.

Etapa	Aditivo Adicionado	Batedor Utilizado	Tempo de Mistura [min]
1	Espumante	Figura 42 b	4
2	HPMC	Figura 42 b	0,3
3	Apenas troca o batedor	Figura 42 c	2

Fonte: Próprio Autor.

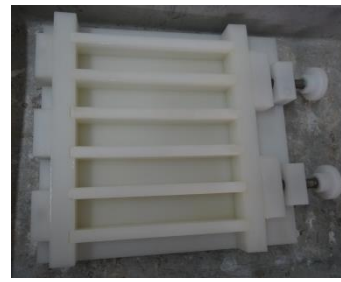
Concluindo, com os moldes necessários para os ensaios que serão realizados, a mistura é moldada. Para que não fiquem alojadas bolhas maiores dentro dos moldes, é necessário batê-los na mesa ou utilizar uma mesa vibratória, para que as bolhas maiores subam para a superfície e sejam eliminadas. Os moldes utilizados neste trabalho foram:

- Para ensaio de compressão uniaxial e diametral: 5 corpos de prova cilíndricos de 50 x 50 mm, feitos de PVC e com cortes na lateral para auxiliar a desmoldagem (Figura 46 a);
- Para ensaio de flexão e módulo elástico: 5 corpos de prova em formato de barras de 25 x 25 x 150 mm (Figura 46 b);
- Para ensaio de absorção acústica: 5 corpos de prova cilíndricos de 40 mm de altura e 100 mm de diâmetro, também feitos de PVC e com cortes na lateral (Figura 46 c); e
- Para ensaio de condutividade térmica: 3 corpos de prova em formato de tijolos de 230 x 114 x 64 mm (Figura 46 d).

Figura 46: Moldes utilizados para a realização dos ensaios.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Próprio Autor.

Os moldes que possuíam cortes na lateral para ajudar no desmolde foi necessário travá-los bem, pois caso o material se expanda no processo de cura, a tensão gerada no corte trinca o material. A Figura 47 mostra um molde que não teve um travamento correto, gerando fissura no material.

Figura 47: Trinca no molde com travamento inadequado.



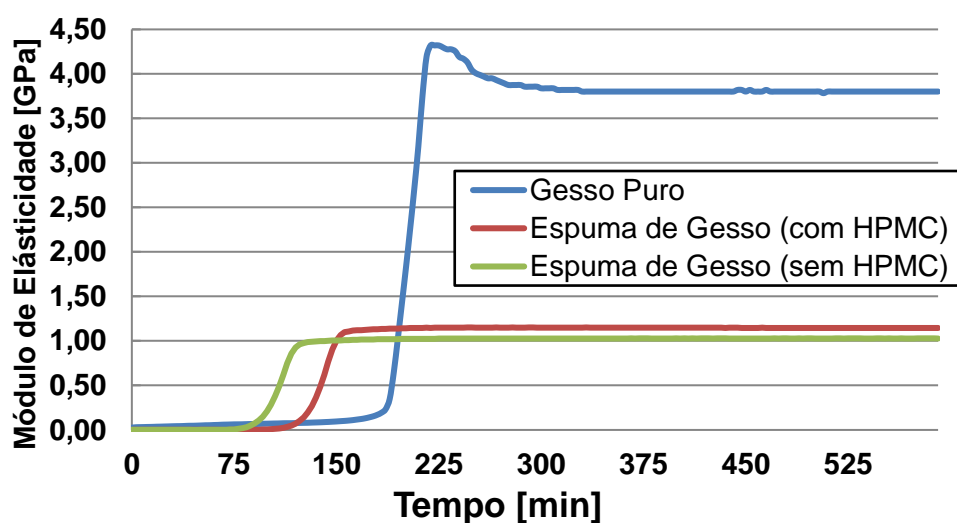
Fonte: Próprio Autor.

Os moldes foram mantidos em uma estufa a 31 °C por 24h antes de serem desmoldados. Após a desmoldagem e antes de realizar os ensaios, foram mantidos na mesma estufa até a massa não sofrer mais alteração para acelerar o processo de secagem, no caso dos preliminares, e mantidas a temperatura ambiente no planejamento experimental definitivo.

O tempo de cura e secagem da espuma de gesso, conforme visto na revisão bibliográfica, possui uma carência em saber exatamente o tempo necessário. Por consequência, realizou-se um ensaio de ultrassom, que será explicado no item 3.2.5, para obter o tempo de cura da espuma de gesso. Além deste ensaio, uma medição dia a dia da massa dos corpos de prova para definir o tempo de secagem e um ensaio de retração foi realizado.

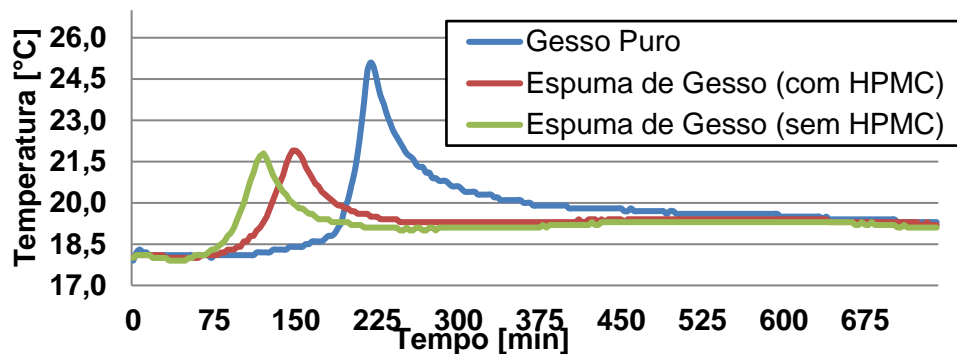
Com os resultados do ultrassom (módulo de elasticidade e temperatura de ensaio), como dito anteriormente, foi possível determinar o tempo de cura do gesso. Quando o módulo de elasticidade atinge o pico máximo, toda reação química já aconteceu e o material sofreu o processo de cura (Figura 48). O mesmo acontece com a temperatura. Como visto na Equação (1), a reação química do gesso é exotérmica (libera calor), ou seja, quando o corpo de prova atinge a temperatura máxima, toda reação química aconteceu e o material foi curado. A partir desse momento, a temperatura começa a cair e estabiliza após um período (Figura 49).

Figura 48: Variação do módulo elástico em função do tempo para determinar o tempo de cura.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 49: Variação da temperatura em função do tempo para determinar o tempo de cura.

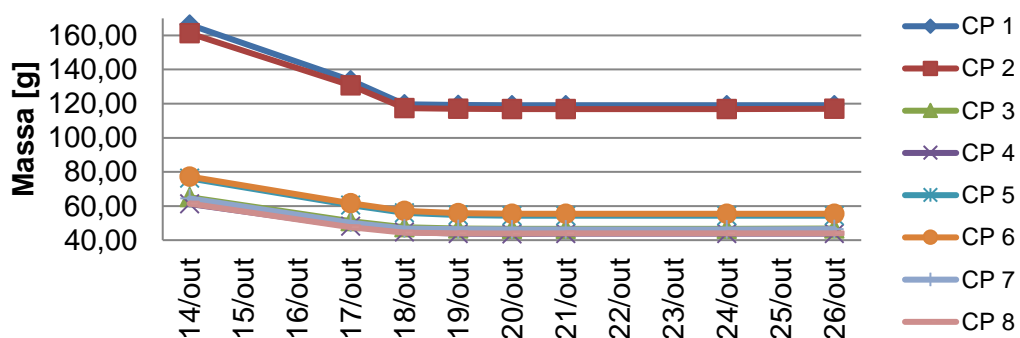


Fonte: Próprio Autor.

Pode-se notar, por meio da Figura 48 e Figura 49, que o tempo de cura para a espuma de gesso é de 150 minutos, levando em consideração a utilização do hidróxi-propil-metil-celulose (HPMC). O gesso sem espuma (gesso puro) possui um tempo de cura de 225 minutos. Vale destacar que esse ensaio foi realizado em temperatura ambiente, podendo concluir que o gesso possui um tempo de cura baixo mesmo em temperatura ambiente, não sendo necessário utilizar a estufa.

O tempo de secagem, que foi definido medindo a massa dos corpos de prova dia a dia para uma relação água/gesso de 0,70, está representado na Figura 50.

Figura 50: Perda de massa.



Fonte: Próprio Autor.

Legenda: CP 1 e CP 2 – gesso puro;

CP 3 e CP 4 – espuma de gesso com HPMC e sem micro sílica;

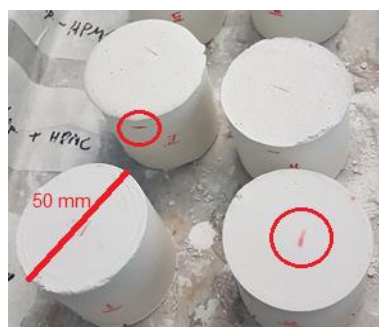
CP 5 e CP 6 – espuma de gesso sem HPMC e sem micro sílica; e

CP 7 e CP 8 – espuma de gesso com HPMC e com micro sílica.

Por intermédio da Figura 50 é possível tirar as seguintes conclusões: o material tem a secagem completa entre 5 e 6 dias; e o gesso puro e a espuma de gesso perderam, através da secagem, 28,50% de sua massa inicial. Lembrando que este ensaio foi realizado também em temperatura ambiente e não em estufa. Vale destacar que, com a secagem do material, este adquire maior resistência mecânica e reduz a porosidade por consequência.

O ensaio de retração, que é necessário medir as dimensões dos corpos de prova (diâmetro e altura) dia a dia, foi realizado marcando o corpo de prova na altura e no diâmetro (Figura 51), para sempre retirar as medidas no mesmo lugar e não ter alteração nas medidas. Concluiu-se que o corpo de prova não sofre expansão ou retração durante a secagem.

Figura 51: Marcação no diâmetro e altura dos corpos de prova.



Fonte: Próprio Autor.

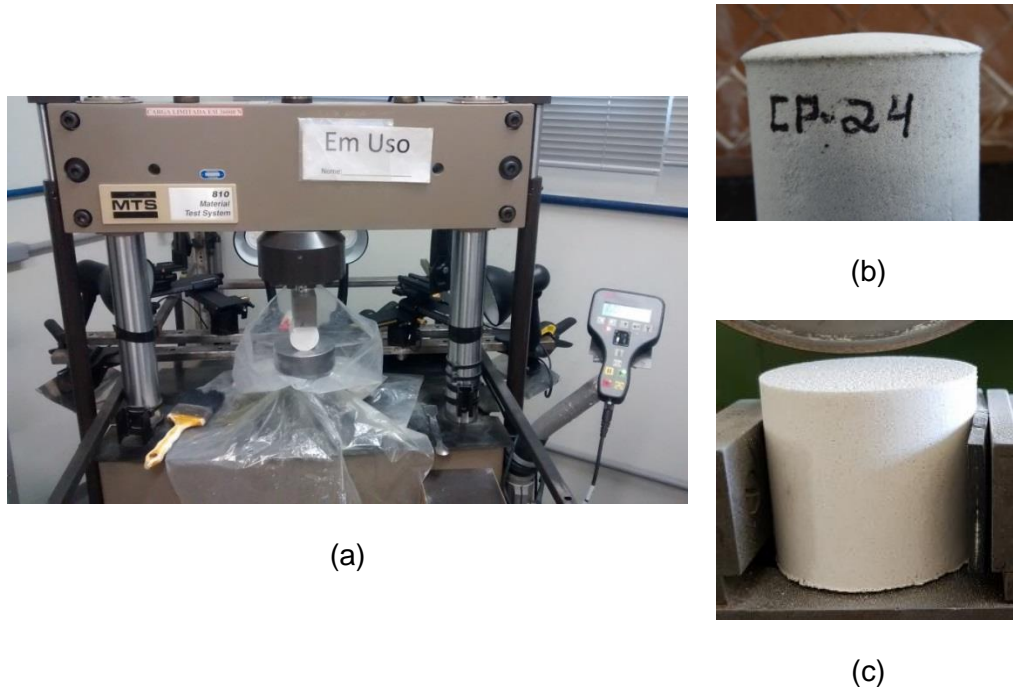
3.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL

A resistência à compressão diametral foi medida de acordo com as premissas da ASTM C496/C496M – 11. De acordo com a norma e para material poroso, as amostras precisam ser cilíndricas com dimensões 51 x 51 mm e com uma taxa de aplicação da tensão no momento do ensaio de 1,034 MPa/min. O equipamento utilizado para medição será a MTS 810 com uma aplicação de carga limite de 36000N, com o dispositivo próprio para ensaio de compressão diametral (Figura 52 a).

Importante explicitar que as amostras após a cura ficam com uma saliência na parte superior, que podem alterar os resultados do ensaio (Figura 52 b). Desta forma, é necessário retificar os corpos de prova para que as duas faces fiquem paralelas (Figura 52 c). Este passo é feito para todos os corpos de prova de todos ensaios realizados.

Figura 52: (a) MTS 810 com dispositivo para ensaio, (b) corpo de prova com saliência na parte superior e (c) corpo de prova retificado.



Fonte: Próprio Autor.

Para calcular a resistência à compressão diametral (corpo de prova rompe à tração), utilizaremos a seguinte equação retirada da ASTM C496/C496M - 11:

$$T = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l \cdot d} \quad (6)$$

Sendo: “P” a força obtida no ensaio em Newton (N);

“l” o comprimento (altura) do corpo de prova em milímetros, pois o ensaio é realizado com este deitado;

“d” o diâmetro do corpo de prova em milímetros; e

“T” a resistência à tração (MPa).

A Figura 53 a seguir mostra o corpo de prova rompido.

Figura 53: Corpo de prova rompido no ensaio de resistência à compressão diametral.

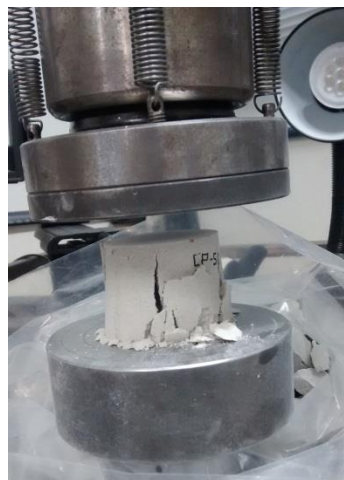


Fonte: Próprio Autor.

3.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

A resistência à compressão uniaxial foi medida de acordo com as premissas da ASTM C133-2008. De acordo com a norma e para material poroso, as amostras precisam ser cilíndricas com dimensões 51 x 51 mm, taxa de aplicação da tensão no momento do ensaio de 3 MPa/min e com um deslocamento controlado de 1,3 mm/min. O equipamento utilizado para medição será o mesmo da compressão diametral, MTS 810 com uma aplicação de carga limite de 36000 N, entretanto com um dispositivo próprio para o ensaio de compressão uniaxial (Figura 54).

Figura 54: Dispositivo da MTS 810 para ensaio de compressão uniaxial e corpo de prova rompido.



Fonte: Próprio Autor.

Para calcular a resistência à compressão uniaxial, utilizaremos a seguinte equação retirada da ASTM C133-2008:

$$S = \frac{W}{A} \quad (7)$$

Sendo: “W” a força obtida no ensaio em Newton (N);

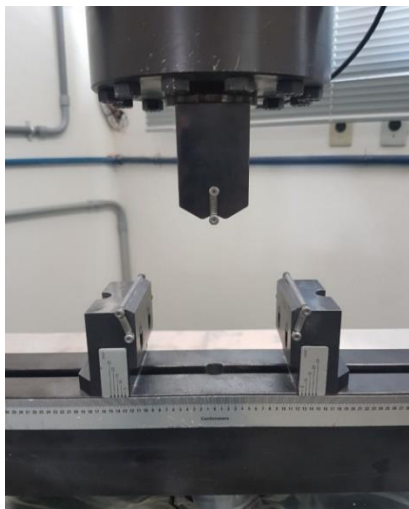
“A” a área de contato entre o dispositivo da máquina e o corpo de prova circular em mm²; e

“S” a resistência à compressão (MPa).

3.2.3 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

A resistência à flexão foi medida de acordo com as premissas da ASTM C1161-13 ou ATSM C133 em 3 pontos. De acordo com a norma e para material poroso, as amostras precisam ser barras com dimensões 25 x 25 x 150 mm, a taxa de aplicação da tensão no momento do ensaio de 3 MPa/min e com um deslocamento controlado de 1,3 mm/min. O equipamento utilizado para medição também será a MTS 810 com uma aplicação de carga limite de 36000 N, mas com o dispositivo ideal para o ensaio de resistência à flexão (Figura 55). Vale lembrar que os corpos de prova precisam ser retificados.

Figura 55: Dispositivo da MTS 810 para ensaio de resistência à flexão.



Fonte: Próprio Autor.

Para calcular a resistência à flexão, utilizaremos a seguinte equação retirada da ASTM C1161-13:

$$S = \frac{3 \cdot P \cdot L}{4 \cdot b \cdot d^2} \quad (8)$$

Sendo: “P” a força obtida no ensaio em Newton (N);

“L” a distância entre os apoios (80 mm);

“b” a base da barra em milímetros;

“d” a altura da barra em milímetros; e

“S” a resistência à flexão.

Embora ambos os ensaios, de compressão diametral e ensaio de flexão, romperem à tração, é necessário fazer os dois ensaios, pois o material é frágil e poroso (material muito complexo - heterogêneo). Conseqüentemente, não é possível afirmar que a resistência à flexão é a mesma que a resistência na compressão diametral do material. Além disto, o gesso é um material muito empregado em placas onde está sujeita à flexão.

A Figura 56 a seguir mostra o corpo de prova rompido.

Figura 56: Corpo de prova rompido no ensaio de resistência à flexão.



(a)



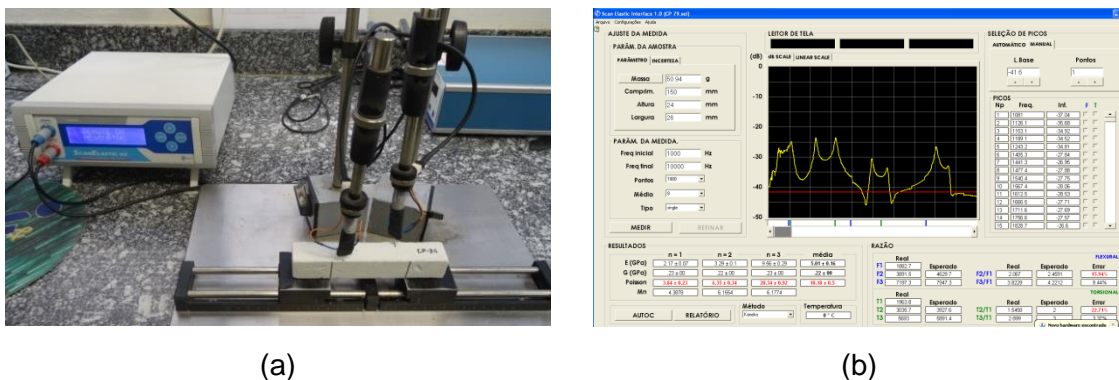
(b)

Fonte: Próprio Autor.

3.2.4 MÓDULO DE ELÁSTICIDADE DINÂMICO

O módulo elástico foi medido de acordo com as premissas da ASTM E1876-07. De acordo com a norma e para material poroso, as amostras precisam ser barras com dimensões 25 x 25 x 150 mm, mesmas dimensões dos corpos de prova para o ensaio de resistência à flexão. O equipamento utilizado para a medição do módulo elástico será o ScanElastic-02 (Figura 57 a) juntamente com o programa ScanElastic Interface 1.0 (Figura 57 b).

Figura 57: (a) Equipamento ScanElastic-02 e (b) programa ScanElastic Interface 1.0.

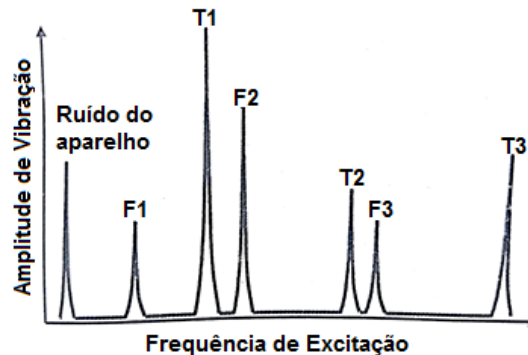


Fonte: Próprio Autor.

O princípio deste método, de varredura de frequência, consiste no estímulo do corpo de prova com frequência variável e na busca das frequências de ressonância de vibração dessa amostra. Por meio de relações matemáticas, determina-se o módulo elástico a partir das frequências de ressonância. Os apoios ficam a 3,7 centímetros (0,247 d comprimento da barra) da extremidade e o detector e excitador, a 4,8 centímetros (0,38 do comprimento da barra). O resultado, como se pode observar na Figura 57 b, é obtido através da configuração correta dos picos flexurais (F) e torcionais (T).

A Figura 58 a seguir mostra a configuração ideal para obter um resultado correto. Ocorre sempre desta maneira, primeiro com um ruído intenso e estreito característico do aparelho, seguido pelo primeiro flexural (F1). Depois, próximo ao dobro da frequência de F1, aparece o primeiro torcional (T1) acompanhado de perto pelo segundo flexural (F2). Tem-se um espaço relativamente grande e aparecem o segundo torcional (T2) e o terceiro flexural (F3), novamente próximos. Por final, após mais um espaço grande, o terceiro torcional (T3). Após esta configuração, o programa exibe o Módulo de Elasticidade do material.

Figura 58: Posicionamento característico dos picos flexurais e torcionais.



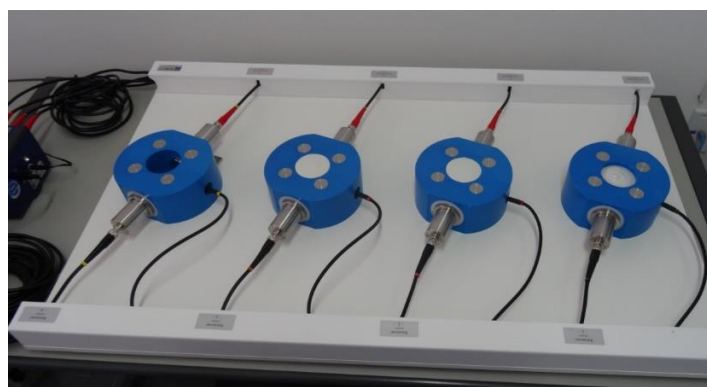
Fonte: Próprio Autor.

Os picos flexurais e torcionais no gesso poroso não ficam muito evidentes, como pode ser visto na Figura 57 b. Isto ocorre pois o material é poroso, de densidade extremamente baixa.

3.2.5 ULTRASSOM (MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E VARIAÇÃO DA TEMPERATURA)

Este método consta em emitir ondas através do material e, através dessas ondas e da velocidade com que se propaga, é possível calcular o módulo elástico dinâmico do material. Além de obter o módulo de elasticidade dinâmico, este ensaio mede outra propriedade relevante para a pesquisa, que é a variação da temperatura ao longo do ensaio. Desta forma, é possível analisar o tempo de pega do gesso com o módulo de elástico dinâmico e com a variação da temperatura do corpo de prova. O programa utilizado foi o Ultra Test Lab IP-8 V3, necessário para ler e gravar os dados obtidos do ensaio.

Figura 59: Ensaio de Ultrassom.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 60 é possível visualizar as propriedades que são extraídas dos ensaios. Este programa emite os dados em formato de Excel (.xls), exceto pelo módulo de elasticidade dinâmico que foi acrescentado com a Equação (9) mostrada a seguir.

Figura 60: Dados extraídos do ensaio de ultrassom.

	A	B	C	D	E	G	H	I
1	Fullname:	C:\Users\UltraTest\UltraTest-measurements\Vania\Gesso puro.lvm						
2	File:	Gesso puro						
3	Date:	5/26/2016	Channel:		1,0	Intervall [min]		
4	Time:	6:23 AM	Distance [mm]		40,0	Offset [µs]		
5	Sample:	Gesso puro						
	Text:	Agua + Gesso sem espuma						
6								
7	User:	Vania						
8								
9	Nr.	Minute	m/s	°C	Curvature	Módulo Elástico	runtime [µs]	
10	1	0,0	156,8	17,9	0,0	0,026	255,1	
11	2	3,0	169,7	18,2	0,0	0,030	235,7	
12	3	6,0	173,0	18,3	0,0	0,031	231,2	
13	4	9,0	176,0	18,2	0,0	0,032	227,3	
14	5	12,0	179,1	18,2	0,0	0,034	223,4	
15	6	15,0	181,1	18,1	0,0	0,034	220,9	
16	7	18,0	185,6	18,1	0,0	0,036	215,5	
17	8	21,0	188,6	18,1	0,0	0,037	212,1	
18	9	24,0	191,7	18,1	0,0	0,039	208,7	
19	10	27,0	195,2	18,1	0,0	0,040	204,9	
20	11	30,0	198,4	18,1	0,0	0,041	201,7	
21	12	33,0	201,2	18,1	0,0	0,042	198,8	
22	13	36,0	202,5	18,1	0,0	0,043	197,5	

Fonte: Próprio Autor.

Por intermédio da equação a seguir, é possível obter o módulo elástico dinâmico no decorrer do ensaio em função da velocidade que a onda se propaga no material.

$$E_d = \frac{1047,854 \cdot V^2}{10^9} \quad (9)$$

Sendo: E_d o módulo de elasticidade dinâmico em GPa; e

V a velocidade de propagação das ondas em metro por segundo.

3.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

3.3.1 ABSORÇÃO ACÚSTICA

A absorção acústica foi medida de acordo com as premissas da ISO 10534-2, utilizando a técnica de tubo de impedância (Figura 61). Os corpos de prova para este tipo de ensaio são cilíndricos, com duas polegadas de diâmetro e altura de 40 milímetros.

Figura 61: Tudo de impedância para cálculo da absorção acústica.



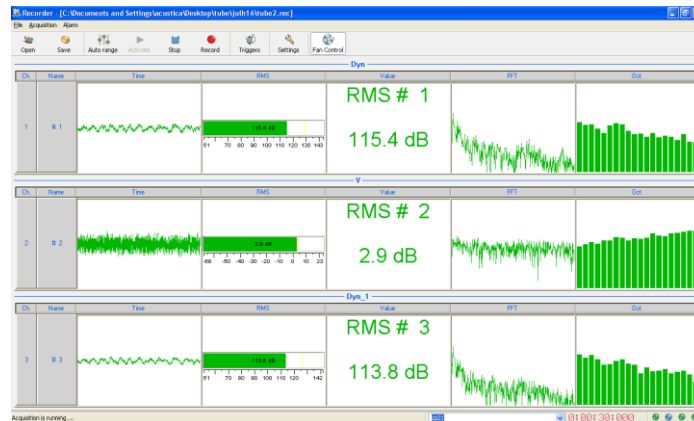
Fonte: Próprio Autor.

Este método consiste em considerar a propagação somente de ondas planas e a incidência se dá segundo a direção normal. Quando uma onda sonora incide em um material, parte da energia é absorvida, parte é refletida e parte é transmitida. A amostra, que deve ser rígida para impedir o mínimo possível de absorção e transmissão pelas suas paredes, é colocada na extremidade do tubo de impedância (MAFRA, 2004).

Este método consiste em excitar o tubo com um ruído branco de banda larga e medir a pressão sonora no seu interior em duas posições distintas. Os sinais obtidos são processados no analisador e a função transferência entre eles é calculada. A partir desta função transferência, pode-se calcular o coeficiente de reflexão e a impedância normal de superfície. Por final, chega-se no coeficiente de absorção do material através do coeficiente de reflexão (MAFRA, 2004). As fórmulas necessárias para encontrar o coeficiente de absorção do material podem ser verificadas na dissertação de Mafra (2004).

Pode-se utilizar 1 ou 2 microfones para a realização das medidas. Neste trabalho foi utilizado a medição com 1 microfone e, para obter as medidas, um sistema de aquisição de 4 canais (Orquestra) juntamente com um software específico para processamento de sinais acústicos (dBFA) e um software que grava os sinais recebidos pelos microfones (Figura 62). Entretanto, através da Figura 61, pode-se notar a utilização de 2 microfones. Na realidade, foi realizada 2 medidas de 1 microfone de cada vez, podendo fazer uma média dessas duas medidas e, desta maneira, reduzindo bastante o ruído.

Figura 62: Software para processamento de sinais acústicos.



Fonte: Próprio Autor.

Os equipamentos utilizados foram: fonte que emite ruído branco de banda larga, tubo de impedância e os microfones. Os softwares utilizados foram: gravador para gravar os sinais dos microfones e dBFA (software para processamento de sinais acústicos).

Entretanto, com este método é possível obter o coeficiente de absorção acústica somente até 2000 Hz, sendo necessário até 4000 Hz para fazer uma análise completa do material desenvolvido. Desta forma, foi necessário utilizar o modelo de Biot-Allard para extrapolar a curva de absorção acústica até a frequência desejada de 4000 Hz. Os parâmetros necessários para utilização deste modelo serão explicados posteriormente no item Predição Acústica, e obtidos através da microtomografia do material com auxílio dos softwares CTan e CTvol.

3.3.2 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica foi medida de acordo com as premissas da ISO 8894-1:2010. De acordo com a norma, as amostras precisam ser tijolos de dimensões 230 x 114 x 64 mm. O equipamento utilizado para medição foi o Tester 426 (Figura 63), operando pelo método do fio quente com taxa de aquecimento de 2k/min, potência do fio quente de 1W. Foi realizado 5 medidas por temperatura com tempo de medida por ponto de 600 segundos.

Figura 63: Equipamento do ensaio de condutividade térmica.



Fonte: Próprio Autor.

3.3.3 POROSIDADE

Para o cálculo da porosidade do material, foi utilizado o método de Arquimedes. O ensaio consiste em medir a massa seca (P_a), úmida (P_u) e imersa (P_i) de uma amostra da composição que deseja medir a porosidade, não importando suas dimensões (Figura 64). Para a massa imersa e úmida, utiliza-se querosene para que não haja dissolução do gesso.

Figura 64: Amostras para ensaio de porosidade (Método de Arquimedes).



Fonte: Próprio Autor.

Desta forma, as amostras são colocadas em um recipiente com querosene até cobrir o dobro da altura das amostras, pois o material é poroso e a quantidade de querosene que será absorvida por eles é alta. Após isto, coloca-se o recipiente por 1h30min em um equipamento a vácuo que, no nosso ensaio, chegou à -680 mm Hg (Figura 65), para que o querosene preencha os poros completamente. Sendo esta é a massa úmida.

Após retirar as amostras do vácuo e medir sua massa úmida, estas são colocadas no recipiente que fica abaixo da balança. Este recipiente está cheio de querosene e possui uma peneira, onde devem ser colocadas as amostras para medir a massa imersa.

Figura 65: Ensaio para obtenção da porosidade - Método de Arquimedes.



Fonte: Próprio Autor.

Dessa maneira, a porosidade (ϕ) pode ser obtida através da densidade relativa (DR) ou diretamente pela Equação (12).

$$\phi = (1 - DR) \cdot 100 \quad (10)$$

$$DR = \frac{P_a - P_i}{P_u - P_i} \quad (11)$$

$$\phi = \frac{P_u - P_a}{P_u - P_i} \quad (12)$$

3.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PRELIMINAR

Será utilizada uma composição base retirada de Salvini et al. (2006). Com esta composição base, utilizada para material cerâmico, foi realizado testes preliminares para definir as porcentagens ideais dos aditivos. A composição base é composta por: lutensol, dextrina, goma arábica, HPMC, ácido cítrico e o espumante. Na Tabela 39 são apresentadas as composições que obtiveram sucesso nos ensaios feitos, ou seja, foi possível desmoldar os corpos de prova e processar os ensaios desejados. Já na Tabela 40 exibe as composições que falharam, ou seja, não foi possível desmoldar os corpos de prova.

Para ajudar a identificação de cada composição na apresentação dos resultados, as composições realizadas a seguir serão escritas como: AG.80 H.P MS.A (Composição A), AG.70 H.P MS.A (Composição A'), AG.80 H.A MS.A (Composição B), AG.70 H.A MS.A (Composição B') e AG.70 H.P MS.P (Composição C). As nomenclaturas seguem a seguinte premissa: primeiro a relação água/gesso (AG), seguido da presença (P) ou ausência (A) do HPMC (H) e, por final, a presença ou ausência da micro sílica (MS).

Tabela 39: Composição (COMP.) base e composições dos testes preliminares que obtiveram sucesso na fabricação.

	COMP. BASE	COMP. A	COMP. A'	COMP. B	COMP. B'	COMP. C
Relação Água/Gesso:	2,08	0,80	0,70	0,80	0,70	0,70
Gesso:	%-p	%-p	%-p	%-p	%-p	%-p
Água	60,42	41,63	38,57	41,68	38,62	38,62
Gesso	30,21	52,03	55,09	52,08	55,14	54,64
Micro Sílica	-	-	-	-	-	0,50
Lutensol	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Dextrina	3,02	3,02	3,02	3,02	3,02	3,02
Goma Arábica	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
HPMC	0,10	0,10	0,10	-	-	0,10
TOTAL:	97,38	97,38	97,38	97,38	97,38	97,48
Espuma:						
Água	2,445	2,445	2,445	2,445	2,445	2,445
Espumante	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
HPMC	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
TOTAL:	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62
Ácido Cítrico:	-	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 40: Composições que falharam.

	COMP.	COMP.	COMP.
	1	2	3
Relação Água/Gesso:	0,81	0,80	0,76
Gesso:	%-p	%-p	%-p
Água	42,33	41,90	41,07
Gesso	52,56	52,13	53,81
Micro Sílica	-	-	-
Lutensol	0,09	0,09	0,09
Dextrina	0,13	0,98	0,13
Goma Arábica	0,13	0,13	0,13
HPMC	-	-	-
Espuma:			
Água	2,07	2,07	2,07
Rheocell	0,14	0,14	0,14
HPMC	0,01	0,01	0,01
Ácido Cítrico:	0,05	0,05	0,05

Fonte: Próprio Autor.

A diferença entre a relação água/gesso da composição base para as outras composições é devida ao fato da composição base ter sido realizada com material cerâmico e não gesso. Conseqüentemente, a relação água/gesso foi reduzida para poder utilizar o gesso (0,70 e 0,80), seguindo o padrão da revisão bibliográfica realizada (ÇOLAK, 2000; HUANG ET AL., 2013; UMPONPANARAT; WANSOM, 2016).

Nas composições preliminares, objetivou reduzir as porcentagens dos aditivos, começando com a dextrina e goma arábica (por esses aditivos terem funções semelhantes). Após a redução, aumentou-se a quantidade de gesso para que o material ficasse mais denso e, conseqüentemente, de melhor resistência. Entretanto, pode-se notar pela Figura 66 que não foi possível reduzir as porcentagens da composição base de dextrina e goma arábica mesmo com acréscimo de gesso, pois não foi possível desmoldar os corpos de prova.

Figura 66: Composições que falharam.



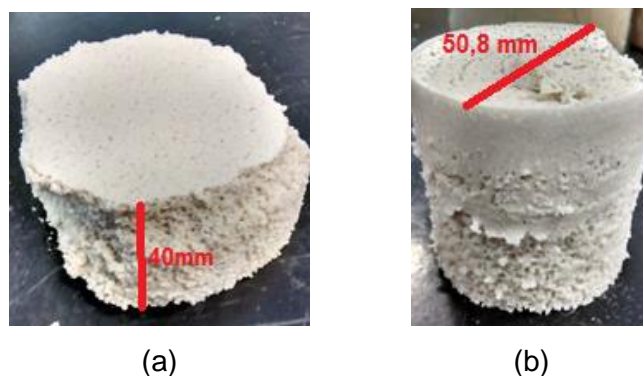
Fonte: Próprio Autor.

Foi realizada, também, a exclusão do hidróxi-propil-metil-celulose (HPMC). Concluiu-se que o HPMC não afeta significativamente nas propriedades mecânicas da espuma de gesso, afetando somente na absorção acústica (sendo mais efetivo em frequência abaixo de 1000 Hz e não afetando em frequências superiores a este valor).

Uma composição com micro sílica (composição C) foi fabricada, uma vez que seria feita somente na etapa final. Foi necessária a fabricação para investigar o efeito deste material na absorção acústica e averiguar como este material se comporta na resistência mecânica. A porcentagem de micro sílica substitui no gesso, para manter a relação água/gesso de 0,80, ou seja, relação água/(gesso + micro sílica) de 0,80.

E por final foi analisado o efeito do ácido cítrico no tempo de pega do gesso, lembrando que a porcentagem deste aditivo é em relação à massa de gesso. Foram adotados 0,192%, sendo que as referências pesquisadas utilizaram uma porcentagem deste aditivo retardante muito superior a este. Entretanto, a amostra entrou em colapso e não curou, como pode ser visto na Figura 67.

Figura 67: Corpos de prova com 0,19% de ácido cítrico.



Fonte: Próprio Autor.

3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DEFINITIVO

Finalmente foi avaliada a porcentagem de micro sílica, objetivando melhoras nas propriedades mecânicas deste material. As porcentagens de micro sílica foram de 2,0%; 3,5%; e 5,0%, assim como a composição sem micro sílica. Este valor foi baseado na literatura pesquisada, sendo que uma porcentagem de 5% obteve um acréscimo de ~10% na resistência à compressão. Vale relembrar que a porcentagem de micro sílica entra na porcentagem do gesso (relação água/(gesso + micro sílica)).

A relação água/gesso será mantida a mesma, devido à relação de 0,80 ser mais efetiva na absorção acústica e condutividade térmica por conter mais água e deixar o material mais poroso. Vale ressaltar que as porcentagens dos aditivos base (lutensol, dextrina, goma arábica, HPMC, ácido cítrico e o espumante) foram os mesmo para todas as composições, variando somente a porcentagem de micro sílica. A Tabela 41 mostra os tratamentos que foram realizados.

Tabela 41: Composições experimentais definitivas.

	COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3	COMP. 4	COMP. 5
Gesso:	%-p	%-p	%-p	%-p	%-p
Água	44,45	41,64	41,64	41,64	41,64
Gesso	55,55	52,03	50,03	48,53	47,03
Micro Sílica	-	-	2,00	3,50	5,00
Lutensol	-	0,10	0,10	0,10	0,10
Dextrina	-	3,02	3,02	3,02	3,02
Goma Arábica	-	0,50	0,50	0,50	0,50
HPMC	-	0,10	0,10	0,10	0,10
TOTAL:	100,00	97,39	97,39	97,39	97,39
Espuma:					
GYP 3550	-	2,60	2,60	2,60	2,60
HPMC	-	0,006	0,006	0,006	0,006
TOTAL:	-	2,61	2,61	2,61	2,61
Ácido Cítrico:	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Fonte: Próprio Autor.

Foram utilizados 5 corpos de prova por ensaio, exceto para a condutividade térmica que foram 3, ou seja, 23 corpos de prova por composição e 115 no total. A quantidade de corpos de prova foi definida de acordo com as premissas das normas. Os ensaios realizados,

como dito anteriormente, foram: resistência à compressão uniaxial, resistência à compressão diametral (tração), flexão, módulo elástico, absorção acústica, condutividade térmica, densidade e porosidade. Apesar de que obteve 8 propriedades diferentes, os mesmos corpos de provas utilizados para determinar o módulo elástico são reaproveitados para realizar o ensaio à flexão, devido ao ensaio de módulo elástico ser não-destrutivo. A porosidade pode ser obtida com os pedaços remanescentes dos ensaios, por não precisar de amostras com dimensões conhecidas. A densidade pode ser retirada de qualquer amostra, sem qualquer comprometimento no corpo de prova também.

A Figura 68 a seguir ilustra os corpos de prova das composições realizadas. Nota-se a diferença de cor entre as composições, sendo que quanto maior a porcentagem de micro sílica, mais escura esta é.

Figura 68: Corpos de prova produzidos (a) e diferença de cor entre eles (b).



Fonte: Próprio Autor.

Legenda: 1 – Gesso puro;
 2 – Sem micro sílica;
 3 – 2% de micro sílica;
 4 – 3,5% de micro sílica; e
 5 – 5% de micro sílica.

Foi notória a dificuldade de se homogeneizar as composições com micro sílica, principalmente quando sua porcentagem era mais alta (3,5% e 5%). A Figura 69 a seguir mostra detalhadamente uma composição com 3,5% de micro sílica, ficando notórios os grãos de gesso que não se misturaram.

Figura 69: Não homogeneização da composição com 3,5% de micro sílica.



Fonte: Próprio Autor.

Para o processo de cura e secagem, o material foi mantido em estufa a 30 °C por 24 horas até o desmolde. Após desmoldar, foi mantido em temperatura ambiente até a secagem completa antes do ensaio em uma sala fechado, onde não batia sol. Como visto anteriormente, o tempo de secagem é de 5 a 6 dias em temperatura ambiente (~26°C). Não foi utilizado um controle na umidade relativa do ar.

3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo objetiva mostrar os métodos utilizados para análise dos resultados. Foi realizado: predição acústica, para extrapolar os valores de absorção acústica do material além dos 2000 Hz atingidos pelo tubo de impedância; análise estatística, para definir as composições ótimas; e o teste de Tukey, para confirmar se as porcentagens de micro sílica tiveram melhoras significativas ou não nas médias das propriedades obtidas.

3.6.1 PREDIÇÃO ACÚSTICA

Será utilizado, como dito, o modelo de Biot-Allard para a predição acústica, utilizando uma planilha para facilitar os cálculos. O equipamento utilizado fornece a absorção acústica até 2000 Hz somente. Para melhor análise, a absorção acústica poderá ser extrapolada para valores superiores a este utilizando o modelo de Biot-Allard. Este modelo tem como função de caracterizar a estrutura de um poro e descreve a propagação das ondas em materiais porosos. É comumente utilizado também para o uso da avaliação das propriedades de absorção acústica de espumas macias poro-elásticas.

Biot em 1956 elaborou um modelo de propagação de ondas elásticas em meios fluidos saturados porosos, levando em conta: os diferentes mecanismos de acoplamento entre as

fases, a atenuação das ondas devido ao atrito viscoso e a elasticidade do esqueleto sólido. Vários autores (Champoux & Allard, 1991; Johnson et al., 2006) adaptaram a formulação original de Biot (1956.a, 1956.b) e introduziram parâmetros com uma clara interpretação física que estão intimamente relacionados com a estrutura de poros na escala de poros. Cada parâmetro está relacionado com a distribuição do fluido, que neste caso é o ar, em todo o material, dependendo unicamente da geometria dos poros.

Técnicas de medição foram desenvolvidas para determinar os parâmetros independentemente um do outro. Estes parâmetros, que serão deduzidos posteriormente, são: resistividade de fluxo, porosidade aberta, uma medida para o tamanho das interseções nas paredes das células do crômio (comprimento característico Viscoso e Térmico) e tortuosidade. Esse processo tem guiado o modelo de Biot-Allard.

Biot (1956.a, 1956.b) previu a existência de 3 ondas: 2 longitudinais e 1 transversal, que viajam através de ambas as fases do meio poroso. Para uma grande variedade de materiais e com frequências suficientemente elevadas, o acoplamento elástico entre o fluido e o material da estrutura pode ser negligenciado, e o material poroso pode ser considerado como tendo uma estrutura rígida.

Nessas frequências, a energia de uma excitação acústica é acoplada a uma onda longitudinal fluida saturante, chamada onda de Biot rápida. Esta onda viaja principalmente através do fluido saturante (ar). As propriedades de absorção de som do material são determinadas por esta propagação de onda e pelos parâmetros de seu número de ondas. Além disso, estes parâmetros podem estar relacionados com a distribuição do fluido através da estrutura sólida. O material poroso pode ser efetivamente considerado como um fluido equivalente com uma densidade efetiva e uma compressibilidade efetiva (Biot, 1956.a).

Esta abordagem é muitas vezes chamada de fluido equivalente ou o modelo de Allard, Champoux e Johnson, que adaptaram a propagação de ondas de alta frequência em meios porosos como apresentado por Biot.

Para certos fluidos, como por exemplo o ar, o efeito da temperatura deve ser considerado e o módulo de elasticidade dependente da frequência do fluido de saturação deve ser conhecido para poder modelar corretamente a propagação do som através de materiais porosos (Champoux e Allard, 1991).

Enfim, podemos deduzir os parâmetros que influenciam o comportamento da absorção do som das espumas. Primeiramente, a resistividade de fluxo (σ) é parâmetro mais conhecido que influencia a absorção, sendo definida como:

$$\sigma = \frac{\Delta P}{Q \cdot l} [N \cdot s / m^4] \quad (13)$$

Sendo que: “ ΔP ” é a queda de pressão sobre o material, “ Q ” o fluxo de ar de estado estacionário por unidade de superfície aplicada sobre uma fatia do material com espessura “ l ”.

A porosidade aberta (ϕ) é definida como a razão entre o volume do fluido “ V_f ” e o volume total “ V_t ”, levando em consideração os poros abertos ($\phi = V_f / V_t$). Os volumes fechados são considerados como sendo parte do sólido e tem um efeito na elasticidade e na densidade da estrutura porosa. A porosidade pode ser medida aplicando a lei do gás ideal. Outro método que também pode ser utilizado aplica uma técnica mais recente, baseada na expressão do coeficiente de reflexão “ R ” na camada semi-infinita de material poroso em incidência normal no regime de alta frequência.

A tortuosidade (α_∞) depende da velocidade do fluido local. Devido à presença da estrutura, a velocidade do fluido local não tem a mesma direção e magnitude. Uma onda acústica que percorre um percurso de poros experimenta um percurso tortuoso, que assim difere de um percurso cilíndrico. Como tal, a tortuosidade pode ser interpretada como um fator de forma estrutural descrevendo o caminho dos poros conectados. Intuitivamente, pode-se entender como uma adaptação à densidade do ar “ ρ_0 ” devida à presença da estrutura. A tortuosidade leva, dessa forma, em conta a diferença de direção e magnitude entre a velocidade microscópica e macroscópica, sendo definida da seguinte forma:

$$\alpha_\infty = \frac{\frac{1}{V} \cdot \int_V v^2 dV}{\left(\frac{1}{V} \cdot \int_V \bar{v} dV \right)^2} = \left(\frac{c_0}{c_1} \right)^2 \quad (14)$$

Sendo que: “ \bar{v} ” é a velocidade microscópica do gás ideal, o denominador representa a velocidade do fluido macroscópico e o volume de integração “ V ” é grande em comparação com o diâmetro médio dos poros.

Segundo Allard (1993), uma das maneiras de calcular “ c_1 ” é usar uma correlação cruzada entre a referência e o pulso transmitido e “ c_0 ” é a velocidade de fase do fluido. Uma abordagem elegante do domínio da frequência, sugerida por Sasche e Pao (1978), considera a fase “ φ_0 ” do pulso de referência no ar livre e que “ φ_1 ” do pulso transmitido que atravessa a amostra. A tortuosidade pode então ser estimada usando a equação:

$$c_1(\omega) = \frac{1}{\frac{1}{c_0} + \frac{\varphi_0(\omega) - \varphi_1(\omega)}{\omega \cdot l}} \quad (15)$$

Ainda segundo Allard (1993), o comprimento característico viscoso (Λ) trata dos efeitos viscosos dependentes da frequência nos poros. Em baixa frequência, o perfil de velocidade nos poros se aproxima de um fluxo de Poiseuille, enquanto em altas frequências o perfil é mais ou menos uniforme. É definido pelas seguintes fórmulas:

$$\frac{2}{\Lambda} = \frac{\int_A |v(r_w)|^2 dA}{\int_V |v(r)|^2 dV} \quad (16)$$

$$\Lambda = c \sqrt{\frac{8 \cdot \alpha_\infty \cdot \eta}{\sigma \cdot \phi}} \quad (17)$$

Sendo que: “ $v(r)$ ” é a velocidade microscópica de um fluido viscoso na parede do poro, o numerador de integração “ V ” excede o volume dos poros, a integração no numerador

é sobre a superfície “ A ” das paredes dos poros e “ $v(r_w)$ ” é a velocidade do mesmo fluido inviscente na superfície das paredes.

Para a segunda equação: “ c ” é o parâmetro que depende da geometria dos poros e cujo valor geralmente se situa entre 1 e $\frac{1}{4}$ para a maioria dos materiais porosos. Para o que se segue, foi definido um poro uniforme como sendo um poro cuja seção transversal tem uma forma e tamanho que são constantes ao longo do comprimento do poro. No caso de um material feito de poros uniformes não-insertos, “ Λ ” pode ser calculado pela primeira equação, pois não há efeito de ponderação associado à velocidade, e “ $\Lambda = \Lambda' = r_h$ ”, onde “ r_h ” é o raio hidráulico definido como o dobro da relação entre a área transversal do poro dividida pelo seu perímetro.

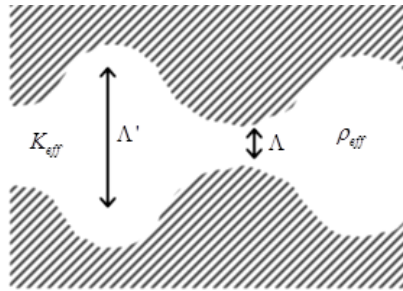
Para a definição do comprimento característico térmico é usada uma aproximação que é semelhante ao usado para tratar dos efeitos viscosos. A densidade e o calor específico da estrutura são muito maiores que a densidade e o calor específico do ar para materiais porosos usuais, e as mudanças na temperatura das paredes podem ser negligenciadas. Em uma frequência suficientemente alta, a profundidade térmica da pele assim como a profundidade viscosa da pele são pequenas, e as paredes dos poros parecem estar localmente planas.

O comprimento característico térmico “ Λ' ” está associado com aos efeitos de temperatura que são levados em consideração pelo módulo de densidade dinâmico do fluido de saturação (proporção da pressão acústica para o valor médio da condensação macroscópica do fluido de saturação). Champoux e Allard (1991) descrevem o comprimento característico térmico como:

$$\frac{2}{\Lambda'} = \frac{\int_A dA}{\int_V dV} \quad (18)$$

O comprimento característico térmico leva em consideração a compressibilidade dependente da frequência devido à troca de energia térmica nos poros entre o fluido e a estrutura (isotérmica em baixas frequências e adiabática em altas frequências). Tortuosidade, viscosidade e comprimento característico térmico dependem somente da configuração geométrica dos poros.

Figura 70: Configuração geométrica dos poros.



Fonte Adaptado de Champoux e Allard, 1991.

Sendo: “ Λ ” a intersecção entre os poros; “ Λ' ” a estimativa do tamanho médio dos poros; “ K_{eff} ” a compressibilidade efetiva; e “ ρ_{eff} ” a densidade efetiva.

Para materiais celulares, o comprimento característico térmico é a estimativa do tamanho médio dos poros, uma vez que esta variável determina o fluxo de calor. O comprimento característico viscoso é a estimativa da intersecção entre os poros, uma vez que esta variável determina os efeitos viscosos.

Quando uma onda se propaga em um poro, uma redução onde à velocidade de fluxo é alta influência as interações viscosas, enquanto uma superfície maior se presta a mais troca de energia térmica. (Poros cilíndricos: $\Lambda' = \Lambda$; outros casos: $\Lambda' \geq \Lambda$).

Esta equação é semelhante à do comprimento característico viscoso “ Λ ”, mas os elementos de volume e área não são ponderados pela velocidade microscópica local do fluido. O comprimento característico térmico “ Λ' ” é igual ao dobro da relação superfície-poro-superfície.

Finalmente, através das fórmulas expressa por Bo e Tianning (2009) mostradas a seguir, é possível calcular e extrapolar o coeficiente de absorção acústica (A_0) e encontrar a impedância característica (Z_c) e o número de onda complexa (k).

$$Z_c = \sqrt{K_{eff} \cdot \rho_{eff}} \quad (19)$$

$$k = \omega \sqrt{\frac{\rho_{eff}}{K_{eff}}} = \omega \frac{\sqrt{\alpha_{\infty}}}{c_0} \left[1 + \frac{\delta(1-i)}{2} \left(\frac{1}{\Lambda} + \frac{(\gamma-1)}{\Lambda \cdot B} \right) \right] \quad (20)$$

$$A_0 = 1 - \left| \frac{Z_f - Z_0}{Z_f + Z_0} \right|^2 \quad (21)$$

Sendo que: “ Z_f ” é impedância acústica de superfície, “ Z_0 ” a impedância característica do ar, “ γ ” é a taxa de calor específico do fluido C_p/C_v e “ c_0 ” é a velocidade de fase do fluido.

$$K_{eff} = \frac{\gamma \cdot P_0}{\left[\gamma - (\gamma - 1) F(B^2 \omega) \right]} \quad (22)$$

$$\rho_{eff} = \alpha_{\infty} \cdot \rho_0 \left(1 + \frac{\sigma \cdot \phi}{i \cdot \omega \cdot \rho_0 \cdot \alpha_{\infty}} \cdot G_c(s) \right) \quad (23)$$

Sendo que: “ P_0 ” é a pressão atmosférica; “ B^2 ” o número de Prandtl; e “ γ ” a relação dos calores específicos do fluido.

$$G_c(s) = - \frac{\frac{s\sqrt{-i}}{4} \cdot \frac{J_1(s\sqrt{-i})}{J_0(s\sqrt{-i})}}{\left[1 - \frac{2}{s\sqrt{-i}} \cdot \frac{J_1(s\sqrt{-i})}{J_0(s\sqrt{-i})} \right]} \quad (24)$$

$$F(B^2 \omega) = \left[1 + \frac{\sigma \cdot \phi}{i \cdot \omega \cdot B^2 \cdot \rho_0 \cdot \alpha_{\infty}} G_c(Bs) \right]^{-1} \quad (25)$$

$$s = c \sqrt{\frac{8 \cdot \omega \cdot \rho_0 \cdot \alpha_\infty}{\sigma \cdot \phi}} \quad (26)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\eta}{\omega \cdot \rho_0}} \quad (27)$$

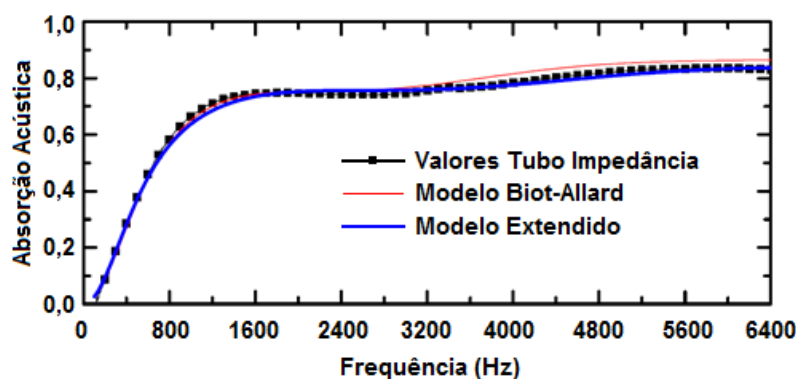
Sendo que: “ α_∞ ” é a tortuosidade, “ ρ_0 ” a densidade estática do ar, “ σ ” a resistividade de fluxo estática, “ ϕ ” a porosidade, “ ω ” a frequência angular de excitação, “ c ” o fator de formato, “ B^2 ” o número de Prandtl, “ δ ” a profundidade da pele viscosa e “ γ ” é a razão de calor específica do ar (c_p/c_v); “ J_0 ” e “ J_1 ” são as funções de Bessel de ordem 0 e primeira, respectivamente. “ $i^2 = 1$ ” e “ P_0 ” é a pressão estática do ar. Para o ar a 18°C: “ $P_0 = 1.0132 \times 10^5 \text{ Pa}$ ”, “ $\rho_0 = 1.213 \text{ kg m}^{-3}$ ”, “ $\gamma = 1.4$ ” e “ $B^2 = 0.71$ ”.

$$-\omega^2 p = \frac{K_{eff}}{\rho_{eff}} \cdot \Delta p \quad (28)$$

Sendo que: “ p ” é a pressão do fluido nos poros.

Para finalizar e comprovar a efetividade do modelo de Biot-Allard, a Figura 71 a seguir mostra a predição acústica apresentada por Bo e Tianning (2009), confirmando a efetividade deste modelo.

Figura 71: Comparação entre a absorção acústica medida pelo tubo de impedância e pelo modelo de Biot-Allard.



Fonte Adaptado de Bo e Tianning (2009).

3.6.2 MODELOS DE REGRESSÃO E TESTE DE TUKEY

Para investigar a influência do tratamento (porcentagens de micro sílica) na obtenção dos valores de resistência e de rigidez das espumas de gesso criadas e principalmente nos valores do coeficiente de condutividade térmica e absorção acústica, será utilizada a análise de variância (ANOVA) com auxílio do software Minitab® versão 14, considerada ao nível de 5% de significância (α), consistindo a equivalência das médias dos 4 grupos em análise como hipótese nula (H_0) e a não equivalência como hipótese alternativa (H_1). Dessa forma, se o P-valor (probabilidade [P] de se aceitar a hipótese nula [H_0]) encontrado é superior ao nível de significância (0,05), isso implica aceitar H_0 (as médias dos três grupos são estatisticamente equivalentes), e se menor (P -valor < 0,05), em refutar H_0 ou aceitar H_1 (pelo menos uma dentre as médias se difere das demais).

A Tabela 42 a seguir mostra os modelos de regressão que foram utilizados nas estimativas. Nesta tabela, X é a variável independente, Y a variável dependente e “a”, “b”, “b1”, “b2”, “b3” e “b4” as constantes (parâmetros) das funções ajustadas pelo método dos mínimos quadrados. Pela ANOVA dos modelos de regressão, a serem avaliados também ao nível de significância de 5%, a hipótese nula estipulada consistirá na não representatividade dos modelos testados ($H_0: \beta=0$), e na representatividade como hipótese alternativa ($H_1: \beta \neq 0$). P-valor superior ao nível de significância considerado implica em aceitar H_0 (o modelo testado não é representativo - variações de X são incapazes de explicar as variações em Y), refutando-a em caso contrário (o modelo testado é representativo). Além do uso da ANOVA, que permite aceitar ou não a representatividade dos modelos testados, os valores do coeficiente de determinação ajustado [$R^2(aj)$] foram obtidos como forma de avaliar a capacidade das variações da variável independente X em explicar a variável preditiva Y ,

possibilitando eleger, dentre os modelos considerados significativos, o de melhor ajuste por relação testada.

Tabela 42: Modelos de regressão a serem utilizados na estimativa das propriedades.

Tipo de Ajuste	Função [$Y=f(X)$]
Polinomial linear [Lin]	$Y = a + b1 \cdot X$
Exponencial [Exp]	$Y = a \cdot e^{b1 \cdot X}$
Logarítmica [Log]	$Y = a + b1 \cdot Ln(X)$
Geométrica [Geo]	$Y = a \cdot X^{b1}$
Quadrática [Quad]	$Y = a + (b1)X + (b2)X^2$
Cúbica [Cub]	$Y = a + (b1)X + (b2)X^2 + (b3)X^3$
Quártica [Quar]	$Y = a + (b1)X + (b2)X^2 + (b3)X^3 + (b4)X^4$

Fonte: Próprio Autor.

O teste de Tukey foi utilizado para contrastar as médias de cada fator idealizado, também considerado ao nível de 5% de significância, possibilitando identificar os níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes assim como os níveis associados ao menor e ao maior valor médio.

4. RESULTADOS

Neste capítulo foram apresentados os resultados do planejamento experimental preliminar, fundamentais para a definição das porcentagens dos aditivos base, e do planejamento experimental definitivo. Será apresentada, também, uma discussão dos resultados obtidos, comparando-os com a revisão bibliográfica desenvolvida.

4.1 RESULTADO DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PRELIMINAR

4.1.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os resultados da média das propriedades mecânicas da espuma de gesso desenvolvida nesta etapa preliminar estão apresentados na Tabela 43 a seguir. Apresentam-se também os coeficientes de variação (CV), que é o desvio padrão dividido pela média dos resultados, podendo, desta forma, julgar a eficiência dos resultados. Através da Tabela 44 é possível verificar se a precisão dos resultados foi ótima ou péssima.

Tabela 43: Média e desvio padrão (CV) das propriedades mecânicas da espuma de gesso.

	Comp. A	Comp. A'	Comp. B'	Comp. C
Nomenclatura	AG.80	AG.70	AG.70	AG.70
Adotada	H.P	H.P	H.A	H.P
	MS.A	MS.A	MS.A	MS.P
Compressão				
Uniaxial [MPa]	0,340	0,913	1,142	0,648
CV	0,146	0,071	0,098	0,049
Compressão				
Diametral [MPa]	0,126	0,289	0,358	0,223
CV	0,382	0,046	0,071	0,046
Flexão [MPa]	0,180	0,460	0,377	-
CV	0,306	0,112	0,498	-
Módulo				
Elástico Estático [GPa]	0,636	0,994	1,334	-
CV	0,161	0,061	0,249	-

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 44: Classificação do Coeficiente de Variação segundo Silva et al. (2011).

Faixa	Precisão	CV
≤15%	Ótima	Baixo
Entre 15% e 20%	Boa	Médio
Entre 20% e 30%	Regular	Alto
>30%	Péssima	Muito alto

Fonte Adaptado de Silva et al. (2011).

Através da Tabela 43 é possível tirar as seguintes conclusões: a presença ou ausência do HPMC não levou a variações significativas para estas propriedades; e a porcentagem baixa de micro sílica utilizada, que foi de 0,5%, não teve acréscimo na resistência mecânica (reduziu 30%), que era o esperado (vide resultados das composições A' e C).

Para a composição B (AG.80 H.A MS.A) foi realizada somente ensaio acústico, pois através da composição A e A' foi constatado que a relação água/gesso de 0,80 é melhor para a absorção acústica.

4.1.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

Os resultados da média das propriedades físicas da espuma de gesso desenvolvida nesta etapa preliminar estão apresentados na Tabela 45 a seguir. Apresentam-se também os coeficientes de variação (CV). Através da Tabela 44 é possível verificar se a precisão dos resultados foi ótima ou péssima, como dito anteriormente.

Tabela 45: Média e desvio padrão (CV) das propriedades físicas da espuma de gesso.

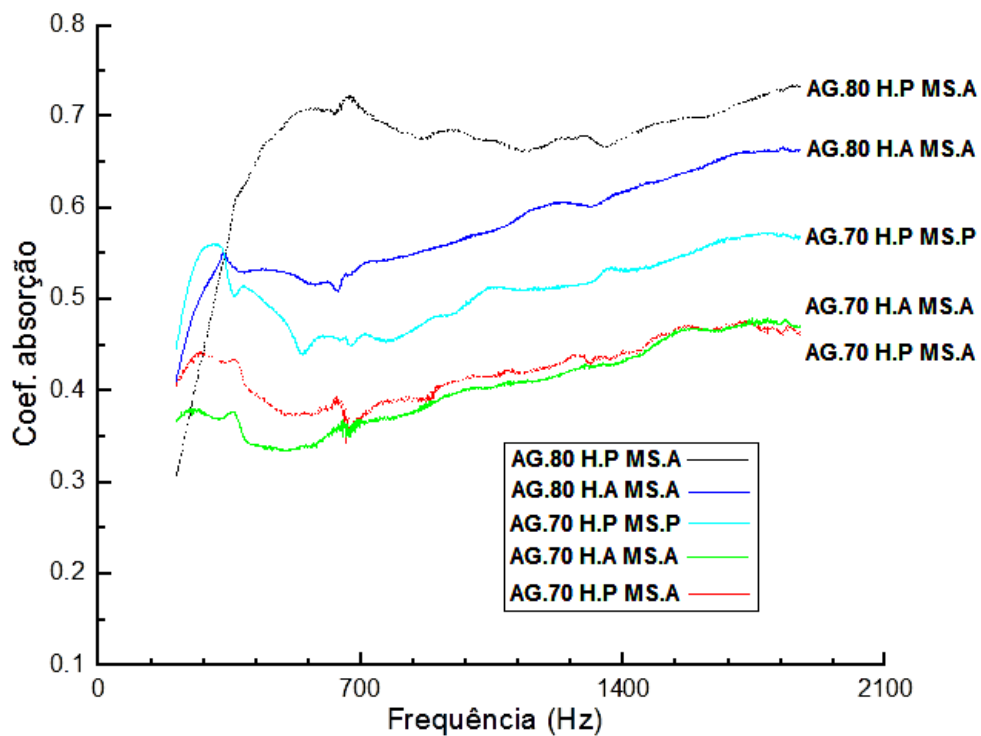
	Comp. A	Comp. A'	Comp. B'	Comp. C
Nomenclatura	AG.80	AG.70	AG.70	AG.70
Adotada	H.P	H.P	H.A	H.P
	MS.A	MS.A	MS.A	MS.P
Densidade [kg/m³]	368	496	540	449
CV	0,015	0,031	0,063	0,013
Porosidade [%]	84,30	78,58	76,95	80,87
CV	0,003	0,008	0,019	0,003

Fonte: Próprio Autor.

Através da Tabela 45 é possível tirar as seguintes conclusões: a porosidade do material é afetada quando se altera a relação água/gesso, sendo que a relação 0,80 (maior quantidade de água) possui maior porosidade, como foi visto na literatura; a presença ou ausência do HPMC não teve variações significativas para estas propriedades; e a densidade do material acompanha as resistências mecânicas e o módulo elástico, sendo que a composição com menor densidade teve menor resistência mecânica e menor módulo elástico e a de maior densidade, maior resistência mecânica e maior módulo elástico, como foi visto na literatura.

Os resultados da absorção acústica do gesso poroso desenvolvido nesta etapa preliminar estão apresentados na Figura 72.

Figura 72: Absorção acústica.



Fonte: Próprio Autor.

Nesta figura é possível tirar as seguintes conclusões: a relação água/gesso influenciou positivamente na absorção acústica, sendo que as composições com maior quantidade de água (relação água/gesso 0,80) atingiu maiores coeficientes de absorção comparando-se com as composições com menor quantidade de água (relação água/gesso 0,70); a influência do

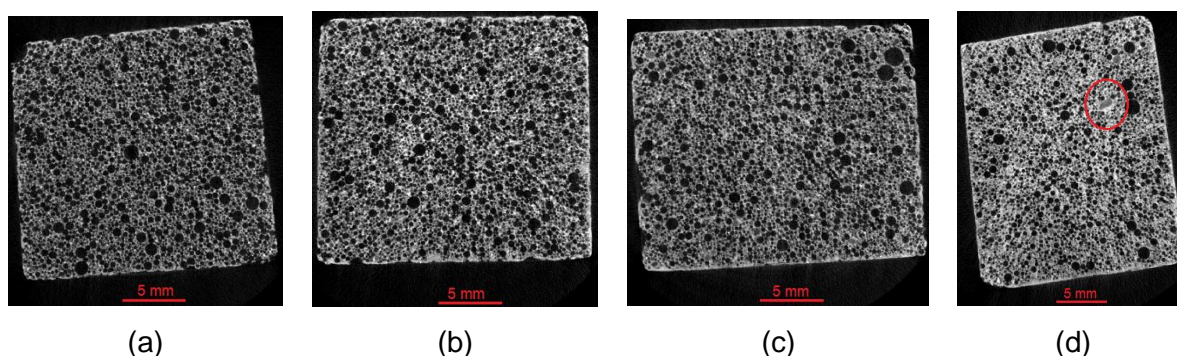
HPMC foi positiva em frequência de 280 Hz a 1120 Hz, sendo menos significativa em frequência superior a este valor; a utilização do HPMC, para composições com relação água/gesso de 0,70, não teve muita influência comparando-se com a relação 0,80, que teve uma diferença mais significativa na absorção acústica; e a utilização da micro sílica não melhorou as propriedades mecânicas do gesso poroso, entretanto, melhorou a absorção acústica.

A composição B (AG.80 H.A MS.A) foi realizada somente ensaio de absorção acústica, pois através da composição A e A' foi constatado que a relação água/gesso de 0,80 é melhor para esta propriedade. Desta forma, para analisar somente o que a composição é melhor, não realizou ensaio de resistência mecânica da composição B.

4.2 RESULTADOS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DEFINITIVO

Antes da apresentação dos resultados do planejamento experimental definitivo, é importante mostrar as microtomografias das espumas de gesso criadas. Estas microtomografias foram de extrema importância para a predição acústica, como dito anteriormente, podendo assim obter valores de absorção acústica superiores aos 2000 Hz do tubo de impedância. Além do mais, é possível conhecer as estruturas dos poros formados e confirmar a difícil homogeneização das composições com alto teor de micro sílica. Na Figura 73.d é possível notar na região circulada resquícios de gesso que não foram homogeneizados.

Figura 73: Microtomografia das composições realizadas - (a) 0% de micro sílica, (b) 2% de micro sílica, (c) 3,5 de micro sílica e (d) 5% de micro sílica.



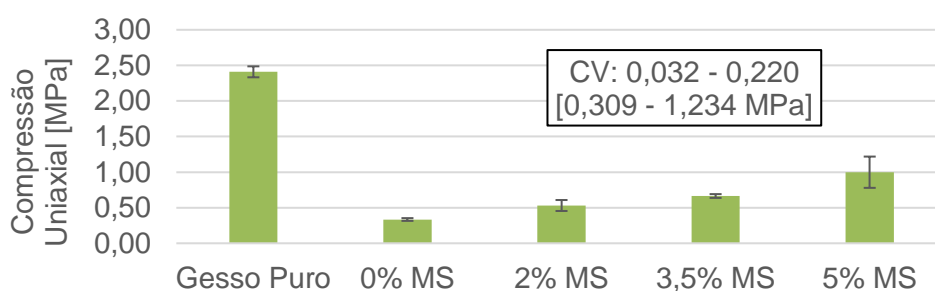
Fonte: Próprio Autor.

4.2.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Neste capítulo serão apresentadas as médias, os coeficientes de variação (CV) e a discussão das propriedades mecânicas obtidas. Estão representados entre colchetes os valores máximos e mínimos das espumas de gessos criadas. Como comparativo, é mostrado o resultado do gesso puro sem espuma, analisando assim as melhoras e pioras nas propriedades analisadas. As espumas de gesso são identificadas como 0% MS, 2% MS, 35% MS e 5% MS, sendo MS a micro sílica e sua porcentagem utilizada.

A Figura 74 a seguir mostra os valores de resistência à compressão uniaxial obtidos.

Figura 74: Resultado Compressão Uniaxial.

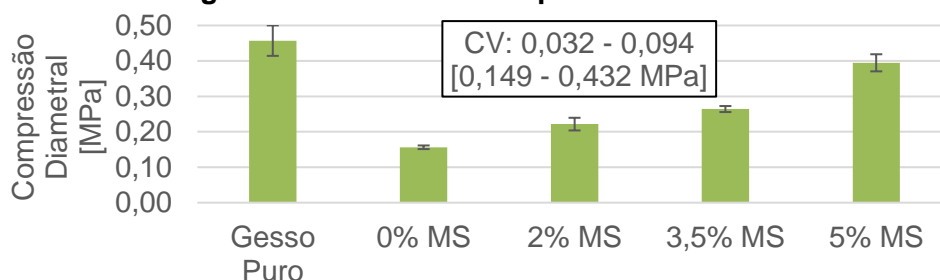


Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que: com a adição de espuma, o material reduziu 86,14% a resistência à compressão uniaxial; e a composição de maior teor de micro sílica obteve o maior coeficiente de variação, podendo ser pela dificuldade em homogeneizar esta composição, e aumentou 199,10% a resistência à compressão uniaxial, comprovando sua efetividade.

A Figura 75 a seguir mostra os valores de resistência à compressão diametral obtidos.

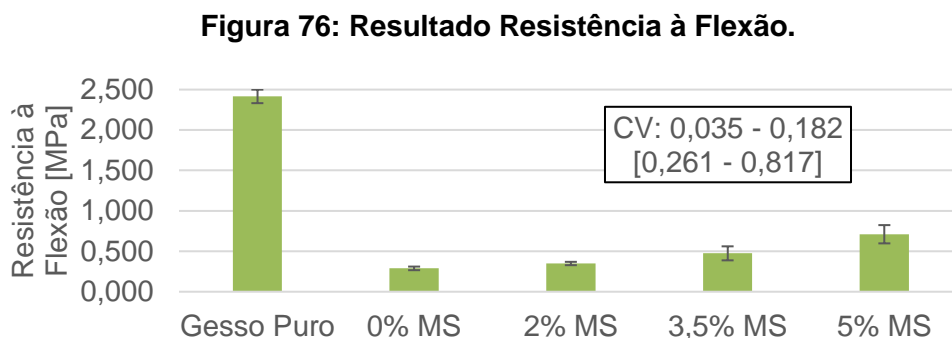
Figura 75: Resultado Compressão Diametral.



Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que: com a adição da espuma, o material reduziu 65,86% a resistência à compressão diametral; e 5% de micro sílica aumentou 153,21% a resistência à compressão diametral.

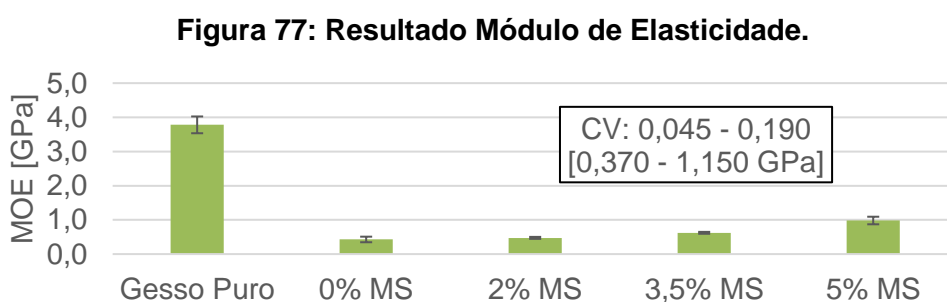
A Figura 76 a seguir mostra os valores de resistência à flexão obtidos.



Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que: com a adição da espuma, o material reduziu 88,04% a resistência à flexão; e 5% de micro sílica aumentou 146,15% a resistência à flexão.

A Figura 77 a seguir mostra os valores do módulo de elasticidade obtidos.



Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que: com a adição da espuma, o material reduziu 88,68% do módulo de elasticidade; e 5% de micro sílica aumentou 129,45% o módulo de elasticidade.

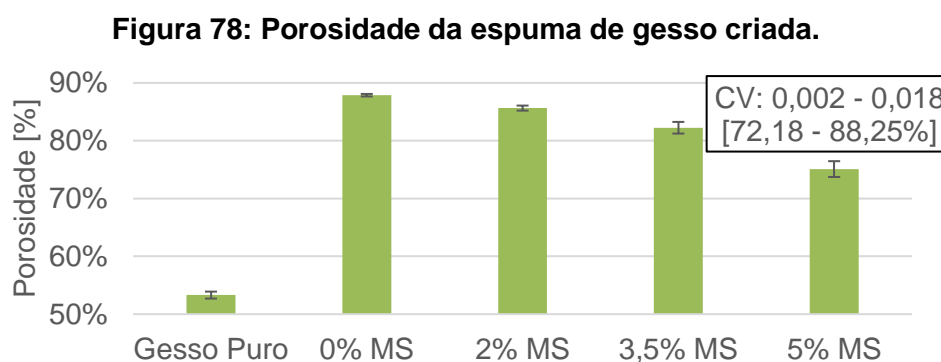
4.2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

Neste capítulo serão apresentadas as médias, os coeficientes de variação (CV) e a discussão das propriedades físicas obtidas. Estão apresentados entre colchetes os valores máximos e mínimos das espumas de gessos criadas. Como comparativo, é apresentado o resultado do gesso puro sem espuma, analisando assim as melhoras e pioras nas propriedades analisadas. As espumas de gesso são identificadas como 0% MS, 2% MS, 35% MS e 5% MS, sendo MS a micro sílica e sua porcentagem utilizada.

Existem 2 parâmetros importantes que devem ser analisados na absorção acústica: NRC e SRA. O NRC (Noise Reduction Coefficient) é a média aritmética dos coeficientes de absorção sonora dos forros para as frequências de 250 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz e 2.000 Hz. Os forros são considerados acústicos a partir do índice de redução sonora de 0,50. Já para o cálculo do SRA, utiliza as faixas de 500, 1000, 2000 e 4000 Hz (PINI).

O NRC é importante quando se refere à escritórios fechados, salas de conferencias, escritórios mistos, corredores, áreas de trabalho, salas de aula, ginásios, lanchonetes, etc. O SRA avalia o percentual da quantidade de ruído proveniente da fala que é absorvido pelo forro (PINI).

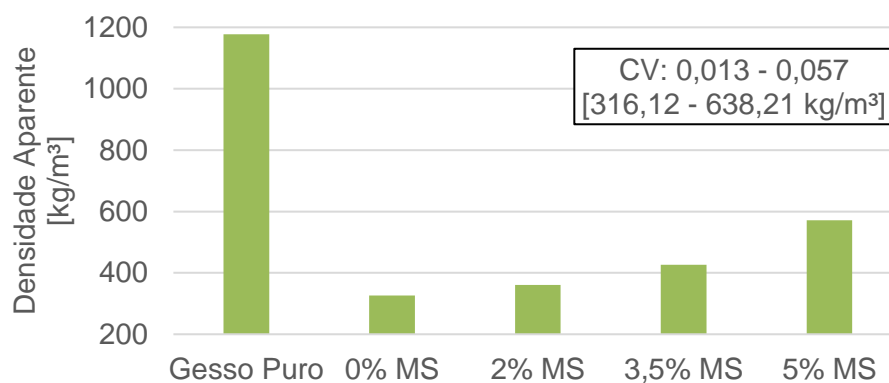
A Figura 78 a seguir mostra os valores de porosidade obtidos.



Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que: o aditivo espumante utilizado aumentou 34,58% a porosidade do material desenvolvido (de 53,50% para 87,88%), mostrando a efetividade do aditivo; e 5% de micro sílica diminuiu 12,78% a porosidade (de 87,88% para 75,10%).

A Figura 79 a seguir mostra os valores de densidade aparente obtidos.

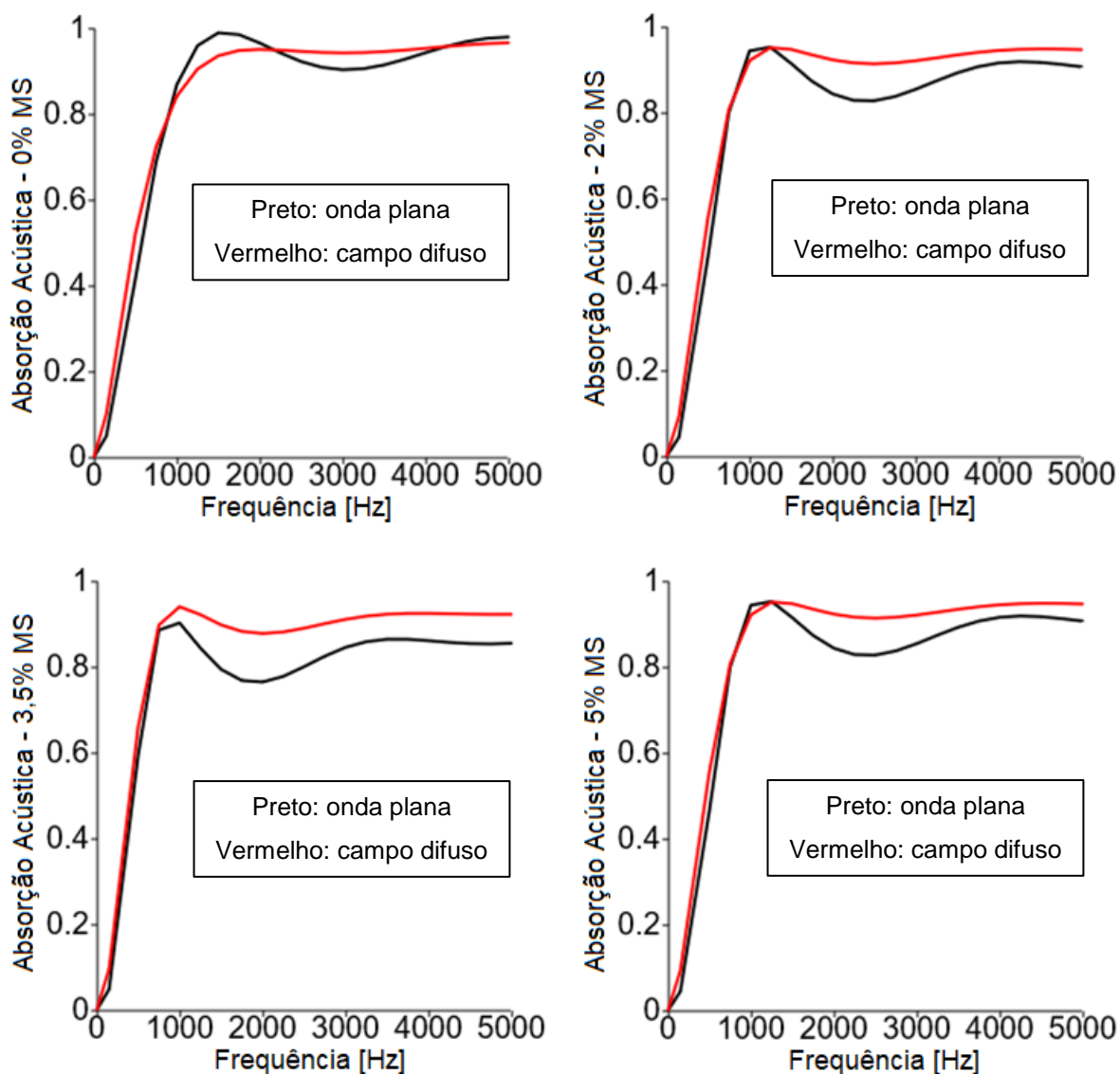
Figura 79: Resultado densidade aparente.

Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que: com a adição da espuma, o material reduziu 72,28% a densidade aparente; e 5% de micro sílica aumentou 75,13% a densidade aparente.

A Figura 80 a seguir mostra as curvas de absorções acústicas obtidas. A linha preta representa a absorção acústica de uma onda plana e a linha vermelha de um campo difuso. Uma onda plana é uma onda de frequência constante, cujas frentes de onda são planos infinitos, paralelos entre si, e com amplitude constante e perpendicular ao vector de velocidade de fase. Um campo difuso é o campo acústico em que um grande número de ondas refletidas, provenientes de todas as direções, combinam de modo que a densidade média de energia seja uniforme em qualquer ponto do referido campo. Uma aproximação desse tipo de campo é obtida em grande escala, nas chamadas câmaras de reverberação.

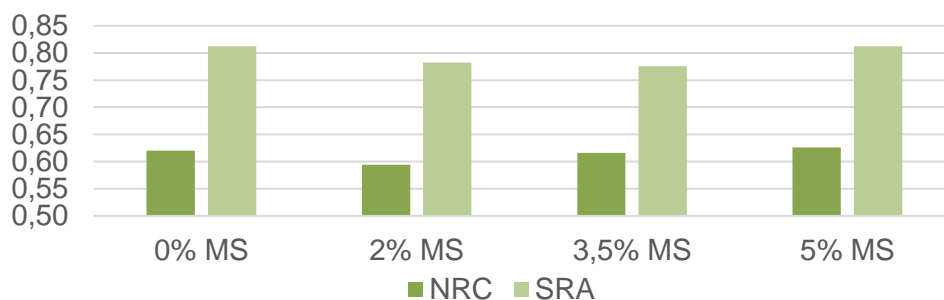
Figura 80: Média das curvas de absorção acústica por composição.



Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que a micro sílica não teve impacto na absorção acústica, sendo isso de extrema importância pois o material adquiriu resistência mecânica e não perdeu suas propriedades acústica.

A Figura 81 a seguir mostra os valores de NRC e SRA obtidos.

Figura 81: Valores de NRC e SRA das espumas de gesso criadas.

Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que este gráfico confirma a proximidade das propriedades, principalmente comparando-se a composição sem micro sílica e a composição com 5% de micro sílica.

A Tabela 46 exhibe a qualidade da espuma de gesso na absorção acústica de acordo com os valores de NRC.

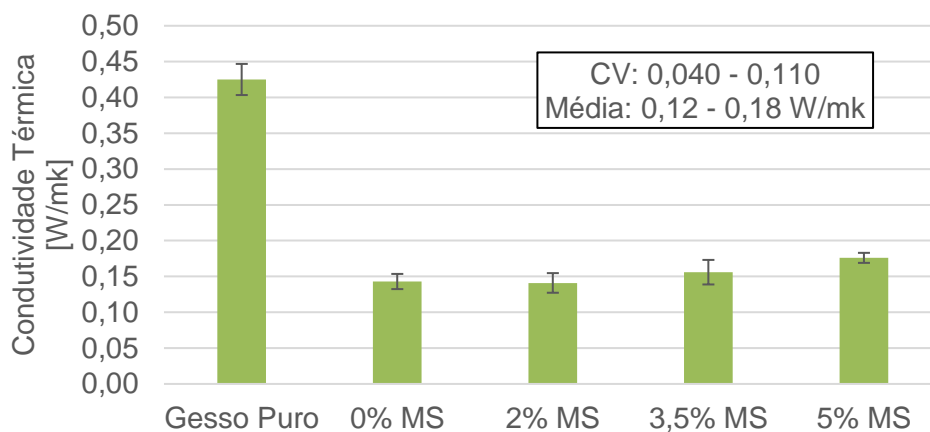
Tabela 46: Qualidade da absorção acústica em função do NRC.

Qualidade Absorção Acústica	NRC
Excelente	0,75 a 1,00
Muito Boa	0,65 a 0,75
Boa	0,50 a 0,65

Fonte: PINI.

Nota-se que a espuma de gesso criada possui boa qualidade de absorção acústica, com um NRC de 0,63.

A Figura 82 a seguir mostra os valores de condutividade térmica obtidos.

Figura 82: Resultado Condutividade Térmica.

Fonte: Próprio Autor.

Nota-se novamente que a micro sílica não teve impacto significativo nesta propriedade também, aumentando apenas 0,033 W/mk (de 0,143 para 0,176 W/mk) da composição sem micro sílica para a composição com 5% de micro sílica.

4.2.3 COMPARATIVO DOS RESULTADOS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DEFINITIVO COM LITERATURA

Neste capítulo serão apresentadas as comparações dos resultados obtidos com a literatura. Para melhor análise, a Tabela 47 a seguir exibe todos os resultados obtidos da espuma de gesso criada, assim como do gesso puro para comparação, e o teste de Tukey para contrastar as médias.

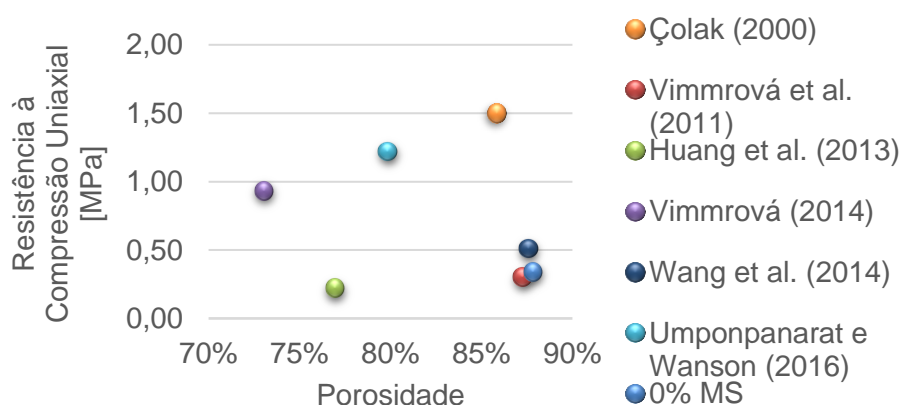
Tabela 47: Resultado das propriedades da espuma de gesso criada.

	COMPOSIÇÕES				Gesso Puro
	0% MS	2% MS	3,5% MS	5% MS	
Porosidade [%]	87,88%	85,65%	82,25%	75,10%	53,30%
Tukey	A	B	C	D	-
Densidade Aparente [kg/m³]	326,21	361,23	426,01	571,30	1176,96
Tukey	C	C	B	A	-
Comp. Uniaxial [MPa]	0,334	0,531	0,664	0,999	2,409
Tukey	C	C e B	B	A	-
Comp. Diametral [MPa]	0,156	0,222	0,264	0,395	0,457
Tukey	D	C	B	A	-
Flexão [MPa]	0,289	0,349	0,475	0,711	2,416
Tukey	C	C e B	B	A	-
MOE [GPa]	0,428	0,474	0,622	0,982	3,780
Tukey	C	C	B	A	-
Absorção Acústica - NRC	0,62	0,59	0,62	0,63	0,05
Tukey	A	B	A	A	-
Absorção Acústica - SRA	0,81	0,78	0,78	0,81	-
Tukey	A	B	B	A	-
Condutividade Térmica [W/mk]	0,143	0,141	0,156	0,176	0,425
Tukey	B	B	B	A	-

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 83 a seguir mostra as maiores porosidades obtidas com seus respectivos valores de resistência à compressão. Vale ressaltar que as porosidades de Çolak (2000) e Wang et al. (2014) foram estimadas como dito anteriormente (Equações 2 a 5) e a espuma desenvolvida nesta pesquisa consta como 0% MS (composição sem micro sílica).

Figura 83: Maiores valores de porosidade com seus respectivos valores de resistência à compressão.

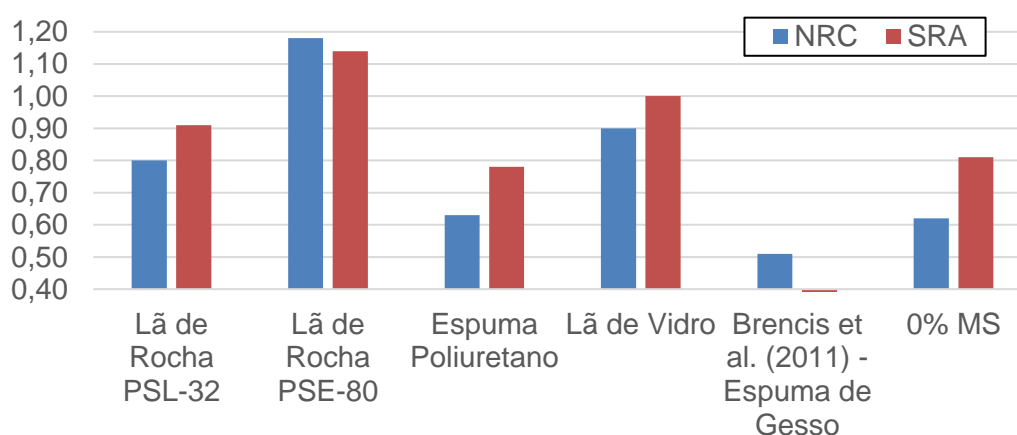


Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que: a metodologia proposta nesta pesquisa obteve o maior valor de porosidade, chegando a 87,88%; Çolak (2000) e Umponpanarat e Wansom (2016) foram os autores que obtiveram melhores resultados, atingindo altas porosidades (85,82% e 79,89% respectivamente) e resistências mecânicas (1,50 MPa e 1,22 MPa respectivamente); a máxima resistência à compressão obtida nesta pesquisa foi de 0,999 MPa com uma porosidade de 75,10%; e os autores que obtiveram porosidades próximas a desta pesquisa foram Vimmrová et al. (2011) e Wang et al. (2014), atingindo 87,30% e 87,62% respectivamente.

A Figura 84 a seguir mostra os valores de NRC e SRA de materiais considerados excelentes absorvedores acústicos e de uma espuma de gesso encontrada na literatura. As lãs de rocha (PSL-32 e PSL-80) são da fabricante Isar Isolamentos Acústicos, de espessuras 50 e 100 mm respectivamente. A espuma de poliuretano e a lã de vidro são da Log Acústica, de espessuras 25 e 50 mm, respectivamente. A espuma de gesso fabricada nessa pesquisa possuía espessura de 30 mm e Brencis et al. (2011) não informa este parâmetro. A espuma desenvolvida nesta pesquisa consta como 0% MS (composição sem micro sílica).

Figura 84: NRC e SRA de excelentes absorvedores acústicos e espumas de gesso.

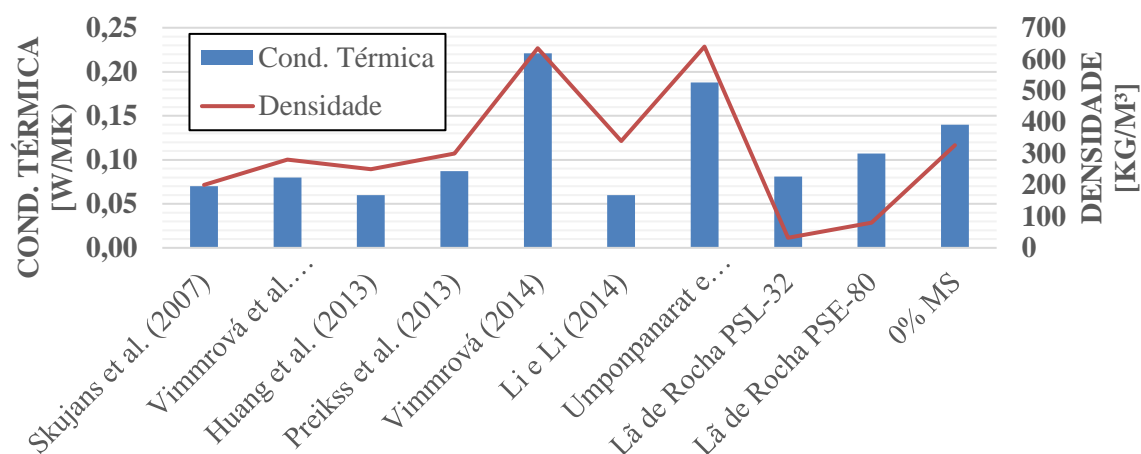


Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que: a espuma de gesso criada nesta pesquisa possui mais efetividade que a espuma de gesso de Brencis et al. (2011) e a espuma de poliuretano; e as lãs de rocha e vidro são mais efetivas que a espuma de gesso criada nesta pesquisa.

A Figura 85 a seguir mostra os valores de condutividade térmica de materiais considerados excelentes isolantes térmicos (Isar) e espumas de gesso. Como comparativo, a condutividade térmica do gesso puro é de 0,313 a 0,498 W/mk com relação água/gesso de 1,00 e 0,60 respectivamente.

Figura 85: Condutividade térmica de materiais isolantes e espumas de gesso.



Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que: a espuma de gesso criada nesta pesquisa não possui tanta efetividade comparando-se com as outras espumas de gesso, exceto pelas espumas de Vimmrová (2014) e Umponpanarat e Wansom (2016); e as lãs de rocha são melhores isolantes térmicos do que a espuma de gesso criada.

4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA

Na Tabela 48 a seguir são exibidos os melhores ajustes conforme explicado anteriormente. Foram definidos os melhores ajustes para todas as propriedades utilizando a micro sílica como fator independente (X) e a propriedade a ser definida como fator dependente (Y). Para a condutividade térmica, foi utilizado a micro sílica (X) e temperatura (T) como fatores independentes. Todos os P-valores foram inferiores a 0.05, exceto para um caso no ajuste da condutividade térmica, sendo este sublinhado.

Tabela 48: Melhores ajustes com seus respectivos R².

Propriedades	Ajuste Regressão	R ²
ρ_v [0.326; 0.571 g/cm ³]	$Y = 0.3280 + 0.0012 \cdot X + 0.0012 \cdot X^2 + 0.0041 \cdot X^3 - 0.0005 \cdot X^4$	97.09%
$\sigma_{c,a}$ [0.334; 0.999 MPa]	$Y = 0.3311 \cdot X^{0.6384}$	89.00%
$\sigma_{c,d}$ [0.156; 0.395 MPa]	$Y = 0.1566 - 0.1635 \cdot X + 0.2003 \cdot X^2 - 0.0641 \cdot X^3 + 0.0065 \cdot X^4$	97.40%
σ_f [0.289; 0.711 MPa]	$Y = 0.2884 - 1.4725 \cdot X + 1.4747 \cdot X^2 - 0.4477 \cdot X^3 + 0.0430 \cdot X^4$	86.94%
MOE [0.428; 0.982 GPa]	$Y = 0.4280 - 0.6126 \cdot X + 0.6115 \cdot X^2 - 0.1825 \cdot X^3 + 0.0178 \cdot X^4$	92.04%
ϕ [75.10; 87.88%]	$Y = 87.8120 + 2.5500 \cdot X - 2.9942 \cdot X^2 + 0.7249 \cdot X^3 - 0.0649 \cdot X^4$	98.03%
NRC [0,59; 0,63]	$Y = 0.6200 - 0.0440 \cdot X + 0.0139 \cdot X^2 + 0.0011 \cdot X^3 - 0.0004 \cdot X^4$	75,82%
SRA [0,78; 0,81]	$Y = 0.8100 + 0.0821 \cdot X - 0.1002 \cdot X^2 + 0.0318 \cdot X^3 - 0.0030 \cdot X^4$	75,82%
k [0.14; 0.18 W/mk]	$Y = 0.17214 + 0.00526 \cdot X - 0.000838 \cdot T + 0.000033 \cdot \underline{X \cdot T}$	79,20%

Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que todos os modelos foram representativos, ou seja, com a porcentagem de micro sílica é possível determinar as propriedades do material. É possível concluir também que: quando maior a porcentagem de micro sílica, maior será a resistência à compressão uniaxial, diametral, resistência à flexão e o módulo de elasticidade do material; uma densidade máxima de 0.621 g/cm³ é obtida quando se utiliza 6.3% de micro sílica; uma porosidade máxima de 88.43% é obtida quando se utiliza 0.53% de micro sílica; um valor de NRC máximo de 0.64 é obtido quando se utiliza 4.45% de micro sílica; um valor de SRA máximo de 0.83 é obtido quando se utiliza 0.83% de micro sílica; o aumento da temperatura reduz a condutividade térmica enquanto o aumento de micro sílica aumenta a condutividade térmica; e não é possível encontrar uma porcentagem de micro sílica que atenda a todas as propriedades, encontrando assim uma composição ótima para todas as composições.

A Tabela 49 a seguir mostra os valores de micro sílica (X) para se obter os maiores valores das propriedades (Y), deixando mais claro o texto escrito acima.

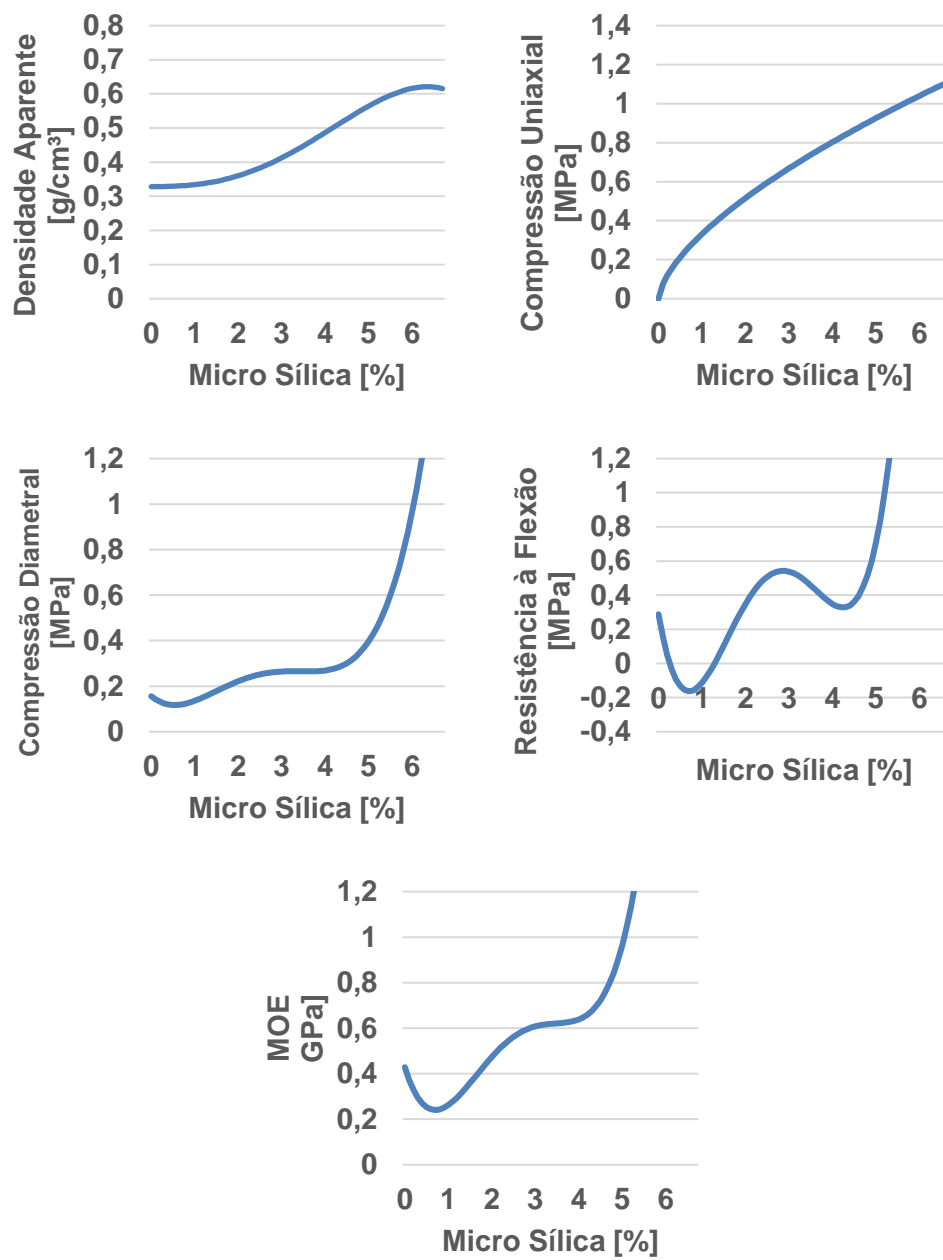
Tabela 49: Valor de X para obter Y máximo.

Y	Valor de X para Y máximo	Y máximo
ρ_v [0.326; 0.571 g/cm ³]	6.3%	0.621 g/cm ³
$\sigma_{c,a}$ [0.334; 0.999 MPa]	Quanto maior o valor de X, maior será o valor de Y.	
$\sigma_{c,d}$ [0.156; 0.395 MPa]	Quanto maior o valor de X, maior será o valor de Y.	
σ_f [0.091; 0.224 MPa]	Quanto maior o valor de X, maior será o valor de Y.	
MOE [0.428; 0.982 GPa]	Quanto maior o valor de X, maior será o valor de Y.	
ϕ [75.10; 87.88%]	0.53%	88.43%
NRC [0.59; 0.63]	4.45%	0.64
SRA [0.78; 0.81]	0.83%	0.83
k [0.14; 0.18 W/mk]	O aumento da temperatura reduz a condutividade térmica e o aumento de micro sílica aumenta a condutividade térmica.	

Fonte: Próprio Autor.

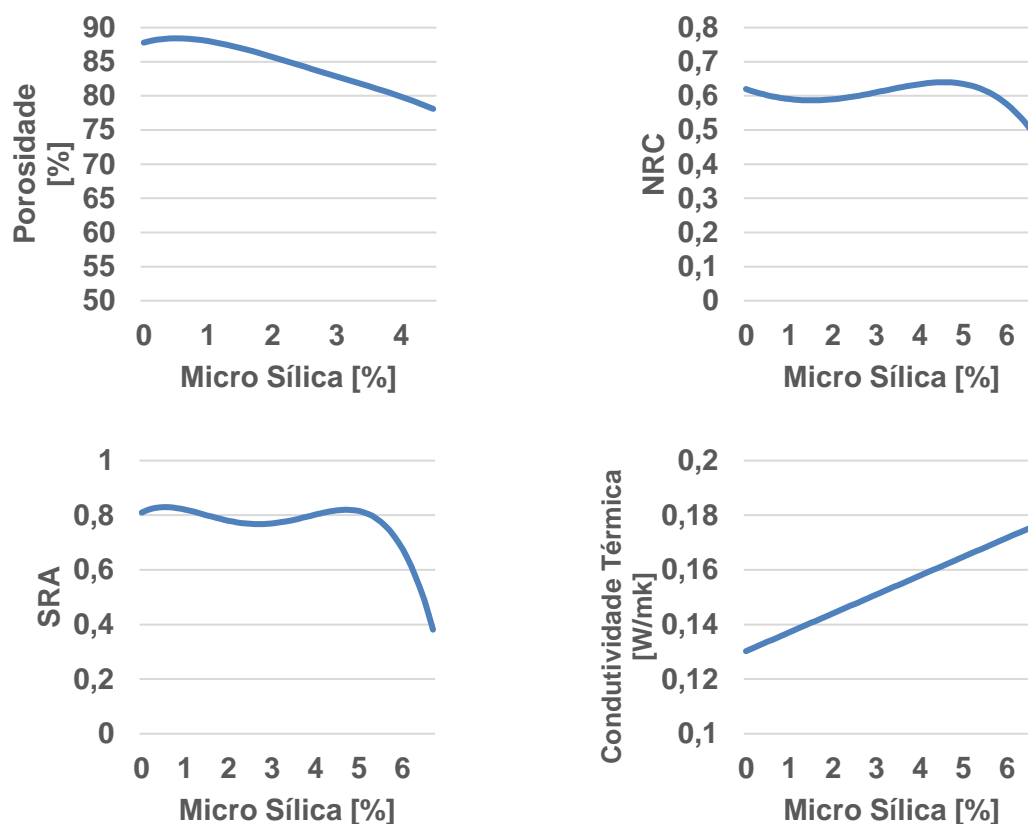
As figuras a seguir mostram os gráficos dos ajustes das propriedades mecânicas e físicas. Através destas figuras, é possível confirmar as conclusões tomadas acima. Para o ajuste da condutividade térmica, adotou-se uma temperatura de 50°C.

Figura 86: Representação dos melhores ajustes obtidos das propriedades mecânicas.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 87: Representação dos melhores ajustes obtidos das propriedades físicas.



Fonte: Próprio Autor.

Na Tabela 50 a seguir, são apresentados os resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas. As letras equivalentes mostram que a médias das propriedades são consideradas estatisticamente equivalentes, ou seja, comprovando se realmente houve acréscimo no valor das propriedades com o acréscimo de micro sílica.

Tabela 50: Resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas.

MS	ρ_v	$\sigma_{c.a}$	$\sigma_{c.d}$	σ_f	MOE
0,0	C	C	D	C	C
2,0	C	C e B	C	C e B	C
3,5	B	B	B	B	B
5,0	A	A	A	A	A

Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que: para a densidade aparente, a composição sem micro sílica e com 2% são consideradas estatisticamente equivalentes; para a compressão uniaxial, a composição sem micro sílica e com 2% são consideradas iguais, além das composições com 2% e 3,5% de micro sílica; para a compressão diametral, houve mudança na média em todas as porcentagens de micro sílica; para a flexão, foi notada a mesma conclusão da compressão uniaxial; e para o módulo de elasticidade, apenas a composição sem micro sílica é considerada igual a composição com 2% de micro sílica.

Na Tabela 51 a seguir, são apresentados os resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas.

Tabela 51: Resultados do teste de Tukey das propriedades físicas.

MS	ϕ	NRC	SRA	k
0,0	A	A	A	B
2,0	B	B	B	B
3,5	C	A	B	B
5,0	D	A	A	A

Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que: para a porosidade, todas as composições são consideradas de médias diferentes; para o NRC, todas as composições são consideradas iguais, exceto a composição com 2% de micro sílica; para o SRA, a composição sem micro sílica é considerada igual a composição com 5% e a composição com 2% é considerada igual a composição de 3,5%; e para a condutividade térmica, todas as composições são consideradas iguais, exceto pela composição com 5% de micro sílica.

5. CONCLUSÕES

Através da análise do planejamento experimental preliminar, algumas conclusões podem ser apresentadas:

- A influência do HPMC foi positiva quando se fala da absorção acústica, sendo que melhorou para frequências de 280 Hz a 1120 Hz. Já quando se analisa a resistência mecânica, este aditivo teve uma leve redução nas propriedades analisadas. Entretanto, pela redução ser pequena para as propriedades mecânicas, mas foi significativa para a absorção acústica, o HPMC foi adotado nas composições finais desta pesquisa;
- As relações água/gesso de 0,70 e 0,80 foram positivas, sendo que a primeira é melhor para as propriedades mecânicas e a segunda para as propriedades físicas (melhora a porosidade);
- A porcentagem de ácido utilizada, de 0,05%, obteve um tempo de trabalhabilidade ideal para moldar os corpos de prova. Lembrando que o tempo de cura foi obtido através do ensaio de ultrassom (150 minutos para o gesso poroso e 220 minutos para o gesso puro);
- Os corpos de prova podem ser secados a temperatura ambiente, levando em torno de uma semana para a secagem completa do material (quando a massa não sofre mais alteração); e
- A porcentagem de micro sílica utilizada neste experimento, de 0,5%, foi muito baixa, pois não alterou para as propriedades mecânicas do material.

Através da análise do planejamento experimental definitivo, algumas conclusões podem ser apresentadas:

- O espumante utilizado mostrou excelente efetividade na produção dos poros, resultando em um material com 87,88% de porosidade;
- A micro sílica mostrou grande efetividade nas propriedades mecânicas, em que triplicou a resistência à compressão uniaxial e, principalmente, não alterando as propriedades físicas (absorção acústica e condutividade térmica). Embora tenha reduzido para 75,10% a porosidade com 5% de micro sílica, a absorção acústica foi a mesma da composição sem micro sílica e a condutividade térmica teve um pequeno acréscimo;

- O ensaio de absorção acústica mostrou que a espuma de gesso desenvolvida nesta pesquisa possui maior efetividade comparando-se com a espuma de poliuretano. A vista disso, a espuma de poliuretano pode ser substituída pelas espumas de gesso em casas de show, por exemplo, evitando assim acidentes em que há propagação das chamas de fogo, como no caso citado anteriormente em Santa Maria;
- A condutividade térmica não foi tão eficaz quanto a absorção acústica. A espuma de gesso produzida nesta pesquisa possui melhor absorção acústica comparando-se com a espuma de gesso de Brencis et al. (2011) e a espuma de poliuretano. Entretanto, a sua condutividade térmica foi mais alta comparando-se com as espumas pesquisadas na revisão bibliográfica;
- É possível obter espumas de gesso com propriedades distintas com alterações pontuais nas porcentagens dos aditivos. Dessa forma, é possível produzir espumas de gesso para atender situações específicas, seja na condutividade térmica, absorção acústica ou resistência mecânica. Vale ressaltar que não foi possível determinar uma composição ótima que atenda todas as composições, principalmente devido o aumento da condutividade térmica com o acréscimo de micro sílica. O acréscimo de micro sílica melhorou as propriedades mecânicas e manteve a absorção acústica, mas piorou a condutividade térmica;
- Os modelos de regressão utilizados foram todos significativos, podendo assim estimar as propriedades em função da porcentagem de micro sílica e, no caso da condutividade térmica, em função da porcentagem de micro sílica e temperatura; e
- Não é possível encontrar uma porcentagem de micro sílica que atenda a todas as propriedades, determinando assim uma composição ótima. As porcentagens de micro sílica para tornar cada propriedade ótima está estipulada na Tabela 49: para resistência à compressão uniaxial, diametral, resistência à flexão, módulo de elasticidade e condutividade térmica, quanto maior a porcentagem de micro sílica, maior será estas propriedades; para a densidade é 6,3% de micro sílica; para porosidade é 0,53% de micro sílica, para o NRC é 4,45% de micro sílica; e para SRA é 0,83% de micro sílica.

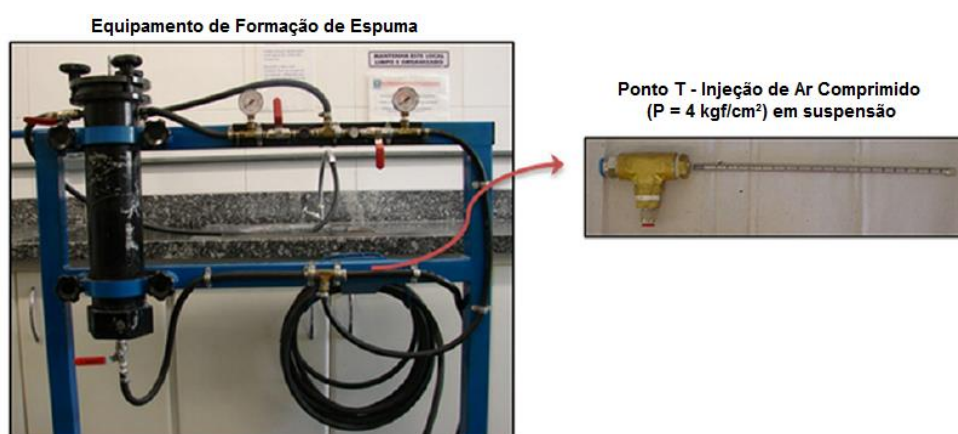
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- I. Analisar o uso da técnica mecânica desenvolvida por Salvini (2016), mostrado na Figura 88 a. Com esta técnica, desenvolvida para cerâmicas macro porosas e ainda não aplicada ao gesso, poderá ser possível produzir uma espuma de gesso de maior porosidade e melhor uniformidade dos poros, como pode ser visto na Figura 88 b. Com

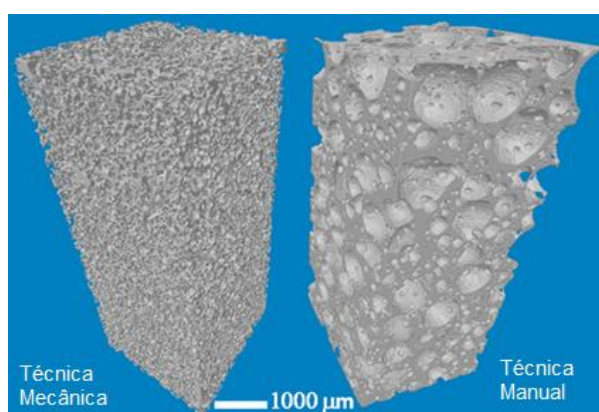
maior porosidade, poderá ter melhoras na absorção acústica e condutividade térmica. Já com a uniformidade dos poros, pode-se ter melhora na resistência mecânica;

- II. Analisar qual a melhor forma de curar o material; e
- III. Analisar novas porcentagens do aditivo espumante, pois o fabricante permite usar até 0,10% em relação à massa do gesso e utilizamos apenas 0,05%.

Figura 88: Método de formação de espuma direta, desenvolvido para produzir cerâmicas macro porosas.



(a)



(b)

Fonte Adaptado de Salvini et al. (2016).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLARD; J. F. Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials. **Elsevier Applied Science**. 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C496: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. 10 p., 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C133: Standard test methods for cold crushing strength and modulus of rupture of refractories. 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1161: Standard test method for flexural strength of advanced ceramics at ambient temperature. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1876: Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. 2007.

AHMADI, S; GITIPOUR, S.; MEHRDADI, N. Compressive strength development of solidified PAHs contaminated soil using cement and micro silica. **Nature Environment and Pollution Technology**, v. 15, n. 1, p. 103-106, 2016.

AKTHAR, F. K.; EVANS, J. R. G. High porosity (> 90%) cementitious foams. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 2, p. 352-358, 2010.

BIOT, M. A. **Acoust. Soc. Am.**, 28 p., 168, 1956.a.

BIOT, M. A. **Acoust. Soc. Am.**, 28 p., 179, 1956.b.

BO, Z.; TIANNING, C. Calculation of sound absorption characteristics of porous sintered fiber metal. **Applied Acoustics**, v. 70, p. 337-346, 2009.

BRENCIS, R.; SKUJANS, J.; ILJINS, U.; ZIEMELIS, I.; OSITS, N. Research on foam gypsum with hemp fibrous reinforcement. **Procedia Engineering**, v. 42, p. 496-500, 2012.

CHAMPOUX, Y.; ALLARD, J. F. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air saturated porous media. **Journal of Applied Physics**, v. 70, p. 1975-1979, 1991.

CHINDAPRASERT, P.; BOONSERM, K.; CHAIRUANGSRI, T.; VICHIT-VADAKAN, W.; EAIMSIN, T.; SATO, T. Plaster materials from waste calcium containing chemicals, organic fibers and inorganic additives. **Construct and Build Materials**, vol. 25, p. 3193-3203, 2011.

CSN 72 2301: Pastas de gesso. Classificação. Requisitos técnicos gerais. Métodos de teste. 1980.

CSN EN 13279-2: Gypsum binders and gypsum plasters - Part 2: Test methods. 2014.

ÇOLAK, A. Density and strength characteristics of foamed gypsum. **Cement & Concrete Composites**, ed. 22, p. 193-200, 2000.

DENG, Y.; LUO, J.; ZAI, D.; XUAN, L.; HAN, Z.; DAI, C.; XU, H.; FENG, M.; HE, G. Study of the retarding mechanism of citric acid during gypsum particleboard manufacturing. **Holzforschung**, vol. 62, o. 368-371, 2008.

DIÁRIO DE PERNAMBUCO. Disponível em: http://www.impresso.diariodepernambuco.com.br/app/noticia/especiais/2016/06/22/interna_especiais,147838/supremacia-pernambucana-na-producao.shtml. Acesso em > 12/12/2017.

DOUTRES, O.; ATALLA, N.; DONG, K. Effect of the microstructure closed pore content on the acoustic behavior of polyurethane foams. **Journal of Applied Physics**, v. 110, 2011.

ELKEM. A Bluestar Company. Disponível em > <https://www.elkem.com/no/elkem-silicon-materials/refractories/microsilica/microsilica-grade-971/>. Acesso em > 12/12/2017.

ELKEM. A Bluestar Company. Disponível em > <https://www.elkem.com/no/elkem-silicon-materials/refractories/microsilica/microsilica-grade-955/>. Acesso em > 12/12/2017.

EL-SUKKARY, M. M. A.; SYED, N. A.; AIAD, I.; EL-ZAB, W. I. M. Synthesis a characterization of some alkyl polyglycosides surfactants. **J Surfactants Deterg**, v. 11, p. 129-137, 2008.

EUROPEAN STANDARD. EN ISO 6946: Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method. Amd 1:2003. 1996.

EUROPEAN STANDARD. EN ISO 8894-1: Refractory materials - Determination of thermal conductivity - Part 1: Hot-wire methods (cross-array and resistance thermometer). 2010.

EUROPEAN STANDARD. EN ISO 11654: Acoustics -- Sound absorbers for use in buildings -- Rating of sound absorption. 1997.

GB/T 5486: Test methods for inorganic rigid thermal insulation. 2008.

GB/T 10294: Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot place apparatus. 2008.

GOGTAS, C.; UNLU, N.; ODABASI, A; SEZER, L.; ÇINAR, F.; GUNER, S.; GOLLER, G.; ERUSLU, N. Preparation and characterization of self-flowing refractory material containing 971U type micro silica. **Advances in Applied Ceramics**, vol. 109 (1), p. 6-11, 2010.

GRUPO HEME ISOLANTES. Disponível em> <http://www.hemeisolantes.com.br/la-de-vidro/la-de-vidro-sem-revestimento.html>. Acesso em> 23/10/2017.

HUANG, B.; ZHANG, Y.; LI, D. Study on the Influences of Foaming Gypsum's Performance. **Materials Science Forum**, vols. 743-744, p. 222-227, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10534: Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – part 1: method using standing wave ratio. 2002.

ISAR ISOLAMENTOS ACÚSTICOS. Disponível em> <http://www.isar.com.br/produtos/isolamento-acustico/la-de-rocha/paineis-ps-pse-psr/>. Acesso em> 21/11/2017.

ISERN, E. R.; MESSING, G. L. Direct foaming and seeding of highly porous, lightweight gypsum. **Journal and Material Research**, vol. 91, n. 15, p. 2244-2251, 2016.

JEON, C. K.; LEE, J. S.; CHUNG, H.; KIM, J. H.; PARK, J. P. A study on insulation characteristics of glass wool and mineral wool coated with a polysiloxane agent. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, 2017.

JOHNSON, D. L.; KOPLIK, J.; DASHEN, R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 176, p. 379-402, 2006

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Gesso de construção civil. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil**. São Paulo: Ibracon. P. 727-760, 2007.

JOST, L.; GERHART, S.; ALBERT, Z. **Foaming agent for plaster and cement compositions**. US Patent 3926650 A, 16 dez. 5 p., 1975.

KARNI, J.; KARNI, E. Gypsum in construction: origin and properties. **Materials and Structure**, p. 92-100, 1995.

KHALIL, A. A.; TAWFIK, A.; HEGAZY, A. A.; EL-SHAHAT, M. F. Effect of some waste additives on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 580-586, 2014.

LI, L.; LI, G. The preparation of fiber-reinforced foaming desulfurization gypsum. **Applied Mechanics and Materials**, v. 468, p. 28-31, 2014.

LOG ACÚSTICA. Disponível em> <http://logacustica.com/coeficientes-de-absorcao-sonora-sound-absorption-coefficients/>. Acesso em> 22/11/2017.

LVS 150: Gypsum building plaster - Definitions, requirements, tests, marking. 20 p. 1998.

MAFRA, M. P. A. **Desenvolvimento de infraestrutura para caracterização e análise de painéis acústicos**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Mecânica para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Universidade Federal do Pará. 143 p., 2004.

MAGRABI, S. A.; DLUGOGORSKI, B. Z.; JAMESON, G. J. Bubble size distribution and coarsening of aqueous foams. **Chemical Engineering Science**, v. 54, p. 4007-4022, 1999.

MITTAL, A.; AHMAD, R.; HASAN, I. Iron oxide-impregnated dextrin nanocomposite: synthesis and its application for the biosorption of Cr(VI) ions from aqueous solution. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, ed. 32, p. 15133-15145, 2016.

MONTGOMERY, D. C. Design and analysis of experiments. **John Wiley & Sons Inc.**, 6th edition, Arizona, 2005.

MUNHOZ, F. C.; RENOFIO, A. Uso da gipsita na construção civil e adequação para a P+L. **XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção - A energia que move a produção: um diálogo sobre integração, projeto e sustentabilidade**. Foz do Iguaçu, PR, 09 a 11 de outubro, 2007.

PATENT 4040850 A: Production of porous gypsum moldings. 1997.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. **Gesso: produção e utilização na construção civil**. 1ª edição. Recife: SEBRAE, p. 119, 2008.

PINI. Disponível em> <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/106/artigo286049-3.aspx>. Acesso em> 15/03/2017 as 19h40.

PREIKSS, I.; SKUJANS, J.; ILJINS, U. Possibilities of silica aerogel application for foam gypsum compositions. **3rd International Conference Civil Engineering**, 2013.

ROUSSEL, D.; LICHTNER, A.; JAUFFRÈS, D.; VILLANOVA, J.; BORDIA, R. K.; MARTIN, C. L. Strength of hierarchically porous ceramics: Discrete simulations on X-ray nanotomography images. **Scripta Materialia**, v. 113, p. 250-253, 2016.

Sachse, W.; Pao, Y. H. On the determination of the phase and group velocities of dispersive waves in solids. **Journal of Applied Physics**, v. 49, p. 4320–4328, 1978.

SALVINI, V. R.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, I. R. de; PANDOLFELLI, V. C. Agente espumante e seus efeitos nas propriedades físicas de alumina porosa. **Cerâmica**, ed. 52, p. 57-62, 2006.

SALVINI, V. R.; LASSO, P. R. O.; LUZ, A. P.; PANDOLFELLI, V. C. Nontoxic Processing of Reliable Macro-Porous Ceramics. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 13, p. 522-531, 2016.

SILVA, A. R. da; CECOM, P. R.; RÊGO, E. R. do; NASCIMENTO, M. Avaliação do coeficiente de variação experimental para caracteres de frutos de pimenteirias. **Revista Ceres**, v. 58, n. 2, p. 168-171, 2011.

SKUJANS, J.; VULANS, A.; ILJINS, U.; ABOLTINS, A. Measurements of heat transfer of multi-layered wall construction with foam gypsum. **Applied Thermal Engineering**, ed. 27, p. 1219-1224, 2007.

SOUZA, L. M. de. Compósito a base de gesso e EPS para fabricação de casas populares. 17º CBECI Mat – **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais**, Foz do Iguaçu, PR. 15 a 19 de novembro, 2006.

TURKISH STANDARDIZATION. TS 370: Gypsum building plasters. TSE, Ankara, 1989.

UMPONPANARAT, P.; WANSOM, S. Thermal conductivity and strength of foamed gypsum formulated using aluminum sulfate and sodium bicarbonate as gas-producing additives. **Materials and Structures**, v. 49, p. 1115-1125, 2016.

VIMMROVA, A.; KEPPERT, M. SVOBADA, L.; CERNY, R. Lightweight gypsum composites: design strategies for multi-functionality. **Cement and Concrete Composites**, ed. 33, p. 84-89, 2011.

VIMMROVÁ, A. New type of lightweight gypsum-based material. **Advanced Materials Research**, v. 982, p. 108-113, 2014.

WANG, H.; LIU, B.; YUAN, K.; DUAN, W.; YANG, F.; GUO, J. Research on the Performance of Plaster Material by Chemical Foaming Method. **Advanced Materials Research**, v. 830, p. 435-438, 2014.

WANG, J.; LIANG, Y.; YIN, Y.; ZHAO, L.; CAI, M.; NIE, J. Enhancing the green mechanical strength of colloidal silica-bonded alumina castables using a silane coupling agent. **Ceramics International**, v. 49, ed. 9, p. 11496-11499, 2016.