

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MIRIÃ PEREIRA DOS SANTOS GRENZEL

**CONCRETO CELULAR DE DIFERENTES DENSIDADES: EFEITO DA GOMA
XANTANA COMO ESTABILIZADOR DE ESPUMA E DE FIBRAS DE
POLIPROPILENO**

**Alegrete
2023**

MIRIÃ PEREIRA DOS SANTOS GRENZEL

**CONCRETO CELULAR DE DIFERENTES DENSIDADES: EFEITO DA GOMA
XANTANA COMO ESTABILIZADOR DE ESPUMA E DE FIBRAS DE
POLIPROPILENO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia da Universidade Federal do Pampa como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Materiais e Estruturas.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Fernanda Bianchi Pereira da Costa

Coorientador: Prof. Dr. Ederli Marangon

**Alegrete
2023**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

G828c Grenzel, Miriã Pereira dos Santos
CONCRETO CELULAR DE DIFERENTES DENSIDADES: EFEITO DA GOMA
XANTANA COMO ESTABILIZADOR DE ESPUMA E DE FIBRAS DE
POLIPROPILENO / Miriã Pereira dos Santos Grenzel.

147 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2023.

"Orientação: Fernanda Bianchi Pereira da Costa".

1. Concreto Celular. 2. Fibra de Polipropileno. 3. Goma
Xantana. I. Título.

MIRIÃ PEREIRA DOS SANTOS GRENZEL

CONCRETO CELULAR DE DIFERENTES DENSIDADES: EFEITO DA GOMA XANTANA COMO ESTABILIZADOR DE ESPUMA E DE FIBRAS DE POLIPROPILENO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia dos Materiais e Meio Ambiente.

Dissertação defendida e aprovada em: 11 de agosto de 2023.

Banca examinadora:

Profa. Dra. Fernanda Bianchi Pereira da Costa

Orientadora

(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Ederli Marangon

Co-orientador

(UNIPAMPA)

Prof. Dr. André Lübeck

(UFSM)

Prof. Dr. Luiz Eduardo Kostascki
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/08/2023, às 13:29, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDERLI MARANGON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/08/2023, às 15:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO KOSTESKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/08/2023, às 15:25, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **André Lübeck, Usuário Externo**, em 11/08/2023, às 15:53, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1208211** e o código CRC **011C2282**.

Aos meus pais, Luis e Sandra, e ao meu esposo, Lucas, com muito amor e carinho.

AGRADECIMENTO

À Deus, autor e consumidor da nossa fé. Agradeço pelo dom da vida, pela minha família e pelos amigos maravilhosos que me proporcionou, pela sua proteção e amparo, meu socorro bem presente na hora da angústia, fortalecendo-me para assim continuar minha caminhada.

Aos meus pais, Sandra e Luís, meus tesouros na terra, obrigada pelos ensinamentos, cuidado, proteção e preparo para a vida. Vocês são meus maiores exemplos de fé, determinação, honestidade, amor e respeito. Nunca mediram esforços para me auxiliar em todas as áreas da vida, tornando meus sonhos concretos. Reconheço e sou eternamente grata a vocês por tudo.

Ao meu esposo, Lucas, meu melhor amigo e companheiro de todas as horas, obrigada pelo apoio e compreensão, a você o meu amor.

Aos meus avós, Aparício, Maria Emília, Alberto (in memorian), Júlia (in memorian), obrigada pelas orações, momentos e ensinamentos compartilhados, amo vocês.

Aos demais familiares, agradeço pelas orações, momentos de risos e pelo apoio em vários momentos de minha vida, todos moram em meu coração.

Aos meus amigos, vocês têm um espaço enorme em meu coração e me fazem acreditar que amigos verdadeiros existem.

A minha orientadora e amiga, Dra. Fernanda Bianchi Pereira da Costa, por todo conhecimento compartilhado, pela disponibilidade, paciência e auxílio em todas as etapas deste trabalho. Toda minha gratidão e admiração.

Ao meu coorientador Dr. Ederli Marangon, por compartilhar seu conhecimento, contribuindo com a qualidade deste trabalho. A você minha gratidão.

Aos laboratoristas do LEMAC, Raquel e Marcelo, por me auxiliarem nos ensaios laboratoriais. A vocês minha gratidão.

As empresas, Neomatex, Quero-Quero e Celublock, por terem doado os materiais para a realização da presente pesquisa.

Ao professor Telmo, por ter viabilizado a doação das fibras de polipropileno.

Aos bolsistas e amigos Bruna Tamiosso e Ian Mota, obrigada pelo auxílio e companheirismo durante a realização da etapa experimental deste trabalho. A você minha gratidão.

Aos alunos da graduação e pós-graduação, Luan, Leiara, Thiago e Rubens, obrigada por toda ajuda.

A todos os professores, agradeço pela nobreza de compartilharem seu conhecimento.

A CAPES pela bolsa de estudos que possibilitou a minha dedicação total a esta pesquisa.

”És fiel em todo tempo, em todo tempo tu
és bom, tão bom, com todo o fôlego que
tenho, eu cantarei da bondade de Deus.”

Isaías Saad

RESUMO

O concreto celular é um material cimentício de estrutura porosa e com baixa densidade, resultante do endurecimento de uma mistura constituída por aglomerantes, agregados miúdos e poros de ar. Uma das formas de inserção dos poros de ar é através de uma espuma pré-formada. A espuma é composta por bolhas de ar, as quais influenciam o comportamento do concreto celular espumoso tanto no estado fresco como no estado endurecido. Trabalhos recentes propuseram a utilização de Goma Xantana (XG) como agente espessante da espuma, e verificaram que XG aumentou a estabilidade e a qualidade da mesma como também proporcionou melhorias de desempenho do concreto celular no estado endurecido. No entanto, o funcionamento da XG e de diferentes dosagens ainda não está esclarecido. Da mesma forma, alguns pesquisadores sugeriram a inserção de fibras a fim de proporcionar um melhor comportamento mecânico e de durabilidade ao concreto celular espumoso. Entre as fibras sintéticas utilizadas como reforço de materiais cimentícios, destaca-se a fibra de Polipropileno (PP). A PP proporciona alguns benefícios, como aumento da capacidade de resistência à flexão e à tração, melhor comportamento pós-fissuração e redução da retração por secagem. Contudo, a utilização de PP acarreta na geração de poros adicionais, ocasionando maior conectividade entre os poros, bem como propiciando a formação de zonas de transição frágeis entre a matriz e a fibra. Todavia, não está esclarecido como PP se comporta em diferentes densidades. Assim, este trabalho apresenta um estudo da influência da Goma Xantana na qualidade da espuma pré-formada, bem como nas propriedades físicas e mecânicas do concreto celular espumoso no estado endurecido. Além do mais, este estudo verifica se a estabilidade proporcionada pela Goma Xantana minimiza as dificuldades encontradas em decorrência da utilização da PP no concreto celular. Foram avaliadas amostras com duas densidades diferentes, 800 Kg/m³ e 1200 Kg/m³. O teor de Goma Xantana foi avaliado em função do teor do agente espumante utilizado para a fabricação da espuma. A composição que proporcionou melhor qualidade da espuma foi 2% de XG. No concreto celular, a adição de XG mostrou-se mais eficiente para a amostra com densidade alvo de 800 Kg/m³, pois em decorrência a maior estabilidade proporcionada a espuma, ocorreu um menor índice de vazios, como também uma maior distribuição de poros menores, menor interconectados e tendendo a uma forma circular. Da mesma forma, a Goma Xantana promoveu um aumento da densidade, sucedendo em uma maior resistência média à compressão e à tração na flexão, com pequeno aumento da condutividade térmica e da retração por secagem. Em relação a adição de PP, a mesma também apresentou maior relevância para as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³, pois reduziu a retração por secagem e proporcionou maior capacidade de resistência mecânica por meio do efeito de ponte de tensões, porém proporcionou poros de formato irregulares a mistura. Por fim, ao utilizar conjuntamente XG e PP, é evidente para as amostras de 800 Kg/m³ que as mesmas promoveram uma maior distribuição poros menores, tendendo a forma circular, o que consequentemente possibilitou melhores propriedades físicas e mecânicas ao concreto celular.

Palavras-chave: Concreto celular espumoso, Goma Xantana, Fibra de Polipropileno

ABSTRACT

Cellular concrete is a cementitious material with a porous structure and low density, resulting from the hardening of a mixture composed of binders, fine aggregates and air pores. One way of inserting the air pores is through a preformed foam. Foam is composed of air bubbles, which influences the behavior of foamed cellular concrete both in the fresh and in the lasting state. Recent work has proposed the use of Xanthan Gum (XG) as a foam thickening agent, and found that XG increased its stability and quality, as well as implemented improvements in the performance of cellular concrete in the resisted state. However, the functioning of XG and different dosages is still unclear. Likewise, some researchers have suggested the insertion of fibers in order to provide better mechanical behavior and durability to foamed cellular concrete. Among the synthetic fibers used to reinforce cementitious materials, Polypropylene (PP) fiber stands out. PP provides some benefits, such as increased flexural and tensile strength, better post-cracking behavior and reduced drying shrinkage. However, the use of PP leads to the generation of additional pores, causing greater connectivity between the pores, as well as favoring the formation of fragile transition zones between the matrix and the fiber. However, it is not clear how PP behaves at different densities. Thus, this work presents a study of the influence of Xanthan Gum on the quality of preformed foam, as well as on the physical and mechanical properties of foamed cellular concrete in the hardened state. Furthermore, this study verifies whether the stability provided by Xanthan Gum minimizes the difficulties encountered as a result of the use of PP in cellular concrete. Samples with two different densities, 800 Kg/m³ and 1200 Kg/m³ were evaluated. The Xanthan Gum content was evaluated according to the content of the foaming agent used to manufacture the foam. The composition that provided better foam quality was 2% XG. In cellular concrete, the addition of XG proved to be more efficient for the sample with a target density of 800 kg/m³, because due to the greater stability provided to the foam, there was a lower void ratio, as well as a greater distribution of smaller pores, smaller interconnected and tending to a circular shape. Likewise, Xanthan Gum promoted an increase in density, resulting in a greater average resistance to compression and traction in flexion, with a small increase in thermal conductivity and shrinkage on drying. Regarding the addition of PP, it was also more relevant for samples with a target density of 800 kg/m³, as it reduced drying shrinkage and provided greater mechanical strength through the stress bridge effect, but provided pores of irregular shapes the mixture. Finally, when using XG and PP together, it is evident for the 800 Kg/m³ samples that they promoted a greater distribution in smaller pores, tending to a circular shape, which consequently allowed better physical and mechanical properties to cellular concrete.

Keywords: Foamy Cellular Concrete. Xanthan Gum. Polypropylene Fiber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transmitância de sistemas de vedações	22
Figura 2 – Pantheon de Roma	24
Figura 3 – Classificação do Concreto Celular	27
Figura 4 – Representação esquematizada da estrutura das espumas	29
Figura 5 – Ensaio de Estabilidade das espumas: a) Espuma proteica e b) Espuma sintética	31
Figura 6 – Efeito da utilização de Goma Xantana na drenagem de espumas	32
Figura 7 – Efeito da utilização de Goma Xantana no tamanho das lamelas	33
Figura 8 – Resultado da utilização de Goma Xantana: a) Drenagem e b) Densidade e múltiplo de espuma	34
Figura 9 – Organograma simplificado em ordem cronológica dos estudos	41
Figura 10 – Curva granulométrica do cimento	42
Figura 11 – Curva granulométrica da areia.	43
Figura 12 – Agente espumante	44
Figura 13 – Goma Xantana.	44
Figura 14 – Microfibras de polipropileno	45
Figura 15 – Processo de geração da espuma	46
Figura 16 – Geração da espuma: a) Gerador de espuma e b) Espuma.	46
Figura 17 – Agitador magnético	47
Figura 18 – Bola utilizada para determinar a resistência da espuma: a) Massa e b) Diâmetro.	48
Figura 19 – Método de mistura: a) realização da argamassa b) Inserção das fibras c) Inserção da espuma	52
Figura 20 – Ensaio de absorção de água por capilaridade	55
Figura 21 – Ensaio de estabilidade através da coluna vertical	56
Figura 22 – Equipamento LaserComp modelo FOX 304 para verificar a condutividade térmica	57
Figura 23 – Ensaio de retração: a) Equipamento b) Leitura da retração	58
Figura 24 – Pintura estocástica	60
Figura 25 – Densidade das composições	61
Figura 26 – Drenagem: a) Drenagem média das espumas b) Drenagem normalizada.	62
Figura 27 – Resistência das espumas	64
Figura 28 – Imagens analisadas no microscópio óptico	65
Figura 29 – Tamanho médio das bolhas de espuma	65
Figura 30 – Análise microscópica: a) Dimensão do filme líquido b) Membrana das bolhas	67
Figura 31 – Regressão linear	69
Figura 32 – Densidade alvo de 800 kg/m ³ : densidades obtidas no a) estado fresco b) estado endurecido	70
Figura 33 – Densidade: a) estado fresco b) estado endurecido	72
Figura 34 – Absorção de água por capilaridade: a) 800 Kg/m ³ b) 1200 Kg/m ³	74
Figura 35 – Ascensão de água em cm – 800 Kg/m ³ : média (desvio padrão)	76
Figura 36 – Ascensão de água em cm – 1200 Kg/m ³ : média (desvio padrão)	77
Figura 37 – Índices Físicos: a) 800 Kg/m ³ b) 1200 Kg/m ³	79

Figura 38 – Análise em MEV para as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m ³	82
Figura 39 – Análise em MEV para as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m ³	83
Figura 40 – Altura de concretagem da coluna vertical (800 kg/m ³ e 1200 kg/m ³)	84
Figura 41 – Índices físicos (coluna vertical) – densidade alvo de 800 Kg/m ³	85
Figura 42 – Índices físicos (coluna vertical) – densidade alvo de 1200 Kg/m ³	86
Figura 43 – Condutividade térmica: (a) 800 Kg/m ³ (b) 1200 Kg/m ³	87
Figura 44 – Valores médios de retração por secagem: (a) 800 Kg/m ³ (b) 1200 Kg/m ³	90
Figura 45 – Resistência à tração na flexão: a) 800 Kg/m ³ b) 1200 Kg/m ³	93
Figura 46 – Processo de fissuração através do DIC – Densidade alvo de 800 Kg/m ³	96
Figura 47 – Processo de fissuração através do DIC – Densidade alvo de 1200 Kg/m ³	97
Figura 48 – Resistência à compressão em corpos de prova prismáticos: a) 800 Kg/m ³ b) 1200 Kg/m ³	99
Figura 49 – Resistência à compressão: a) 800 Kg/m ³ b) 1200 Kg/m ³	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Transmitância térmica para paredes externas	21
Tabela 2 – Condutividade térmica de materiais frequentemente utilizados em vedações	22
Tabela 3 – Requisitos estabelecidos na NBR13438/2021	23
Tabela 4 – Categorias do concreto quanto a massa específica seca	23
Tabela 5 – Síntese sobre os resultados obtidos através da inserção de fibra em concreto celular espumoso	39
Tabela 6 – Caracterização da areia natural	43
Tabela 7 – Características da microfibras de polipropileno	45
Tabela 8 – Composição das espumas na primeira etapa	47
Tabela 9 – Traços unitário	50
Tabela 10 – Traços com o consumo de materiais para a produção de 1m ³	51
Tabela 11 – Ensaio realizados	53
Tabela 12 – Teste de Tukey para a drenagem das espumas	63
Tabela 13 – Faixa de distribuição dos tamanhos das bolhas de espuma	65
Tabela 14 – Teste de Tukey para o tamanho médio das bolhas	66
Tabela 15 – Teste de Tukey para o filme líquido	67
Tabela 16 – Teste de Tukey para a membrana das bolhas	68
Tabela 17 – Teste de Tukey para a densidade aos 28 dias das amostras com densidade alvo de 800 Kg/m ³	71
Tabela 18 – Teste de Tukey para a densidade aos 28 dias das amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m ³	73
Tabela 19 – Teste de Tukey para a absorção de água por capilaridade das amostras com densidade alvo de 800 Kg/m ³	75
Tabela 20 – Teste de Tukey para a absorção de água por capilaridade das amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m ³	75
Tabela 21 – Teste de Tukey para a ascensão de água das amostras com densidade alvo de 800 Kg/m ³	76
Tabela 22 – Teste de Tukey para a ascensão de água das amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m ³	78
Tabela 23 – Teste de Tukey para a absorção de água por imersão e índice de vazios aos 28 dias das amostras com densidade alvo de 800 Kg/m ³	80
Tabela 24 – Teste de Tukey para a absorção de água por imersão e índice de vazios aos 28 dias das amostras com densidade alvo de 800 Kg/m ³	81
Tabela 25 – Teste de Tukey para a condutividade térmica das amostras com densidade alvo de 800 Kg/m ³	88
Tabela 26 – Teste de Tukey para a condutividade térmica das amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m ³	89
Tabela 27 – Teste de Tukey para a retração por secagem das amostras com densidade alvo de 800 Kg/m ³	91
Tabela 28 – Teste de Tukey para a retração por secagem das amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m ³	92
Tabela 29 – Teste de Tukey para a resistência média à tração na flexão para as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m ³ , aos 7 dias e 28 dias.	94

Tabela 30 – Teste de Tukey para a resistência média à tração na flexão para as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m ³ , aos 7 e 28 dias . . .	95
Tabela 31 – Duração média das tensões Traços 800 Kg/m ³	96
Tabela 32 – Duração média das tensões Traços 1200 Kg/m ³	97
Tabela 33 – Teste de Tukey para a resistência média à compressão para as amostras prismáticas com densidade alvo de 800 Kg/m ³ , aos 7 dias e 28 dias.	100
Tabela 34 – Teste de Tukey para a resistência média à compressão para as amostras prismáticas com densidade alvo de 1200 Kg/m ³ , aos 7 e 28 dias	100
Tabela 35 – Teste de Tukey para a resistência média à compressão cilíndrica para as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m ³ , aos 7 dias e 28 dias.	103
Tabela 36 – Teste de Tukey para a resistência média à compressão para as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m ³ , aos 7 e 28 dias . . .	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

a/c – Relação água/cimento

cm - Centímetro

Cp – Corpo de prova

CPV-ARI RS – Cimento Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos

DIC – Correlação digital de imagem

g – Grama

g/cm² – Grama por centímetro quadrado

Kg/m³ – Quilograma por metro cúbico

KN – QuiloNewton

L – Litro

MPa – Mega Pascal

m – Metro

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

min – Minuto

ml - Mililitro

mm – Milímetro

mm² – Milímetro quadrado

mm/s – Milímetro por segundo

NBR – Norma Brasileira

N/s – Newton por segundo

μm – Micrômetro

PP – Polipropileno

PET – Polietileno tereftalato

px –Píxel

RS – Rio Grande do Sul

SP – São Paulo

SVVIE – Sistema de vedações internas e externa

XG – Goma Xantana

W/m.K – Watt por metro Kelvin

W/m².K – Watt por metro quadrado kelvin

°C – Graus Ceusius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivos	20
1.1.1	Objetivo geral	20
1.1.2	Objetivos específicos	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Requisitos normativos para vedações	21
2.2	Concreto Celular	23
2.3	Uso de agente espumante para fabricação de concreto celular espumoso	28
2.4	Uso de fibras em concreto celular espumoso	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	Materiais	42
3.1.1	Cimento Portland	42
3.1.2	Areia	42
3.1.3	Agente espumante	43
3.1.4	Goma Xantana	44
3.1.5	Microfibra de polipropileno	45
3.2	Programa experimental	45
3.2.1	Produção e avaliação da espuma pré-formada	46
3.2.2	Confecção do concreto celular: traço, mistura, moldagem e cura	49
3.2.3	Densidade do concreto celular	54
3.2.4	Absorção de água por capilaridade	54
3.2.4.1	Absorção de água por imersão e Índices de Vazios	55
3.2.5	Estabilidade do concreto celular espumoso através da coluna vertical	56
3.2.6	Condutividade Térmica	56
3.2.7	Retração por secagem	57
3.2.8	Resistência à tração na flexão e compressão de corpos de prova prismáticos	58
3.2.9	Resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos	60
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
4.1	ETAPA 1: Avaliação da estabilidade da espuma pré-formada	61
4.2	ETAPA 2: Concreto celular espumoso	70
4.2.1	Densidade	70
4.2.2	Absorção de água por capilaridade	73
4.2.3	Absorção de água por imersão e índice de vazios	78
4.2.4	MEV	82
4.2.5	Estabilidade do concreto celular espumoso através da coluna vertical	83
4.2.6	Condutividade térmica	86
4.2.7	Retração por secagem	89
4.3	Resistência Mecânica	92
4.3.1	Resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos	92

4.3.2	Resistência à compressão em corpos de prova prismáticos	98
4.3.3	Resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos	101
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
5.1	Conclusões	106
5.2	Sugestões de Trabalhos futuros	108
	REFERÊNCIAS	109
	APÊNDICE A – RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA ESPUMA PRÉ-FORMADA	115
	APÊNDICE B – RESULTADOS DA DENSIDADE NO ESTADO ENDURECIDO	120
	APÊNDICE C – RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	121
	APÊNDICE D – RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS	122
	APÊNDICE E – RESULTADOS DE ESTABILIDADE DO CONCRETO CELULAR ESPUMOSO ATRAVÉS DA COLUNA VERTICAL	123
	APÊNDICE F – RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA .	125
	APÊNDICE G – RESULTADOS DE RETRAÇÃO	133
	APÊNDICE H – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	141
	APÊNDICE I – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS	143
	APÊNDICE J – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS	145

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é um dos setores que mais utiliza recursos naturais, sendo responsável por cerca de 32% do consumo de energia e 30% das emissões globais de gases do efeito estufa (VORSATZ *et al.*, 2015). Atualmente, existe uma grande preocupação em preservar o meio ambiente, evitando a exploração de recursos naturais, a contaminação do solo e da água, como também, as emissões de CO₂ para a atmosfera. Profissionais ligados ao setor da construção civil, possuem o desafio de atuar com práticas ecológicas, bem como implementar soluções que apresentem um bom desempenho frente as necessidades da população. Tendo em vista essas preocupações, há a necessidade de produção de materiais inovadores e sustentáveis.

Em 2013, foi instituída a NBR 15.575 (ABNT, 2021b), a norma de desempenho das edificações, a qual foi atualizada em 2021. A referida norma estabelece requisitos mínimos de habitabilidade durante o uso dos edifícios, entre eles, o conforto térmico. De acordo com Guitarrapa (2022), o território brasileiro está localizado, em sua maior parte, na Zona Tropical, onde há a maior incidência de calor ao longo do ano. Visando melhorar o desempenho térmico nas edificações, o uso de equipamentos para aquecimento ou resfriamento, se tornou uma necessidade para a população.

Com base nos dados fornecidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo de energia elétrica no Brasil, triplicou entre 2005 e 2017 (LUNA, 2022), e a maior parte do consumo de energia é atribuído aos equipamentos condicionadores de ar (VORSATZ *et al.*, 2015). No ano de 2021, o Brasil teve a pior crise hídrica em 90 anos, ocasionando também uma crise energética, conseqüentemente aumentando o valor da bandeira tarifária, o que gera um aumento nas contas de energia elétrica (MALAR, 2022). Uma solução frente aos problemas relacionados ao conforto térmico e ao alto consumo de energia elétrica, é a utilização de materiais de vedação com melhores propriedades térmicas, como por exemplo painéis ou blocos de concreto celular espumoso.

O concreto celular espumoso é um tipo de concreto leve, composto por cimento, água, bolhas de ar, podendo ou não possuir agregados miúdos (FERREIRA; TEZUKA, 1987). Ele possui muitas vantagens de aplicação, como baixa densidade, baixo teor de cimento Portland, aumento de produtividade, diminuição do peso estrutural, destacando-se como bom isolante térmico, entre outros (RAMAMURTHY; NAMBIAR; RANJANI, 2009; MYDIN; WANG, 2012; CHICA; ALZATE, 2019).

De acordo com Hou *et al.* (2021), a inserção de bolhas de ar na estrutura interna do concreto celular espumoso é que proporciona a redução da densidade e da condutividade térmica. Os poros de ar ocupam de 10 a 90% em volume do concreto celular endurecido, os quais possuem alta relação com as propriedades mecânicas

do mesmo, pois as bolhas prejudicam a resistência mecânica do compósito. Além disso, Sun *et al.* (2018) abordam sobre a instabilidade das bolhas de ar na espuma pré-formada, durante o estado fresco. Segundo Ramamurthy, Nambiar e Ranjani (2009), a instabilidade prejudica as propriedades do concreto celular no estado endurecido como resistência mecânica, absorção de água e retração por secagem. Assim, alguns autores utilizaram materiais modificadores de viscosidade (HAJIMOHAMMADI; NGO; MENDIS, 2018; ZHU *et al.*, 2020), para estabilizar a espuma pré-formada e proporcionar uma maior resistência a bolha, e assim obter melhores propriedades do concreto celular no estado endurecido.

Ainda visando melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto celular, alguns pesquisadores sugeriram a adição de fibras, a fim de proporcionar um comportamento dúctil, e melhorar propriedades como resistência à flexão, módulo de tenacidade e retração por secagem. Algumas fibras utilizadas são fibras de carbono, fibras de aço, fibras de polipropileno, entre outras (DAWOOD *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2019; BATOOL; BINDIGANAVILE, 2020c).

Entre as fibras sintéticas utilizadas como reforço de materiais cimentícios, a fibra de polipropileno vem sendo empregada em larga escala, pois diferente de outras fibras sintéticas, as mesmas são produzidas no Brasil e acarretam em um baixo investimento ao compósito. Alguns autores elencam alguns de seus benefícios ao concreto celular espumoso, entre eles o aumento da capacidade de resistência à tração (WANG *et al.*, 2019; AMRAN *et al.*, 2020) e à flexão (DAWOOD *et al.*, 2018; FALLIANO *et al.*, 2018), maior módulo de elasticidade (DAWOOD *et al.*, 2018), baixa retração por secagem (FALLIANO *et al.*, 2019; AMRAN *et al.*, 2020), como também melhor comportamento pós-fissuração devido a fibra atuar como ponte de tensões, costurando as fissuras do concreto celular espumoso (WANG *et al.*, 2019). Entretanto, a inserção da fibra de polipropileno gera algumas dificuldades no concreto celular espumoso, como por exemplo a menor trabalhabilidade. Além disso, a PP altera a estrutura de poros, propiciando a criação de poros adicionais, e de diferentes diâmetros, principalmente em densidades mais elevadas. Destaca-se também que ao gerar poros adicionais na matriz, a fibra acarreta em maior conectividade dos poros, facilitando a percolação de agentes patogênicos tais como cloretos, sulfatos e CO₂ no concreto celular espumoso, bem como propiciando a formação de zonas de transição críticas entre a fibra e a matriz, diminuindo a durabilidade e as propriedades mecânicas do concreto celular espumoso (DAWOOD *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2019; BATOOL; BINDIGANAVILE, 2020a; AMRAN *et al.*, 2020; GENCEL *et al.*, 2021b).

Em face destas considerações, ainda não está esclarecido como a fibra PP se comporta em diferentes densidade, como também na presença de um agente estabilizador de espuma. Com o intuito de produzir um compósito de concreto celular durável, primeiramente se propõem verificar a estabilidade da espuma com o uso de

goma xantana, pois há indícios que a mesma proporciona uma melhor qualidade a espuma bem como uma melhor estrutura de poros no estado endurecido do concreto celular espumoso. Deseja-se utilizar a fibra de polipropileno como reforço da matriz cimentícia leve, para isto, é importante que a estrutura de poros tenha uma melhor qualidade. Ao obter uma estrutura de poros mais estável e resistente, é possível que a mesma minimize as dificuldades ocasionadas pela inserção da fibra. Por fim, este trabalho propõem-se estudar se ao estabilizar a espuma com Goma Xantana é possível minimizar os contratempos ocasionados pela inserção da fibra de polipropileno. Os compósitos produzidos serão avaliados através do desempenho térmico, físico e mecânico.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um concreto celular espumoso leve com adição de goma xantana e micro fibra de polipropileno, e avaliar suas propriedades físicas, térmicas e mecânicas.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral desta pesquisa, o trabalho divide-se em atender os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a qualidade e estabilidade da espuma pré-formada com a utilização de diferentes teores de Goma Xantana, a fim de obter o teor de melhor desempenho para produção dos concretos;
- Verificar a estrutura de poros no estado endurecido do concreto celular espumoso (com e sem fibra de polipropileno e em diferentes densidades) a fim de estimar as melhorias proporcionadas pela Goma Xantana em comparação a uma mistura de referência;
- Comparar os efeitos individuais e combinados da fibra de polipropileno e goma xantana na retração por secagem do concreto celular espumoso em diferentes densidades;
- Avaliar o desempenho térmico dos compósitos com Goma Xantana e micro fibra de polipropileno, através do ensaio de condutividade térmica;
- Verificar o desempenho mecânico por meio dos ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão dos compósitos celulares produzidos com Goma Xantana e microfibras de polipropileno.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordado o estado da arte e conceitos fundamentais com base em produções acadêmicas desenvolvidas sobre a mesma temática, em áreas semelhantes ou paralelas ao desenvolvido neste trabalho. Esta dissertação tem como foco o uso de concreto celulares como elemento de vedação leve. Assim, este item será dividido em requisitos mínimos para vedações, características e tipos de concreto leve, bem como o sobre o uso de fibras para melhora de suas propriedades.

2.1 Requisitos normativos para vedações

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) preconiza algumas normativas que estabelecem requisitos mínimos de qualidade para o sistema de vedações verticais internas e externas (SVVIE), como também de seus componentes. Entre essas normas, é possível citar a norma de desempenho, NBR 15575-1 (ABNT, 2021b), a qual prescreve requisitos normativos que visam a satisfação do cliente em relação a segurança, qualidade e sustentabilidade. Esses requisitos dizem respeito a características que a edificação e seus sistemas devem apresentar de modo que as exigências dos usuários sejam atendidas. No que concerne ao SVVIE, a parte 4 da referida norma (ABNT, 2021a) aborda especificamente sobre os seus requisitos mínimos de desempenho. Todavia, após a revisão, a norma de desempenho passou a ter um rol informativo, não citando tipos de materiais, mas sim as propriedades que esses materiais devem possuir. De forma geral, o SVVIE deve proporcionar bom isolamento térmico e acústico, estanqueidade à água, bem como capacidade de resistir a esforços ocasionados pelo uso e pela fixação de peças suspensas, entre outros.

Em relação ao desempenho térmico, a NBR 15575-4 (ABNT, 2021a) aborda que as paredes externas devem possuir valor de transmitância térmica conforme o enquadramento no zoneamento bioclimático estabelecido na NBR 15220-3 (ABNT, 2005c), conforme apresenta a Tabela 1. De acordo com a NBR 15220-3 (ABNT, 2005c), o Brasil possui 8 zoneamentos bioclimáticas. O Rio Grande do Sul encontra-se nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, caracterizadas por invernos muito frios e verões muito quentes.

Tabela 1 – Transmitância térmica para paredes externas

Zonas bioclimáticas 1 e 2	Zonas bioclimáticas 3 a 8	
$U_{par} \leq 2,7$	$\alpha_{par^a} \leq 0,6$	$\alpha_{par^a} \leq 0,6$
	$U_{par} \leq 3,7$	$U_{par} \leq 2,5$

Em contrapartida, a NBR 15220-3 (ABNT, 2005c) estabelece que para as zonas bioclimáticas 1 e 2, as vedações externas sejam do tipo leve, a qual possui transmitância

térmica menor ou igual a 3,00 W/(m².K). Já para a zona bioclimática 3 é estabelecido paredes do tipo leve refletora com transmitância térmica menor ou igual a 3,6 W/(m².K). Para tanto, a mesma NBR também apresenta o coeficiente de condutividade térmica de alguns materiais frequentemente utilizados para vedações, os quais são apresentados na Tabela 2, como também a transmitância de alguns sistemas de vedações usuais (ver Figura 1).

Tabela 2 – Condutividade térmica de materiais frequentemente utilizados em vedações

Material	λ (W/m.K)
Cerâmica	0,90
Argamassa de emboço ou assentamento	1,15
Concreto	1,75

Figura 1 – Transmitância de sistemas de vedações

Parede	Descrição	U W/(m ² .K)
	Parede de tijolos maciços aparentes Dimensões do tijolo:10x6x22 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1 cm Espessura total da parede:10 cm	3,70
	Parede de tijolos de 6 furos quadrados, assentados na menor dimensão Dimensões do tijolo: 9x14x19 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1 cm Espessura da argamassa de emboço: 2,5cm Espessura total da parede:14 cm	2,48
	Parede de concreto maciço Espessura total da parede:5 cm	5,04

Fonte: Adaptado de NBR 15220(ABNT, 2005b)

Em relação ao desempenho estrutural, a norma de desempenho (ABNT, 2021a), não aborda sobre resistências mínimas, contudo, determina que a estrutura principal, bem como seus elementos construtivos, devem manter sua capacidade funcional durante toda a sua vida útil de projeto. Para vedações verticais internas é de ≥ 20 anos e para vedações verticais externas é de ≥ 40 anos. Porém, pode-se tomar como base as prescrições da NBR 15270 (ABNT, 2017a) quanto a utilização de blocos cerâmicos em alvenaria de vedação, assim como as prescrições da NBR 13438 (ABNT, 2021a), quanto a utilização de blocos de concreto celular autoclavado utilizados

para a construção de paredes internas e externas. Para tanto, a NBR 15270 (ABNT, 2017a) estabelece resistência mínima à compressão de 1,5 MPa, como também a NBR 13438 (ABNT, 2021a) estabelece 5 classes de concreto celular autoclavado com a sua respectiva densidade e resistência à compressão, conforme pode ser visualizado na Tabela 3.

Tabela 3 – Requisitos estabelecidos na NBR13438/2021

Classe	Resistência à compressão mínima (MPa)	Densidade seca (Kg/m ³)
C12	1,2	< 450
C15	1,5	< 500
C25	2,5	< 550
C35	3,5	< 600
C45	4,5	< 650

Pode-se elencar também a NBR 6136 (ABNT, 2016) a qual aborda sobre os requisitos de bloco vazados de concreto simples para utilização em alvenaria. A norma estabelece que os blocos de concreto sem função estrutural (Classe C) tenham resistência característica à compressão axial aos 28 dias $\geq 3,0$ MPa, como também retração $\leq 0,065\%$ e absorção média $\leq 13\%$.

2.2 Concreto Celular

A NBR 8.953 (ABNT, 2015) distingue três categorias de concreto de acordo com a massa específica seca (densidade), sendo eles concreto normal, concreto leve e concreto pesado ou denso. A Tabela 4 apresenta a faixa de valores da massa específica para os referidos concretos.

Tabela 4 – Categorias do concreto quanto a massa específica seca

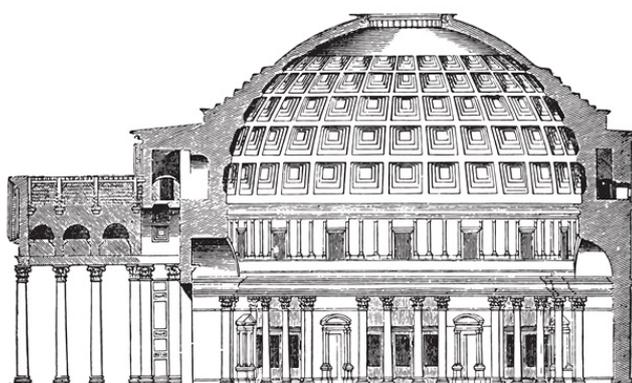
Concreto	Massa específica seca (kg/m ³)
Normal	2.000 - 2.800
Leve	< 2.000
Pesado ou denso	> 2.800

Fonte: Adaptado NBR 8.953 (ABNT, 2015)

Conforme pode ser visto na Tabela 4, o concreto leve possui uma densidade abaixo de 2000 Kg/m³, e de acordo com Upasiri *et al.* (2022), sua principal característica já está explícita em seu próprio nome: a leveza, a qual pode ser obtida pela inserção de agregados leves ou poros de ar à mistura.

Há 2.000 anos atrás, os Romanos foram os pioneiros no uso do concreto com agregado leve. Localizado na capital Italiana, o Pantheon (ver Figura 2) pode ser citado como um dos exemplos mais conhecidos da utilização do concreto leve. Considerado a construção arquitetônica mais conservada da Roma antiga, sua cúpula possui dimensões de 43,44 m de altura interna, 43,44 m de diâmetro e o óculo (abertura) com 9 metros de diâmetro. A construção do óculo foi possível devido a adição de pedra pomes (rocha vulcânica) nas partes mais altas, como agregado leve e poroso, com o intuito de reduzir o peso estrutural sobre a base (THIENEL; HALLER; BEUNTNER, 2020; RODRIGUES, 2022).

Figura 2 – Pantheon de Roma



Fonte: Rodrigues (2022)

Além disso, outro tipo de concreto leve é o concreto celular, o qual é definido como sendo uma estrutura porosa e com baixa densidade, resultante do endurecimento de uma mistura constituída por aglomerantes, agregados miúdos e poros de ar (FERREIRA; TEZUKA, 1987).

O nome concreto celular é derivado da nomenclatura Europeia, *Celular Concrete* ou *Betton Cellulaire*, mas também pode ser encontrado na literatura como concreto aerado, decorrente da nomenclatura utilizada nos Estados Unidos, *Aerated Concrete* (FERREIRA; TEZUKA, 1987). De acordo com Silva (2015), apesar do nome "concreto celular", a verdadeira definição do compósito é de uma pasta endurecida constituída por cimento e água, que para obter uma estrutura porosa é inserido bolhas de ar durante a sua produção. Essa nomenclatura foi proposta apenas para facilitar a sua inserção e aceitação no setor da construção civil, e salientar que o mesmo também é um produto a partir de cimento Portland.

Segundo Amran, Farzadnia e Ali (2015) foram os Romanos que observaram pela primeira vez que misturando sangue de animal, cascalho, areia grossa, cal quente e água, eram criadas pequenas bolhas de ar tornando a mistura mais viável e durável. Discorrendo sobre patentes, o primeiro registro do concreto celular veio com Hoffman

em 1989, na cidade de Praga, Chéquia. O produto em questão tratava-se de um concreto celular aerado, no qual o processo de produção compreendia a criação de poros em uma pasta de cimento pela reação química entre o ácido clorídrico e o bicarbonato de sódio. O mesmo autor relata outras duas patentes, em 1917 e em 1919, a primeira na Holanda onde os poros eram confeccionados através de leveduras orgânicas, e a segunda em Berlin, Alemanha, onde Grösche produziu de forma industrial vigas de concreto armado (FERREIRA; TEZUKA, 1987).

Conforme Chica e Alzate (2019), em 1923, o arquiteto Sueco Johan Axel Eriks-sonn, conhecido como o pai dos concretos celulares, registra o primeiro concreto espumado a base de cimento Portland, denominado de Ytong, onde a aeração foi produzida através de alumínio em pó ou peróxido de hidrogênio em uma pasta alcalina de cimento Portland e, às vezes, cal (BINDIGANAVILE; HOSEINI, 2008). Este método continua sendo o mais utilizado até hoje pelas empresas fabricantes de bloco de concreto celular auto-clavado. Na época em questão o autor queria obter um material com características da madeira como leveza, bom isolamento térmico e facilidade de manuseio, mas sem as desvantagens como absorção de água e deterioração (FERREIRA; TEZUKA, 1987; MOTA, 2001). Chica e Alzate (2019) e Ferreira e Tezuka (1987) apresentam uma linha cronológica de outros eventos envolvendo o concreto celular leve, descritos no Quadro 1.

Quadro 1 – Eventos históricos envolvendo o concreto celular

Década	Eventos Históricos
1950	Valore desenvolve a primeira pesquisa com concreto celular e chega ao mercado agentes espumantes à base de proteínas hidrolisadas.
1960	Surgimento dos agentes espumígenos de origem sintética, porém apresentavam problemas com a estabilidade.
1970	Surgimento de agentes espumígenos orgânicos.
2000	Desenvolvimento de agentes espumantes híbridos (mistura de agentes espumantes proteicos e sintéticos) e aprimoramento na produção de super-plastificantes.

Fonte: Chica e Alzate (2019), Ferreira e Tezuka (1987)

O concreto celular foi utilizado com sucesso em grande parte do mundo após a segunda guerra mundial. Porém, no Brasil, somente no final da década de 1970, é que o material começou a ser aplicado industrialmente (FERREIRA; TEZUKA, 1987). Em relação a especificações técnicas, no Brasil, a primeira ocorreu no ano de 1992, a qual estabelecia condições para execução, controle de qualidade e recebimento de

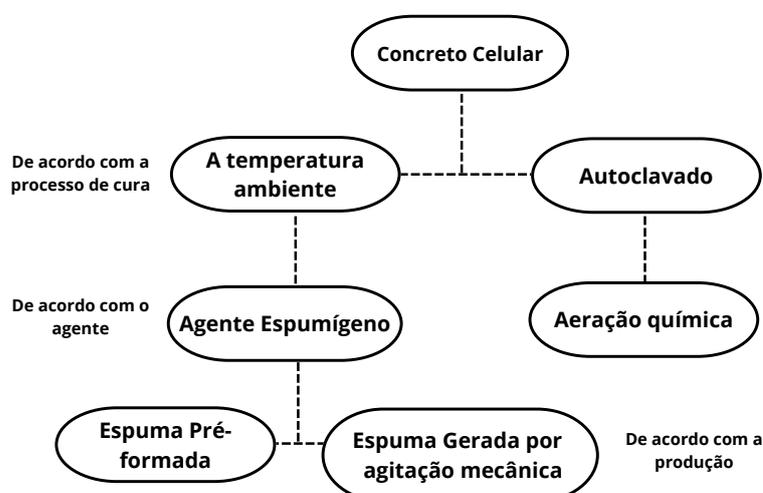
paredes de concreto celular espumoso moldado in loco. Atualmente, esta norma está cancelada, como também as normas brasileiras em relação ao concreto celular são relativamente novas, as quais são elencadas a seguir:

- NBR 17071/2022 - Parede de concreto celular estrutural moldada no local para a construção de edificações - Projeto, execução e controle - Requisitos e procedimentos (ABNT, 2022);
- NBR 13438/2021 - Blocos de concreto celular autoclavado — Requisitos (ABNT, 2021a);
- NBR 13440/2021 - Blocos de concreto celular autoclavado — Métodos de ensaio (ABNT, 2021b);
- NBR 14956-1/2013 - Blocos de concreto celular autoclavado — Execução de alvenaria sem função estrutural - Parte 1: Procedimento com argamassa colante industrializada (ABNT, 2013a);
- NBR 14956-2/2013 - Blocos de concreto celular autoclavado — Execução de alvenaria sem função estrutural Parte 2: Procedimento com argamassa convencional (ABNT, 2013b);

Todavia, com exceção da NBR 17071 (ABNT, 2022), as demais são específicas para concreto celular autoclavado. Contudo, existem normas internacionais em relação ao concreto celular espumoso, como a ASTM C 869 (Especificação padrão para agentes espumantes usados na fabricação de espuma pré-formada para concreto celular), a ASTM C 796 (Método de teste padrão para agentes de espuma para uso na produção de concreto celular usando espuma pré-formada) e ASTM 495 (Método de teste padrão para resistência à compressão de concreto leve isolante).

De acordo com Melo (2009), o concreto celular pode ser classificado conforme o processo de cura, agente e forma de produção dos poros, como pode ser visto na Figura 3. A classificação quanto a cura pode ser a temperatura ambiente ou autoclavado. A forma de inserção dos poros é categorizada em aeração química ou agente espumígeno, este último ainda se divide em espuma pré-formada e espuma gerada por agitação mecânica (HAJIMOHAMMADI; NGO; MENDIS, 2018).

Figura 3 – Classificação do Concreto Celular



Fonte: Adaptado de Melo (2009)

Conforme Chica e Alzate (2019), o método de produção mais eficaz é aquele que utiliza agentes espumantes, pois obtêm resistências maiores à compressão. Para Hashim e Tantray (2021), a espuma gerada pelo processo de espuma pré-formada é estável e pode ser misturada facilmente com a mistura de base.

O concreto celular espumoso é frequentemente utilizado em divisórias Mydin e Wang (2012), painéis de parede isolados, preenchimento de pontes (SUN *et al.*, 2018), blocos de construção leve (CHICA; ALZATE, 2019), isolamento acústico em pisos, isolamento de coberturas (MELO, 2009), sub-bases de estradas, estabilização de solos, barreiras amortecedoras para aeroportos e tráfego regular (WANG *et al.*, 2020), entre outras aplicações.

Mydin e Wang (2012), Hou *et al.* (2021) e Shang, Qu e Li (2022) elencam alguns benefícios de aplicações do concreto celular espumoso, tais como boa fluidez, aumento da produtividade e redução dos custos de fabricação. Assim como os autores citados acima, Sun *et al.* (2018) também abordam que a estrutura de poros do concreto celular apresenta um bom isolamento térmico e acústico e alta resistência ao fogo.

Devido a alta porosidade e a conectividade dos poros, o uso do concreto celular espumoso também possui algumas desvantagens, como alta absorção de água, baixo desempenho físico-mecânico e de durabilidade. Uma das principais causas da fissuração precoce e da perda de resistência está relacionado a alta retração por secagem. A medida que a densidade aumenta, a retração por secagem também aumenta, pois há um elevado teor de cimento e ausência de agregados graúdos e miúdos ou baixa incorporação de agregados miúdos (GENCEL *et al.*, 2021a; HASHIM;

TANTRAY, 2021; GENCEL *et al.*, 2022).

Com relação a massa específica aparente seca do concreto celular espumoso, alguns autores apresentam divergência em relação a faixa de valor. Para Amran, Farzadnia e Ali (2015) esta faixa encontra-se entre 320 a 1600 kg/m³, para Wang *et al.* (2020) entre 400 a 1950 kg/m³, para Ramamurthy, Nambiar e Ranjani (2009) e Hashim e Tantray (2021) entre 400 a 1600 kg/m³ e para Ferreira e Tezuka (1987) encontra-se entre 400-1850 kg/m³.

Massas específicas mais baixas são obtidas quando não há incorporação de agregados miúdos e as mais altas são devido a sua incorporação e, dependendo do controle adequado da dosagem de espuma e da densidade, o concreto celular espumoso pode ser aplicado em diferentes finalidades (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015). Wang *et al.* (2020) discorre sobre aplicações do concreto celular espumoso baseado em sua densidade, para o autor, exemplares com 400 kg/m³ são utilizados para reboco e isolamento térmico, já para uma densidade aproximada de 600 kg/m³ é utilizado como componentes não estruturais, e na faixa de 1200 a 1850 kg/m³ é usado como material estrutural.

Para concretos espumados, existe uma relação inversa entre densidade e porosidade (tratando-se apenas de vazios de ar). Quanto maior for a quantidade de vazios de ar menor será a densidade, maior o tamanho e a faixa de distribuição dos poros, resultando em menor matriz de cimento entre os poros, como também sobreposição e fusão das bolhas (BATTOOL; BINDIGANAVILE, 2020c; HASHIM; TANTRAY, 2021).

A densidade, a distribuição, o tamanho e a forma dos poros afetam as propriedades mecânicas e físicas do concreto espumoso. Em densidades menores ocorre a presença de poros menos estáveis e com elevado risco de ruptura, já em densidades maiores ocorre a presença de poros mais estáveis (SHE *et al.*, 2018; HASHIM; TANTRAY, 2021).

A fim de ter uma estrutura de poros no concreto celular espumoso, é adicionado a argamassa uma espuma, a qual é produzida através de um agente espumante e água (MELO, 2009). No item a seguir será abordado as características, tipos e trabalhos relacionados ao uso do agente espumante na fabricação de concreto celular espumoso.

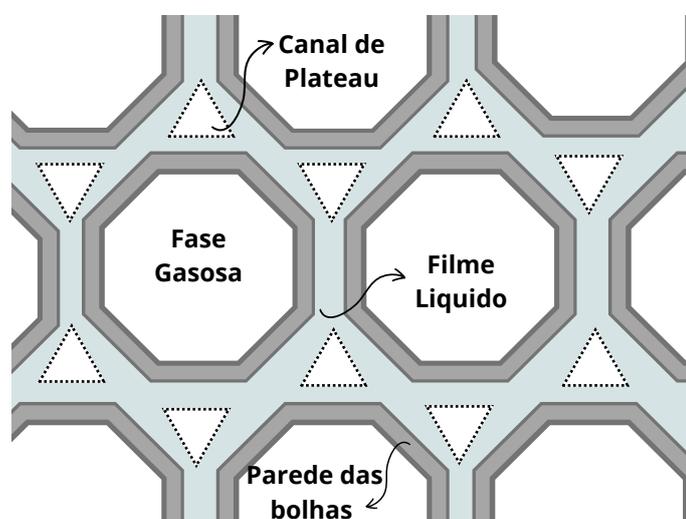
2.3 Uso de agente espumante para fabricação de concreto celular espumoso

A incorporação de bolhas de ar ao concreto celular por meio de agente espumante pode ser de duas formas, através de uma espuma pré-formada ou mediante espuma gerada por agitação mecânica. Em ambos os casos, é previamente produzido um composto com aditivo incorporador de ar diluído em água. Com o objetivo de produzir a espuma pré-formada, o composto é inserido em equipamentos específicos para a geração de espuma e só posteriormente é adicionado a betoneira com os demais constituintes do concreto. Já a espuma gerada por agitação mecânica, o composto é

incorporado à pasta de cimento Portland na betoneira, na qual, durante a operação, a espuma é formada pela velocidade do equipamento (MELO, 2009).

As espumas possuem em sua estrutura uma fase líquida e uma fase gasosa. De acordo com Falliano, Restuccia e Gugliandolo (2021) podemos identificar e conceituar as seguintes estruturas: a lamela, o canal de *Plateau* e o nó. A lamela é compreendida pela região delimitada entre a fase líquida e a fase gasosa de duas bolhas adjacentes, incluindo também o filme líquido; o canal de *Plateau* compreende a região onde três lamelas convergem; já o nó é a região onde quatro canais de *Plateau* convergem. A Figura 4 a seguir representa um esquema das estrutura das espumas.

Figura 4 – Representação esquematizada da estrutura das espumas



Fonte: Autoria própria, baseado em Falliano, Restuccia e Gugliandolo (2021)

Os agentes espumantes podem também ser denominados na literatura como agentes surfactantes ou agentes tensoativos. Atualmente no Brasil, os agentes espumantes disponíveis no mercado são principalmente do tipo sintético ou proteico. Os agentes espumantes proteicos são derivados da goma de sangue animal (HASHIM; TANTRAY, 2021), na qual as bolhas são formadas pela degradação da proteína. Já os agentes espumantes sintéticos são encontrados na literatura na maioria das vezes como constituintes de lauril sulfato de sódio (HASHIM; TANTRAY, 2021).

Não é unanimidade entre autores sobre qual é o melhor agente espumante, pois cada um possui as suas particularidades. Para Panesar (2013), Falliano *et al.* (2018), Hashim e Tantray (2021) agentes espumantes proteicos são mais estáveis e dão origem a concretos espumados com melhores características mecânicas em comparação a agentes espumantes sintéticos, devido a sua vida útil maior (FALLIANO; RESTUCCIA; GUGLIANDOLO, 2021).

Já para Sun *et al.* (2018) a estabilidade e resistência de agentes espumantes sintéticos são muito maiores se comparados a agentes espumantes proteicos. Com base no estudo desenvolvido por Falliano, Restuccia e Gugliandolo (2021), as espumas

sintéticas possuem maior capacidade de formação de espuma e apresentam menor densidade em comparação ao agente espumante proteico, ou seja, uma quantidade menor de espuma é suficiente para atingir uma certa densidade.

Suryanita *et al.* (2022) destacam que os agentes espumantes sintéticos são estáveis quando utilizados em concretos de espuma com densidade acima de 1000 kg/m³, assim como Chica e Alzate (2019) abordam que os agentes espumantes sintéticos são mais fáceis de manusear, são mais baratos e requerem menor energia de armazenamento a longo prazo.

Em seus estudos Sun *et al.* (2018) e Ribeiro (2021) elencam três fenômenos paralelos que podem ocorrer a partir do momento de formação da espuma de composição bifásica líquido-gás, e acabar danificando-a, os quais são definidos a seguir:

- **Drenagem** - É quando o excesso de líquido presente na espuma acaba escoando em decorrência da ação da força de gravidade.
- **Coalescência** - é definido como o momento em que duas bolhas de ar se unem formando uma única bolha maior.
- **Amadurecimento de Ostwald** - compreende o processo de crescimento das bolhas decorrentes da coalescência.

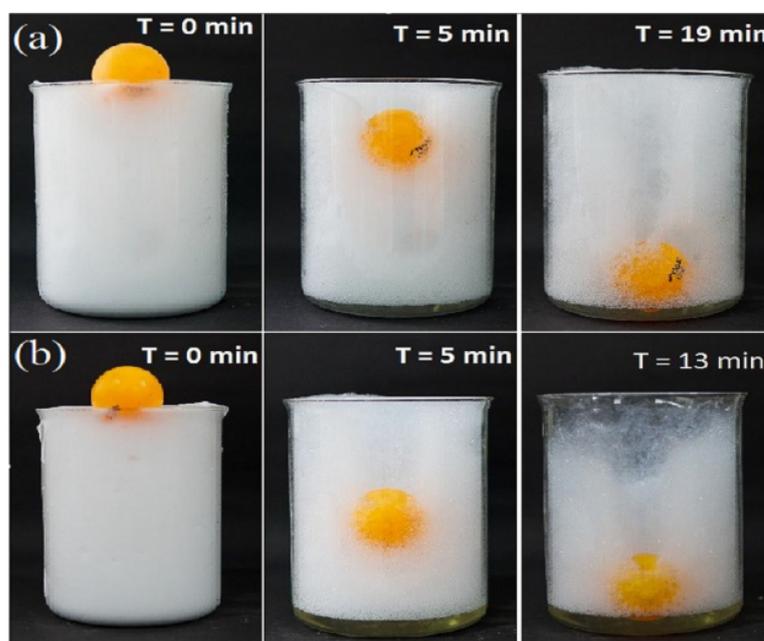
Em conformidade com Zhang *et al.* (2020), devido a dificuldade de controle, as espumas apresentam bolhas de formato, quantidade de vazios e dimensões diferentes. Bolhas menores tendem a se difundir com bolhas maiores, facilitando a drenagem do líquido após a origem da espuma, o que leva à redução de 10% do total do número de bolhas.

Salienta-se que durante a mistura na pasta, espumas instáveis podem acabar coalescendo e se fundindo uma as outras, resultando em poros maiores, onde o volume total da bolha é a soma do volume de todas as bolhas que coalesceram. Em contrapartida, a área de superfície resultante é menor que a soma das áreas das bolhas menores, concluindo que a coalescência leva a uma redução da área total de superfície das bolhas, resultando em uma redução de energia total de todo o sistema (FALLIANO; RESTUCCIA; GUGLIANDOLO, 2021). A soma dos acontecimentos descritos é que determina o quão estável é uma espuma e estabelece o tempo de vida útil delas (WANG *et al.*, 2020).

Outro parâmetro importante para controlar a qualidade das espumas é a densidade (kg/m³). De acordo com Zhu *et al.* (2020), a faixa de valor ideal está entre 30 a 50 kg/m³, onde valores acima desta faixa indicam que há um elevado teor de água na espuma, baixa concentração de agentes espumantes e baixa pressão de ar na formação das bolhas (FALLIANO; RESTUCCIA; GUGLIANDOLO, 2021).

Hashim e Tantray (2021) compararam a estabilidade de espumas produzidas com agentes espumantes sintéticos e proteicos preenchendo um béquer de 1000 mL de capacidade com as espumas produzidas (ver Figura 5). Sobre as espumas foi colocado uma bola com diâmetro de 40 mm e massa de 2,7 g. Na sequência, foi registrado o tempo em que a bola levou para atingir a superfície inferior do béquer, como também uma leitura intermediária foi realizada aos 5 minutos após o início do experimento. Os autores obtiveram que a espuma proteica possui velocidade de afundamento da bola de 0,13 mm/s, já a espuma sintética possui 0,2 mm/s, comprovando que a espuma proteica possui maior resistência ao afundamento da bola, como também apresentou maior viscosidade e densidade que a espuma sintética, sendo assim mais estável.

Figura 5 – Ensaio de Estabilidade das espumas: a) Espuma proteica e b) Espuma sintética



Fonte: Adaptado de Hashim e Tantray (2021)

Em conformidade com Sun *et al.* (2018) e Hajimohammadi, Ngo e Mendis (2018) as características da espuma antes que ocorra a pega e endurecimento do concreto, implica no desempenho e qualidade dos concretos espumados. De acordo com Falliano, Restuccia e Gugliandolo (2021) é inviável incorporar outros materiais a mistura do concreto celular a fim de obter uma melhor resistência mecânica, caso não seja investigado a qualidade das espumas, em termos de densidade, vida útil e propriedades químicas.

Diante disso, com a finalidade de estabilizar e aumentar a vida útil das espumas alguns autores estudaram a adição de agentes modificadores de viscosidade, os quais retardam a velocidade de drenagem, aumentam a capacidade de reparo, a viscosidade e a elasticidade do filme líquido espumante (HAJIMOHAMMADI; NGO; MENDIS, 2018;

ZHU *et al.*, 2020). Um exemplo de agente modificador de viscosidade, é a goma xantana, a qual será descrita no item a seguir:

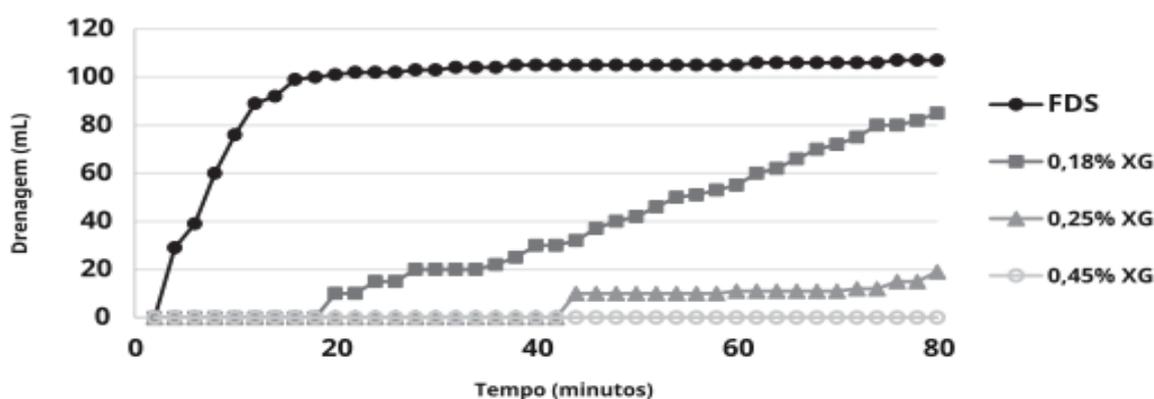
- **Goma Xantana:**

Em conformidade com Bhat *et al.* (2022), a goma xantana (XG) é um exopolissacarídeo fabricado comercialmente por uma bactéria gram-negativa da espécie *Xanthomonas campestris*, da qual provém sua denominação. Em função de apresentar alta solubilidade em água quente ou fria e alta viscosidade mesmo em baixas concentrações, ela é comumente utilizada nas indústrias alimentícia, farmacêutica, petrolífera, entre outras (SUTHERLAND, 1996; BORGES; VENDRUSCOLO, 2008; ZHU *et al.*, 2020).

Com o passar dos anos, houve um aumento na produção, comercialização e utilização da goma xantana como espessante e estabilizante, como também estudos recentes revelam que a utilização de goma xantana melhora a estabilidade de espumas.

Hajimohammadi, Ngo e Mendis (2018) verificaram o impacto da estabilização das espumas através da adição de goma xantana (XG) nos teores de 0,18, 0,25 e 0,45% em relação a massa do agente surfactante, Dodecil Sulfato de Sódio (SDS). De acordo com a Figura 6, a amostra referência (REF) drena nos primeiros 20 min 94% de sua solução, já as espumas com adição de XG permanecem sem drenar até os primeiros 20 min. Após este período, a espuma com 0,18% de XG começa a drenar lentamente a uma taxa de 1,1 mL/min, já a solução com 0,25% de XG inicia a drenagem após os 40 min. Os autores destacam a espuma com 0,45% de XG, pois permanece sem drenar durante os 80 min de realização do ensaio, confirmando assim a estabilização da espuma através do aumento de viscosidade do filme líquido.

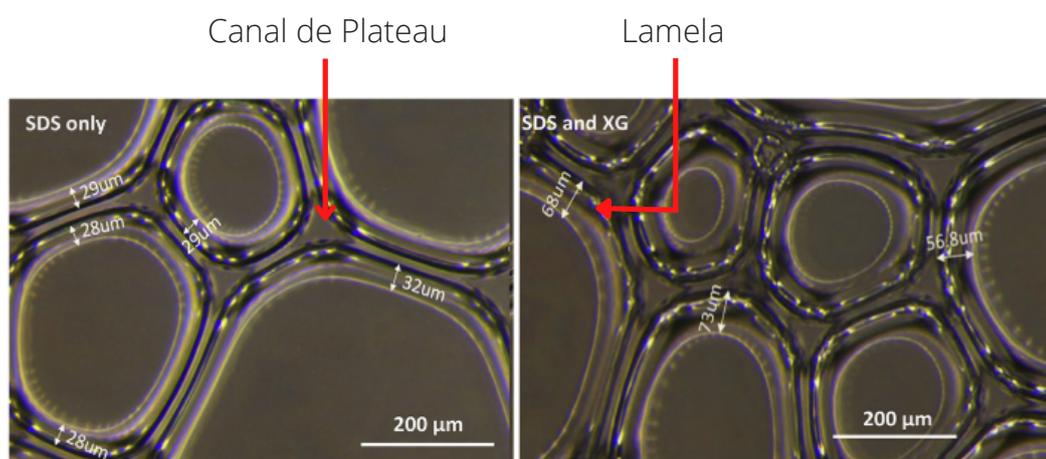
Figura 6 – Efeito da utilização de Goma Xantana na drenagem de espumas



Fonte: Adaptado de Hajimohammadi, Ngo e Mendis (2018)

Os autores também observaram que 0,45% de adição de XG suprimiu a coalescência das bolhas, reduziu a frequência de poros com formatos irregulares, proporcionou uma distribuição de tamanho de poros menor e com uma faixa mais estreita, como também, conforme pode ser visto na Figura 7, aumentou a espessura das lamelas. Na figura a esquerda é uma solução referência (sem goma xantana), onde a lamela é cerca de $30 \pm 2 \mu\text{m}$, já na figura a direita é solução com 0,45% de XG, onde a espessura da lamela é cerca de $65 \pm 7 \mu\text{m}$, o dobro da amostra referência.

Figura 7 – Efeito da utilização de Goma Xantana no tamanho das lamelas

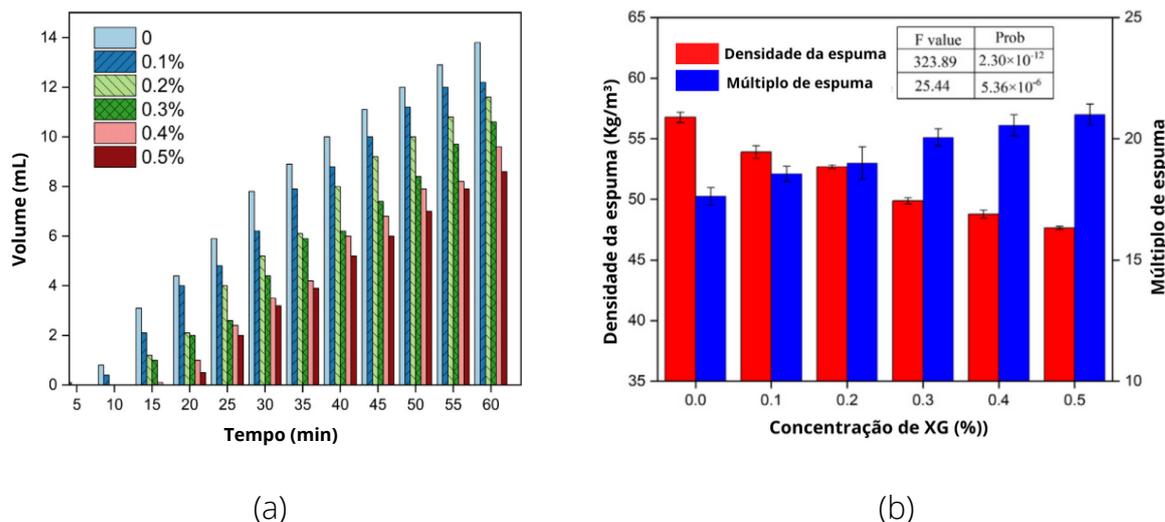


Fonte: Adaptado de Hajimohammadi, Ngo e Mendis (2018)

Os autores mencionados acima também enumeraram alguns benefícios da goma xantana no estado endurecido do concreto celular, como: aumento da resistência à compressão, diminuição da densidade, da absorção de água, da absorção de umidade (ZHU *et al.*, 2020) e redução da condutividade térmica (HAJIMOHAMMADI; NGO; MENDIS, 2018).

Zhu *et al.* (2020) em seus estudos, confeccionaram um concreto celular espumoso com densidade igual a 600 Kg/m^3 . Os autores adicionaram 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4% e 0,5% de goma xantana em relação a massa do agente espumante, com o intuito de estabilizar a espuma, a qual foi produzida por um agente surfactante aniônico (sintético). Conforme pode ser visualizado no gráfico exposto na Figura 8 (a) e (b), à medida que a concentração de goma xantana aumenta, diminuiu o volume de drenagem ao longo do tempo e a densidade, como também aumentou o múltiplo de espuma (capacidade de produção de espuma). Os autores também observaram que com o teor de 0,5% de XG, a espuma permaneceu sem drenar até os primeiros 15 min de ensaio e aos 60 min drenou apenas 8,6 ml.

Figura 8 – Resultado da utilização de Goma Xantana: a) Drenagem e b) Densidade e múltiplo de espuma



Fonte: Zhu *et al.* (2020)

Os pesquisadores observaram, que no estado endurecido, à medida que aumenta a concentração de XG, ocorre um aumento gradativo da resistência à compressão do concreto espumoso, bem como a diminuição da absorção de água e absorção de umidade. Através de análise em microscópio óptico, observou-se que a adição de goma xantana ocasionou um aumento da espessura do filme líquido e da parede das bolhas (lamela), menor tamanho de poro, distribuição mais concentrada como também poros menos conectados.

2.4 Uso de fibras em concreto celular espumoso

De acordo com Chica e Alzate (2019), as fibras podem ser de origem natural ou sintética, onde alguns exemplos de fibras utilizadas são: kenaf, sisal, coco, aço, polipropileno, vidro, carbono, entre outras. A utilização de fibras em matrizes cimentícias difundiu-se com o objetivo de minimizar o comportamento frágil, quando o concreto é submetido à forças de tração, antes que ocorra a ruptura. Entre outras melhorias atribuídas ao uso de fibra em compósitos cimentícios, podemos citar a resistência à flexão, tenacidade, resistência ao impacto, isolamento térmico e acústico, como também a capacidade de absorção de energia (WEI; MEYER, 2015; ASIM *et al.*, 2020; STAPPER; GAUVIN; BROUWERS, 2021).

O comprimento da fibra determina a uniformidade da dispersão da mesma durante a mistura. Fibras curtas, com menos de 50 mm, possuem uma distribuição uniforme e tendem a assumir uma orientação mais aleatória, o que pode restringir a propagação de fissuras e melhorar as propriedades mecânicas do compósito, porém na prática, uma distribuição uniforme é raramente alcançada (BENTUR; MINDESS, 2007;

TANG *et al.*, 2022). Para Tang *et al.* (2022), no momento em que o comprimento da fibra excede o comprimento crítico, a probabilidade da fibra se aglomerar aumenta, formando grumos de fibras na matriz e resultando em dispersão desigual e concentração de tensão local.

Bentur e Mindess (2007) abordam que as propriedades das fibras variam conforme à sua resistência e módulo de elasticidade, e com o intuito de aumentar a resistência do compósito, a fibra deve ter um módulo de elasticidade maior que o da matriz.

As fibras podem ser utilizadas em concreto celular para melhorar suas propriedades mecânicas e de durabilidade. Conforme Wang *et al.* (2019), Tang *et al.* (2022) as fibras aprimoram a capacidade de carga e capacidade de absorção de energia, sendo capaz de efetivamente impedir a geração e propagação de trincas na matriz cimentícia. No entanto, um efeito desfavorável do reforço de fibra pode estar relacionado à redução da porosidade, devido ao colapso progressivo da estrutura celular, onde os espaços que antes eram ocupados por poros de ar acabam sendo ocupados pela matriz cimentícia, aumentando assim a densidade do concreto celular (CHICA; ALZATE, 2019).

Dawood *et al.* (2018) empregaram teores de 0,5%, 1% e 1,5% de fibra de carbono em concreto celular, em relação ao volume de material cimentício. A adição de fibras de carbono diminuiu a trabalhabilidade e a absorção de água, como também aumentou a resistência à flexão, o módulo de elasticidade, o módulo de tenacidade à flexão e a densidade seca.

Wang *et al.* (2019) utilizaram fibras de aço com teor de 0,5% a 1,5%, e obtiveram que o aumento do teor de fibras, diminuiu a trabalhabilidade, melhorou a resistência à tração e o comportamento pós-fissuração do concreto celular.

Tang *et al.* (2022) utilizaram fibra de PET em concreto celular com teores de 0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4% em relação a massa total de material cimentício. Os autores encontraram que com a adição de até 0,2% de fibra de PET, a resistência à compressão aos 28 dias foi superior ao traço referência, o qual pode ser justificado pelo fenômeno de ponte das fibras, o que limita o crescimento e a propagação de trincas.

Falliano *et al.* (2019) confeccionaram um concreto celular com fibras poliméricas curtas, as quais possuem 20 mm de comprimento e 0,54 mm de diâmetro. Foram utilizados três teores de fibras 0,7%, 2,0% e 5,0%, em relação ao volume de concreto celular, como também três densidades alvo secas, 400 Kg/m³, 600 Kg/m³ e 800 Kg/m³. Os autores constataram que à medida que aumenta o teor de fibra e a densidade alvo, reduz a retração por secagem como também aumenta a resistência à flexão. Os autores evidenciam a influência da utilização de fibras poliméricas curtas no aumento da resistência à flexão em menores densidades, onde para a densidade de 400 Kg/m³, teve um aumento de 10 a 15 vezes maior que a amostra referência. Além disso, ao avaliarem a resistência à compressão, os pesquisadores notaram que as fibras pouco

influenciam nos resultados.

Entre as fibras sintéticas utilizadas como reforço de materiais cimentícios, destacam-se as poliméricas, entre as quais, as fibras de polipropileno vem sendo empregadas em larga escala. As fibras de polipropileno são comumente utilizadas em concreto devido à sua estabilidade química na solução alcalina do concreto (HOSSEIN-ZADEH *et al.*, 2023). Elas são leves, de fácil acesso, apresentam baixo custo, alto desempenho à abrasão, como também são resistentes à corrosão (WANG *et al.*, 2020). Outro destaque às vantagens do uso das fibras de polipropileno deve-se ao aumento da resistência à tração, cisalhamento e flexão do concreto (PAKRAVAN; LATIFI; JAMSHIDI, 2017; GUO *et al.*, 2019).

Batool e Bindiganavile (2020c) utilizaram 0,2% de microfibras de polipropileno em relação ao volume da mistura e constataram um aumento da porosidade através da introdução da fibra. Os autores atribuíram ao uso da fibra, o aumento do número de poros, como também criação de poros de vários diâmetros, intensificando esse comportamento em densidades mais elevadas.

Amran *et al.* (2020) utilizaram fibra PP em um compósito celular, os autores adotaram um consumo fixo de fibra PP por m³ de 7,2 Kg (0,8%), a fibra possuía 100 μ m de diâmetro e 14,8-15 mm de comprimento. Os pesquisadores definiram quatro densidades alvo diferentes diferentes 1000 Kg/m³, 1300 Kg/m³, 1600 Kg/m³ e 1900 Kg/m³. Os pesquisadores constataram que ocorreu um aumento da resistência à compressão e à tração a medida que aumentava a densidade, como também, o incremento de resistência ocasionado pela fibra PP era proporcional ao aumento do volume de espuma. Os autores mencionam que a utilização da fibra diminuiu a trabalhabilidade da mistura e o valor de retração por secagem, como também constataram que a retração por secagem aumenta a medida que aumenta o volume de espuma.

Wang *et al.* (2020) desenvolveram um concreto leve geopolimérico à base de cinzas volantes reforçado com fibra PP. A fibra possuía 0,017 mm de diâmetro e seu comprimento variou entre 3, 6, 9, 12 e 19 mm. O teor de fibra variou de 0 a 2% em relação a massa do concreto geopolimérico. Os autores observaram que com o uso da fibra PP, diminuiu a condutividade térmica, aumentou a resistência à compressão, como também alterou a configuração de falha do concreto celular. Além disso, entre os comprimentos e os percentuais avaliados, a fibra com 12 mm de comprimento e com teor de 0,5%, obteve o melhor desempenho, com um aumento de 71% da resistência à compressão, comparado as amostras sem fibra PP. Os pesquisadores constataram, para esta dosagem, que 0,5% é teor crítico de volume para as fibras, e que teores maiores diminuíram a resistência à compressão. A principal razão é a dispersão das fibras, que em maiores volumes se tornam difíceis, causando baixa trabalhabilidade e compactação incompleta. Os autores sugerem que a resistência à compressão depende fortemente do comprimento da fibra, como também atribuem o impedimento

de propagação de trincas ao efeito de ponte das fibras.

Gencel *et al.* (2021b) avaliaram um concreto celular por meio da inserção de fibras PP. Dois consumos de cimento foram utilizados, 300 e 400 Kg/m³, com uma relação água/cimento de 0,57. As fibras utilizadas possuem 6 mm de comprimento e 18 μ m de diâmetro, foram empregados três teores diferentes de fibras PP, 0, 0,5 e 1 % em relação ao volume do compósito. Além disso, três teores diferentes de agente espumante, 40, 50 e 60 Kg/m³, o qual é a base de proteína.

Os pesquisadores observaram que com aumento do teor da fibra PP, mantendo-se todas as outras variáveis constantes, diminuiu a densidade, a trabalhabilidade, aumentou a porosidade, como também a absorção de água. A redução da densidade é em virtude que as fibras PP são materiais leves e sua inserção no concreto celular, gera novos vazios. Já a redução da trabalhabilidade é devido que a adição de PP resultar em uma estrutura de rede espacial como também consome pasta de cimento afim de cobrir as fibras, resultando em uma menor trabalhabilidade e conseqüentemente na criação de microporos na amostra de concreto, o que aumenta a porosidade. A criação de microporos é um fenômeno proeminente de amostras com baixo consumo de cimento, pois em consumos maiores, os microporos são preenchidos pela pasta de cimento e nenhum efeito relevante quanto a porosidade é observado.

De acordo com os autores, a medida que aumenta o teor de fibra PP, diminui também a resistência à compressão, pois a mesma não contribui significativamente para aumento da resistência à compressão do concreto celular. Além disso, a redução da resistência pode ser atribuída ao efeito da adição de fibras na consolidação do concreto celular. Fibras PP dispostas paralelamente à direção do carregamento, comportando-se como vazios resultando na diminuição de propriedades mecânicas do compósito.

Em relação a resistência à flexão, para as amostras com consumo de cimento igual a 400 Kg/m³, o aumento do teor de PP aumento a resistência. Por sua vez, as misturas com consumo de cimento igual a 300 Kg/m³ diminuíram a resistência à flexão à medida que aumentou o teor de PP. A redução da resistência à flexão pode ser atribuída a vários fatores como: cobertura das fibras pela pasta de cimento, efeito da adição de fibras na consolidação do concreto celular e distribuição das fibras paralelamente ao carregamento, comportando-se como vazios. Os autores constataram também que o aumento do teor de PP, diminui a condutividade térmica e a retração por secagem, como também aumenta a absorção de água por capilaridade.

Batool e Bindiganavile (2020a) avaliaram a condutividade térmica do concreto celular com a inserção de microfibras PP. As misturas tiveram densidade alvo entre 400-800 Kg/m³, e a fração volumétrica das fibras foi de 0,2%. Os pesquisadores observaram que a inserção da fibra PP criou poros de vários diâmetros, especialmente em densidades mais elevadas, ampliando a faixa de distribuição de poros e reduzindo a condutividade térmica bem como aumentando a porosidade.

Balgourinejad *et al.* (2022) avaliaram o efeito da alta temperatura entre 200 °C e 600 °C nas propriedades microestruturais e mecânicas do concreto leve contendo metacaulim e reforçado com fibras PP. O teor de fibra variou entre 0,1% e 0,8% em relação ao volume de concreto celular. Os autores abordam que a adequada distribuição das fibras de PP é essencial para alcançar alta resistência mecânica em concretos leves. Os mesmos constataram que ao expôr o concreto leve a altas temperaturas, as fibras PP aumentam a permeabilidade e a porosidade, pois as mesmas derretem em temperaturas superiores a 165 °C, ocasionando cavidades no interior do concreto, as quais funcionam como dutos para liberar a pressão do vapor gerado quando o calor aumenta. Outro ponto importante é que as fibras PP também diminuiriam a fissuração do concreto leve, aumentando assim a resistência ao fogo.

A Tabela 5, apresenta uma síntese das principais contribuições relacionadas ao uso de fibra em concreto celular espumoso. Vários autores elencam algumas dificuldades relacionadas ao uso da fibra, como por exemplo a redução da trabalhabilidade. Embora a fibra PP proporcione um aumento do desempenho mecânico, é comprovado que a mesma altera a estrutura de poros do concreto celular, criando poros de diferentes diâmetros. Logo, ainda não está claro como a fibra PP se comporta em diferentes densidades, bem como na presença de um agente estabilizador de espuma. Até então, não há registros de trabalhos que utilizaram a ação conjunta da Goma Xantana (como estabilizador da espuma) e da fibra PP como reforço da matriz cimentícia. Por este motivo, o presente estudo visa aumentar a qualidade da espuma através da Goma Xantana, a fim de obter uma melhor estrutura de poros e por fim tentar sanar algumas lacunas existentes sobre o uso e comportamento da fibra em uma matriz cimentícia leve.

Tabela 5 – Síntese sobre os resultados obtidos através da inserção de fibra em concreto celular espumoso

Autor (ano)	Densidade (Kg/m³)	Fibra (Características)	Contribuição	Problema
Dawood <i>et al.</i> (2018)	1800	Carbano comprimento-8mm diâmetro-7 µm	Aumentou a resistência à flexão e o módulo de elasticidade	Redução da trabalhabilidade
Wang <i>et al.</i> (2019)	2000	Aço comprimento-30mm diâmetro-0,9mm	Melhorou a resistência à tração e o comportamento pós-fissuração	Redução da trabalhabilidade
Tang <i>et al.</i> (2022)	<500	Aço comprimento-30mm diâmetro-0,9mm	A fibra proporcionou uma maior resistência à compressão	A fibra não teve efeito significativo na densidade seca e na absorção de água
Falliano <i>et al.</i> (2019)	400,600 e 800	Poliméricas comprimento-20mm diâmetro-0,54mm	Reduziu a retração por secagem e aumentou a resistência à flexão	A fibra não influencia na resistência à compressão
Batool e Bindiganavile (2020c)	400, 600 e 800	Polipropileno comprimento- 20 mm	-	Redução da trabalhabilidade
Amran <i>et al.</i> (2020)	1000,1300 ,1600 e 1900	Polipropileno comprimento- 15mm diâmetro- 100 µm	A fibra aumentou a resistência à tração, a resistência à fluência e à retração por secagem	Redução da trabalhabilidade
Gencil <i>et al.</i> (2021)	1000-1200	Polipropileno comprimento-6mm diâmetro-18 µm	Aumentou a resistência à flexão	Redução da trabalhabilidade
Batool e Bindiganavile (2020a)	400 e 800	Polipropileno comprimento- 20 mm	Reduziu a condutividade térmica	A fibra cria poros de vários diâmetros em maiores densidades

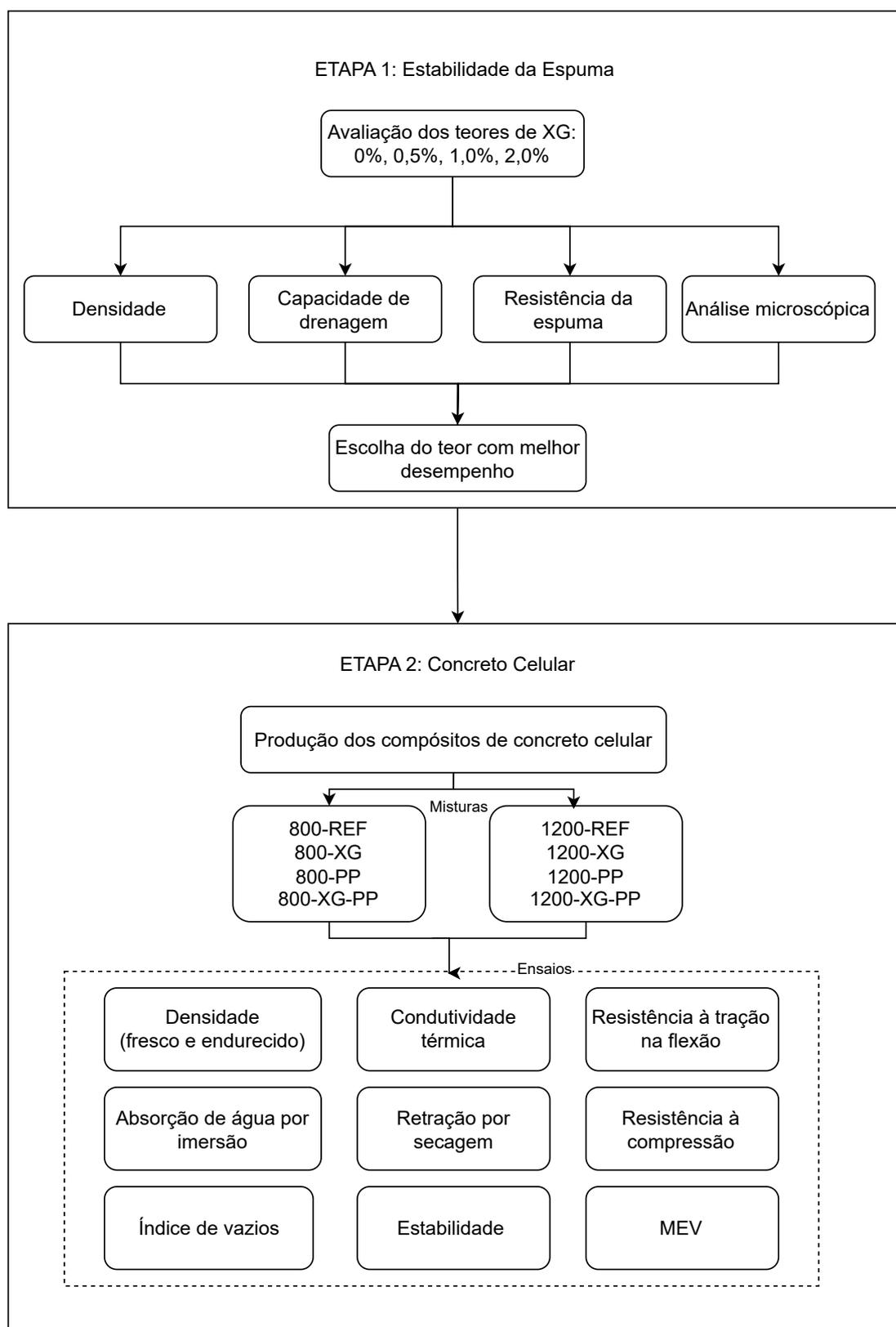
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são caracterizados os materiais utilizados na presente pesquisa, como também descritos os procedimentos adotados para a realização do programa experimental. A Figura 9 ilustra um organograma simplificado dos procedimentos experimentais. Na primeira etapa, foi estudada a estabilidade da espuma através da inserção de diferentes teores de goma xantana (do inglês XG).

Após a escolha da composição da espuma na primeira etapa, foram avaliadas oito composições diferentes de concreto celular, sendo estabelecido as duas densidades alvo, 800 kg/m^3 e 1200 kg/m^3 . Para cada densidade alvo estudada foi confeccionada uma mistura referência (REF), bem como, amostras com e sem goma xantana (XG) e com e sem fibra de polipropileno (PP). As fibras de polipropileno foram adicionadas à matriz a fim de melhorar o desempenho mecânico do concreto celular.

No estado fresco foi verificado a massa específica das amostras. Após a moldagem e cura, no estado endurecido, foram realizados ensaios para a verificação da resistência mecânica, através de ensaios de compressão (7 e 28 dias) e de tração na flexão (7 e 28 dias). Também foram determinados os índices físicos aos 28 dias (massa específica, absorção de água por imersão, índice de vazios e absorção de água por capilaridade) e retração por secagem (1, 2, 7, 14, 28 dias). Por fim, os concretos celulares foram avaliados quanto a condutividade térmica (28 dias) e estabilidade do compósito de concreto celular através da coluna vertical (28 dias). Uma análise em microscópio eletrônico de varredura (MEV) também foi realizada, a fim de verificar o impacto da goma xantana como também o impacto e disposição das fibras PP. De posse dos resultados foi realizado a análise e as conclusões sobre o estudo proposto.

Figura 9 – Organograma simplificado em ordem cronológica dos estudos



Fonte: Autoria própria

3.1 Materiais

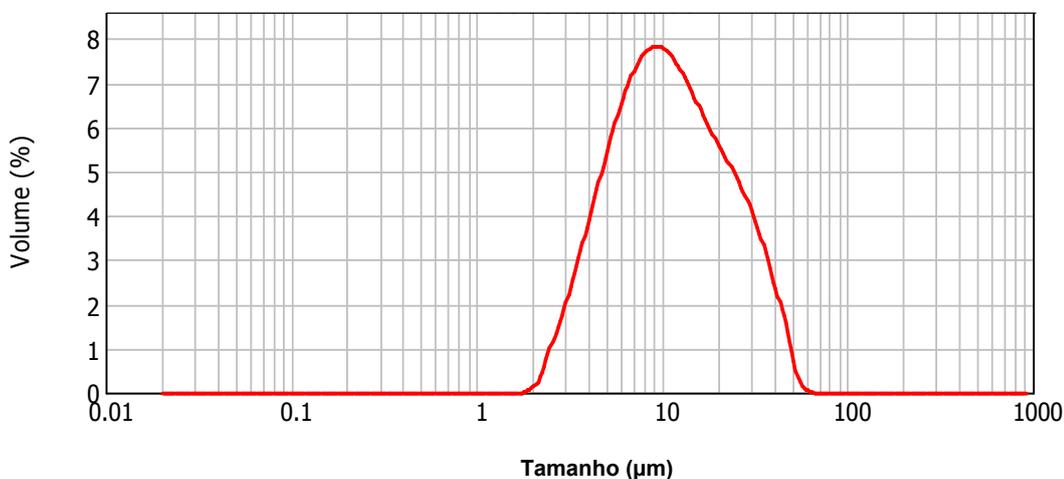
Neste item são apresentados e caracterizados os materiais que serão empregados na realização do programa experimental.

3.1.1 Cimento Portland

No presente trabalho foi utilizado CPV-ARI RS, cimento Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos. O motivo de utilizar o cimento Portland CPV-ARI RS deve-se ao fato do mesmo apresentar um ganho de resistência inicial a curto prazo, diminuindo assim as tensões que a pasta fresca gera na espuma (SONG; LANGE, 2021), como também possibilita que a desmoldagem ocorra de maneira mais rápida.

A composição granulométrica do cimento Portland representada na Figura 10 foi determinada através de análise de granulometria a laser no equipamento MASTER-SIZER 2000, pertencente a Unipampa, campus de Uruguaiana/RS. O cimento Portland ARI-RS possui massa específica de $2,98 \text{ g/cm}^3$, a qual foi definida de acordo com a NBR 16.605 (ABNT, 2017b), através do frasco volumétrico de Le Chatelier.

Figura 10 – Curva granulométrica do cimento



3.1.2 Areia

A areia utilizada na presente pesquisa é proveniente de rio, e comercializada na região de Alegrete/RS. Sua composição granulométrica foi determinada de acordo com a NBR 17.054 (ABNT, 2022), a densidade e a absorção de água segundo a NBR 16.916 (ABNT, 2021a), a massa unitária e o índice de vazios de acordo com NBR 16.972 (ABNT, 2021b). A Figura 11 apresenta a curva granulométrica da areia utilizada, e a Tabela 6 apresenta suas características.

Figura 11 – Curva granulométrica da areia.

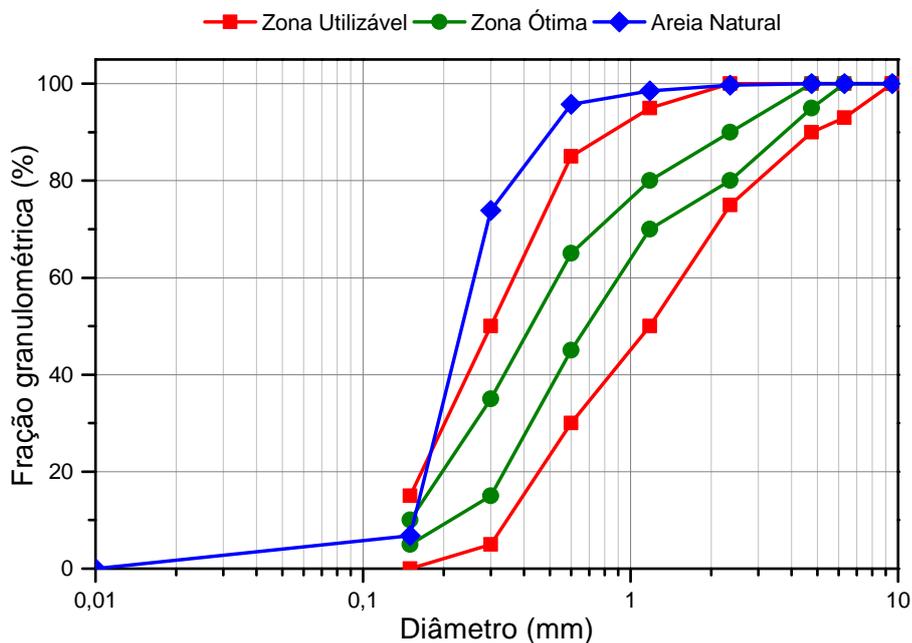


Tabela 6 – Caracterização da areia natural

Massa unitária solta	1,55 g/cm ³
Massa unitária compactada	1,69 g/cm ³
Densidade seca	2,5 g/cm ³
Densidade sat. sup. seca	2,51 g/cm ³
Absorção de água	0,18%
Diâmetro máximo	0,6 mm
Módulo de finura	1,25

3.1.3 Agente espumante

A fim de obter uma espuma pré-formada foi utilizado o aditivo plastificante incorporador de ar LIGA CELUBLOCK (ver Figura 12), produzido pela empresa Liga Química. O agente espumante é de origem sintética, possui coloração amarela, massa específica de 1,01 g/cm³ e teor de sólidos de 14,6%. De acordo com a recomendação do fabricante deve ser utilizado na proporção de 1/30, sendo 1 (um) Litro de agente espumante e 30 Litros de água.

Figura 12 – Agente espumante

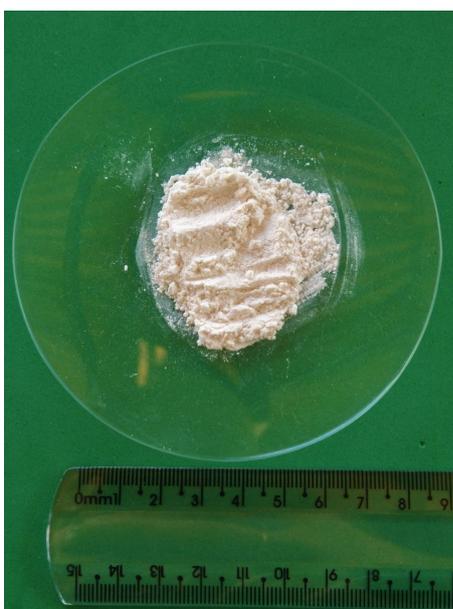


Fonte: Autoria própria

3.1.4 Goma Xantana

A goma xantana (ver Figura 13) utilizada na presente pesquisa, tem a finalidade de aumentar a viscosidade do filme líquido e assim estabilizar a espuma. Ela é caracterizada como um exopolissacarídeo de coloração branca, que apresenta alta viscosidade, é pseudo-plástica e solúvel em água. A mesma é comercializada em pó, e foi adquirida a granel em uma loja de produtos alimentícios situada em Alegrete/RS.

Figura 13 – Goma Xantana.



Fonte: Elaboração Própria

3.1.5 Microfibras de polipropileno

As microfibras de polipropileno (ver Figura 14) utilizadas na presente pesquisa, são denominadas comercialmente como Neofibra MF 6 mm, as quais são produzidas pela empresa Neomatex. De acordo com informações fornecidas pelo fabricante, as microfibras são desenvolvidas a partir de filamentos muito finos, os quais são produzidos por um sistema de extrusão e posteriormente passam pelo processo de estiramento.

Figura 14 – Microfibras de polipropileno



Fonte: Elaboração própria

As microfibras utilizadas neste trabalho são do tipo monofilamento e possuem 6 mm de comprimento, a Tabela 7 apresenta suas propriedades físicas e mecânicas, disponibilizados pelo fabricante.

Tabela 7 – Características da microfibras de polipropileno

Neofibra MF 6 mm	
Matéria prima	100% polipropileno
Massa específica	0,91 g/cm ³
Diâmetro	12 μ m
Comprimento	6 mm
Tenacidade	865 MPa
Módulo de Elasticidade	9 GPa

3.2 Programa experimental

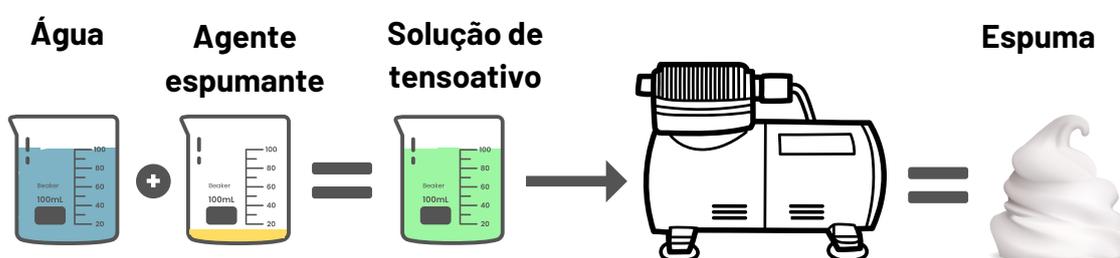
Conforme os objetivos propostos neste trabalho, foi desenvolvido um programa experimental que proporcione a análise das variáveis que afetam a estabilidade da

espuma, os índices físicos e a resistência mecânica dos compósitos cimentícios leves produzidos.

3.2.1 Produção e avaliação da espuma pré-formada

Em um primeiro momento, foi preparado a solução de tensoativo, composta pela mistura de agente espumante e água, na proporção 1/30, respectivamente. A mistura da solução de tensoativo ocorreu de forma suave, pois nesse instante não é ideal que ocorra formação de bolhas. A Figura 15, a seguir, apresenta o processo de formação da espuma.

Figura 15 – Processo de geração da espuma



Para a geração da espuma, foi utilizado o equipamento incorporador de ar ECOFOAMER - 100 W - 10BP, o qual é formado por uma bomba hidráulica de recalque e um compressor de ar. Ao passo que um é responsável pela sucção da solução de tensoativo, o outro libera ar sobre pressão para gerar a espuma. O equipamento utilizado e a espuma produzida são apresentados na Figura 16. Em circunstâncias da configuração do equipamento, a pressão de ar adotada para gerar a espuma foi de 80 psi.

Figura 16 – Geração da espuma: a) Gerador de espuma e b) Espuma.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria, Ecopore (2022)

Em um segundo momento, com o objetivo de estabilizar a espuma e assim obter uma espuma de melhor qualidade, foi adicionado diferentes percentuais de goma xantana à solução de tensoativo, onde o percentual inicial é baseado nos resultados obtidos por Zhu *et al.* (2020), conforme é apresentado na Tabela 8. A goma xantana, quando utilizada, foi dissolvida no volume total de água necessário para a produção da espuma, de acordo com as composições apresentadas na Tabela 8. O percentual utilizado de goma xantana é em relação a massa de agente espumante. Para evitar a formação de grumos durante a dissolução da goma xantana, foi utilizado um agitador magnético modelo DT3120H (ver Figura 17).

Figura 17 – Agitador magnético



Fonte: Autoria própria

Tabela 8 – Composição das espumas na primeira etapa

Identificação	Solução	XG (%)
REF	1/30	-
XG-0,5	1/30	0,5
XG-1	1/30	1,0
XG-2	1/30	2,0

Fonte: Autoria própria

Com o intuito de aferir a qualidade da espuma foi avaliada sua densidade, estabilidade e resistência. A estabilidade foi analisada com base na metodologia utilizada por Sun *et al.* (2018) e Zhu *et al.* (2020), na qual foi preenchido 3 (três) béqueres de 500 ml, com a espuma recém formada e a perda de volume foi registrada a cada 5 min durante 30 min. De acordo com Zhu *et al.* (2020), a taxa de drenagem padrão do agente espumante é aquela aferida no tempo de 30 min após a formação da espuma, e para ter aplicações em engenharia, deve atender ao requisito do volume drenado ser menor que 20% do volume total.

A resistência da espuma foi mensurada de acordo com a metodologia proposta por Sun *et al.* (2018). Para isso foi utilizada, conforme a Figura 18 (a) uma bola de plástico de 2,53 g de massa, e com 3 cm de diâmetro (ver Figura 18 (b)). Com um béquer cheio de espuma pré-formada, é colocado a bola suavemente no topo da espuma, e acionado o cronômetro. Dessa forma, foi medido o tempo que a bola levou para percorrer do topo ao fundo do béquer. Com a distância e o tempo, foi calculada a velocidade média de afundamento da bola. Quanto menor a velocidade média calculada, maior a resistência da espuma.

$$V_m = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (3.1)$$

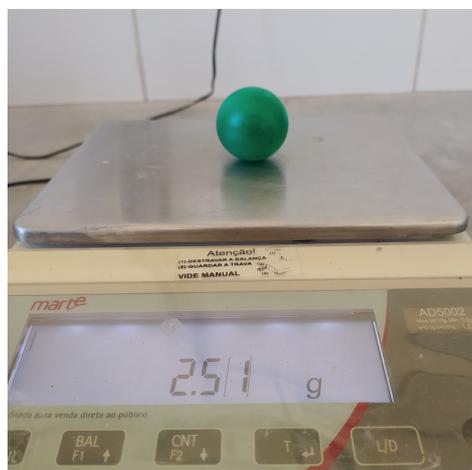
Onde:

V_m : Velocidade média, em mm/s.

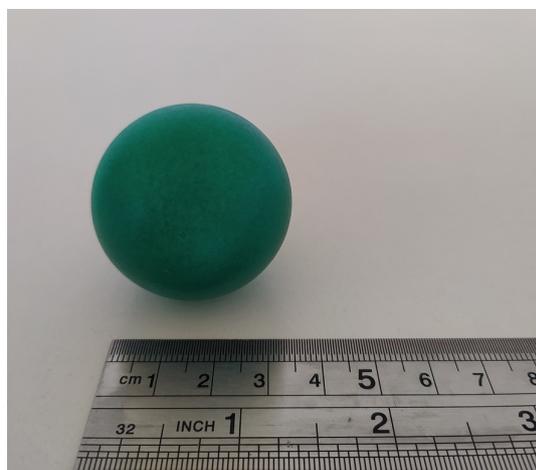
ΔS : Variação do deslocamento, em mm.

Δt : Variação do tempo, em s.

Figura 18 – Bola utilizada para determinar a resistência da espuma: a) Massa e b) Diâmetro.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria

A densidade da espuma foi analisada logo após sua formação, onde um béquer de volume e massa conhecidos (500 ml) foi completado com a espuma recém formada. A massa do béquer com a espuma foi determinada em uma balança com precisão de 0,01 g, e posteriormente os dados obtidos foram aplicados na seguinte Equação 3.2.

$$D = \frac{m - mb}{V} \quad (3.2)$$

Onde:

D : Densidade (kg/m^3)

m : Massa do béquer com espuma, em kg.

mb : Massa do béquer sem espuma, em kg.

V : Volume do béquer, em m^3 .

A fim de verificar a estrutura das bolhas na espuma, logo após a produção da mesma, foi realizado uma análise de microscopia óptica, através do microscópio modelo Kontrol Im100i, com aumento de 100x, instrumentado com câmera SH-318 1/3 Sony color D.S.P CCD, com resolução de 720 x 480 px. Após a obtenção das imagens, foi utilizado o *software* ImageJ para medir a dimensão das bolhas, bem como a parede das bolhas e a espessura do filme líquido. Foram analisadas, cinco imagens, sendo aferido, no total, 25 medidas do filme líquido, 25 da membrana da bolha e 25 do tamanho das bolhas, respectivamente para cada composição.

Após obter a análise de estabilidade dos traços, foi desenvolvido uma regressão linear para o traço referência, como também para a amostra que obteve melhor desempenho. O objetivo da regressão linear é estabelecer o tempo necessário para a produção de um determinado volume de espuma.

A fim de obter a regressão linear, foram escolhidos três volumes diferentes de espuma, 17, 23 e 46 Litros. Com o auxílio de um cronômetro foi aferido o tempo necessário para preencher certo volume de espuma. Foram utilizados três volumes diferentes de recipientes, esse procedimento foi repetido por quatro vezes, a fim de se ter uma melhor representatividade estatística.

3.2.2 Confecção do concreto celular: traço, mistura, moldagem e cura

O traço a ser utilizado nesta pesquisa foi dosado com base na metodologia proposta por Teixeira Filho e Tezuka (1992), onde foi previamente estabelecido a massa específica alvo (γ_{ef}), o consumo de cimento (C_c) e a relação água/cimento (a/c). A partir desses parâmetros e por meio de equações foram quantificados a areia (A_s) conforme a Equação 3.3, o volume de espuma (V_{esp}) conforme a Equação 3.4, e o volume de água (V_a) conforme a Equação 3.5, descontando-se do volume de água, a quantidade utilizada para a produção da espuma.

$$A_s = \gamma_{ef} - C_c - (a/c \times C_c) \quad (3.3)$$

$$V_{esp} = 1000 - \frac{A_s}{\gamma_a} - \frac{C_c}{\gamma_c} - (a/c \times C_c) \quad (3.4)$$

$$V_a = (a/c \times C_c) - (V_{esp} \times \gamma_{esp}) \quad (3.5)$$

Onde:

γ_{ef} : é a massa específica alvo do concreto celular

C_c : é o consumo de cimento

a/c: é a relação água/cimento

A_s : é a quantidade de areia seca/m³

γ_a : é a massa específica seca da areia

γ_c : é a massa específica do cimento

V_{esp} : é o volume de espuma

γ_{esp} : é a massa específica da espuma.

A Tabela 9 apresenta os traços unitários e a Tabela 10 o consumo de materiais por traço para a confecção de 1 m³ de compósito de concreto celular que foram desenvolvidos e analisados na presente pesquisa. Os traços foram denominados em função da massa específica alvo, a presença ou não de goma xantana e de fibra de polipropileno.

Tabela 9 – Traços unitário

Mistura	Cimento	Áreia	Espuma	Água	Água na espuma	Fator a/c	Fibra PP
800-REF	1	0,79	1,71	0,46	0,04	0,5	-
800-PP	1	0,79	1,71	0,46	0,04	0,5	0,02
800-XG	1	0,79	1,71	0,46	0,04	0,5	-
800-XG-PP	1	0,79	1,71	0,46	0,04	0,5	0,02
1200-REF	1	1,93	1,25	0,45	0,05	0,5	-
1200-PP	1	1,93	1,25	0,45	0,05	0,5	0,02
1200-XG	1	1,93	1,25	0,45	0,05	0,5	-
1200-XG-PP	1	1,93	1,25	0,45	0,05	0,5	0,02

Fonte: Autoria própria

Tabela 10 – Traços com o consumo de materiais para a produção de 1m³

Mistura	Cimento (kg)	Áreia (Kg)	Espuma (L)	Água na espuma (L)	Fibra PP (Kg/m³)
800-REF	350	276,5	598,5	14	-
800-PP	350	276,5	598,5	14	1,82
800-XG	350	276,5	598,5	14	-
800-XG-PP	350	276,5	598,5	14	1,82
1200-REF	350	675,5	437,5	17,5	-
1200-PP	350	675,5	437,5	17,5	1,82
1200-XG	350	675,5	437,5	17,5	-
1200-XG-PP	350	675,5	437,5	17,5	1,82

Fonte: Autoria própria

O método de mistura foi baseado na metodologia utilizada por Sun *et al.* (2018), a qual está de acordo com a ACI 523.3R-14 (ACI, 2014), e Liu, Xie e Li (2022). Em um primeiro momento, o cimento, a areia e a água foram inseridos no misturador de eixo vertical e misturados até obter uma argamassa homogênea (ver Figura 19 (a)). Após, conforme pode ser visualizado na Figura 19 (b), com a finalidade de não ocorrer a formação de grumos, a fibra PP foi sendo incorporada aos poucos à argamassa. Por fim, a espuma pré-formada foi adicionada no misturador de eixo vertical e incorporada na argamassa com fibras (ver Figura 19 (c)). De acordo com os autores citados acima, este procedimento minimiza o rompimento das bolhas.

Figura 19 – Método de mistura: a) realização da argamassa b) Inserção das fibras c) Inserção da espuma



(a)

(b)



(c)

Ferreira e Tezuka (1987) utilizou 3 (três) tempos de mistura, 3, 5 e 10 minutos, e observou que com o aumento do tempo de mistura, ocorreu o aumento da massa específica, pois as bolhas de ar presente na mistura se romperam. Em face dessa consideração, o tempo de mistura após a adição da espuma pré-formada foi de 3 (três) minutos. Após decorrer os três minutos, um béquer com capacidade de 1 litro foi preenchido com o compósito recém formado e aferido a sua massa específica.

Para a moldagem dos corpos de prova, foram utilizados cinco dimensões diferentes de fôrmas, em função dos ensaios propostos. A fim de obter uma maior representatividade estatística, foi moldado no mínimo 3 (três) corpos de prova para

cada traço, ensaio e idade de verificação do mesmo. A moldagem dos corpos de prova procedeu-se da seguinte forma: com o auxílio de uma concha, preencheu-se as fôrmas com concreto celular espumoso, até a metade da sua altura. Em seguida, por meio de uma mesa vibratória, realizou-se o adensamento. Por fim, completou-se o volume restante das fôrmas com concreto celular espumoso, e repetiu-se o adensamento. Como o concreto celular é fluído, o adensamento ocorreu por poucos segundos. Com o intuito de conferir uma superfície com melhor acabamento, realizou-se o nivelamento (rasamento) com o auxílio de uma régua. Após a moldagem, a superfície dos corpos de prova em contato com o ar, foram revestidas com um filme plástico, a fim de evitar a perda de água para o ambiente. A seguir será apresentado a Tabela 11, com os ensaios que serão executados no estado endurecido e as respectivas dimensões do corpos de prova.

Tabela 11 – Ensaios realizados

Ensaio	Corpo de prova		Quantidade/ Traço	Idade dos ensaios (dias)
	Geometria	Dimensão (mm)		
Resistência à compressão	cilindro	100x200	8	7 e 28
Resistência à compressão	prisma	40x40x160	16	7 e 28
Resistência à tração na flexão em 3 pontos	prisma	40x40x160	8	7 e 28
Estabilidade do concreto celular	cilindro	100x1500	1	28
Absorção de água por capilaridade	cilindro	100x200	3	28
Absorção e índices de vazios	cilindro	100x200	3	28
Retração por secagem	retangular	30x30x285	3	1,2,7,28
Condutividade térmica	retangular	150x150x50	3	28

Ao final foram moldados 232 corpos de prova, compondo 0,42 m³ de volume de compósito de concreto celular. Salienta-se que nesse volume, foi empregado 30% de perda. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e mantidos em cura saturada, com exceção dos corpos de prova que foram analisados a retração por secagem, até as idades estabelecidas para os ensaios.

3.2.3 Densidade do concreto celular

A densidade no estado fresco foi determinada com base na NBR 12.644 (ABNT, 2014). Para obter maior confiabilidade, foram feitas quatro medições através de um recipiente com volume e peso conhecidos, onde o mesmo foi preenchido com concreto celular logo após a finalização da mistura, em seguida foi pesado em uma balança com precisão de 0,1 g, e os dados encontrados foram aplicados na seguinte Equação 3.6:

$$D = \frac{m - mb}{V} \quad (3.6)$$

Onde:

D : Densidade (kg/m³)

m : Massa do recipiente com concreto celular, em kg.

mb : Massa do recipiente sem concreto celular, em kg.

V : Volume do béquer, em m³.

A determinação da densidade no estado endurecido foi realizada após 28 dias de cura. Um paquímetro será utilizado para aferir a altura exata dos corpos de prova e posteriormente as amostras serão pesadas em uma balança com precisão de 0,1g. A densidade foi obtida através da Equação 3.7 a seguir.

$$D = \frac{m}{V} \quad (3.7)$$

Onde:

D : Densidade (kg/m³)

m : Massa do corpo de prova, em kg.

V : Volume do corpo de prova, em m³.

3.2.4 Absorção de água por capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade após 28 dias foi realizada de acordo com a NBR 9779 ABNT (2012). Os corpos de prova foram previamente secos em estufa a temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$, até atingirem a constância de massa. O ensaio consiste em colocar uma superfície da amostra de concreto em contato com a água (ver Figura 20), de modo que o nível de água permaneça constante com 5 ± 1 mm. A água absorvida foi aferida após a superfície do concreto ser colocada em contato com a água, nos seguintes intervalos de tempo: 3, 6, 24, 48 e 72 h. Após, os corpos de prova foram ensaiados a compressão diametral e aferido a altura de ascensão capilar.

Figura 20 – Ensaio de absorção de água por capilaridade



3.2.4.1 Absorção de água por imersão e Índices de Vazios

A determinação da absorção de água por imersão e do índice de vazios sucederam de acordo com a NBR 9.778 (ABNT, 2009), aos 28 dias, onde foi seguido os procedimentos descritos a seguir.

Em um primeiro momento, a amostra foi posta em estufa por um período de 72 horas à temperatura de 60 ± 5 °C para atingir a constância de massa. Após, foi registrado a massa da amostra na condição seca (m_s), em balança com precisão de 0,1 g.

Em um segundo momento, a amostra foi imersa em água a temperatura de 23 ± 2 °C por um período de 72 horas. Em seguida, a amostra foi colocada em um recipiente cheio de água, e levado a uma temperatura de 80 °C, onde permaneceu por um período de cinco horas, mantendo o volume de água constante.

Após a água esfriar naturalmente até a temperatura de 23 ± 2 °C, com o auxílio de uma balança hidrostática, foi determinada e registrada a massa (m_j). Em seguida, foi determinado a sua massa saturada (m_{sat}), na qual a amostra será retirada da água, e enxugada com um pano úmido, e em seguida, aferida sua massa.

A absorção de água (A) foi calculada com a Equação 3.8, e o índice de vazios (I_v) de acordo com a Equação 3.9, a seguir.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.8)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_j} \times 100 \quad (3.9)$$

Onde:

m_{sat} : é a massa da amostra saturada em água após a imersão e fervura, em gramas;

m_s : é a massa da amostra em estufa, em gramas.

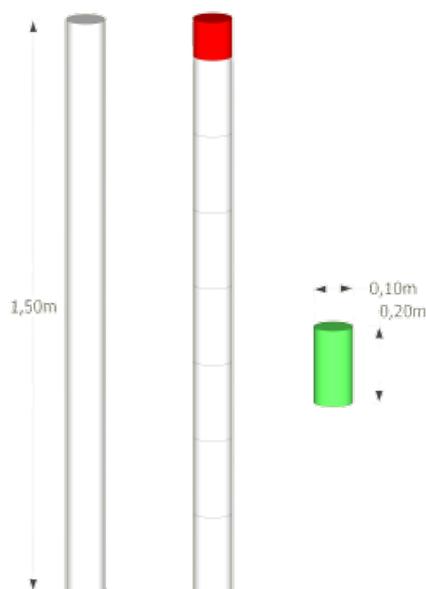
m_j : é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura, em gramas.

3.2.5 Estabilidade do concreto celular espumoso através da coluna vertical

A determinação da estabilidade do concreto espumado, será baseada no método proposto por She *et al.* (2018). O método consiste em determinar a variação da densidade, índice de vazios e absorção de água por imersão do concreto celular espumoso em relação à altura de lançamento. Foi realizado a moldagem de corpos de prova em formato cilíndrico com diâmetro de 100 mm e altura de 1500 mm.

Após 7 dias de cura, os corpos de prova foram retirados dos moldes e fatiados em vários cilindros de 200 mm de altura, conforme pode ser visto na Figura 21. A fim de obter uma superfície homogênea, foram descartadas as extremidades da coluna vertical. Após 28 dias, as amostras fatiadas foram secas em estufa até atingir uma massa constante. Em seguida, foram realizados os procedimentos descritos no item anterior e verificado a densidade das amostras.

Figura 21 – Ensaio de estabilidade através da coluna vertical



3.2.6 Condutividade Térmica

A condutividade térmica foi avaliada após 28 dias de cura com base na NBR 15.220-3 (ABNT, 2005b). Para determinar a condutividade térmica foi utilizado o equipamento LaserComp, modelo FOX 304 (ver Figura 22), o qual faz uso do método fluxiométrico para realizar o ensaio. O equipamento leva em consideração a espessura da amostra, a variação de temperatura entre os pratos e o fluxo térmico sobre a amostra,

o mesmo consegue determinar a condutividade térmica na faixa de temperatura de -20 °C e 75 °C, com precisão de $\pm 0,01$ °C.

Figura 22 – Equipamento LaserComp modelo FOX 304 para verificar a condutividade térmica



Fonte: Autoria própria

Para tanto, foram moldados corpos de prova cúbicos de 150x150 mm em que, após 28 dias de cura, foram fatiados com o auxílio de uma serra circular de bancada em três amostras prismáticas de 150x150x50 mm. As amostras foram posicionados entre os dois pratos do equipamento, os quais são configurados para que possuam uma diferença de temperatura de 25 °C (ΔT). A faixa de temperatura adotada foi entre 10 °C e 35 °C. A condutividade térmica (λ) possui precisão de ± 2 % e foi determinada através através da Equação 3.10.

$$\lambda = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta T} \quad (3.10)$$

Onde:

L : espessura da amostra;

Q : o calor de cada prato;

A : a área de contato da amostra com os pratos;

ΔT : a diferença de temperatura, definida como 25 °C.

3.2.7 Retração por secagem

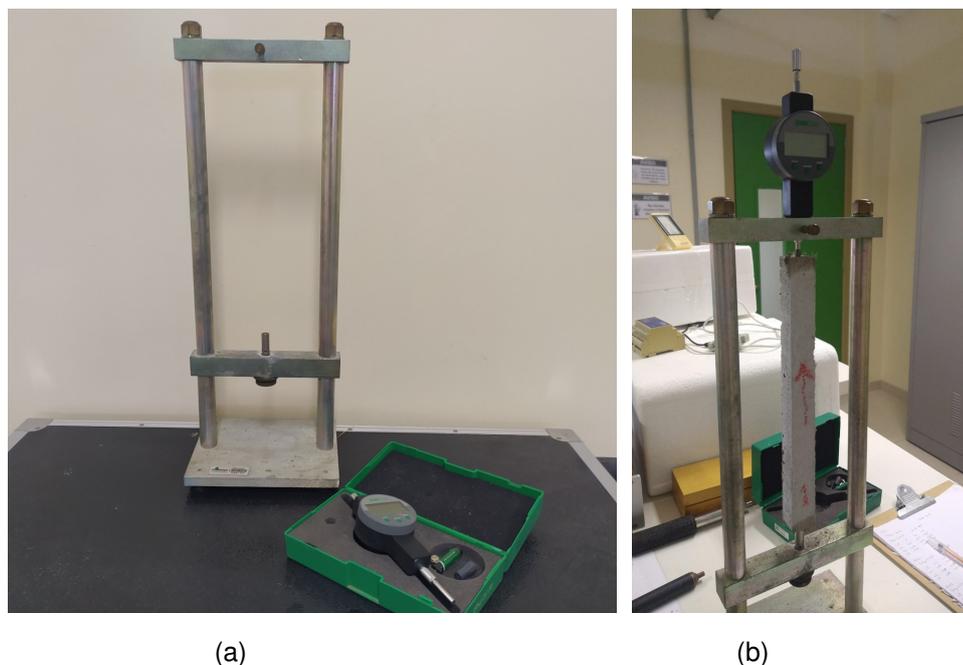
O ensaio de retração por secagem consiste em verificar a variação dimensional do material. A retração foi avaliada conforme estabelecido pela NBR 16.834 (ABNT, 2020). Para a execução do ensaio, foram moldados corpos de prova prismáticos de 30x30x285 mm para cada traço analisado.

Foram utilizados pinos de medida de aço inoxidável, os quais foram encaixados simetricamente nas extremidades internas de menor lado dos moldes. Em seguida foi realizado a moldagem das amostras. Após a moldagem, a superfície do corpo de prova em contato com o ar foi coberta com filme PVC, para evitar a perda de umidade durante as primeiras 12 ± 3 horas. Decorrido esse período, os corpos de prova foram desmoldados, corretamente identificados e mantidos em câmara seca, com temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar de 50 ± 5 %, até os 56 dias.

Será adotado a condição de variação livre, onde não possui a presença de restrição à retração ou à expansão do concreto celular.

As leituras (Li) serão realizadas com o auxílio de um aparelho comparador (ver Figura 23), que deve dispor de um relógio comparador com resolução de 0,001 mm. As leituras serão aferidas após 1, 2, 7, 14 e 28 dias.

Figura 23 – Ensaio de retração: a) Equipamento b) Leitura da retração



3.2.8 Resistência à tração na flexão e compressão de corpos de prova prismáticos

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado com base na NBR 13.279 (ABNT, 2005a). Para a realização do ensaio, foram utilizados corpos de prova prismáticos de dimensões 40x40x160 mm, os quais foram aferidos aos 7 e 28 dias de cura.

Para a verificação foi utilizado uma máquina de ensaios universais eletromecânica com carregamento de 50 ± 10 N/s até a ruptura do corpo de prova. A máquina de ensaios universais é da fabricante Emic modelo DL 20000 e possui capacidade máxima de carga de 200 kN. A resistência à tração na flexão foi determinada pela Equação 3.11.

$$R_t = \frac{1,5F_f.L}{40^3} \quad (3.11)$$

Onde:

R_t : é a resistência à tração na flexão, em MPa;

F_F : é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N;

L : é a distância entre os suportes, em mm;

Com base na NBR 13.279 (ABNT, 2005a), as metades dos corpos prismáticos, originárias do rompimento através do ensaio de tração na flexão, foram utilizadas para realizar o ensaio de resistência à compressão. A carga aplicada foi de 500 ± 50 N/s até a ruptura do cp. A resistência à compressão foi calculada segundo a equação 3.12.

$$R_c = \frac{F_c}{1.600} \quad (3.12)$$

Onde:

R_c : é a resistência à compressão, em MPa;

F_F : é a carga máxima aplicada, em N;

1.600: é a área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga 40 mm x 40 mm, em mm²;

O processo de fissuração dos corpos de prova foram avaliados através de correlação digital de imagem (DIC), no *software* GOM Correlate. De acordo com Poissant (2007), o método parte da utilização de imagens digitais, que passam por um processo de discretização dos seus elementos primários, os Pixels. Antes de mais nada, conforme pode ser visto na Figura 24, realizou-se em uma das faces dos cps uma pintura estocástica (*speckles*), a qual consiste em aplicar uniformemente uma camada de tinta branca, e após aplicar levemente um jato de tinta spray preto, a fim de criar níveis de contrastes variados através de pequenos pontos aleatórios nos cps. Por fim, o ensaio de resistência à tração na flexão foi filmado com uma câmera de 43 MegaPixels, a fim de obter as imagens para realizar a correlação.

Figura 24 – Pintura estocástica



3.2.9 Resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos

A determinação da resistência à compressão foi baseada na NBR 5739 ABNT (2018). Foram ensaiados corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 100 x 200 mm, aos 7 e 28 dias, como também, as metades dos corpos de prova rompidos no ensaio de resistência à tração na flexão. Para a verificação foi utilizado uma máquina de ensaios universais eletromecânica com uma taxa de carregamento constante de 0,05 mm/min. A máquina de ensaios universais é da fabricante Emic modelo DL 20000 e possui capacidade máxima de carga de 200 kN. A resistência à compressão será determinada através da Equação 3.13, exposta a seguir.

$$f_{cc} = \frac{F}{A} \quad (3.13)$$

Onde:

f_{cc} : é a resistência à compressão do corpo de prova, em MPa;

F : é a carga de falha, em N;

A : é a área de suporte de pressão do corpo de prova, em mm².

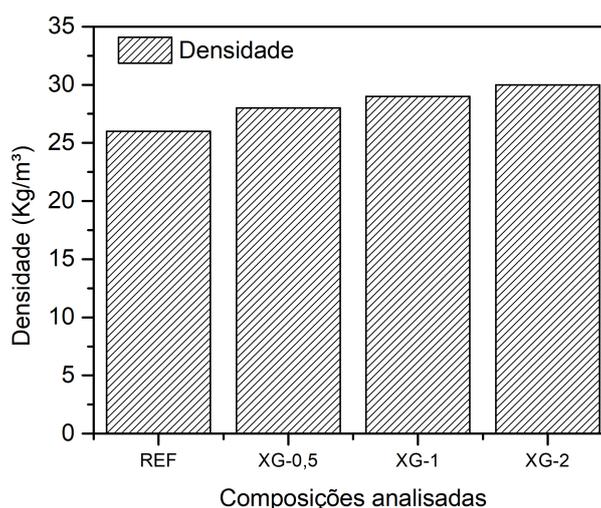
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os resultados referentes ao programa experimental proposto, como também sua análise e interpretação, de maneira a auxiliar as conclusões da pesquisa, apresentadas no capítulo final deste trabalho.

4.1 ETAPA 1: Avaliação da estabilidade da espuma pré-formada

Neste item são expostos os resultados avaliados em relação a qualidade e produção das espumas, como também, a interpretação dos resultados obtidos. Os dados individuais encontram-se no Apêndice A. A Figura 25 apresenta de forma gráfica as densidades das espumas produzidas.

Figura 25 – Densidade das composições

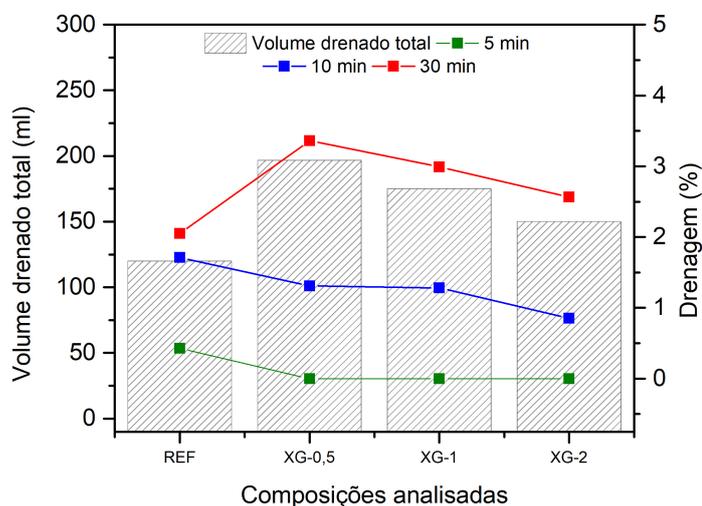


Conforme pode ser visto, para a relação de água/agente espumante igual a 1/30 e pressão de ar de 80 Psi, durante a formação da espuma, a medida que aumenta o teor de goma xantana, aumenta também a densidade da espuma. A composição XG-2 apresentou a maior densidade, com 30 Kg/m³, conforme explicado no item 2.3 é a única que está dentro da faixa de valores ideais de densidade mencionados por Zhu *et al.* (2020) e ASTM (2012). As demais composições apresentaram densidades menores que 30 Kg/m³, estando fora da faixa ideal. Os valores encontrados estão em concordância com as observações de Raj, Krishnan e Ramamurthy (2022), na qual os autores obtiveram que há um incremento na densidade à medida que aumenta o teor de XG.

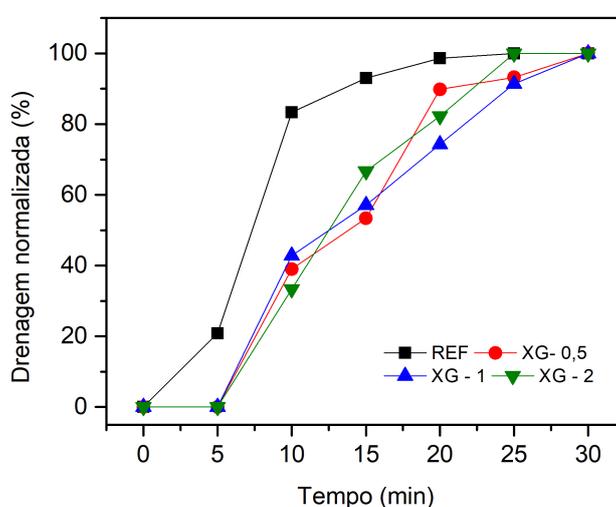
A Figura 26 (a) apresenta de forma gráfica os valores médios de drenagem das espumas produzidas e (b) apresenta o volume drenado em função do tempo. A fim de obter maior confiança dos resultados, o ensaio foi repetido por 3 vezes. Salienta-se

que as amostras apresentaram um baixo desvio padrão, por este motivo o mesmo não pode ser visualizado nos gráficos.

Figura 26 – Drenagem: a) Drenagem média das espumas b) Drenagem normalizada.



(a)



(b)

Conforme pode ser visto, a composição que apresenta, ao final de 30 min de ensaio, o menor volume de líquido drenado é à composição REF. A composição XG-2 ocupa a segunda posição, seguida de XG-1 e XG-0,5. Em comparação a composição REF, XG-2 apresenta em torno de 25% a mais de volume drenado, XG-1 cerca de 45% e XG-0,5 cerca de 63%. O percentual máximo de volume de espuma drenado foi de 3,93 %, estando todos os traços bem abaixo do percentual máximo de drenagem de 20% para ser ter uso em engenharia de acordo com Zhu *et al.* (2020).

Em conformidade com o gráfico da Figura 26 (a), as composições XG-0,5, XG-1 e XG-2 permanecem sem drenar durante os primeiros cinco minutos de ensaio, compro-

vando o efeito retardador da goma xantana. Após 10 min de ensaio, o volume drenado pela composição XG-2 é cerca de metade do volume drenado pela composição REF, e 3/4 do volume drenado pelas composições XG-0,5 e XG-1. Apesar da composição REF apresentar menor volume de líquido drenado ao final do ensaio, ele começa a drenar logo após sua confecção, o que diminui a qualidade e estabilidade da espuma. Conforme Raj, Krishnan e Ramamurthy (2022), nos primeiros momentos após a formação da espuma, o aumento do teor de goma xantana aumenta a capacidade da espuma em reter água no filme líquido, impedindo a ocorrência da drenagem.

Observa-se no gráfico da Figura 26(b), que após 20 min de ensaio, a composição REF já atingiu o valor total da drenagem, em contrapartida, a composição XG-2 atingiu o valor total de drenagem após 25 min de ensaio. O tempo desde a preparação da mistura até o final da moldagem dos corpos de prova é em torno de 20 min, por este motivo, é ideal utilizar a composição XG-2, visto que obteve a menor taxa de drenagem nesse intervalo de tempo, apresentando melhor qualidade entre as composições de espumas avaliadas. Entretanto, mesmo com esse indicador com relação a drenagem média, é necessário analisar se, de fato, há influência da goma xantana na taxa de drenagem final da espuma. Para tanto, foi realizado o teste de Tukey conforme pode ser visualizado na Tabela 12.

Tabela 12 – Teste de Tukey para a drenagem das espumas

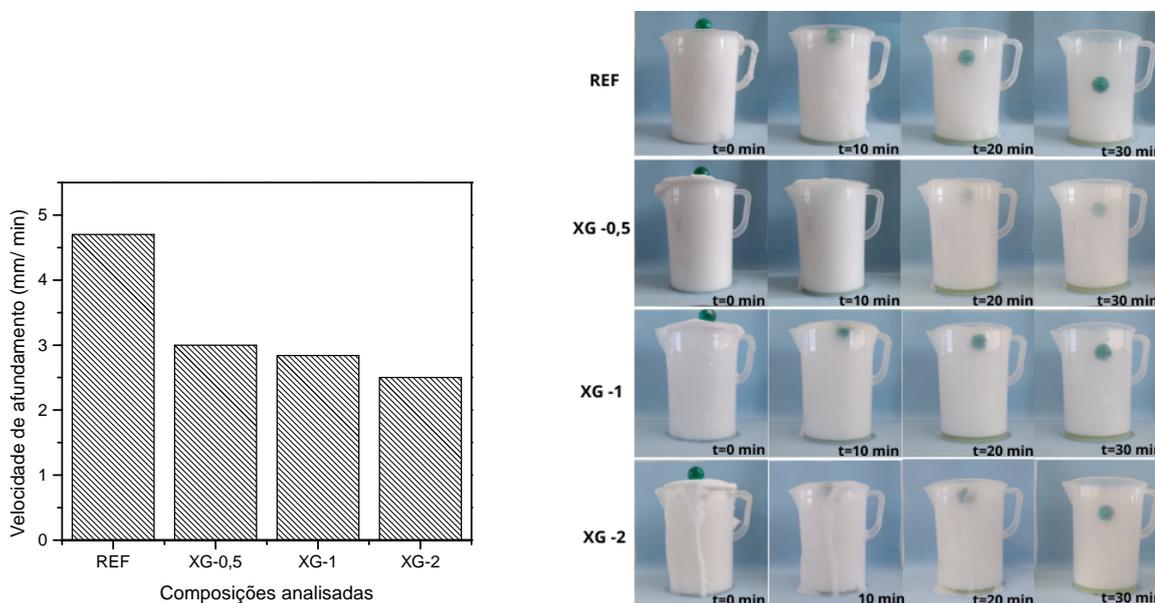
Comparação	Probabilidade	Significância
REF vs. XG-0,5	3,19458E-5	Sim
REF vs. XG-1	3,56427E-4	Sim
REF vs. XG-2	0,01611	Sim
XG-1 vs. XG-0,5	0,07587	Não
XG-2 vs. XG-0,5	0,0011	Sim
XG-2 vs. XG-1	0,04041	Sim

Conforme mostra a Tabela 12, o aumento do teor de goma xantana de 0,5% para 1%, não apresenta diferença significativa na diminuição da taxa de drenagem média das espumas. As demais variações apresentam entre si diferenças significativas, confirmando a influência da goma xantana na diminuição da taxa de drenagem média das espumas. Os resultados estão em conformidade com os obtidos por Raj, Krishnan e Ramamurthy (2022), na qual a goma xantana reduziu substancialmente a drenagem do líquido e conseqüentemente melhorou a estabilidade da espuma produzida com um tensoativo sintético. De acordo com os autores, o aumento da estabilização da espuma, em decorrência do aumento da dosagem de goma xantana, pode ser atribuída ao maior emaranhamento das moléculas, e conseqüente aumento da capacidade de retenção de água entre as bolhas.

A Figura 27 (a) a seguir demonstra de forma gráfica a resistência das espumas

produzidas, a partir da velocidade de afundamento da bola plástica, e (b) a execução do ensaio de resistência das espumas.

Figura 27 – Resistência das espumas



Conforme pode ser visto, a medida que aumenta o teor de goma xantana, diminui a velocidade de afundamento da bola plástica. A composição XG-2 possui menor velocidade de afundamento, com velocidade de 2,5mm/min, apresentando assim maior valor de resistência entre as composições analisadas. As composições XG-1, XG-0,5 e REF, apresentaram as seguintes velocidades de afundamento, 2,84mm/min, 3mm/min e 4,7mm/min, respectivamente. Não houve repetibilidade do ensaio de resistência, visto que a bola plástica era posta logo após o envase do béquer com espuma.

Figura 28 apresenta as imagens que foram utilizadas para ter uma noção do tamanho das bolhas/lamela, do filme líquido, como também da membrana que recobre as bolhas, obtidas no microscópio óptico. Salienta-se que o sistema de bolhas é instável, portanto é difícil a precisão dos dados.

Por meio de uma inspeção visual, observa-se que os traços analisados possuem uma composição heterogênea com relação ao tamanho das bolhas de espuma. A Figura 29 apresenta de forma gráfica o tamanho médio das bolhas de espuma. A Tabela 13 apresenta a faixa de distribuição dos tamanhos das bolhas de espuma para cada composição.

Figura 28 – Imagens analisadas no microscópio óptico

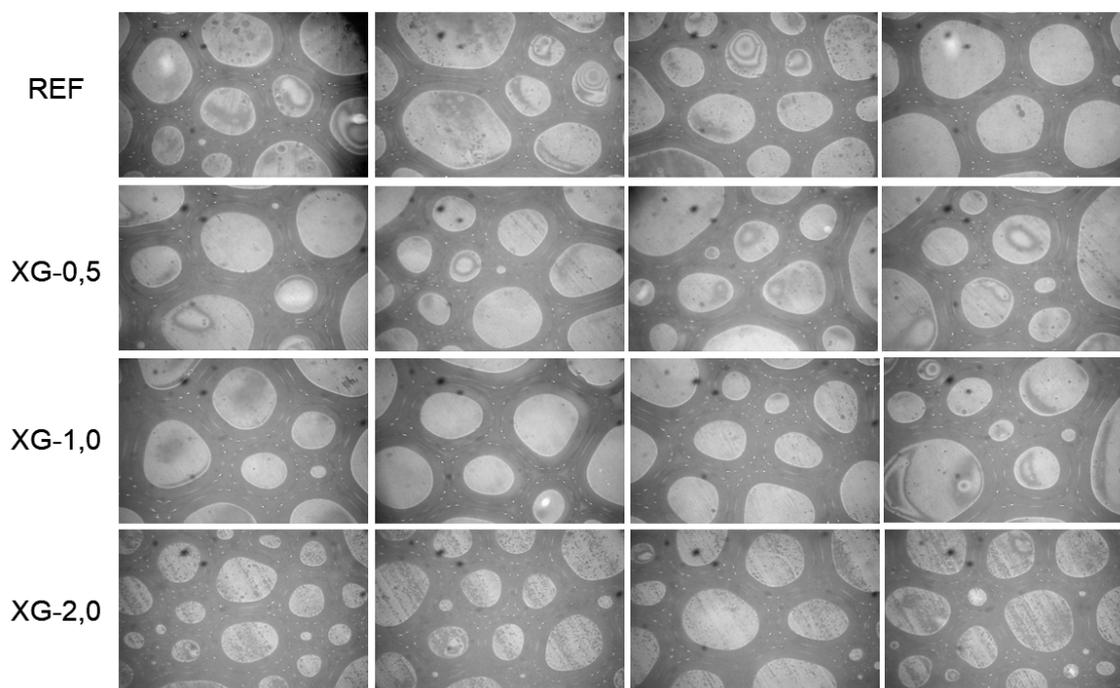


Figura 29 – Tamanho médio das bolhas de espuma

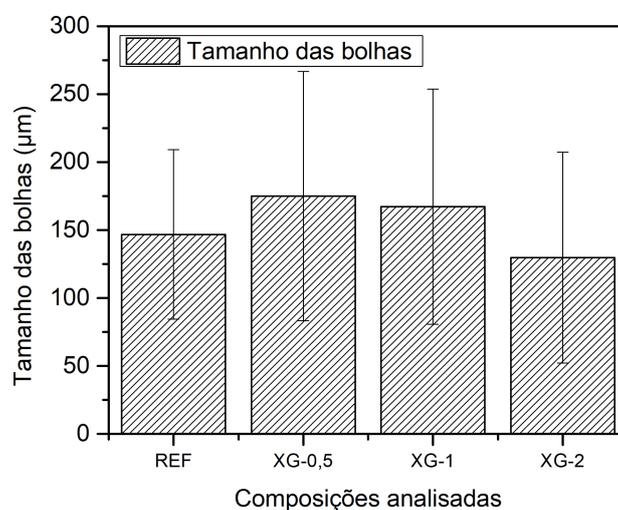


Tabela 13 – Faixa de distribuição dos tamanhos das bolhas de espuma

Composições	Faixa de distribuição (μm)
REF	43,05 - 279,9
XG-0,5	52,56 - 356,09
XG-1	61,52 - 333,03
XG-2	41,44 - 324,68

Conforme pode-se visualizar no gráfico, a composição XG-2, apresenta um menor tamanho médio das bolhas, com 129,70 μm , seguido da composição REF, com

146,81 μm , XG-1, com 167,70 μm e por fim XG-0,5, com 174,98 μm . Em relação a faixa de distribuição de tamanho das bolhas de espuma, observa-se na Tabela 13, que a composição XG-0,5 possui uma maior faixa de distribuição, seguido de XG-2, XG-1 e REF. Analisando as faixas de distribuição, nota-se que 50% (D50) das bolhas de espuma possuem dimensões abaixo de 168,63 μm em XG-1, 155,8 μm em XG-0,5 143,06 μm em REF e 115,52 μm em XG-2, ressaltando a maior presença de menores bolhas de espuma na composição XG-2.

Os dados encontrados sugerem que a composição XG-2 possui maior qualidade de espuma, pois apresenta um menor tamanho médio de bolhas como também sua faixa de distribuição possui bolhas com dimensões menores que as demais. O que está em conformidade com os resultados obtidos para a taxa de drenagem, pois a presença de bolhas menores evidencia que a composição está um ritmo de drenagem mais lento, se comparado com as demais composições. De acordo com o exposto por Zhang *et al.* (2020), bolhas menores tendem a se difundir com bolhas maiores, o que facilita a drenagem do líquido após a origem da espuma, e conseqüentemente diminui a qualidade das espumas.

Ao analisar o gráfico, é possível notar, que há pouca diferença entre os resultados aferidos. Constata-se através do teste de Tukey (ver Tabela 14), com 95% de confiança, que não há significância entre os resultados, evidenciando que a goma xantana não tem influência no tamanho das bolhas de espuma.

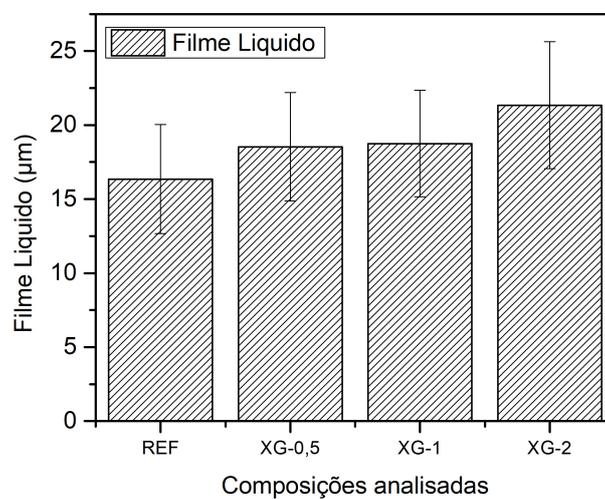
Tabela 14 – Teste de Tukey para o tamanho médio das bolhas

Comparação	Probabilidade	Significância
REF vs. XG-0,5	0,99631	Não
REF vs. XG-1	1	Não
REF vs. XG-2	1	Não
XG-1 vs. XG-0,5	0,99526	Não
XG-2 vs. XG-0,5	0,9968	Não
XG-2 vs. XG-1	0,99999	Não

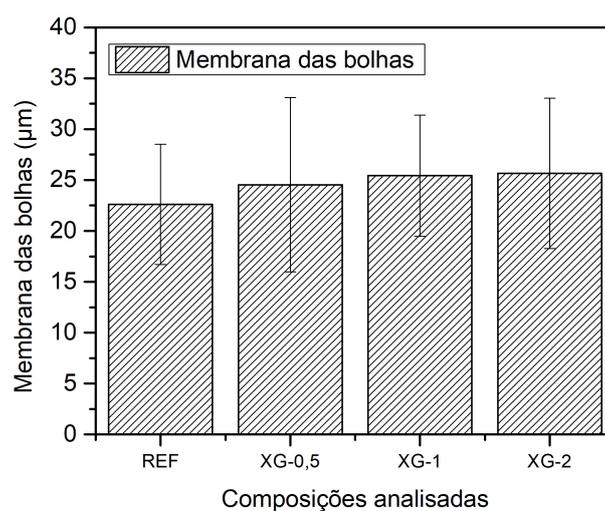
A Figura 30 apresenta de forma gráfica os resultados da análise microscópica, (a) do valor médio do filme líquido e (b) do valor médio da membrana que recobre a bolha.

Observando-se a Figura 30 (a), a medida que aumenta o teor de goma xantana, aumenta a dimensão média do filme líquido. A composição que apresenta maior dimensão média do filme líquido é a XG-2, com 21,34 μm , seguido de XG-1 com 18,75 μm , XG-0,5, com 18,53 μm e por fim a composição REF com 16,35 μm . Ao analisar o gráfico, é possível notar, a influência da goma xantana no aumento da espessura do filme líquido, evidenciando o efeito modificador de viscosidade da goma xantana. Para confirmar esta suposição e verificar se realmente há influência da goma xantana

Figura 30 – Análise microscópica: a) Dimensão do filme liquido b) Membrana das bolhas



(a)



(b)

na dimensão do filme líquido, foi realizado o teste de Tukey, com 95% de confiança, conforme pode ser visualizado na Tabela 15.

Tabela 15 – Teste de Tukey para o filme líquido

Comparação	Probabilidade	Significância
REF XG-0,5	0,18645	Não
REF XG-1	0,12372	Não
XG-1 XG-0,5	0,99708	Não
REF XG-2	6,85349E-5	Sim
XG-2 XG-0,5	0,05182	Não
XG-2 XG-1	0,08413	Não

Observa-se na tabela que apenas há significância na dimensão do filme líquido entre as composições REF e XG-2, entre as demais composições, não há diferença significativa na dimensão do filme com o incremento de goma xantana. Os resultados estão de acordo com os achados de Raj, Krishnan e Ramamurthy (2022), os quais obtiveram um aumento da espessura do filme líquido à medida que aumenta a dosagem de goma xantana.

Ao analisar a Figura 30 (b), pode-se verificar que a medida que aumenta a dosagem de goma xantana, aumenta o valor médio para a membrana que recobre a bolha, sendo que a composição que apresenta maior valor médio é XG-2, com $25,66\mu\text{m}$, seguido de XG-1, com $25,42\mu\text{m}$, XG-0,5 com $24,53\mu\text{m}$ e REF com $22,60\mu\text{m}$. Pode-se inferir que os valores são proporcionais ao tamanho das bolhas como também que são semelhantes. O teste de Tukey comprova que não há significância nos achados, conforme pode ser visualizado na Tabela 16.

Tabela 16 – Teste de Tukey para a membrana das bolhas

Comparação	Probabilidade	Significância
REF XG-0,5	0,75491	Não
REF XG-1	0,47298	Não
XG-1 XG-0,5	0,96813	Não
REF XG-2	0,59914	Não
XG-2 XG-0,5	0,99412	Não
XG-2 XG-1	0,99708	Não

Durante a execução da análise das espumas no microscópio, notou-se que quanto maior o teor de goma xantana, maior o período de manuseio da amostra. Ressalta-se que houve uma dificuldade de obter uma amostra precisa, pois as amostras se movem, e sofrem constantemente com a ação do ar, deteriorando-se.

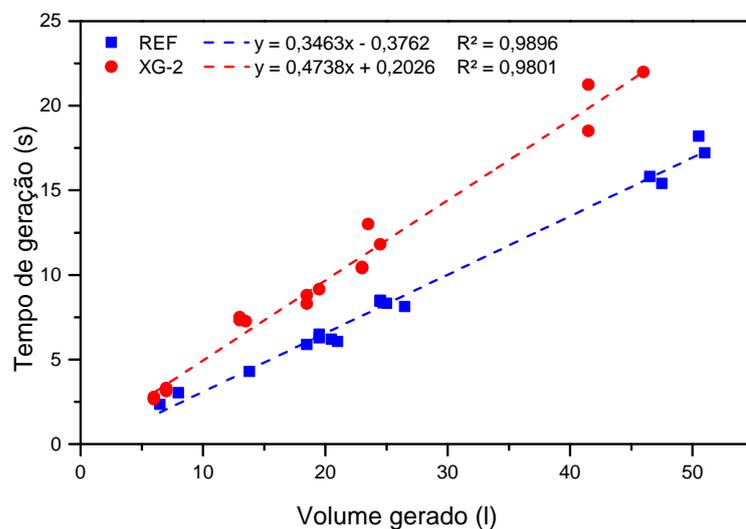
Por fim, ao analisar os resultados, escolheu-se o teor de 2% para a goma xantana. Apesar de XG-2 apresentar ao final do ensaio de drenagem maior percentual em comparação a REF, o mesmo permanece sem drenar até os primeiros 5 min, e apresenta menor percentual de drenagem aos 10 min, período necessário para realizar a moldagem dos corpos de prova. XG-2 também apresenta maior resistência da espuma e maior membrana que recobre as bolhas.

Com base em trabalhos realizados anteriormente, a forma utilizada para quantificar e inserir a espuma na argamassa, era através do preenchimento de um recipiente com volume conhecido, para enfim, acrescentar a espuma à argamassa. Este processo acaba influenciando na qualidade das espumas, pois deteriora as bolhas de ar.

A fim de obter uma espuma de melhor qualidade e com maior precisão de volume, durante o processo de inserção e mistura da mesma na argamassa, a espuma foi adicionada direto no misturador de eixo vertical e o parâmetro de medição adotado,

foi o tempo. Para isso, foi determinado o tempo necessário para a produção de um certo volume de espuma, através de uma regressão linear, conforme pode ser visualizado na Figura 31, a seguir.

Figura 31 – Regressão linear



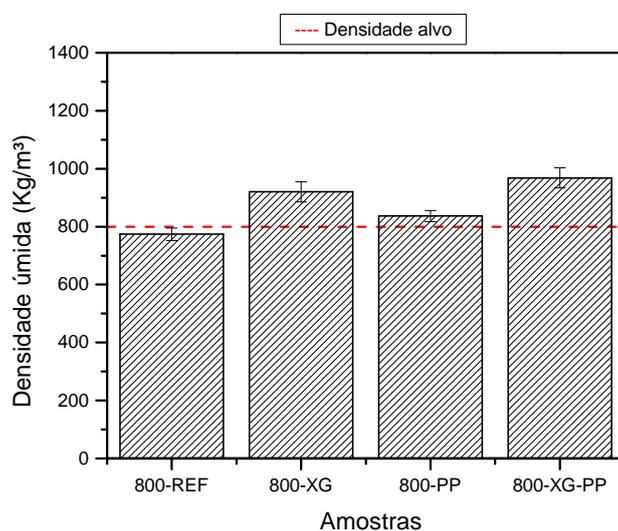
Após varias medições do volume de espuma em função do tempo, observa-se no gráfico, que para uma mesma quantidade de espuma, a amostra com goma xantana necessita de um maior tempo para a sua produção. A regressão linear resultou em uma fórmula, na qual introduz-se o volume de espuma necessário e como resultado, tem-se o tempo de inserção da espuma no misturador de eixo vertical.

4.2 ETAPA 2: Concreto celular espumoso

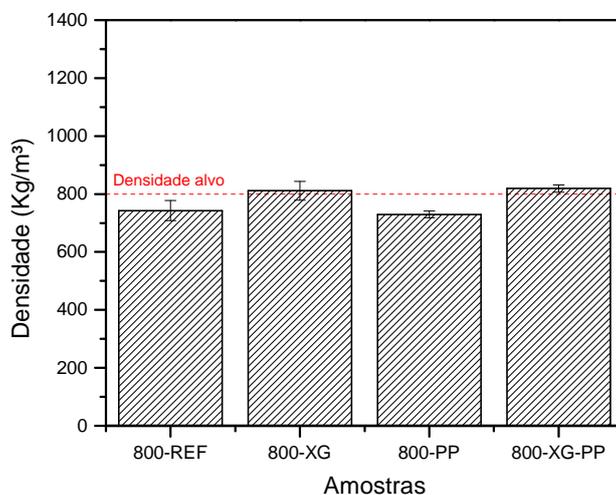
4.2.1 Densidade

A Figura 32 apresenta os resultados médios para a densidade das amostras com densidade planejada igual a 800 Kg/m^3 . Em (a) pode-se visualizar os resultados no estado fresco, aferido logo após a confecção do compósito de concreto celular, e em (b) no estado endurecido, aferido aos 28 dias. A Tabela 17 mostra a probabilidade e a significância obtidos na análise de comparação de médias através do teste de Tukey para a densidade no estado endurecido. Os dados individuais encontram-se no Apêndice B.

Figura 32 – Densidade alvo de 800 kg/m^3 : densidades obtidas no a) estado fresco b) estado endurecido



(a)



(b)

Conforme pode-se observar, ocorreu uma diferença entre a densidade no estado fresco e a densidade planejada. Em relação a densidade alvo, a amostra que obteve maior variação foi 800-XG-PP, com um aumento em torno de 21%, seguido de 800-XG e 800-PP, com um incremento de cerca de 15% e 4,5%, respectivamente. Em contrapartida, a amostras 800-REF obteve uma redução de 3% em relação a densidade esperada. No estado endurecido, observa-se na Figura 32 (b), que as amostras obtiveram densidade ligeiramente inferior a 800 Kg/m³. Os traços 800-REF e 800-PP ficaram abaixo da densidade alvo, em cerca de 7,16% e 8,81%, respectivamente. Já os traços 800-XG e 800-XG-PP tiveram um leve aumento da densidade em relação a densidade planejada, em torno de 2,27% e 2,37%, respectivamente.

Ao comparar a densidade no estado endurecido com a densidade no estado fresco, percebe-se que há uma tendência de redução da densidade. A amostra 800-REF perdeu em torno de 31 Kg/m³, 800-XG em torno de 109 Kg/m³, 800-PP em torno de 107 Kg/m³ e 800-XG-PP em torno de 149 Kg/m³. A ACI 523.3R-14ACI (2014) estima uma redução da densidade entre 80Kg/m³ e 160 Kg/m³, em decorrência do processo de cura. Os dados encontrados para a perda de densidade estão de acordo com a referida norma, com exceção da amostra 800-REF, a qual ficou fora desta faixa estimada.

Para os traços estudados na densidade alvo de 800 kg/m³, nota-se que XG proporcionou um aumento de cerca de 9,22%, como também, a ação conjunta de XG e PP possibilitou um incremento de cerca de 10,27% na densidade. De acordo com a Tabela 17, o incremento na densidade ocasionado pela XG como também pela ação conjunta de XG e PP é significativo, porém entre as amostras não há diferença significativa nos resultados. Portanto, a maior densidade conferida às amostras contendo XG ocorre devido ao aumento da estabilidade da espuma, mantendo a conformação da bolha após a mistura com a pasta de cimento, garantindo assim a densidade do concreto espumado (ZHU *et al.*, 2020). Por outro lado, a adição de fibras de PP não influenciam a densidade do concreto celular espumoso em faixas de 800 kg/m³.

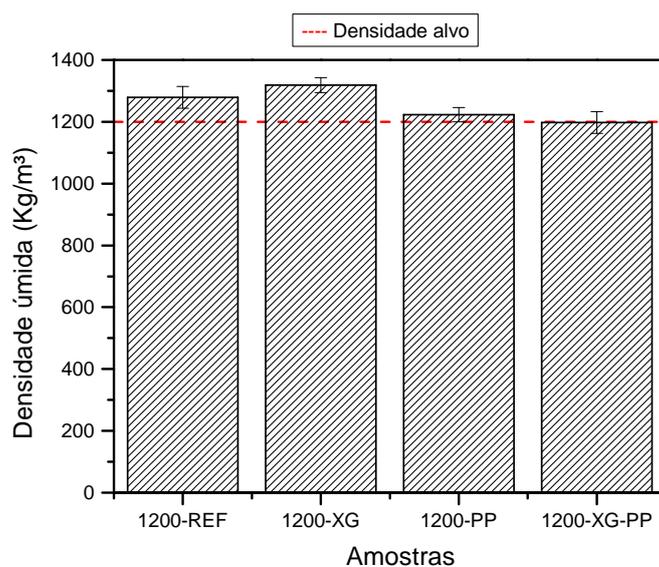
Tabela 17 – Teste de Tukey para a densidade aos 28 dias das amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³

Combinações	Probabilidade	Significância
800-REF vs. 800-XG	0,03292	Sim
800-REF vs. 800-PP	0,90379	Não
800-REF vs. 800-XG-PP	0,01906	Sim
800-XG vs. 800- PP	0,01318	Sim
800-XG vs. 800-XG-PP	0,97714	Não
800-PP vs. 800-XG-PP	0,00786	Sim

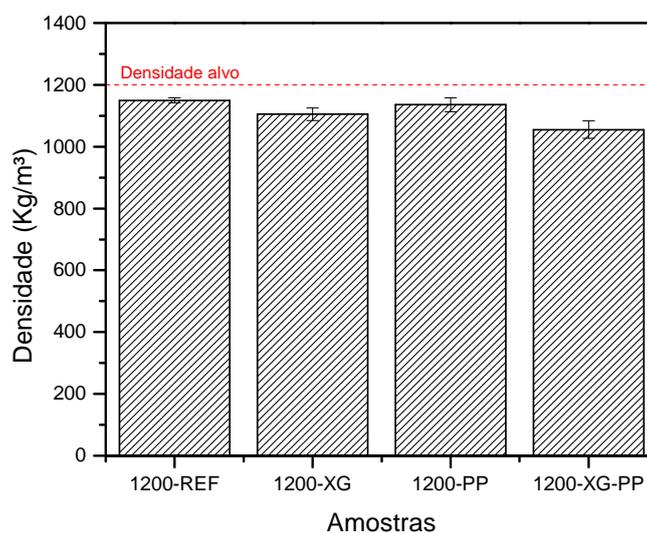
A Figura 33 apresenta os resultados médios para a densidade das amostras com densidade planejada igual a 1200 Kg/m³. Em (a) pode-se visualizar os resultados

no estado fresco, aferido logo após a confecção do compósito de concreto celular, e em (b) no estado endurecido, aferido aos 28 dias. A Tabela 18 mostra a probabilidade e a significância obtidos na análise de comparação de médias através do teste de Tukey para a densidade no estado endurecido. Os dados individuais encontram-se no Apêndice B.

Figura 33 – Densidade: a) estado fresco b) estado endurecido



(a)



(b)

No estado fresco, visualiza-se na Figura 33 (a), que as amostras 1200-XG, 1200-REF e 1200-PP registraram um leve aumento da densidade em relação a densidade planejada, em torno de 9%, 6% e 2%, respectivamente. Em contrapartida, 1200-XG-PP obteve uma leve redução de 2% em relação ao esperado. Aos 28 dias, conforme pode

ser visualizado na Figura 33 (b), as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³ ficaram um pouco abaixo da densidade planejada. Em relação a densidade almejada, a amostra 1200-XG-PP exibiu a menor densidade no estado endurecido, com uma diferença em torno de 12,07%. Por sua vez, 1200-XG apresentou uma variação de cerca de 7,93% e 1200-PP de 5,36%. Por fim, a amostra referência obteve a densidade mais próxima ao almejado, com uma pequena diferença de 4,20%. Verifica-se também, que ocorreu uma variação entre a densidade no estado fresco e no estado endurecido. A amostra 1200-PP apresentou a menor perda, em torno de 87 Kg/m³, seguido de 1200-REF com 129 Kg/m³, 1200-XG-PP 142 Kg/m³ e por último 1200-XG com 213 Kg/m³. Com base na ACI (2014), a alta perda de densidade está relacionado a exposição das amostras a condições de baixa umidade.

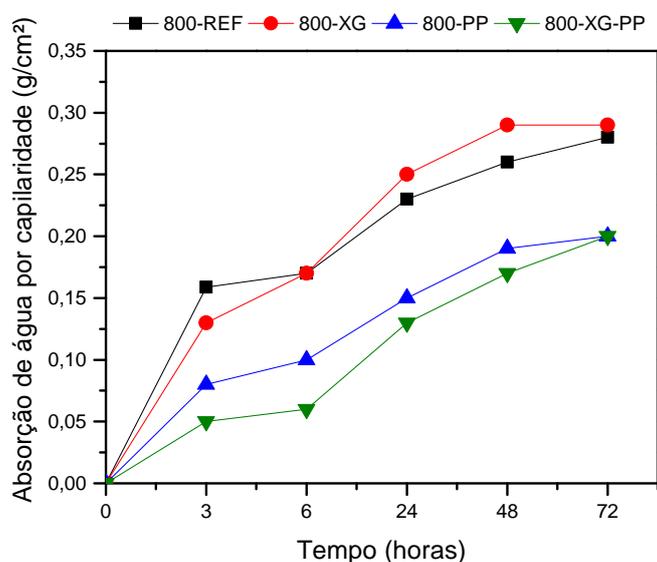
Em comparação a amostra referência, observa-se na Tabela 18, que a adição de XG influenciou em uma leve redução da densidade, em torno de 4%. Do mesmo modo, a ação conjunta de XG e PP diminuiu a densidade em cerca de 8,21 %, apresentando significância de resultados. Por sua vez, a adição de PP apresentou uma sutil redução da densidade, no entanto apresentou resultados semelhantes a REF. Nota-se também que entre as amostras 1200-XG e 1200-XG-PP não há diferença significativa, sugerindo-se que, na presença da goma xantana para a densidade estudada, as fibras PP não influenciam na densidade do concreto celular espumoso.

Tabela 18 – Teste de Tukey para a densidade aos 28 dias das amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³

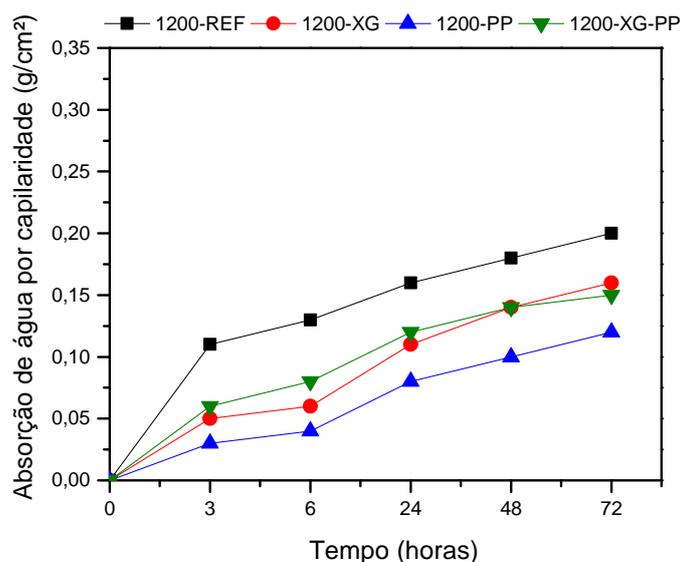
Combinações	Probabilidade	Significância
1200-REF vs. 1200-XG	0,0238	Sim
1200-REF vs. 1200-PP	0,84711	Não
1200-REF vs. 1200-XG-PP	0,00246	Sim
1200-XG vs. 1200-PP	0,33475	Não
1200-XG vs. 1200-XG-PP	0,07576	Não
1200-PP vs. 1200-XG-PP	0,00654	Sim

4.2.2 Absorção de água por capilaridade

De acordo com Niu *et al.* (2020) a absorção de água por capilaridade é uma propriedade importante para avaliar a durabilidade do concreto celular, como também, de acordo com (COSTA, 2015), o ensaio fornece indícios sobre o diâmetro dos poros. A Figura 34 apresenta os resultados médios obtidos para a absorção de água por capilaridade em função do tempo, medidos aos 28 dias. Em (a) para as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³ e em (b) para as amostras com densidade alvo de 1.200 Kg/m³. Os dados individuais encontram-se no Apêndice C.

Figura 34 – Absorção de água por capilaridade: a) 800 Kg/m³ b) 1200 Kg/m³

(a)



(b)

De acordo com a Figura 34(a) e com base na absorção aferida ao final do ensaio (72 h), para as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³, percebe-se que 800-REF e 800-XG obtiveram maior absorção de água por capilaridade. Por outro lado, 800-PP e 800-XG-PP proporcionaram uma leve redução na absorção de água. Contudo, ao verificar a significância dos resultados através do teste de Tukey, de acordo com a Tabela 19, verifica-se que os resultados são semelhantes. Assim, para a densidade em estudo, a fibra PP e XG não influenciam na absorção de água por capilaridade. Este fato pode ser explicado devido ao maior desvio-padrão obtido nos resultados de 800-REF. Cabe lembrar que neste traço, devido a ausência de XG, há uma maior

instabilidade da espuma, responsável pela maior variação na estrutura de poros do concreto celular espumoso.

Tabela 19 – Teste de Tukey para a absorção de água por capilaridade das amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³

Combinações	Probabilidade	Significância
800-REF vs. 800-XG	0,96885	Não
800-REF vs. 800-PP	0,11205	Não
800-REF vs. 800-XG-PP	0,09401	Não
800-XG vs. 800-PP	0,05985	Não
800-XG vs. 800-XG-PP	0,0502	Não
800-PP vs. 800-XG-PP	0,99924	Não

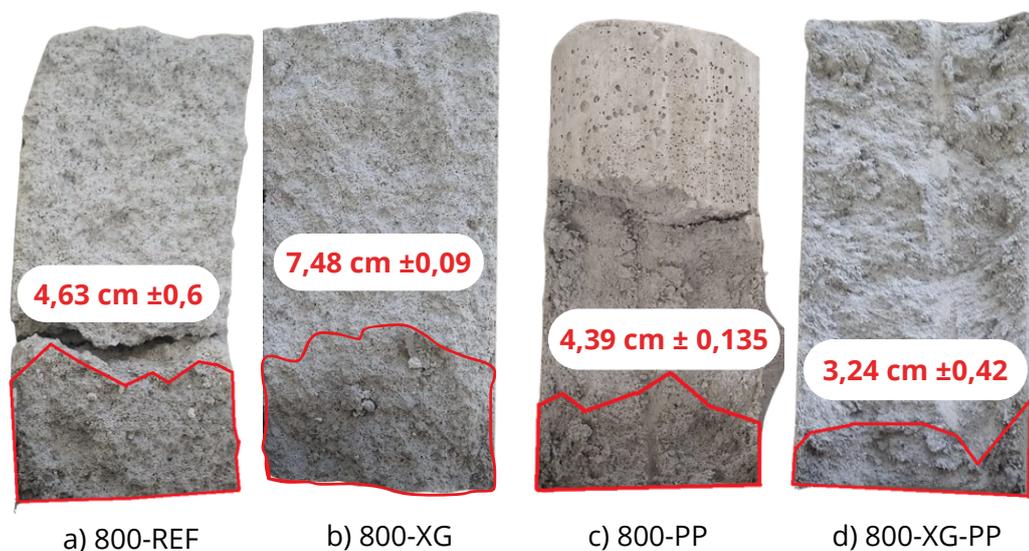
Conforme pode ser visualizado na Figura 34 (b), para as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³, o traço referência apresenta a maior absorção de água por capilaridade. Nota-se que a inserção de XG reduziu em torno de 20% a absorção de água, como também, a ação conjunta de XG e PP diminuiu cerca de 25% em relação à amostra de referência. Além disso, a adição somente da fibra PP proporcionou uma redução ainda mais expressiva, em torno de 40%. Conforme pode ser visualizado na Tabela 20, as amostras 1200-XG, 1200-PP e 1200-XG-PP apresentam diferença significativa em relação a 1200-REF, porém entre elas há semelhança. Pode-se inferir que XG, PP e a ação conjunta de XG e PP proporcionam uma diminuição da absorção de água por capilaridade para a referida densidade.

Tabela 20 – Teste de Tukey para a absorção de água por capilaridade das amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³

Combinações	Probabilidade	Significância
1200-REF vs. 1200-XG	0,01328	Sim
1200-REF vs. 1200-PP	0,00178	Sim
1200-REF vs. 1200-XG-PP	0,00701	Sim
1200-XG vs. 1200-PP	0,40675	Não
1200-XG vs. 1200-XG-PP	0,95809	Não
1200-PP vs. 1200-XG-PP	0,66943	Não

Após o ensaio de absorção de água por capilaridade, as amostras foram rompidas por compressão diametral, possibilitando a medição das alturas de penetração de água nas mesmas. A Figura 35 apresenta a média e o desvio padrão obtidos para as alturas de penetração para as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³. A Figura 36 apresenta a média e o desvio padrão obtidos para as alturas de penetração para as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³. De acordo com Costa (2015) as forças capilares aumentam com a redução do diâmetro dos poros, ou seja, poros de menor diâmetro apresentam uma maior altura de ascensão capilar.

Figura 35 – Ascensão de água em cm – 800 Kg/m³: média (desvio padrão)

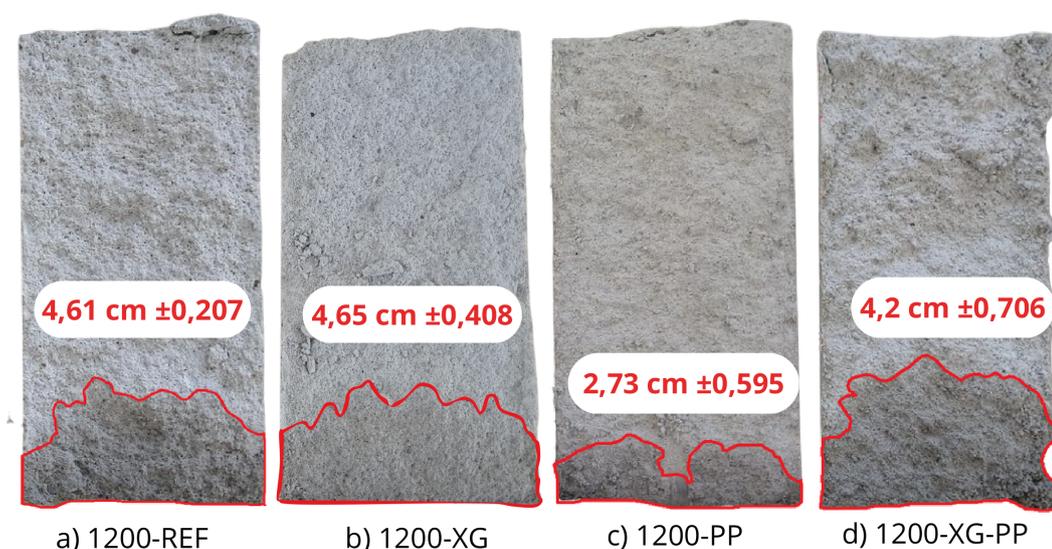


Fonte: Elaboração própria, (2023).

Observa-se que na Figura 35, os resultados estão de acordo com os dados expressos na Figura 34 (a). 800-XG apresenta maior capacidade de absorção de água como também maior altura de ascensão de água por capilaridade e um baixo desvio-padrão comparado às demais. Dessa forma, acredita-se que XG, além de conferir estabilidade à espuma, reduziu efetivamente o diâmetro dos poros. Por outro lado, os traços contendo fibras de PP apresentaram a menor altura de ascensão de água capilar. Neste caso, acredita-se que a PP comportou-se como uma barreira para o fluxo de água, tornando o fluxo capilar tortuoso, reduzindo a altura de ascensão capilar(COSTA, 2015). A Tabela 21 mostra a significância dos resultados.

Tabela 21 – Teste de Tukey para a ascensão de água das amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³

Combinações	Probabilidade	Significância
800-REF vs. 800-XG	8,25322E-4	Sim
800-REF vs. 800-PP	0,94838	Não
800-REF vs. 800-XG-PP	0,03978	Sim
800-XG vs. 800-PP	0,001	Sim
800-XG vs. 800-XG-PP	6,3992E-5	Sim
800-PP vs. 800-XG-PP	0,12868	Não

Figura 36 – Ascensão de água em cm – 1200 Kg/m³: média (desvio padrão)

Fonte: Elaboração própria, (2023).

Na Figura 36, é possível visualizar que 1200-PP obteve a menor altura de ascensão de água por capilaridade. Da mesma forma que para o concreto celular espumoso de 800 kg/m³, a fibra comportou-se como uma barreira para o fluxo de água, aprisionando os vazios de ar e tornando o caminho tortuoso para o fluxo capilar, consequentemente apresentando menor absorção e altura média de ascensão capilar. Para o traço 1200-XG-PP, apesar de ter apresentado altura de ascensão capilar maior que 1200-PP, esta diferença não é significativa devido ao desvio-padrão mais elevado para estas misturas. A Tabela 22 mostra a significância dos resultados. De maneira geral, na presença de XG no concreto espumoso, a fibra de PP não altera a absorção capilar e a ascensão de água para a densidade estudada. De acordo com Hajimohammadi, Ngo e Mendis (2018), a XG tende a suprimir a coalescência de bolhas e proporcionar uma distribuição de poros menores e com uma faixa mais estreita. No entanto, o uso das fibras de PP e XG nesta densidade, podem ter rompido as bolhas menores e isoladas, aliado ao alto peso/rigidez da matriz, causando a junção das bolhas. Sendo assim, o uso somente da fibra de PP apresentou resultados mais satisfatórios.

Tabela 22 – Teste de Tukey para a ascensão de água das amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³

Combinações	Probabilidade	Significância
1200-REF vs. 1200-XG	0,99971	Não
1200-REF vs. 1200-PP	0,02666	Sim
1200-REF vs. 1200-XG-PP	0,85467	Não
1200-XG vs. 1200-PP	0,02354	Sim
1200-XG vs. 1200-XG-PP	0,81231	Não
1200-PP vs. 1200-XG-PP	0,08125	Não

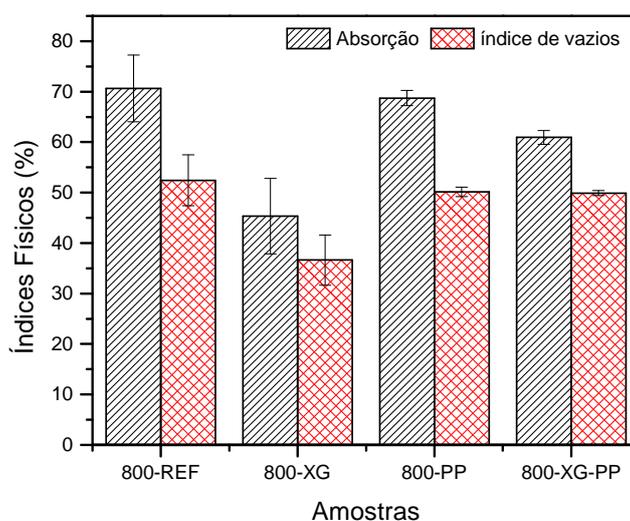
4.2.3 Absorção de água por imersão e índice de vazios

A Figura 37 apresenta um histograma com os resultados médios obtidos para o ensaio de absorção de água por imersão como também o percentual médio para o índice de vazios após 28 dias. Em (a) para os traços com densidade alvo igual a 800 Kg/m³ e em (b) para os traços com densidade alvo igual a 1200 Kg/m³. Os dados individuais encontram-se no Apêndice D. Ressalta-se que a absorção de água por imersão é um indicador importante para medir a durabilidade e as propriedades físicas do concreto celular espumado.

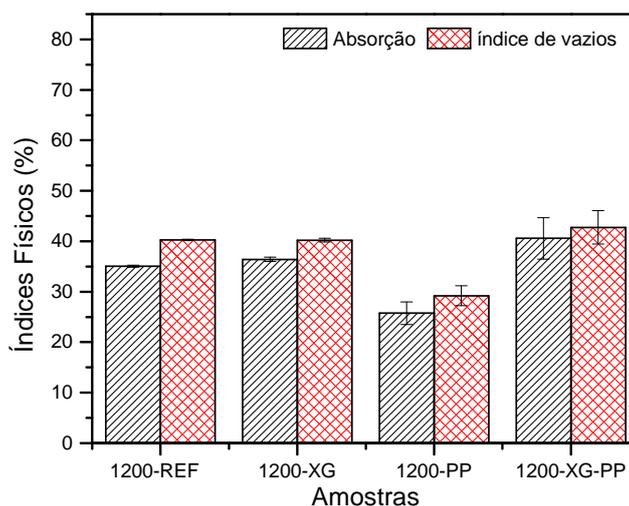
Conforme observa-se na Figura 37 (a), o traço que exibiu maior percentual de absorção de água por imersão para a densidade alvo de 800 Kg/m³, foi o traço referência, com cerca de 70%. Em comparação à amostra referência, pode-se observar que XG reduziu em torno de 25% a absorção de água por imersão. Já a fibra PP e a ação conjunta de XG e PP proporcionaram uma leve redução na absorção em relação a amostra referência, todavia apresentam semelhança nos resultados. Ao comparar os resultados de 800-XG e 800-XG-PP, percebe-se que há significância entre os valores, e que PP possibilita o aumento da absorção de água por imersão de água por imersão. A significância dos resultados foi verificada através do teste de Tukey, com nível de confiança de 95%, apresentado na Tabela 23.

Com base no exposto na Tabela 23, sugere-se que quando utilizado somente XG, a goma xantana influencia positivamente na absorção de água por imersão, proporcionando uma menor interconectividade entre os poros. A verificação está de acordo com o obtido por Zhu *et al.* (2020). Para os autores, XG melhora a viscosidade superficial e a elasticidade da espuma, onde durante a mistura da pasta com a mesma, a XG pode efetivamente impedir a deterioração da espuma, evitando que as bolhas se difundam com as bolhas circundantes. Após a solidificação do concreto espumoso, um número significativo de minúsculos poros fechados é gerado, os quais geralmente absorvem pouca água, o que pode efetivamente reduzir a taxa de absorção de água do concreto espumoso.

Em relação ao índice de vazios, a amostra 800-REF apresentou o maior percen-

Figura 37 – índices Físicos: a) 800 Kg/m³ b) 1200 Kg/m³

(a)



(b)

tual, em torno de 52%. Além disso, nota-se que a adição XG reduziu o índice de vazios, em cerca de 16%. Neste sentido, a ação da XG foi benéfica, pois acarretou em menor porosidade e/ou poros mais isolados, reduzindo a absorção de água por imersão. As amostras 800-PP e 800-XG-PP apresentam resultados semelhantes entre si e em relação a amostra referência. Em contrapartida, ao analisar a Tabela 23, percebe-se diferença significativa entre as amostras XG e XG-PP, ou seja, ao adicionar PP em uma mistura contendo XG para a densidade analisada, aumenta-se o índice de vazios, fortalecendo a hipótese de que a fibra de PP cria poros adicionais no concreto celular espumoso. A significância dos resultados foi verificada através do teste de Tukey, com 95% de confiança, conforme a Tabela 23.

Os resultados estão de acordo com Batool e Bindiganavile (2020a), Gencel *et al.* (2021b), os quais também constataram que ao utilizar a microfibras PP ocorria o aumento

da porosidade do concreto celular, através da criação de novos poros ou aberturas. Para Gencel *et al.* (2021b) as microfibras de polipropileno são consideradas como a razão crítica por trás da geração de vazios e aumento da porosidade do concreto celular espumoso. Batool e Bindiganavile (2020b) verificaram que a porosidade adicional é resultante das fibras que passam pelo poros, os quais não foram fortes o suficiente para manter a pressão, e conseqüentemente quebram ou se fundem em outros poros.

Tabela 23 – Teste de Tukey para a absorção de água por imersão e índice de vazios aos 28 dias das amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³

Variável	Combinações	Probabilidade	Significância
Absorção de água por imersão	800-REF vs. 800-XG	0,00132	Sim
	800-REF vs. 800-PP	0,96462	Não
	800-REF vs. 800-XG-PP	0,16828	Não
	800-XG vs. 800- PP	0,00222	Sim
	800-XG vs. 800-XG-PP	0,02333	Sim
	800-PP vs. 800-XG-PP	0,31072	Não
Índice de vazios	800-REF vs. 800-XG	0,00284	Sim
	800-REF vs. 800-PP	0,8551	Não
	800-REF vs. 800-XG-PP	0,81908	Não
	800-XG vs. 800- PP	0,00747	Sim
	800-XG vs. 800-XG-PP	0,00824	Sim
	800-PP vs. 800-XG-PP	0,99982	Não

Para a densidade alvo de 1200 Kg/m³, ao analisar a Figura 37 (b), percebe-se que o traço 1200-PP apresenta o menor percentual para a absorção de água por imersão. Em comparação ao 1200-REF, o percentual reduziu em torno de 9%. Ao analisar as demais amostras, verifica-se que há um pequeno aumento na absorção, no entanto os resultados apresentam semelhança. De acordo com o teste de Tukey, com nível de confiança de 95%, apresentado na Tabela 23, apenas a fibra PP influencia na redução da absorção de água por imersão.

Os resultados obtidos para 1200 Kg/m³ permitem observar que o uso de XG não traz benefícios para esta densidade. A matriz mais densa e a menor quantidade de espuma possivelmente expliquem tais resultados. Cabe lembrar que a quantidade de espuma entre as densidades alvo é reduzida. Neste sentido, 2% de XG parece não surtir efeito positivo na proteção das bolhas da espuma de um concreto celular de densidade mais elevada. Adicionalmente, quando as fibras de PP são incorporadas à matriz juntamente com a XG, há maior variação no resultados e um aumento da absorção em comparação ao traço 1200-PP. Acredita-se que, pelo fato da XG gerar poros menores, a fibra de PP pode acarretar no rompimento e coalescência de tais bolhas, aumentando a absorção.

Tabela 24 – Teste de Tukey para a absorção de água por imersão e índice de vazios aos 28 dias das amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³

Variável	Combinações	Probabilidade	Significância
Absorção de água por imersão	1200-REF vs. 1200-XG	0,99999	Não
	1200-REF vs. 1200-PP	5,18658E-4	Sim
	1200-REF vs. 1200-XG-PP	0,44604	Não
	1200-XG vs. 1200-PP	5,3443E-4	Sim
	1200-XG vs. 1200-XG-PP	0,43116	Não
	1200-PP vs. 1200-XG-PP	1,23841E-4	Sim
Índice de vazios	1200-REF vs. 1200-XG	0,99999	Não
	1200-REF vs. 1200-PP	5,18658E-4	Sim
	1200-REF vs. 1200-XG-PP	0,44604	Não
	1200-XG vs. 1200-PP	5,3443E-4	Sim
	1200-XG vs. 1200-XG-PP	0,43116	Não
	1200-PP vs. 1200-XG-PP	1,23841E-4	Sim

Em relação ao índice de vazios para a densidade de 1200 Kg/m³, nota-se na que a amostra com apenas a adição de PP teve uma redução em torno de 11% da quantidade de poros de ar presentes na mistura. Já entre as amostras 1200-REF (40,27%), 1200-XG (40,23%) e 1200-XG-PP (42,75%) ocorreu semelhança de resultados, o que pode ser comprovado através do teste de Tukey apresentando na Tabela 24. Assim, como observado nos resultados de absorção de água por imersão, novamente nota-se que o uso de XG para esta densidade não acarreta em diferença significativa nos resultados. No entanto, para àqueles obtidos nos concretos de densidade de 800 kg/m³, a XG tende a reduzir o índice de vazios e absorção, possivelmente pela redução do tamanho dos poros.

Na densidade de 1200 Kg/m³ é possível que a inclusão da XG não seja eficiente, pois de acordo com Nambiar e Ramamurthy (2007), Batool e Bindiganavile (2017), em maiores densidades, a mistura referência é mais estável, como também apresenta poros menores e mais uniformes. Portanto, o conteúdo de XG não é suficiente para obter diferença significativa nos resultados.

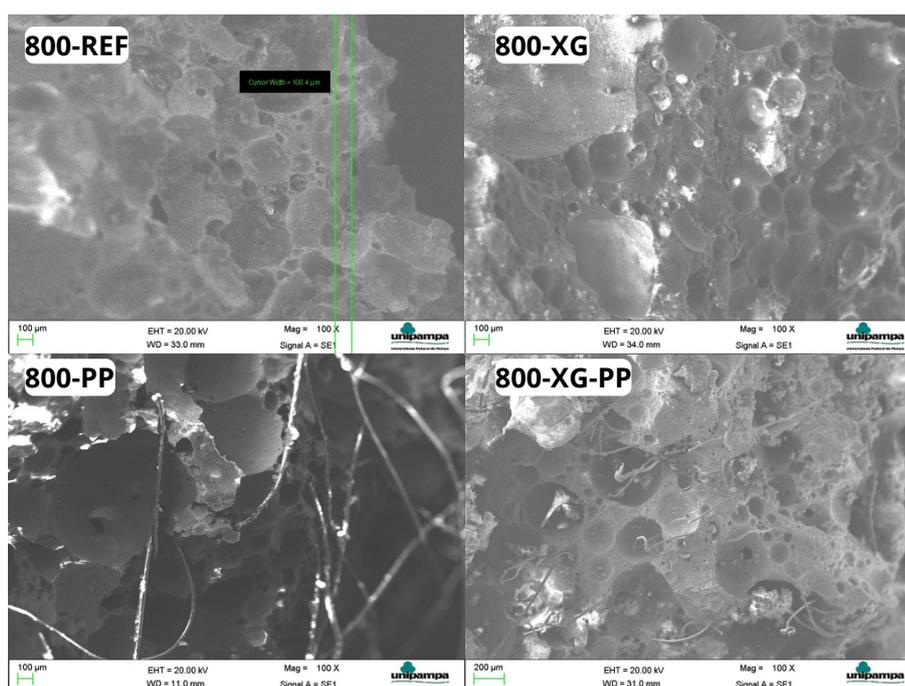
Em suma, para um concreto de densidade mais elevada, como o de 1200 Kg/m³, em que seu volume é composto por 44% de espuma, a Goma Xantana não se mostrou relevante nos resultados para a dosagem estudada. Já para o concreto com 800 kg/m³, composto por 60% de espuma, a quantidade de XG já se mostra mais eficiente na estabilização da espuma e proteção das bolhas de ar. De acordo com Hashim e Tantray (2021), concretos celulares com densidades alvo menores são mais instáveis em comparação à concretos celulares com maiores densidades.

4.2.4 MEV

A Figura 38 mostra, a uma magnitude de 100x, a comparação entre as estruturas internas dos concretos celulares espumosos para a densidade de 800 kg/m³. Conforme pode ser visualizado, a amostra referência possui poros mais irregulares, além da coalescência de poros. A adição de XG proporciona à mistura poros mais regulares, tendendo a forma circular, como também uma maior distribuição de poros menores.

Nas amostras contendo PP, a goma xantana também parece interferir no formato dos poros. Para o traço 800-PP, a ausência de XG proporcionou poros mais irregulares. Por outro lado, a amostra com a ação conjunta de XG e PP apresenta poros mais redondos e menores. Também é possível observar que a fibra tende a cruzar os poros em ambos os casos, conectando-os e promovendo a coalescência entre poros menores. A interface fibra-matriz por também apresentar porosidade, acarreta na interconectividade dos poros.

Figura 38 – Análise em MEV para as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³

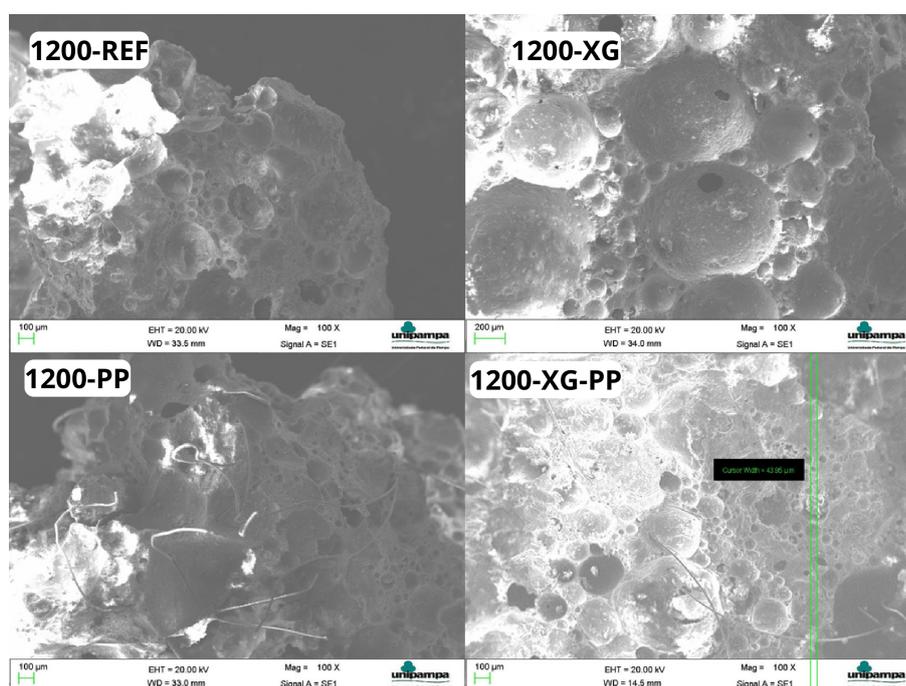


Na Figura 39, o uso de XG parece gerar efeito contrário na estrutura de poros do concreto celular espumoso de densidade 1200 kg/m³ em comparação ao de 800 kg/m³. Tal fato reforça a hipótese que em densidades mais elevadas, os microporos gerados pela presença de XG tendem a se coalescerem devido ao peso da matriz, gerando poros maiores e equivalentes ao 1200-REF. Sendo assim, o uso de XG na quantidade estudada de 2% não gera efeitos na estrutura de poros para concretos celulares espumosos de 1200 kg/m³. As imagens feitas com o MEV auxiliam, portanto, no entendimento dos resultados obtidos para absorção de água por capilaridade e imersão, e também o índice de vazios para esta densidade alvo. Neste caso, os poros

nas misturas com XG parecem apresentar formato mais arredondado e uma distribuição não graduada, isto é, presença de poros maiores e menores em diversas proporções.

No traço 1200-PP, os poros parecem mais irregulares e achatados, ora conectados pelas fibras de polipropileno, que se apresentam mais tortuosas devido ao peso da matriz. Este fato corrobora com a interpretação dos resultados de menor absorção de água por capilaridade e imersão, além da redução no índice de vazios em comparação à amostra de referência. Devido à densidade da matriz, é possível que as fibras tenham gerado uma barreira para a conexão dos poros.

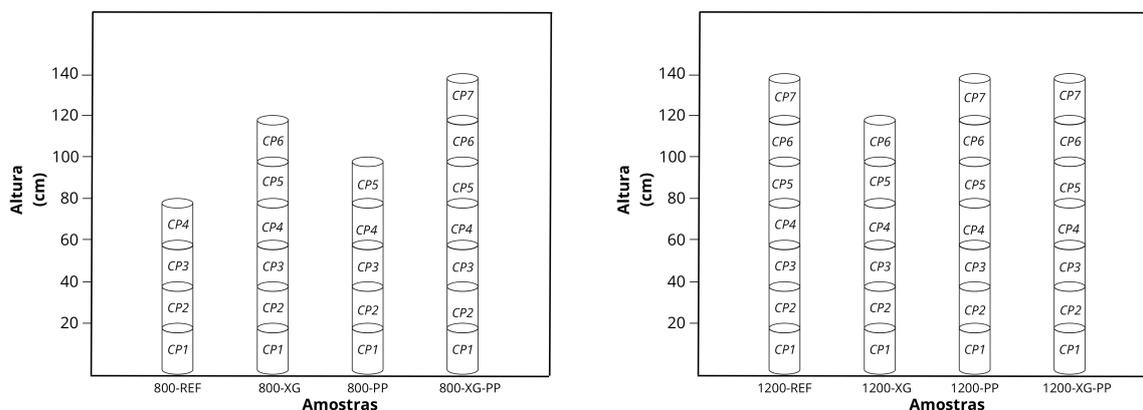
Figura 39 – Análise em MEV para as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³



4.2.5 Estabilidade do concreto celular espumoso através da coluna vertical

Este item apresenta os resultados obtidos para a densidade e índices físicos em relação a altura de lançamento do concreto celular espumoso. A altura de lançamento foi fixada em 1,5 m. Ressalta-se que o lançamento do concreto celular espumoso na coluna vertical, ocorreu ao final do processo de moldagem dos corpos de prova. Com o decorrer do tempo e em função do manuseio e instabilidade da mistura, as bolhas presentes no concreto celular espumoso acabam se deteriorando. Durante a moldagem, era possível perceber que para algumas amostras ocorria uma maior perda de volume de material. Por este motivo, em algumas amostras não foi possível completar a altura da coluna vertical. Na Figura 40, visualiza-se a altura final após concretagem da coluna vertical para cada traço, descontando-se 5 cm da face superior e 5 cm da face inferior da coluna, as quais foram descartadas. Os dados individuais encontram-se no apêndice E. Os corpos de prova foram numerados em ordem crescente de valores, tomando como referência a base da coluna vertical.

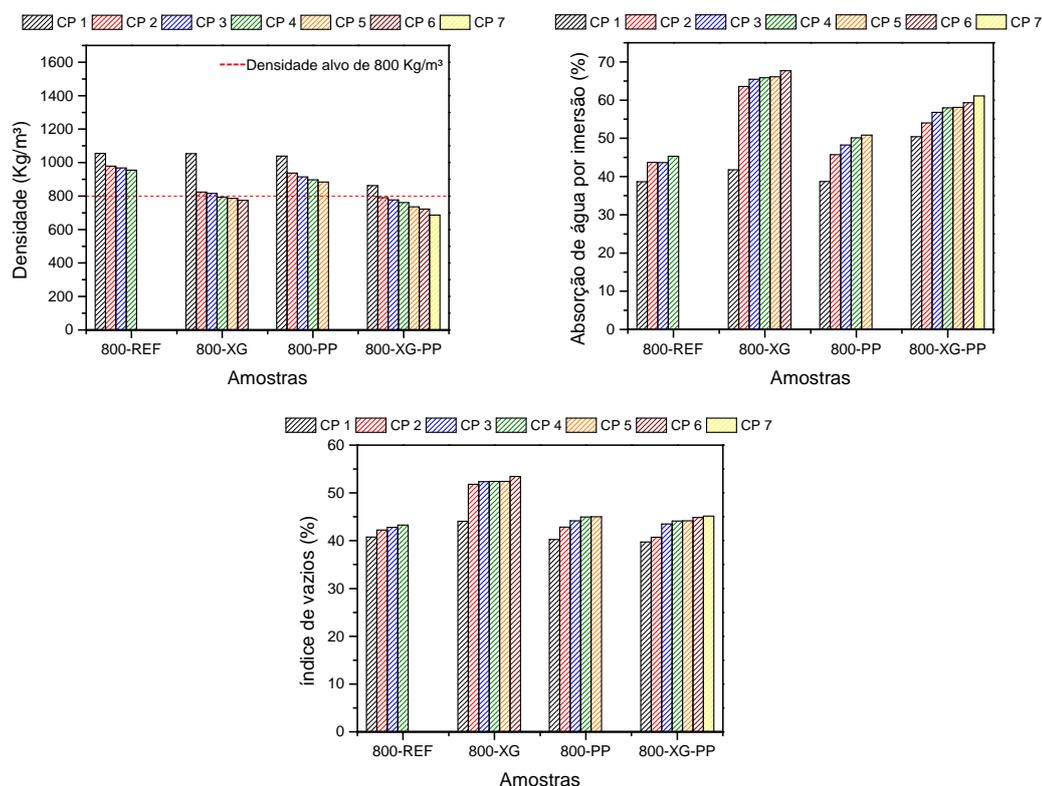
Figura 40 – Altura de concretagem da coluna vertical (800 kg/m³ e 1200 kg/m³)



Conforme pode ser visto na Figura 40, os traços com densidade alvo de 800 Kg/m³, são mais instáveis e as bolhas de ar suscetíveis ao colapso, devido a forças ocasionadas pelo manuseio da mistura. Em relação a amostra referência, a fibra PP possibilitou um aumento de 25% no volume de concretagem. Além disso, sugere-se que XG proporciona um aumento na estabilidade do concreto celular espumoso, pois o aumento no volume de concretagem foi mais evidente, em torno de 50%. A ação conjunta de XG e PP proporcionou uma altura de verificação ainda maior, com um aumento de 75% no volume de concretagem. As amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³ apresentam maior estabilidade se comparadas as amostras de 800 Kg/m³. Apenas para 1200-XG não foi possível completar a altura da coluna vertical.

A Figura 41 apresenta os resultados obtidos para as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³ em função da altura de lançamento de 1,5m. Na Figura estão contidos os resultados para a densidade, absorção de água por imersão e índice de vazios.

Ao analisar a densidade das amostras, devido a instabilidade da mistura e em função do manuseio e do tempo de moldagem, todos os corpos de prova referência obtiveram densidade maior do que a planejada. Em contrapartida, observa-se que a XG aumenta a estabilidade do sistema de bolhas, mantendo a densidade dos corpos de prova mais próxima da densidade planejada. Além disso, nota-se que aqueles com fibra PP obtiveram densidade acima da planejada. O aumento da densidade pode ser devido ao rompimento das bolhas de ar através da inserção da fibra PP como também pelo efeito da pasta sobre um sistema de bolhas instável. Em relação as demais amostras, os corpos de prova contendo XG e PP, apresentam a menor densidade em função da altura de lançamento. Acredita-se que pode ser em razão da XG aumentar estabilidade das bolhas e, nesta densidade, a fibra PP criar novos vazios de ar, assim possibilitando uma menor densidade do concreto celular espumoso. Os resultados estão de acordo com Zhu *et al.* (2020). Para os autores, a goma xantana proporciona uma maior estabilidade às bolhas, diminuindo o impacto da pasta sobre as mesmas e

Figura 41 – Índices físicos (coluna vertical) – densidade alvo de 800 Kg/m³

mantendo a densidade planejada. Já para Batool e Bindiganavile (2020a), as fibras PP criam poros adicionais, diminuindo a densidade do concreto celular espumoso.

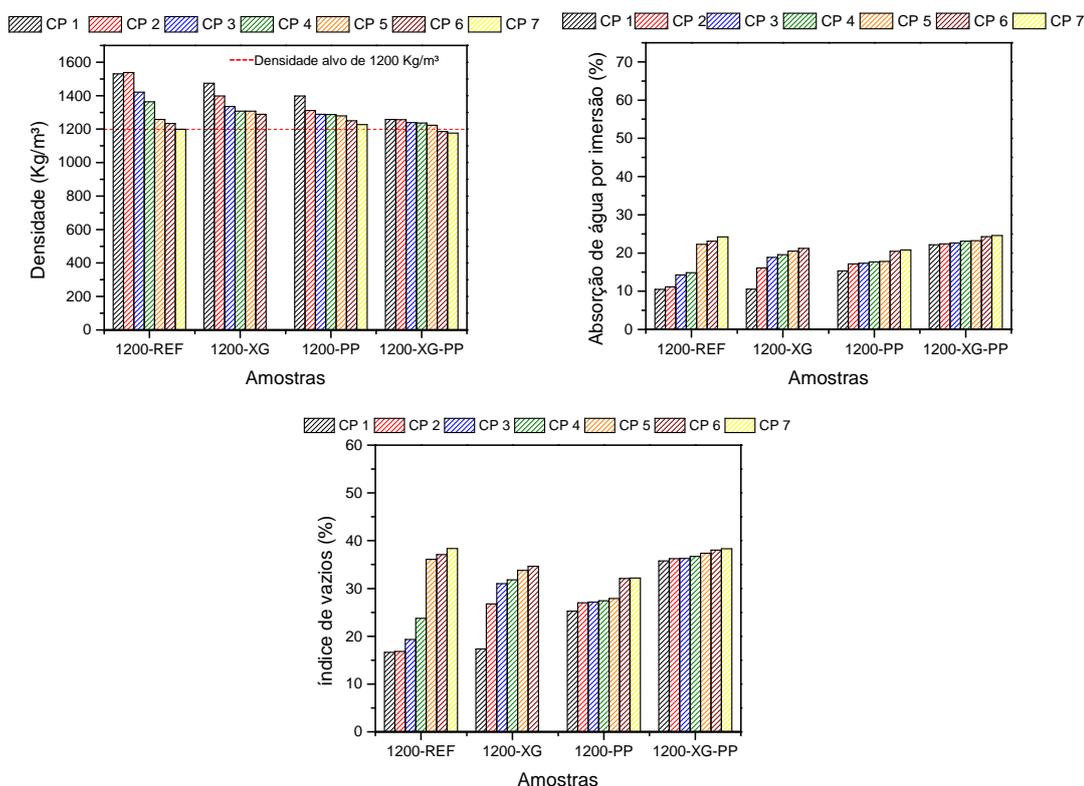
Nota-se também que, em todas as amostras mais próximas da base, menor é a absorção de água por imersão, como também o índice de vazios. É possível verificar que a XG proporcionou os maiores aumentos, como também, a ação conjunta de XG e PP proporcionou absorção de água e índice de vazios acima de REF, porém não tão expressivamente quanto somente a utilização de XG. Já a ação somente de PP teve um sutil aumento, aproximando-se do traço 800-REF.

A Figura 42 apresenta os resultados obtidos para os índices físicos das amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³, aos 28 dias, em relação a altura de lançamento da coluna vertical. Na Figura estão contidos os dados de densidade, absorção de água por imersão e índice de vazios.

Para as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³ é possível verificar maior estabilidade em relação aos corpos de prova de uma mesma amostra. Ao utilizar somente de XG, nota-se que não ocorreu um impacto substancial, pois é possível constatar que os corpos de prova tiveram densidade acima do planejado. Nota-se também que os resultados contendo a fibra PP ficaram mais próximos ao planejado.

Em relação a absorção de água por imersão e índice de vazios, verifica-se que em todas as amostras a medida que aumenta a altura de lançamento, a absorção de água por imersão, como também o índice de vazios, diminuem. Conforme pode

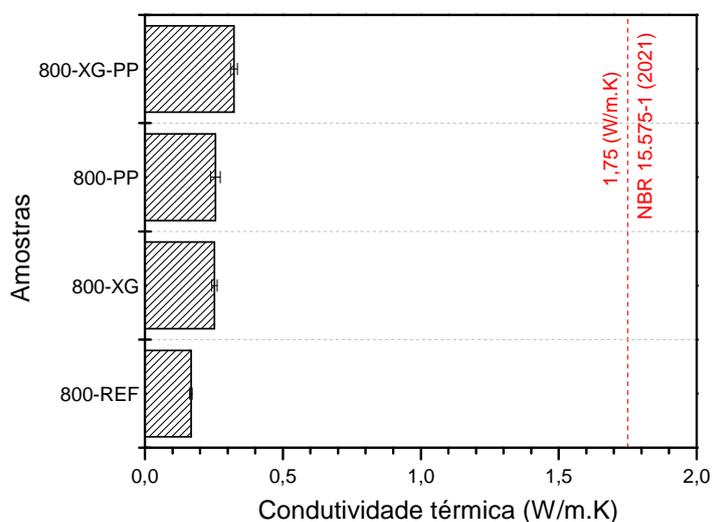
Figura 42 – Índices físicos (coluna vertical) – densidade alvo de 1200 Kg/m³



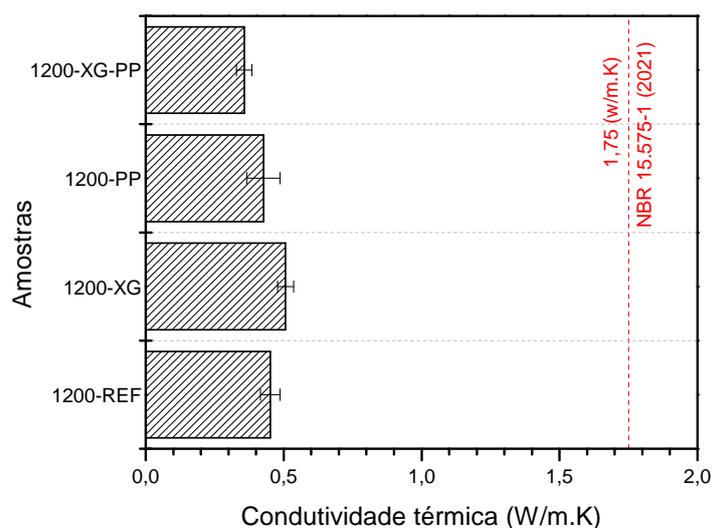
ser visualizado, em ambas as densidades ocorre a mesma tendência, quanto mais próximo a base, maior a densidade e menor o índice de vazios, ou seja, quanto menor a altura de lançamento, mais estável é a mistura do concreto celular espumoso e maior a probabilidade do mesmo manter a densidade planejada. O aumento da densidade nos corpos de prova mais próximos da base pode estar relacionado ao impacto da pasta sobre as bolhas. Verifica-se que quanto mais estável o sistema de bolhas, menor o impacto da pasta, o rompimento das bolhas e o aumento da densidade.

4.2.6 Condutividade térmica

A Figura 43 apresenta os resultados médios obtidos para a condutividade térmica. Em (a) encontram-se os resultados para as amostras com 800 Kg/m³ e em (b) para as amostras com 1200 kg/m³. Os dados individuais encontram-se no apêndice F. Ao analisar os gráficos, é possível verificar que as amostras com densidade alvo de 800 kg/m³ tiveram um menor coeficiente de condutividade térmica em comparação às de 1200 kg/m³. A condutividade térmica possui relação com a conectividade, tamanho e quantidade de poros. Além disso, possui também relação direta com a densidade, em consequência do conteúdo de pasta. Geralmente, observa-se a redução da condutividade térmica à medida que obtêm-se uma menor densidade e uma maior porosidade do concreto celular espumoso (GENCEL *et al.*, 2021b).

Figura 43 – Condutividade térmica: (a) 800 Kg/m³ (b) 1200 Kg/m³

(a)



(b)

Em relação as amostras contendo apenas XG, para as duas densidades analisadas, a adição de XG apresentou um aumento dos resultados de condutividade térmica em relação aos traços de referência. Tais resultados não estão de acordo com os obtidos por (HAJIMOHAMMADI; NGO; MENDIS, 2018), os quais obtiveram, para a densidade alvo de 700 Kg/m³, uma pequena diminuição da condutividade térmica à medida que se aumentava a porcentagem de XG, quando utilizado teores de 0,18%, 0,25% e 0,45% em relação a massa do agente espumante. No entanto, embora houvesse aumento da distribuição de tamanho dos poros e maior frequência de poros menores à medida que o teor de XG era aumentado, os autores não apresentaram valores de

porosidade total que justificassem os dados de condutividade térmica obtidos. De acordo com Papa *et al.* (2016), a combinação de alta macroporosidade, arredondamento, dimensão dos poros e redução da espessura inter-porosa (pelo incremento da porosidade total), permite o atingimento de menores condutividades térmicas.

Observando-se apenas os dados obtidos para a densidade alvo de 800 kg/m³, a Figura 43 (a) mostra os valores médios de condutividade térmica variando de 0,16 a 0,32 W/m.K. A utilização de XG proporcionou um aumento evidente na condutividade térmica de cerca de 49,70%, bem como a fibra PP proporcionou um aumento mais expressivo, de cerca de 53,29%. Além disso, nota-se que a ação conjunta de XG e PP proporcionou um aumento ainda mais acentuado de 93,47%. Conforme o teste de Tukey (Tabela 25), com 95% de confiança, os resultados apresentam diferença significativa.

Tabela 25 – Teste de Tukey para a condutividade térmica das amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³

Combinações	Probabilidade	Significância
800-REF vs. 800-XG	0	Sim
800-REF vs. 800-PP	0	Sim
800-REF vs. 800-XG-PP	0	Sim
800-XG vs. 800- PP	0,6141	Não
800-XG vs. 800-XG-PP	0	Sim
800-PP vs. 800-XG-PP	7,63073E-8	Sim

Ao correlacionar os dados observa-se que para a densidade de 800 Kg/m³, tanto XG quanto PP proporcionaram um aumento na densidade. Além disso, a XG proporcionou uma redução do índice de vazios e refinamento dos poros, os quais contribuíram com o aumento do coeficiente de condutividade térmica do concreto celular espumoso. De acordo com Batool e Bindiganavile (2017), em decorrência de uma maior quantidade de poros menores, o concreto celular apresenta um aumento da condutividade térmica. Além disso, ao reduzir a sua porosidade, aumenta-se o conteúdo de pasta hidratada entre os poros, e a condutividade térmica é aumentada.

Em relação à fibra PP, novos microporos são gerados na interface fibra-matriz, aumentando a porosidade do concreto celular espumoso e conexão entre poros. De acordo com Gencel *et al.* (2021b), este fato acarreta na diminuição da condutividade térmica. No entanto, conforme já mencionado, as fibras de polipropileno alteraram a tortuosidade e conectividade dos poros nos concretos celulares de 800 kg/m³, o que possivelmente explica o aumento da condutividade térmica. Tais resultados estão de acordo com os obtidos por Batool e Bindiganavile (2020a) que, além de constatarem o aumento da porosidade, notaram que ao inserir a fibra PP em uma amostra de concreto celular espumoso de 800 Kg/m³, as fibras propiciam a criação de poros menores

porém com diâmetros diferentes, ampliando a faixa de distribuição média dos poros e consequentemente aumentando a condutividade térmica.

Para as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³, a Figura 43 (b) mostra que a adição de XG também apresentou um leve aumento, porém significativo, de cerca de 12,31%. Já a fibra PP e a ação conjunta de XG e PP proporcionaram uma pequena redução da condutividade, porém os dados não são significativos em relação a 1200-REF. A significância dos resultados pode ser comprovada pelo teste de Tukey, conforme apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 – Teste de Tukey para a condutividade térmica das amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³

Combinações	Probabilidade	Significância
1200-REF vs. 1200-XG	0,00284	Sim
1200-REF vs. 1200-PP	0,8551	Não
1200-REF vs. 1200-XG-PP	0,81908	Não
1200-XG vs. 1200-PP	0,00747	Sim
1200-XG vs. 1200-XG-PP	0,00824	Sim
1200-PP vs. 1200-XG-PP	0,99982	Não

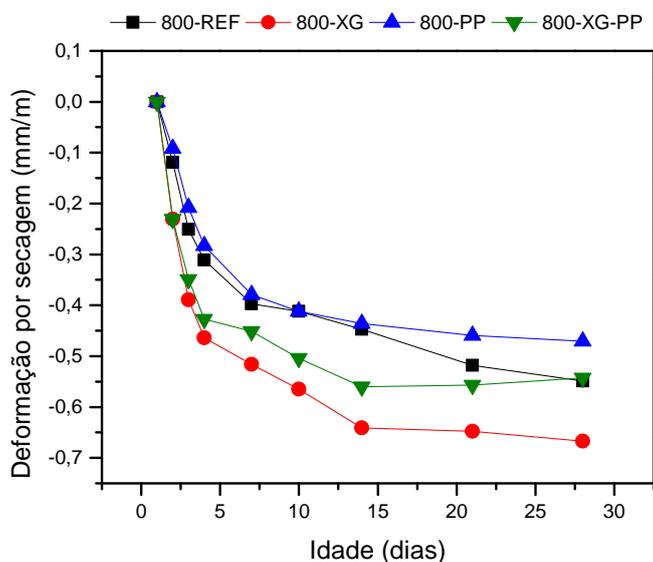
Entre as amostras 1200-XG e 1200-XG-PP há significância de resultado, evidenciando a influência da PP em reduzir a condutividade térmica neste caso. Conforme mencionado anteriormente, para a densidade mais elevada, a rigidez da matriz impactou na coalescência dos poros menores gerados na presença da XG. No entanto, quando adicionado fibras de PP à mistura contendo XG, estas foram responsáveis pelo incremento da porosidade total e conexão dos poros, tendo efeito direto na redução da condutividade térmica.

Com base na NBR 15.220-3 (ABNT, 2005b), todos os resultados obtidos encontram-se abaixo do valor estipulado para a condutividade térmica de blocos cerâmicos e de concreto, materiais comumente utilizados para alvenaria de vedação, os quais apresentam condutividade térmica igual a 0,90 W/ (m.K) e 1,75 W/(m.K), respectivamente. Os valores também se encontram bem abaixo do valor máximo estipulado pela norma de desempenho, a NBR 15.575-1 (2021), para paredes externas e internas, de 1,75 W/ (m.K). Sendo assim, no que se refere à condutividade térmica, todas as amostras em estudo, podem ser utilizadas como alvenaria de vedação.

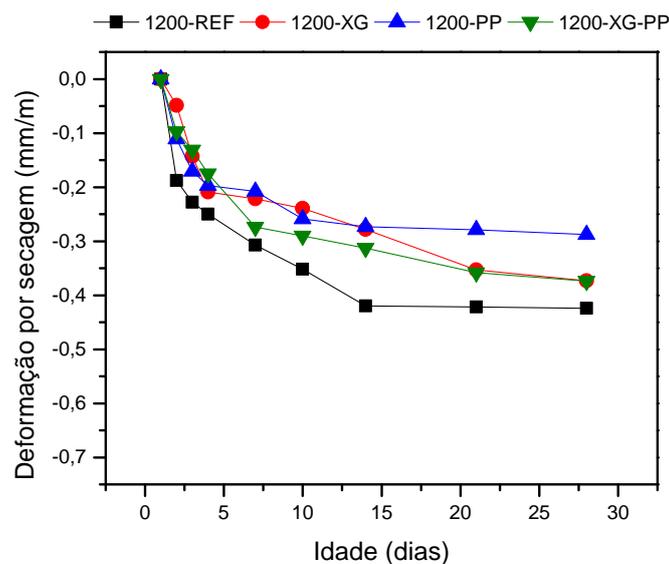
4.2.7 Retração por secagem

A Figura 44 apresenta os resultados médios (de três corpos de prova por mistura) obtidos para a retração por secagem. Em (a) estão contidos os resultados para as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³ e em (b) para as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³. Os dados individuais encontram-se no apêndice G.

Figura 44 – Valores médios de retração por secagem: (a) 800 Kg/m³ (b) 1200 Kg/m³



(a)



(b)

A fim de verificar a precisão dos resultados, foi efetuada, pelo menos, três vezes, a leitura de retração para cada corpo de prova. A primeira leitura foi realizada após 24 h de moldagem e continuou diariamente até completar os 28 dias. Devido a limitação de tempo da pesquisa, não foi possível completar os 56 dias previstos em norma.

Ao comparar as duas densidades, visivelmente, é possível notar que à medida que aumenta o teor de espuma, aumenta os valores de retração por secagem. Em relação as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³, percebe-se que em todas as amostras há uma rápida evolução das deformações por secagem nos primeiros 4 dias. A amostra 800-PP tende a estabilizar após 10 dias de verificação. Em contrapartida,

nas misturas com a presença de XG, a retração tende a estabilizar apenas após 15 dias. Aos 28 dias, 800-PP apresentou a menor deformação por secagem, seguido de 800-REF e 800-XG-PP, e por último 800-XG. No entanto, observa-se que há tendência de 800-REF em continuar o processo de retração após 28 dias, já que apresenta uma queda contínua nos valores médios de deformação ao longo do tempo.

Em comparação a amostra referência para densidade de 800 kg/m³, constata-se que o uso da XG aumenta significativamente a retração em 21,49%. O aumento das deformações pode estar relacionado ao incremento da densidade proporcionada pela XG e maiores zonas de pasta na amostra pela diminuição do conteúdo de vazios. Gencel *et al.* (2021a) também observou o aumento da retração por secagem em decorrência do aumento da densidade.

Já a fibra PP diminui consideravelmente a retração por secagem em cerca de 60%. Observa-se que 800-XG-PP apresentou semelhança de resultados com 800-REF aos 28 dias, porém, entre as demais amostras apresentou significância, comprovando que a fibra PP tende a reduzir a retração por secagem, contendo assim as deformações oriundas do processo natural. A Tabela 27 apresenta a significância dos resultados. No entanto, os dados de retração de 800-XG-PP são maiores que 800-REF até 20 dias. Neste caso, acredita-se que a presença da XG ao reduzir os poros, promoveu a coalescência destes na presença da fibra, diminuindo a quantidade de pontes de transferência de tensões entre a pasta e a fibra.

Tabela 27 – Teste de Tukey para a retração por secagem das amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³

Combinações	Probabilidade	Significância
800-REF vs. 800-XG	2,53509E-4	Sim
800-REF vs. 800-PP	0,00793	Sim
800-REF vs. 800-XG-PP	0,98993	Não
800-XG vs. 800- PP	4,10283E-6	Sim
800-XG vs. 800-XG-PP	1,80302E-4	Sim
800-PP vs. 800-XG-PP	0,01218	Sim

Na figura 44(b), é possível constatar visivelmente que em todas as amostras há um rápido crescimento das deformações nos primeiros dias. Nota-se que até os primeiros 15 dias, as deformações da amostra referência continuam apresentando um crescimento acentuado e após tendem a estabilizar.

Aos 28 dias, a amostra que 1200-PP apresentou menor retração por secagem, seguida de 1200-XG e 1200-XG-PP e por último 1200-REF. Nota-se mais uma vez que a fibra PP reduziu efetivamente a retração por secagem. Para esta densidade em estudo, o uso somente da fibra PP reduziu em torno de 32%. Os resultados estão consistentes com os relatos de Gencel *et al.* (2021b), para os autores as fibras agem

como agente anti-microcraqueamento e conseqüentemente reduzem a retração por secagem.

Por outro lado, há similaridade, aos 28 dias, entre os resultados das amostras 1200-REF, 1200-XG e 1200-XG-PP, o que pode ser verificado na Tabela 28. Novamente, tem-se como hipótese a coalescência dos poros na mistura contendo XG e fibra PP, diminuindo a quantidade de pontes de transferência de tensões entre fibra-matriz.

Tabela 28 – Teste de Tukey para a retração por secagem das amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³

Combinações	Probabilidade	Significância
1200-REF vs. 1200-XG	0,12193	Não
1200-REF vs. 1200-PP	4,59103E-4	Sim
1200-REF vs. 1200-XG-PP	0,1133	Não
1200-XG vs. 1200- PP	0,00816	Sim
1200-XG vs. 1200-XG-PP	0,99994	Não
1200-PP vs. 1200-XG-PP	0,00872	Sim

4.3 Resistência Mecânica

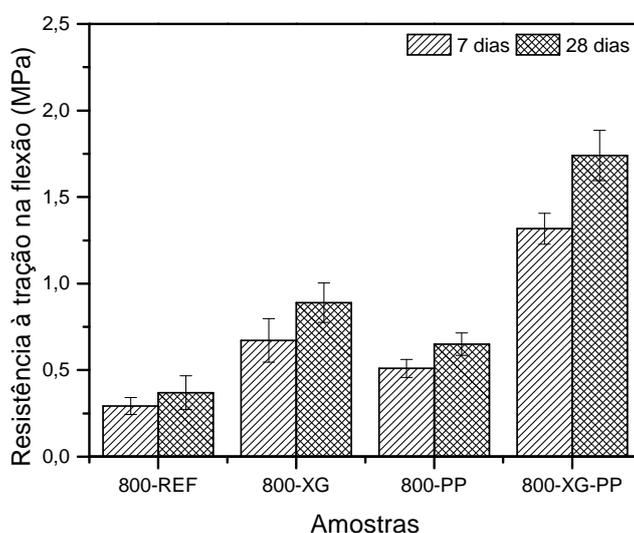
Este tópico apresenta e discute os resultados obtidos para a avaliação mecânica do concreto celular espumoso. Para tanto realizou-se os ensaios de resistência à tração na flexão, fazendo uso de Cps prismáticos, e de resistência à compressão, por meio das metades resultantes do mesmo ensaio, como também em CPs cilíndricos, individualmente.

4.3.1 Resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos

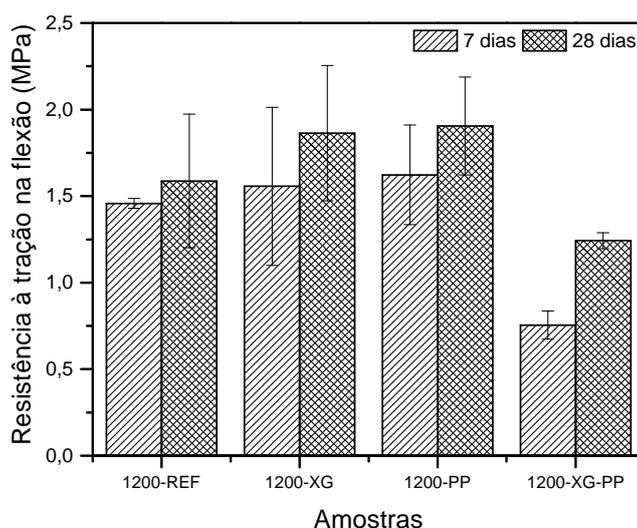
A Figura 45 a seguir representa de forma gráfica, os valores médios aferidos quanto a resistência à tração na flexão em 3 (três) pontos, para as idades de 7 e 28 dias. Em (a) estão os resultados para as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³ e em (b) para as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³. Os dados individuais encontram-se no apêndice H.

Conforme observa-se na Figura 45 (a), em comparação a amostra referência, aos 7 dias de idade, a fibra PP possibilitou um incremento de cerca de 75% na resistência à tração na flexão bem como a adição de XG proporcionou um aumento de 131%. Além disso, destaca-se um incremento substancial de cerca de 355% para as amostras com a ação conjunta de XG e PP.

Em comparação a resistência à tração na flexão de 7 dias e 28 dias, percebe-se uma evolução significativa da resistência ao longo do tempo, em torno de 27% para amostras com PP e 32% para as amostras com XG e com a ação conjunta de XG e PP. Esse aumento é devido a continuidade do processo de hidratação. Os resultados

Figura 45 – Resistência à tração na flexão: a) 800 Kg/m³ b) 1200 Kg/m³

(a)



(b)

para a amostra referência, entre 7 e 28 dias, demonstram semelhança de resultados, evidenciando não haver evolução da resistência para o traço 800-REF. Aos 28 dias, em comparação a amostra referência, a amostra 800-PP demonstrou resistência superior, em cerca de 75%, 800-XG 140%, e 800-XG-PP um incremento substancial de 370%. A significância dos dados podem ser verificados na Tabela 29, a qual evidencia a influência de XG, como também de PP no aumento da resistência à tração na flexão.

O aumento da resistência devido a inserção da fibra PP está de acordo com Amran *et al.* (2020), Salehi, Dabbagh e Ashengroph (2022), o qual é mais evidente em menores densidades. Além disso, o aumento da resistência pode ser devido a

orientação aleatória das fibras, a qual aumenta a absorção de energia bem como proporciona um efeito de ponte, evitando a propagação de mais trincas (HOSSEINZADEH *et al.*, 2023). Em relação a inserção XG, o aumento pode ser devido a melhor qualidade da espuma produzida e conseqüentemente a redução de tamanho dos poros como também a menor conectividade proporcionada pela XG.

Tabela 29 – Teste de Tukey para a resistência média à tração na flexão para as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³, aos 7 dias e 28 dias.

Variável	Combinações	Probabilidade	Significância
Comparação aos 7 dias entre misturas	800-REF X 800-XG	5,71115E-4	Sim
	800-REF X 800-PP	0,00307	Sim
	800-REF X 800-XG-PP	0	Sim
	800-XG X 800-PP	0,73382	Não
	800-XG X 800-XG-PP	3,13728E-6	Sim
	800-PP X 800-XG-PP	9,20358E-7	Sim
Comparação aos 28 dias entre misturas	800-REF X 800-XG	2,08382E-4	Sim
	800-REF X 800-PP	0,03285	Sim
	800-REF X 800-XG-PP	0	Sim
	800-XG X 800-PP	0,07124	Não
	800-XG X 800-XG-PP	1,80191E-6	Sim
Comparação entre 7 e 28 dias para as mesmas misturas	800-PP X 800-XG-PP	1,95192E-7	Sim
	800-REF X 800-REF	0,20833	Não
	800-XG X 800-XG	0,04278	Sim
	800-PP X 800-PP	0,04419	Sim
	800-XG-PP X 800-XG-PP	0,00251	Sim

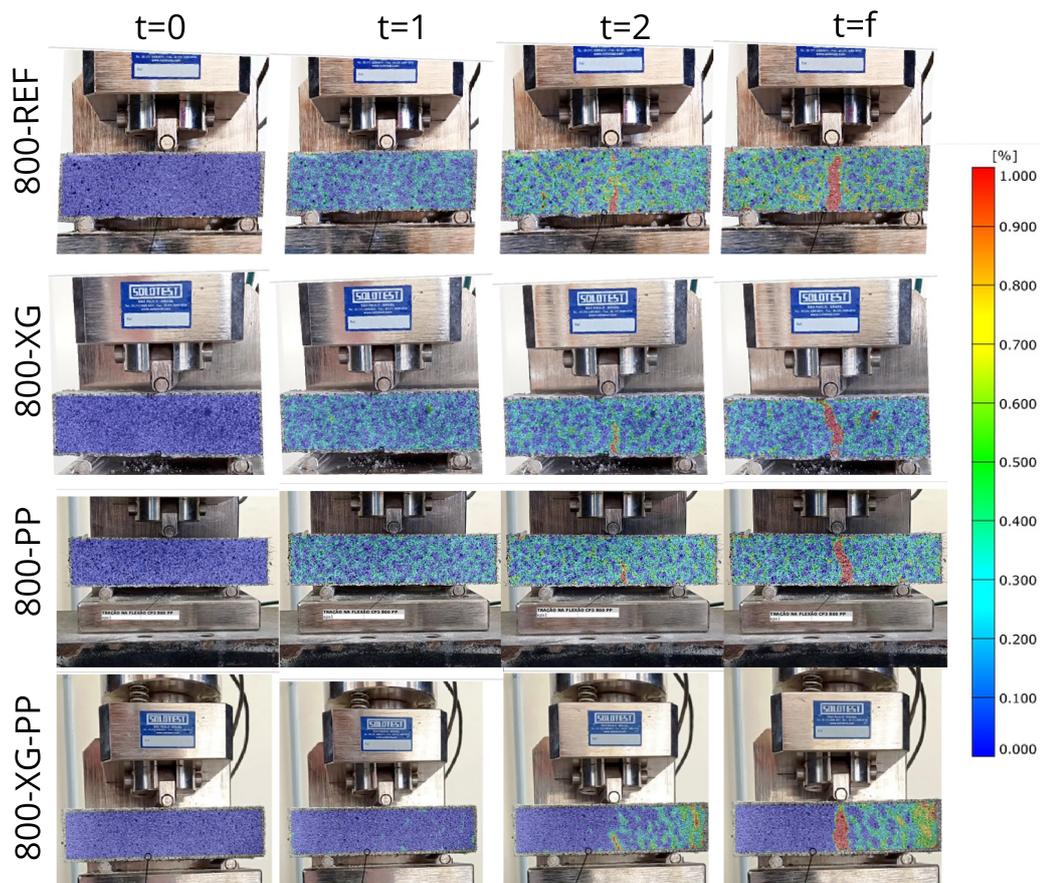
Ao observar os dados da Figura 45 (b) e da Tabela 30, aos 7 dias, nota-se visualmente que há semelhança entre os resultados de 1200-REF, 1200-XG e 1200-PP. Além disso, observa-se um acentuado declínio de cerca de 48% na resistência à tração na flexão quando utilizado conjuntamente XG e PP. Com a evolução da idade, não houve crescimento na resistência, evidenciando semelhança de resultados aos 7 e 28 dias. Nota-se que entre os traços analisados, os resultados aferidos são similares, aos 28 dias. Evidenciando que XG, PP ou a ação conjunta de ambos não influenciam na resistência à tração na flexão. Para esta densidade, conforme evidenciado nos outros resultados, a XG não apresentou diferenças evidentes. Adicionalmente, o uso da fibra PP também não contribuiu de forma positiva. É provável que a fibra não tenha conseguido gerar pontes de transferência de tensões, em razão da coalescência dos poros gerado pelo peso da matriz.

Observa-se que a resistência à tração na flexão é maior para a densidade 1200 Kg/m³ do que para as amostras com densidade igual a 800 Kg/m³, o que está de acordo com os resultados de Gencel *et al.* (2021b).

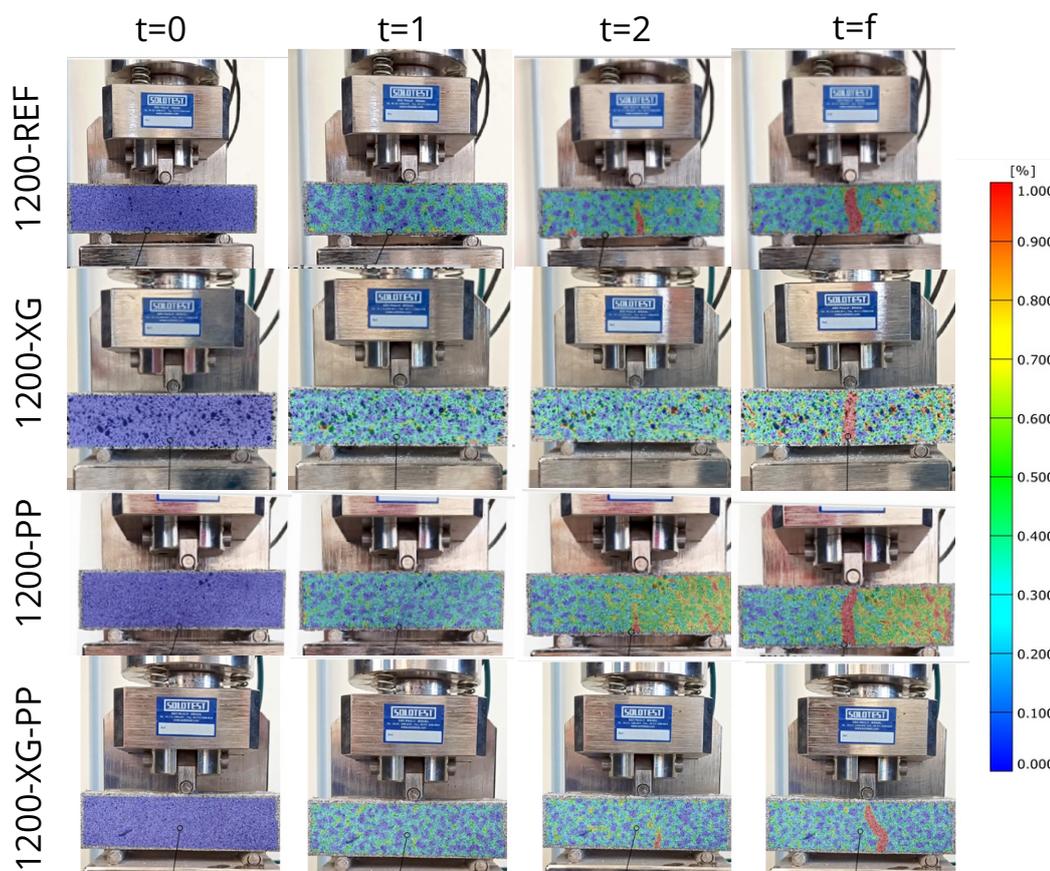
Tabela 30 – Teste de Tukey para a resistência média à tração na flexão para as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³, aos 7 e 28 dias

Variável	Combinações	Probabilidade	Significância
Comparação aos 7 dias entre misturas	1200-REF X 1200-XG	0,95171	Não
	1200-REF X 1200-PP	0,10609	Não
	1200-REF X 1200-XG-PP	0,00954	Sim
	1200-XG X 1200-PP	0,30766	Não
	1200-XG X 1200-XG-PP	0,00659	Sim
	1200-PP X 1200-XG-PP	2,05299E-4	Sim
Comparação aos 28 dias entre misturas	1200-REF X 1200-XG	0,64318	Não
	1200-REF X 1200-PP	0,99835	Não
	1200-REF X 1200-XG-PP	0,41129	Não
	1200-XG X 1200-PP	0,72952	Não
	1200-XG X 1200-XG-PP	0,08519	Não
	1200-PP X 1200-XG-PP	0,33417	Não
Comparação entre 7 e 28 dias para as mesmas misturas	1200-REF X 1200-REF	0,52707	Não
	1200-XG X 1200-XG	0,42647	Não
	1200-PP X 1200-PP	0,21021	Não
	1200-XG-PP X 1200-XG-PP	4,86065E-5	Não

A Figura 46 e Figura 47 apresentam os resultados obtidos para o processo de fissuração dos corpos de prova através da correlação digital de imagem (DIC) das amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³ e 1200 Kg/m³, respectivamente. As imagens estão dispostas em sequência de tempo, onde $t = 0$ é o momento anterior ao início das tensões, $t = 1$ o tempo de início das tensões, $t = 2$ é o tempo médio entre o início e o final das tensões e $t = f$ o tempo último de suporte de tensões. Os tempos médios de duração do ensaio até o atingimento da carga última foram obtidos a partir das filmagens geradas no ensaio de resistência à tração na flexão. Os resultados podem ser verificados na Tabelas 31 e 32.

Figura 46 – Processo de fissuração através do DIC – Densidade alvo de 800 Kg/m³Tabela 31 – Duração média das tensões Traços 800 Kg/m³

Amostras	Duração média (segundos)	Desvio Padrão
800-REF	13,86	1,88
800-XG	27,24	3,46
800-PP	33,21	6,80
800-XG-PP	34,13	7,11

Figura 47 – Processo de fissuração através do DIC – Densidade alvo de 1200 Kg/m³Tabela 32 – Duração média das tensões Traços 1200 Kg/m³

Amostras	Duração média (segundos)	Desvio Padrão
1200-REF	19,07	3,91
1200-XG	14,7225	9,68
1200-PP	30,1325	3,79
1200-XG-PP	34,615	3,28

Em relação à densidade de 800 Kg/m³, observa-se que as amostras sem fibra (800-REF e 800-XG) apresentam concentração de tensões, indicando a abertura de fissura na parte central do corpo de prova, logo na metade do tempo de ensaio ($t = 2$). Já os corpos de prova contendo fibra, em $t = 2$, a abertura da fissura ocorre de forma mais lenta. Assim, para as amostras sem fibra, os tempos de resistência às tensões é menor em comparação as amostras com fibras, pois as fibras reduzem a velocidade de propagação das fissuras no material, proporcionando um comportamento pseudodúctil ou não frágil (AKCAY; TASDEMIR, 2012)

Ao analisar os corpos de prova para a densidade de 1200 Kg/m³, observa-se que a inserção de XG para o traço sem fibra, resultou em um menor tempo de duração do ensaio, com a divisão abrupta do corpo de prova em duas metades. A amostra 1200-REF apresentou também um baixo tempo de ensaio, porém com diversas

concentrações de tensões distribuídas até a ruptura abrupta do material. O modo de ruptura contribui para a hipótese de coalescência dos poros gerados pela XG nesta densidade, gerando poros maiores e uma matriz mais frágil. Por outro lado, as misturas contendo fibras PP acarretaram em maior tempo de ensaio e o aparecimento gradual da fissura no centro do corpo de prova. A amostra 1200-PP obteve uma melhor distribuição das tensões em relação a 1200-XG-PP, devido à maior incidência de tons amarelo-vermelho. Neste sentido, a XG não gerou contribuições na resistência nem no modo de ruptura do concreto celular para a densidade de 1200 Kg/m³.

4.3.2 Resistência à compressão em corpos de prova prismáticos

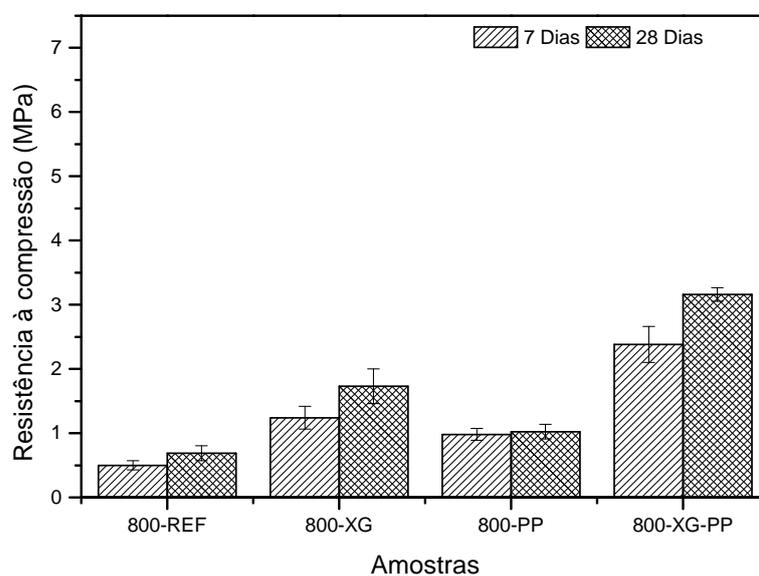
Na Figura 48 são apresentados os resultados médios da resistência à compressão para as amostras prismáticas, obtidas através das metades pós ruptura dos corpos de prova à tração na flexão. Em (a) estão contidos os resultados para as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³ e em (b) para as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³. Os dados individuais encontram-se no apêndice I. A Tabela 33 mostra a probabilidade e a significância obtidos na análise de comparação das médias pelo teste de Tukey para as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³ e a Tabela 34 para as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³.

Ao observar os dados da Figura 48 percebe-se que em ambas as densidades alvo há uma tendência de crescimento da resistência ao longo do tempo. Em relação as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³, nota-se que PP proporcionou um aumento na resistência à compressão aos 7 e 28 dias, em torno de 96% e 48%, respectivamente, em relação ao 800-REF. Por sua vez, a média de resistência manteve-se semelhante dos 7 aos 28 dias, conforme é evidenciado estatisticamente na Tabela 33. Ao adicionar XG, a mesma também proporcionou um aumento considerável na resistência à compressão do concreto celular espumoso, com um percentual de cerca de 148%, aos 7 dias e de 150%, aos 28 dias. A amostra 800-XG-PP, visivelmente apresenta a maior taxa de crescimento bem como a maior capacidade de resistência aos 7 e 28 dias. Em comparação a amostra 800-REF, 800-XG-PP apresenta um incremento significativo de 376% aos 7 dias e 357% aos 28 dias.

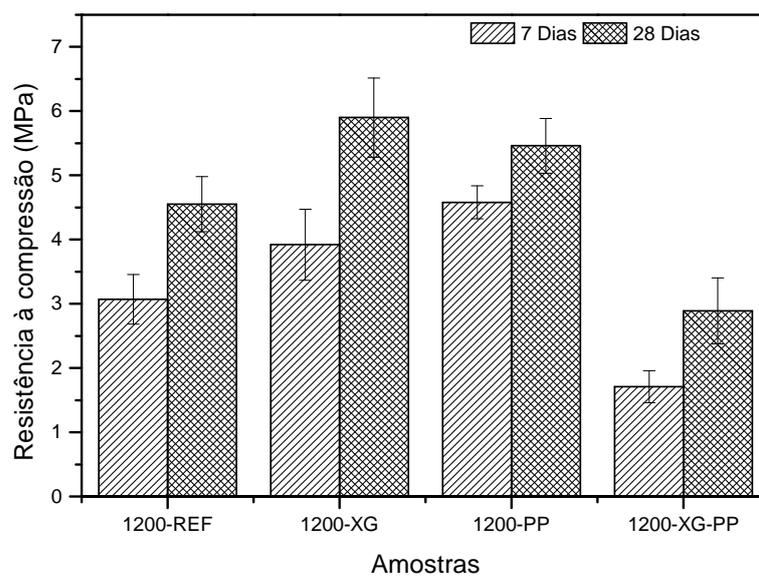
Ao analisar os dados obtidos para a densidade alvo de 1200 Kg/m³, observa-se uma tendência de desenvolvimento da capacidade de resistência dos compósitos de 7 para 28 dias. Visivelmente, aos 7 dias, a amostra 1200-PP apresenta melhor desempenho à compressão, com um aumento significativo em torno de 52,31%. Da mesma forma, 1200-XG possui um aumento relevante na resistência à compressão, em cerca de 27,68%. Contudo, ao utilizar conjuntamente XG e PP, nota-se que 1200-XG-PP obteve resistência inferior a 1200-REF, com uma redução significativa em torno de 44,29%.

Aos 28 dias, não foi mantida a mesma tendência verificada anteriormente. A

Figura 48 – Resistência à compressão em corpos de prova prismáticos: a) 800 Kg/m³
b) 1200 Kg/m³



(a)



(b)

amostra 1200-XG apresenta maior desempenho, com um incremento considerável de 29,67%. 1200-PP também obteve um aumento na resistência, em torno 20%. Porém, assim como aos 7 dias, 1200-XG-PP também teve o pior desempenho, com uma expressiva de redução de 36,48% na capacidade de resistência à compressão.

Tabela 33 – Teste de Tukey para a resistência média à compressão para as amostras prismáticas com densidade alvo de 800 Kg/m³, aos 7 dias e 28 dias.

Variável	Combinações	Probabilidade	Significância
Comparação aos 7 dias entre misturas	800-REF X 800-XG	1,33073E-9	Sim
	800-REF X 800-PP	4,14973E-5	Sim
	800-REF X 800-XG-PP	0	Sim
	800-XG X 800-PP	0,03251	Sim
	800-XG X 800-XG-PP	0	Sim
	800-PP X 800-XG-PP	0	Sim
Comparação aos 28 dias entre misturas	800-REF X 800-XG	0	Sim
	800-REF X 800-PP	0,02178	Sim
	800-REF X 800-XG-PP	0	Sim
	800-XG X 800-PP	3,73778E-6	Sim
	800-XG X 800-XG-PP	0	Sim
	800-PP X 800-XG-PP	0	Sim
Comparação entre 7 e 28 dias para as mesmas misturas	800-REF X 800-REF	0,00144	Sim
	800-XG X 800-XG	6,79868E-4	Sim
	800-PP X 800-PP	0,0,51451	Não
	800-XG-PP X 800-XG-PP	3,71262E-6	Sim

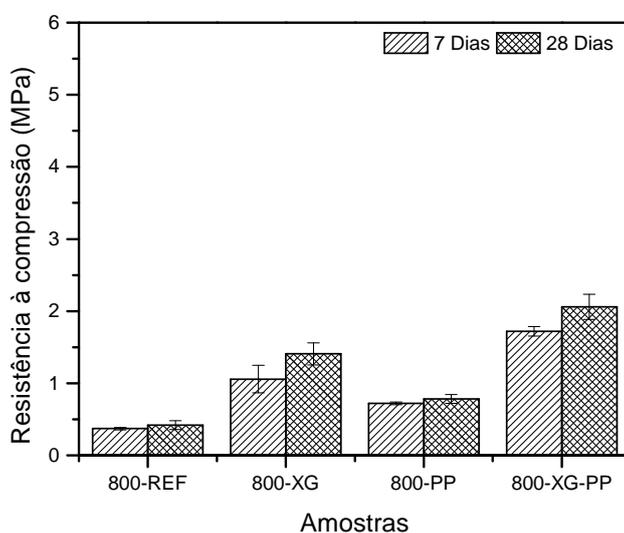
Tabela 34 – Teste de Tukey para a resistência média à compressão para as amostras prismáticas com densidade alvo de 1200 Kg/m³, aos 7 e 28 dias

Variável	Combinações	Probabilidade	Significância
Comparação aos 7 dias entre misturas	1200-REF X 1200-XG	0,00346	Sim
	1200-REF X 1200-PP	0	Sim
	1200-REF X 1200-XG-PP	2,3914E-6	Sim
	1200-XG X 1200-PP	1,14154E-6	Sim
	1200-XG X 1200-XG-PP	5,40719E-7	Sim
	1200-PP X 1200-XG-PP	0	Sim
Comparação aos 28 dias entre misturas	1200-REF X 1200-XG	6,25529E-5	Sim
	1200-REF X 1200-PP	0,99918	Sim
	1200-REF X 1200-XG-PP	6,30217E-7	Sim
	1200-XG X 1200-PP	8,5646E-5	Sim
	1200-XG X 1200-XG-PP	0	Sim
	1200-PP X 1200-XG-PP	4,62479E-7	Sim
Comparação entre 7 e 28 dias para as mesmas misturas	1200-REF X 1200-REF	4,57424E-6	Sim
	1200-XG X 1200-XG	1,68117E-4	Sim
	1200-PP X 1200-PP	1,87232E-4	Sim
	1200-XG-PP X 1200-XG-PP	4,47505E-5	Sim

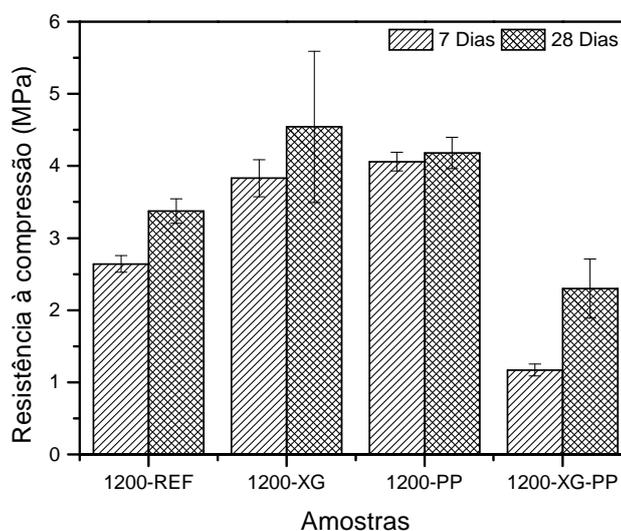
4.3.3 Resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos

No gráfico de colunas da Figura 49, são apresentados os resultados médios obtidos para o ensaio de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos aos 7 e 28 dias, para as amostras com densidade alvo de (a) 800 Kg/m³ e (b) 1200 Kg/m³. Os dados individuais encontram-se no apêndice J. A Tabela 35 e a 36 mostram a probabilidade e a significância obtidos na análise de comparação das médias através do teste de Tukey, para as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³ e 1200Kg/m³, respectivamente.

Figura 49 – Resistência à compressão: a) 800 Kg/m³ b) 1200 Kg/m³



(a)



(b)

Observa-se que aos 7 dias, a amostra que alcançou melhor desempenho à

compressão foi 800-XG-PP, seguido de 800-XG, 800-PP e por fim 800-REF. Nota-se que a XG proporciona um incremento de 186% e a fibra PP de 94% na resistência à compressão. Contudo, a ação conjunta de XG e PP promove um aumento substancial, em cerca de 365%, se comparado a amostra referência. Observa-se que ocorreu a mesma tendência em relação a resistência à compressão para as amostras com corpos de prova prismáticos, os quais foram verificados no item 4.3.1.

As amostras 800-XG e 800-XG-PP tiveram um aumento significativo na resistência à compressão de 7 para 28 dias, de 33% e 19%, respectivamente. Porém os demais traços demonstraram resultados semelhantes entre as duas idades de verificação. Observa-se que aos 28 dias, a fibra PP proporcionou um incremento de cerca de 85% na resistência à compressão, porém em relação as demais combinações é considerado superficial. XG propiciou um aumento ainda mais expressivo, em torno de 233%. Contudo, destaca-se a ação conjunta de XG e PP, a qual proporcionou um substancial aumento, em torno de 390% superior a REF. Aos 28 dias de verificação, as amostras mantiveram a mesma tendência verificada aos 7 dias, como também todas as amostras apresentam diferença significativa, evidenciando a influência de PP, XG e da ação conjunta de ambas no aumento da resistência à compressão para as amostras com densidade planejada igual a 800 kg/m^3 . A significância dos resultados pode ser verificada na Tabela 35.

Para Hashim e Tantray (2021) a resistência à compressão do concreto celular espumoso depende principalmente de dois fatores, a fase de endurecimento da matriz de ligação e a qualidade e tamanho dos poros de ar. Ao analisar cada variável, pode-se observar que XG contribuiu para a estabilização da espuma, como também no estado endurecido proporcionou poros menores e menos interconectados, conseqüentemente viabilizou o aumento da resistência à compressão média. Os resultados estão de acordo com os resultados encontrados por Hajimohammadi, Ngo e Mendis (2018), Zhu *et al.* (2020), os quais obtiveram o aumento da capacidade de resistência à compressão através da utilização de goma xantana. Para Zhu *et al.* (2020) ao estabilizar a espuma com XG, a espessura da parede do poro é aumentada, por conseguinte a resistência à compressão do concreto celular espumoso. Salienta-se que, aos 28 dias, a resistência à compressão para baixas densidades, como esta em estudo, é proveniente da estrutura da parede de poros, a qual está relacionada com a distribuição de tamanho (KEARSLEY; VISAGIE, 2002), homogeneidade e espessura da parede dos poros (ZHU *et al.*, 2020).

A fibra PP por sua vez também contribuiu para o aumento da resistência à compressão, porém em comparação a XG, em menor percentual. Os dados estão em concordância com os obtidos por Amran *et al.* (2020) e Wang *et al.* (2020), os quais obtiveram o aumento da capacidade de resistência através da inserção de PP. Amran *et al.* (2020) elencam que o incremento ocasionado por PP aumenta proporcionalmente com o volume de espuma, ou seja, em menores densidades é possível notar o aumento

da resistência à compressão ocasionado por PP. Na opinião de Wang *et al.* (2020), este aumento pode estar atribuído ao comprimento da fibra, a interação entre a fibra e a matriz, como também ao efeito de ponte ocasionado pelas fibras.

Ao analisar a ação conjunta de XG e PP para densidade de 800 kg/m³, ocorre um aumento ainda mais expressivo da resistência. Este aumento pode ser atribuído a combinação dos benefícios ocasionados por XG e PP, os quais mantiveram a densidade e o índice de vazios, porém diminuíram o tamanho e interconectividade dos poros. Conseqüentemente, ocorreu um incremento substancial na resistência à compressão.

Tabela 35 – Teste de Tukey para a resistência média à compressão cilíndrica para as amostras com densidade alvo de 800 Kg/m³, aos 7 dias e 28 dias.

Variável	Combinações	Probabilidade	Significância
Comparação aos 7 dias entre misturas	800-REF X 800-XG	2,9254E-6	Sim
	800-REF X 800-PP	0,00185	Sim
	800-REF X 800-XG-PP	0	Sim
	800-XG X 800-PP	0,00248	Sim
	800-XG X 800-XG-PP	3,13728E-6	Sim
	800-PP X 800-XG-PP	9,20358E-7	Sim
Comparação aos 28 dias entre misturas	800-REF X 800-XG	2,08382E-4	Sim
	800-REF X 800-PP	0,03285	Sim
	800-REF X 800-XG-PP	0	Sim
	800-XG X 800-PP	0,07124	Não
	800-XG X 800-XG-PP	4,35205E-6	Sim
	800-PP X 800-XG-PP	0	Sim
Comparação entre 7 e 28 dias para as mesmas misturas	800-REF X 800-REF	0,17377	Não
	800-XG X 800-XG	0,02887	Sim
	800-PP X 800-PP	0,09999	Não
	800-XG-PP X 800-XG-PP	0,01072	Sim

Em relação as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³, observa-se na Figura 49 (b), que a amostra 1200-PP obteve o melhor desempenho a resistência à compressão aos 7 dias, com um aumento percentual de 53% em relação a REF. A inserção de XG também propiciou um aumento em cerca de 45% da resistência à compressão. Contudo, as amostras apresentam semelhança entre os seus resultados, ou seja, com a finalidade de melhorar a resistência à compressão, pode-se optar por XP ou PP, visto que a resistência à compressão será estatisticamente a mesma para esta variável. Todavia, nota-se que a adição conjunta de XG e PP não foi benéfica para esta densidade em estudo, pois diminuiu a resistência do concreto celular espumoso em 56% aos 7 dias. A significância dos resultados pode ser verificada na Tabela 36.

Com o passar do tempo, as amostras REF e XG-PP tiveram uma considerável evolução na resistência de 7 para 28 dias, em cerca de 28% para o traço REF e 96,58%

para XG-PP. Os demais traços apresentaram valores médios semelhantes quando comparado as duas idades de verificação. Aos 28 dias, 1200-REF, 1200-XG e 1200-PP apresentam resultados médios semelhantes. A resistência média de 1200-XG não é significativa devido ao seu elevado desvio-padrão. O fato se deve porque dois corpos de prova apresentaram ruptura de topo, em decorrência de uma aplicação de carga de forma irregular ou porque os corpos de prova apresentaram defeito de retificação. Embora tenha ocorrido este problema, a resistência à compressão destes corpos de prova foi mais elevada comparada às demais amostras, com um aumento de 34% em comparação a REF. Por fim, o traço 1200-XG-PP apresenta o pior desempenho à compressão, com uma diminuição significativa de 25% na resistência. As amostras seguem a mesma tendência que as amostras aferidas no item 4.3.1. A significância dos resultados pode ser verificado na Tabela 36.

De acordo com Gencel *et al.* (2021b), a diminuição da resistência à compressão, pode ser atribuída a consolidação das fibras no concreto celular, pois fibras PP dispostas paralelamente à direção do carregamento, comportam-se como vazios, tornando-se zonas de transição frágeis e como consequência resultam na diminuição de propriedades mecânicas do compósito. Ressalta-se que em concretos celulares com densidades acima de 1000 Kg/m³, a pasta de cimento é quem determina a resistência à compressão, pois os vazios de ar estão muito afastados uns dos outros (KEARSLEY; VISAGIE, 2002).

Tabela 36 – Teste de Tukey para a resistência média à compressão para as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m³, aos 7 e 28 dias

Variável	Combinações	Probabilidade	Significância
Comparação aos 7 dias entre misturas	1200-REF X 1200-XG	1,01147E-6	Sim
	1200-REF X 1200-PP	3,5059E-8	Sim
	1200-REF X 1200-XG-PP	0	Sim
	1200-XG X 1200-PP	0,23253	Não
	1200-XG X 1200-XG-PP	0	Sim
	1200-PP X 1200-XG-PP	0	Sim
Comparação aos 28 dias entre misturas	1200-REF X 1200-XG	0,0615	Não
	1200-REF X 1200-PP	0,25408	Não
	1200-REF X 1200-XG-PP	0,08828	Não
	1200-XG X 1200-PP	0,81291	Não
	1200-XG X 1200-XG-PP	6,97241E-4	Sim
Comparação entre 7 e 28 dias para as mesmas misturas	1200-PP X 1200-XG-PP	0,00296	Sim
	1200-REF X 1200-REF	3,70256E-4	Sim
	1200-XG X 1200-XG	0,23509	Não
	1200-PP X 1200-PP	0,37848	Não
	1200-XG-PP X 1200-XG-PP	0,00172	Sim

Em relação à influência da densidade na resistência à compressão média, as amostras 800-REF apresentaram cerca de 12,46% da resistência alcançada pelo traço 1200-REF aos 28 dias. Já as amostras do traço 800-XG apresentaram 30,83% da resistência atingida pelo traço 1200-XG. Como também as amostras do traço 800-PP atingiram 18,66% de 1200-PP e 800-XG-PP 89% de 1200-XG-PP, aos 28 dias. Assim, com o aumento da densidade ocorreu um incremento na resistência à compressão média. Os resultados estão de acordo com Amran *et al.* (2020), Hashim e Tantray (2021) e Gencel *et al.* (2021a), que relataram a diminuição da resistência à compressão a medida que aumenta o teor de espuma e conseqüentemente diminui a densidade. Sendo assim, a inserção de XG contribuiu para a estabilização da espuma, e conseqüentemente aumentou a resistência à compressão média, estando de acordo com os resultados encontrados por Hajimohammadi, Ngo e Mendis (2018) e Zhu *et al.* (2020).

Os traços 800-XG-PP, 1200-REF, 1200-XG, 1200-PP e 1200-XG-PP atingiram resistência à compressão média superior a resistência mínima de 1,50 MPa, estipulada pela (ABNT, 2017a), podendo assim serem utilizados como materiais de vedação. Já os traços 800-REF, 800-XG e 800-PP não atingiram a resistência mínima à compressão, pois o concreto celular apresenta baixas resistências em função dos vazios presente em sua estrutura (HASHIM; TANTRAY, 2021; GENCEL *et al.*, 2021a; GENCEL *et al.*, 2022).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

A produção de novos Sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE) mostra-se como uma excelente oportunidade na busca por vedações que ofereçam propriedades além da trivial separação do meio externo com o interno, bem como de compartimentalizar ambientes. O objetivo desta pesquisa foi produzir um material leve para utilização em SVVIE, aliado a melhores propriedades físicas como também a um melhor comportamento mecânico. Para alcançar esta finalidade, utilizou-se a Goma Xantana a fim de obter uma espuma de melhor qualidade e estável, bem como reforçou-se a matriz cimentícia através da inserção de fibra de polipropileno. A partir do presente estudo, pode-se concluir que:

- Em relação a qualidade da espuma, o percentual de 2% de Goma Xantana promoveu uma maior estabilidade a espuma, viabilizando o retardo do percentual de drenagem durante os primeiros 10 minutos, como também maior resistência final da bolha, proporcionando uma melhor qualidade à espuma.
- No que se refere ao concreto celular espumoso, a estabilização da espuma proporcionada pela Goma Xantana, possibilitou melhores propriedades no estado endurecido para a densidade de 800 Kg/m³. Por meio da estrutura de poros, a goma xantana promoveu uma maior distribuição de poros menores, como também mais isolados e tendendo a uma forma circular. Em consequência, aumentou a densidade o que resultou em um menor índice de vazios e maior retração por secagem. Contudo, através da estrutura de poros, a Goma Xantana conferiu uma maior qualidade ao concreto celular espumoso proporcionando uma menor absorção de água e maior resistência média à compressão e à tração na flexão, como também mostrou ser um bom material para fins de conforto térmico, visto que apresentou coeficiente de condutividade térmica menor em comparação a materiais comumente utilizados no mercado. Todavia, em comparação a densidade de 800 Kg/m³, o percentual de 2% de Goma Xantana não se mostrou tão eficaz para a densidade de 1200 Kg/m³, pois apesar de aumentar a resistência média à compressão, reduzir a densidade e a absorção de água, o mesmo proporcionou um aumento no coeficiente de condutividade térmica, bem como não mostrou ser significativo para as demais propriedades avaliadas, levando a crer que para uma maior densidade o percentual de 2% de XG não foi suficiente para gerar efeito na estrutura dos poros.
- No que concerne a microfibras de polipropileno, para a densidade alvo de 800Kg/m³, evidencia-se mais uma vez, os benefícios da fibra em reduzir a retração por se-

cagem, como também em proporcionar maior resistência mecânica, através da capacidade de resistência média à compressão e à tração na flexão. Porém a mesma conferiu poros mais irregulares a mistura, como também aumentou o coeficiente de condutividade térmica. Para as amostras com densidade alvo de 1200 Kg/m^3 , a fibra também mostrou ser eficaz em reduzir a retração por secagem como também em aumentar a capacidade de resistência média à compressão. Em relação ao fluxo capilar, a mesma tornou o caminho tortuoso, reduzindo a absorção e a ascensão de água por capilaridade. Contudo, proporcionou poros mais irregulares e achatados, e não apresentou significância de resultados para as demais propriedades avaliadas.

- Ao utilizar Goma Xantana e microfibras de polipropileno conjuntamente, conclui-se que, para a densidade alvo de 800 Kg/m^3 , a utilização das duas conjuntamente promoveu poros menores e mais circulares, sendo eficazes em aumentar a densidade, porém mantendo o índice de vazios, a absorção de água por imersão e a retração por secagem, como também reduzindo a ascensão capilar. Contudo, apresentou o maior coeficiente de condutividade térmica para os traços 800 Kg/m^3 , mesmo assim enquadra-se como um bom material a ser utilizado para proporcionar maior conforto térmico. Em se tratando de resistência mecânica, é evidente a maior resistência à tração e à compressão, destacando-se como o único traço de 800 Kg/m^3 a obter resistência à compressão maior que $1,5 \text{ MPa}$. Em relação as amostras de 1200 Kg/m^3 , a ação conjunta das duas não foi benéfica, pois reduziu a densidade e conseqüentemente diminuiu a condutividade e a resistência à compressão e à tração na flexão, levando a crer que há uma maior faixa de distribuição de poros, como também poros maiores ocasionados pela coalescência dos mesmos em razão de uma matriz mais densa. As demais propriedades avaliadas, a ação conjunta de XG e PP não se mostrou significativa.
- Em relação as amostras de 1200 Kg/m^3 , é evidente que a amostra referência apresenta maior estabilidade em comparação a 800 Kg/m^3 , por este motivo a ação tanto de XG na estrutura de poros como de PP no reforço da matriz é mais evidente na densidade de 800 Kg/m^3 . Como também, é visível que para as amostras de 800 Kg/m^3 , a XG minimiza os problemas ocasionados através da inserção da fibra no concreto celular espumoso.

Em suma, por meio da atuação da Goma Xantana na estabilização da espuma como também da fibra de polipropileno no reforço da matriz cimentícia, é possível produzir um concreto celular com densidade de 800 Kg/m^3 , apresentando boas propriedades físicas e mecânicas. Além do mais, em razão da sua leveza, pode-se inferir que também resultará em uma maior produtividade no canteiro de obras, bem como em um

menor peso sobre a estrutura, sendo um material promissor para ser utilizado como SVVIE.

5.2 Sugestões de Trabalhos futuros

Com base nas conclusões obtidas no presente trabalho, verificou-se que existe a possibilidade de criar um material de vedação com alta qualidade bem como apresentando desempenho superior a materiais convencionais, para tanto sugere-se como trabalhos futuros:

- Investigar a utilização de Goma xantana e da fibra PP em concretos celulares espumosos com densidades inferiores a 800 Kg/m^3 , assim como aumentar o teor de Goma Xantana;
- Reproduzir o concreto celular espumoso a fim de verificar o seu comportamento em relação a resistência ao fogo, ao impacto e ao comportamento acústico;
- Produzir um concreto celular espumoso com densidade de 1200 Kg/m^3 com maiores teores de Goma Xantana;
- Verificar a composição da Goma Xantana a fim de estimar a sua interação química com a matriz cimentícia;
- Investigar a utilização de Goma Xantana com outras fibras em concretos celulares espumosos.

REFERÊNCIAS

AKCAY, B.; TASDEMIR, M. A. Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 28, n. 1, p. 287–293, 2012.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE 523. **ACI 523.3R-14 Guide for Cellular Concretes Above 50 Lb/ft³ (800 Kg/m³)**. Michigan, 2014. 17 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C796/C796M, Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam**. West Conshohocken, 2012.

AMRAN, Y. M. *et al.* Performance properties of structural fibred-foamed concrete. **Results in Engineering**, v. 5, p. 100092, 2020.

AMRAN, Y. M.; FARZADNIA, N.; ALI, A. A. Properties and applications of foamed concrete; a review. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 990–1005, 2015.

ASIM, M. *et al.* Comparative experimental investigation of natural fibers reinforced light weight concrete as thermally efficient building materials. **Journal of Building Engineering**, Elsevier, v. 31, p. 101411, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779 - Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

_____. **NBR 5739 - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

_____. **NBR 16.916 - Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021. 7 p.

_____. **NBR 16.972 - Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, 2021. 6 p.

_____. **NBR 17.054 - Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2022. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15220-3 - Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 14956-1 - Blocos de concreto celular autoclavado — Execução de alvenaria sem função estrutural Parte 1: Procedimento com argamassa colante industrializada**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 14956-2 - Blocos de concreto celular autoclavado — Execução de alvenaria sem função estrutural Parte 2: Procedimento com argamassa convencional.** Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 8993 - Concreto para fins estruturais- Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR-6136 - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 15270 - Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria, Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16605 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR-13438 - Blocos de concreto celular autoclavado - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 13440- Blocos de concreto celular autoclavado — Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 17071 - Parede de concreto celular estrutural moldada no local para a construção de edificações - Projeto, execução e controle - Requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro, 2022.

BALGOURINEJAD, N. *et al.* Experimental study on mechanical properties, microstructural of lightweight concrete incorporating polypropylene fibers and metakaolin at high temperatures. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 18, p. 5238–5256, 2022.

BATOOL, F.; BINDIGANAVILE, V. Air-void size distribution of cement based foam and its effect on thermal conductivity. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 17–28, 2017.

_____. Evaluation of thermal conductivity of cement-based foam reinforced with polypropylene fibers. **Materials and Structures**, Springer, v. 53, p. 1–16, 2020.

_____. Fresh properties of fiber reinforced cement-based foam with pozzolans. **Iran J Sci Technol Trans Civ Eng**, v. 44, p. 253–264, 2020.

_____. Microstructural parameters of fiber reinforced cement-based foam and their influence on compressive and thermal properties. **Journal of Building Engineering**, Elsevier, v. 31, p. 101320, 2020.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fiber Reinforced Cementitious Composites**. 2. ed. London: Taylor Francis, 2007.

BHAT, I. M. *et al.* Advances in xanthan gum production, modifications and its applications. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, Elsevier, p. 102328, 2022.

BINDIGANAVILE, V.; HOSEINI, M. Developments in the formulation and reinforcement of concrete. In: _____. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2008. cap. Foamed concrete.

BORGES, C. D.; VENDRUSCOLO, C. T. Goma xantana: características e condições operacionais de produção. **Semina: Ciências Biológicas e da Saúde**, v. 29, n. 2, p. 171–188, 2008.

CHICA, L.; ALZATE, A. Cellular concrete review: New trends for application in construction. **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 637–647, 2019.

CONCRETO - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear. Rio de Janeiro, 2020. 7 p.

COSTA, F. B. P. da. **Análise da Durabilidade de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação Reforçados com Fibras**. 169 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

DAWOOD, E. T. *et al.* Toughness, elasticity and physical properties for the evaluation of foamed concrete reinforced with hybrid fibers. **Heliyon**, v. 4, n. 12, p. e01103, 2018.

FALLIANO, D. *et al.* Compressive and flexural strength of fiber-reinforced foamed concrete: Effect of fiber content, curing conditions and dry density. **Construction and Building Materials**, v. 198, p. 479–493, 2019.

_____. Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 165, p. 735–749, 2018.

FALLIANO, D.; RESTUCCIA, L.; GUGLIANDOLO, E. A simple optimized foam generator and a study on peculiar aspects concerning foams and foamed concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 268, p. 121101, 2021.

FERREIRA, O. A. R.; TEZUKA, Y. **Concretos leves: o concreto celular espumoso**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 1987.

GENCEL, O. *et al.* Effect of waste marble powder and rice husk ash on the microstructural, physico-mechanical and transport properties of foam concretes exposed to high temperatures and freeze–thaw cycles. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 291, 2021.

_____. Influence of bottom ash and polypropylene fibers on the physico-mechanical, durability and thermal performance of foam concrete: An experimental investigation. **Construction and Building Materials**, v. 306, p. 124887, 2021.

_____. Basalt fiber-reinforced foam concrete containing silica fume: An experimental study. **Construction and Building Materials**, v. 326, 2022.

GUITARRAPA, P. **Climas do Brasil**. 2022. Url <https://brasilecola.uol.com.br/brasil/os-climas-brasil.htm>.

GUO, H. *et al.* Effect of steel and polypropylene fibers on the quasi-static and dynamic splitting tensile properties of high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 224, p. 504–514, 2019.

HAJIMOHAMMADI, A.; NGO, T.; MENDIS, P. Enhancing the strength of pre-made foams for foam concrete applications. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 87, p. 164–171, 2018.

HASHIM, M.; TANTRAY, M. Comparative study on the performance of protein and synthetic-based foaming agents used in foamed concrete. **Case Studies in Construction Materials**, Elsevier, v. 14, p. e00524, 2021.

HOSSEINZADEH, H. *et al.* The effects of steel, polypropylene, and high-performance macro polypropylene fibers on mechanical properties and durability of high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 386, p. 131589, 2023.

HOU, L. *et al.* Influence of foaming agent on cement and foam concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 280, p. 122399, 2021.

KEARSLEY, E.; VISAGIE, M. Properties of foamed concrete as influenced by air-void parameters. **Concr. Beton**, v. 101, p. 8–14, 2002.

LIU, J.; XIE, X.; LI, L. Experimental study on mechanical properties and durability of grafted nano-sio2 modified rice straw fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 347, p. 128575, 2022.

LUNA, D. **Consumo de energia por ar condicionado triplica**. 2022. [Urlhttps://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/consumo-de-energia-por-ar-condicionado-triplica](https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/consumo-de-energia-por-ar-condicionado-triplica).

MALAR, J. P. **Crise energética deve aliviar em 2022, mas espaço para queda em contas é pequeno**. 2022. [Urlhttps://www.cnnbrasil.com.br/business/crise-energetica-deve-aliviar-em-2022-mas-espaco-para-queda-em-contas-e-pequeno/](https://www.cnnbrasil.com.br/business/crise-energetica-deve-aliviar-em-2022-mas-espaco-para-queda-em-contas-e-pequeno/).

MANUAL do Usuário - Gerador de Espuma ECOFOAMER - 100W-10BP. [S.I.], 2022.

MELO, G. F. d. **Concreto Celular Polimérico:Influência da adição de resíduo de poliéster insaturado termofixo**. 83 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

MOTA, J. R. **ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCOS DE CONCRETO CELULAR AUTOCLAVADO E BLOCOS DE CONCRETO - INFLUÊNCIA DA JUNTA VERTICAL NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PRISMAS**. 223 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

MYDIN, M. A. O.; WANG, Y. C. Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 26, p. 638–654, 2012.

NAMBIAR, E. K.; RAMAMURTHY, K. Air-void characterisation of foam concrete. **Cement and concrete research**, Elsevier, v. 37, n. 2, p. 221–230, 2007.

NBR 12644 - Concreto leve celular estrutural - Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco. Rio de Janeiro, 2014. 6 p.

NBR 15575 - 4 - EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS - DESEMPENHO - PARTE 4: REQUISITOS PARA OS SISTEMAS DE VEDAÇÕES VERTICAIS INTERNAS E EXTERNAS-SVVIE. Rio de Janeiro, 2021. 84 p.

NBR 15575 - EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS - DESEMPENHO - PARTE 1: REQUISITOS GERAIS. Rio de Janeiro, 2021. 98 p.

NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009. 4 p.

NIU, D. *et al.* Experimental study on mechanical properties and durability of basalt fiber reinforced coral aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117628, 2020.

PAKRAVAN, H.; LATIFI, M.; JAMSHIDI, M. Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review. **Construction and building materials**, Elsevier, v. 142, p. 280–294, 2017.

PANESAR, D. Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. **Construction and building materials**, Elsevier, v. 44, p. 575–584, 2013.

PAPA, E. *et al.* Porosity and insulating properties of silica-fume based foams. **Energy And Buildings**, v. 131, p. 31–32, 2016.

RAJ, S.; KRISHNAN, J. M.; RAMAMURTHY, K. Influence of admixtures on the characteristics of aqueous foam produced using a synthetic surfactant. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 643, p. 128770, 2022.

RAMAMURTHY, K.; NAMBIAR, E.; RANJANI, G. I. S. A classification of studies on properties of foam concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 6, p. 388–396, 2009.

RIBEIRO, P. P. **Estabilidade de espumas de soluções de tensoativos não iônicos: abordagem química e modelagem matemática**. 56 p. Monografia (tcc) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

RODRIGUES, L. **Pantheon de Roma: História, Arquitetura e Curiosidades**. 2022. [Urlhttp://https://www.romapravoce.com/pantheon-de-roma/](http://https://www.romapravoce.com/pantheon-de-roma/).

SALEHI, P.; DABBAGH, H.; ASHENGROPH, M. Effects of microbial strains on the mechanical and durability properties of lightweight concrete reinforced with polypropylene fiber. **Construction and Building Materials**, v. 322, p. 126519, 2022.

SHANG, X.; QU, N.; LI, J. Development and functional characteristics of novel foam concrete. **Construction and Building Materials**, v. 324, 2022.

SHE, W. *et al.* Numerical study on the effect of pore shapes on the thermal behaviors of cellular concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 163, p. 113–121, 2018.

SILVA, C. A. d. O. **Estudo de dosagem e avaliação de concreto celular com fins estruturais**. 139 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

SONG, Y.; LANGE, D. Influence of fine inclusions on the morphology and mechanical performance of lightweight foam concrete. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 124, p. 104264, 2021.

STAPPER, J. L.; GAUVIN, F.; BROUWERS, H. Influence of short-term degradation on coir in natural fibre-cement composites. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 306, p. 124906, 2021.

SUN, C. *et al.* Effects of foaming agent type on the workability, drying shrinkage, frost resistance and pore distribution of foamed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 833–839, 2018.

SURYANITA, R. *et al.* O efeito da adição de sílica ativa na resistência à compressão do concreto leve celular. *Results in Engineering*, v. 14, 2022.

SUTHERLAND, I. W. Microbial biopolymers from agricultural products: production and potential. **International Biodeterioration & Biodegradation**, Elsevier, v. 38, n. 3-4, p. 249–261, 1996.

TANG, R. *et al.* Preparation and performance analysis of recycled pet fiber reinforced recycled foamed concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 57, p. 104948, 2022.

TEIXEIRA FILHO, F. J.; TEZUKA, Y. **Considerações sobre algumas propriedades dos concretos celulares espumosos**. São Paulo, 1992.

THIENEL, K.-C.; HALLER, T.; BEUNTNER, N. Lightweight concrete—from basics to innovations. **Materials**, MDPI, v. 13, n. 5, p. 1120, 2020.

UPASIRI, I. *et al.* Fire performance of lightweight concrete-filled lsf wall panels. **Structures**, v. 40, p. 1039–1055, 2022.

VORSATZ, D. Üрге *et al.* Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 85–98, 2015.

WANG, X. *et al.* Investigation of silica fume as foam cell stabilizer for foamed concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 237, p. 117514, 2020.

WANG, X.-h. *et al.* Effect of steel fibers on the compressive and splitting-tensile behaviors of cellular concrete with millimeter-size pores. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 60–73, 2019.

WANG, Y. *et al.* Thermo-mechanical and moisture absorption properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete reinforced by polypropylene fibers. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 118960, 2020.

WEI, J.; MEYER, C. Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. **Cement and concrete Research**, Elsevier, v. 73, p. 1–16, 2015.

ZHANG, S. *et al.* Influence of the porosity and pore size on the compressive and splitting strengths of cellular concrete with millimeter-size pores. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 235, p. 117508, 2020.

ZHU, H. *et al.* Experimental study on performance improvement of anionic surfactant foaming agent by xanthan gum. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 230, p. 116993, 2020.

APÊNDICE A – RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA ESPUMA PRÉ-FORMADA

a) Resultados do volume drenado

Tempo (min)	Referência	Volume Drenado (ml)		
		XG-0,5	XG-1	XG-2
0	0	0	0	0
	0	0	0	0
	0	0	0	0
5	25	0	0	0
	25	0	0	0
	25	0	0	0
10	100	80	75	50
	100	75	100	50
	100	75	75	50
15	105	110	100	100
	120	100	120	100
	110	105	100	100
20	105	180	180	150
	140	175	200	110
	110	175	190	110
25	110	200	180	150
	140	175	200	150
	110	175	190	150
30	110	200	200	150
	140	190	200	150
	110	200	200	150

b) Resultados da resistência das espumas

Tempo (min)	Deslocamento (mm)			
	Referência	XG-0,5	XG-1	XG-2
0	0	0	0	0
5	34	28	30	25
10	46	37	42	40
15	65	44	51	48
20	87	60	62	57
25	111	72	72	65
30	141	90	85	75
Velocidade de Afundamento	4,7	3	2,83	2,5

c) Resultados do tamanho das bolhas, filme liquido e membrana que recobre as bolhas.

Amostra REF		
Membrana das bolhas	Filme Liquido	Tamanho das bolhas
8,43	10,53	43,05
12,76	11,28	46,44
13,86	12,65	76,29
14,49	13,34	85,91
16,76	13,42	88,32
18,12	13,5	95,05
18,87	13,87	95,08
19,09	14,32	106,32
22,47	14,64	114,48
22,47	14,64	120
22,94	16,12	128,16
23,19	16,13	142,42
24,41	16,23	143,06
24,52	16,4	154,31
24,74	16,5	160
24,76	16,67	161,4
25,63	16,76	165,13
25,89	17,09	166,52
26,4	17,35	177,1
27,59	17,48	205,6
28,6	17,78	207,35
28,97	19,91	226,002
29,52	22,36	236,78
29,53	22,41	245,52
31,06	27,31	279,9

Amostra XG-0,5		
Membrana das bolhas	Filme Liquido	Tamanho das bolhas
9,19	11,66	52,56
11,85	18,65	54,33
13,21	13,89	56,52
15,51	14,29	66,94
15,81	16,87	71,06
17,03	16,81	81,32
19,14	16,67	94,02
19,21	23,9	134,16
19,92	20,56	135,57
21,1	15,77	136,08
22	22,06	145,99
23,51	23,04	155,05
24,52	15,62	155,8
24,63	20,15	176,14
26,17	22,7	180,28
26,61	18,97	202,71
27,66	16,83	211,1
31,02	18	231,15
31,15	15,8	234,42
32,25	21,93	235,14
32,5	16,19	255,35
33,23	26,48	285,96
35,15	15,07	320,7
39,96	18,39	346
41,02	23,02	356,09

Amostra XG-1		
Membrana das bolhas	Filme Liquido	Tamanho das bolhas
23,23	15,35	61,52
24,4	13,54	62,23
18,22	13,5	65,07
20,15	15,84	68,12
20,35	21,79	69,29
37,8	13,79	69,64
25,12	22,19	95,48
13,31	20,6	111,61
23,28	20	116,29
30,18	21,47	118,71
17,75	19,81	132,24
17,33	24,19	140,89
31,4	13,14	168,63
21,21	22,36	171,59
29,73	16,09	177,55
31,02	21,5	181,18
30,27	22,51	194,83
28,6	22,96	202,71
26,09	18,51	235,17
32,19	21,03	255,38
25,56	18,78	257,81
31,4	20,8	262,07
31,06	19,42	299,69
26,47	17,51	328,35
19,49	12,08	333,03
21,75	18,45	337,29

Amostra XG-2		
Membrana das bolhas	Filme Liquido	Tamanho das bolhas
13,46	12,3	41,44
13,99	17,03	50,57
14,36	17,94	51,08
15,01	18	53,45
17,68	18,03	55,08
20,67	18,31	57,24
21,51	18,5	59,81
22,09	18,56	85,17
22,19	18,93	97,62
22,55	19,29	103,6
23,72	19,68	106,88
24,19	20,71	113,81
25,14	20,74	115,52
25,72	20,88	117,44
26,28	21,38	134,09
27,34	22,32	138,24
28,5	22,47	143,4
29,7	22,67	155,26
30,7	23,74	156,11
31,06	23,75	156,67
32,2	24,89	165,08
32,47	25	170,03
33,06	25,05	290,17
35,7	31,63	300,13
36,5	31,71	324,68

APÊNDICE B – RESULTADOS DA DENSIDADE NO ESTADO ENDURECIDO

a) Resultados densidade alvo de 800 Kg/m³.

Mistura	CP	massa seca (g)	massa sat (g)	massa sub (g)	Densidade seca (Kg/m ³)	
800 - REF	1	1158,44	2046	518	758,1414	
	2	1181,61	1932,5	382,5	762,3290	742,69
	3	1102,51	1894,1	336	707,5990	
800 - XG	1	1232,5	1861,5	328,8	804,1365	
	2	1223,39	1812,4	249	782,5189	811,164
	3	1323,52	1811,8	248,9	846,8360	
800-PP	1	1150,58	1956,3	350,7	716,6044	
	2	1169,17	1976,4	394,5	739,0922	729,495
	3	1154,8	1929,6	353,7	732,7876	
800 - XG - PP	1	1302,62	2082	517,4	832,5578	
	2	1284,44	2062,04	489,7	816,8971	818,956
	3	1267,72	2059,5	489,4	807,4135	

b) Resultados densidade alvo de 1200 Kg/m³.

Mistura	CP	massa seca (g)	massa sat (g)	massa sub (g)	Densidade seca (Kg/m ³)	
1200 - REF	1	1801,89	2429,05	870,9	1156,4291	
	2	1816,39	2454,1	876,6	1151,4358	1149,59
	3	1773,87	2398,08	843,3	1140,9138	
1200-XG	1	1690,7	2312,4	750,8	1082,6716	
	2	1755,6	2386,1	822,4	1122,7217	1104,82
	3	1748,1	2387,2	811	1109,0598	
1200 - PP	1	1738,82	2218,07	660,4	1116,2955	
	2	1753,81	2217,51	666,5	1130,7535	1135,73
	3	1807,61	2227,88	669,8	1160,1522	
1200 - XG - PP	1	1705,77	2324,5	755,1	1086,8931	
	2	1639,78	2312,5	741	1043,4489	1055,2
	3	1636,96	2364,8	783,6	1035,2644	

APÊNDICE C – RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Mistura	CP	massa (g)					
		0h	3h	6h	24h	48h	72h
800-REF	1	1158,44	1219,51	1223,95	1245,68	1256,22	1264,66
	2	1181,61	1214,58	1219,26	1236,96	1244,64	1249,43
	3	1102,51	1158,12	1163,12	1179,66	1188,28	1193,64
800-XG	1	1232,5	1287,63	1307,11	1325,05	1335,65	1336,83
	2	1223,39	1257,03	1267,32	1291,5	1304,54	1306,35
	3	1323,52	1358,57	1369,76	1395,25	1411,31	1414,23
800-PP	1	1155,54	1179,73	1186,35	1201,84	1213,56	1218,2
	2	1140,33	1165,02	1172,32	1187,65	1199,61	1204,1
800-XG-PP	1	1288,19	1299,75	1303,69	1320,91	1332,53	1341,68
	2	1281,74	1294,13	1298,27	1322,18	1333,63	1344,55
	3	1257,77	1276,45	1283,19	1307,68	1318,2	1327,13
1200-REF	1	1800,03	1831,38	1835,04	1847,74	1854,21	1860,44
	2	1810,57	1845,12	1849,61	1861,95	1867,81	1871,3
	3	1830,58	1867,91	1871,66	1883,27	1890,58	1893,62
1200-XG	1	1746,98	1760,33	1763,6	1781,85	1791	1797,28
	2	1670,02	1688,14	1691,66	1708,78	1716,46	1722,77
	3	1768,65	1781,98	1785,76	1802,4	1810,93	1818,13
1200-PP	1	1738,82	1746,49	1748,97	1761,13	1765,31	1772,23
	2	1753,81	1765,1	1768,6	1782,99	1790,77	1795,71
	3	1807,61	1814,34	1816,75	1825,94	1835	1840,3
1200-XG-PP	1	1705,77	1723,05	1728,07	1737,86	1744,15	1746,33
	2	1639,78	1659,09	1668,02	1684,04	1694,05	1696,67
	3	1636,96	1656,76	1661,98	1669,61	1676,95	1678,68

APÊNDICE D – RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS

a) Resultados densidade alvo de 800 Kg/m³.

Mistura	CP	massa seca (g)	massa sat (g)	massa sub (g)	Densidade seca (Kg/m ³)	
800 - REF	1	1158,44	2046	518	758,1414	
	2	1181,61	1932,5	382,5	762,3290	742,69
	3	1102,51	1894,1	336	707,5990	
800 - XG	1	1232,5	1861,5	328,8	804,1365	
	2	1223,39	1812,4	249	782,5189	811,164
	3	1323,52	1811,8	248,9	846,8360	
800-PP	1	1150,58	1956,3	350,7	716,6044	
	2	1169,17	1976,4	394,5	739,0922	729,495
	3	1154,8	1929,6	353,7	732,7876	
800 - XG - PP	1	1302,62	2082	517,4	832,5578	
	2	1284,44	2062,04	489,7	816,8971	818,956
	3	1267,72	2059,5	489,4	807,4135	

b) Resultados densidade alvo de 1200 Kg/m³.

Mistura	CP	massa seca (g)	massa sat (g)	massa sub (g)	Densidade seca (Kg/m ³)	
1200 - REF	1	1801,89	2429,05	870,9	1156,4291	
	2	1816,39	2454,1	876,6	1151,4358	1149,59
	3	1773,87	2398,08	843,3	1140,9138	
1200-XG	1	1690,7	2312,4	750,8	1082,6716	
	2	1755,6	2386,1	822,4	1122,7217	1104,82
	3	1748,1	2387,2	811	1109,0598	
1200 - PP	1	1738,82	2218,07	660,4	1116,2955	
	2	1753,81	2217,51	666,5	1130,7535	1135,73
	3	1807,61	2227,88	669,8	1160,1522	
1200 - XG - PP	1	1705,77	2324,5	755,1	1086,8931	
	2	1639,78	2312,5	741	1043,4489	1055,2
	3	1636,96	2364,8	783,6	1035,2644	

**APÊNDICE E – RESULTADOS DE ESTABILIDADE DO CONCRETO CELULAR
ESPUMOSO ATRAVÉS DA COLUNA VERTICAL**

a) Resultados densidade alvo de 800 Kg/m³.

Misturas	n° de amostras	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Densidade (Kg/m ³)
800-REF	1	38,63	40,75	1054,95
	2	43,66	42,25	978,97
	2	43,71	42,79	967,74
800-XG	1	45,31	43,27	955,10
	1	41,79	44,06	1054,20
	2	63,56	51,81	823,91
	3	65,48	52,37	816,56
	4	65,85	52,40	793,08
	5	66,11	52,43	786,82
800-PP	6	67,70	53,47	774,07
	1	38,73	40,26	1039,61
	2	45,69	42,83	937,33
	3	48,28	44,17	914,83
	4	50,85	44,95	897,13
800-XG-PP	5	50,15	44,99	883,92
	1	50,44	39,73	862,55
	2	54,01	40,74	790,35
	3	56,78	44,14	777,25
	4	57,96	44,15	761,82
	5	58,09	43,51	735,58
	6	59,34	44,88	722,45
7	61,10	45,15	686,62	

b) Resultados densidade alvo de 1200 Kg/m³.

Misturas	n° de amostras	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Densidade (Kg/m ³)
1200-REF	1	10,493	16,66	1538,70
	2	11,152	19,31	1530,86
	3	14,270	23,78	1420,79
	4	14,845	25,48	1363,90
	5	22,296	36,11	1258,59
	6	23,123	37,11	1233,92
	7	24,236	38,37	1199,56
1200-XG	1	10,517	17,33	1474,58
	2	16,075	26,79	1398,43
	3	18,846	31,02	1335,84
	4	19,574	31,82	1308,00
	5	20,527	33,78	1307,61
	6	21,195	34,65	1288,39
1200-PP	1	15,298	25,25	1398,23
	2	17,139	26,98	1311,91
	3	17,320	27,14	1288,17
	4	17,660	27,42	1287,32
	5	17,808	27,89	1278,68
	6	20,438	32,17	1249,32
	7	20,772	32,09	1227,17
1200-XG-PP	1	22,152	35,76	1258,63
	2	22,365	36,26	1256,76
	3	22,652	36,30	1239,66
	4	23,086	36,70	1236,48
	5	23,215	37,38	1222,75
	6	24,277	38,04	1186,49
	7	24,558	38,32	1177,08

APÊNDICE F – RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA

a) Resultados para a densidade alvo de 800 Kg/m³.

800-REF					
CP	Tupper [°C]	Tlower [°C]	Qupper [μV]	Qlower [μV]	Lambda [W/mK]
1	10,02	35,04	-5961	6034	0,1701
	10,02	35,04	-5971	6006	0,1699
	10,02	35,04	-5986	5969	0,1696
	10,02	35,04	-5998	5935	0,1693
	10,02	35,03	-6010	5904	0,1690
	10,02	35,03	-6028	5875	0,1689
	10,02	35,03	-6048	5848	0,1688
	10,02	35,03	-6067	5827	0,1688
	10	35,01	-6047	5848	0,1688
	10	35	-6014	5880	0,1688
2	10,03	35,04	-6747	7192	0,1711
	10,03	35,04	-6770	7154	0,1709
	10,01	35,03	-6772	7133	0,1707
	10	35,02	-6751	7132	0,1704
	10,01	35,02	-6749	7127	0,1704
	10,01	35,02	-6736	7123	0,1701
	10,01	35,02	-6739	7114	0,1701
	10,01	35,02	-6728	7115	0,1700
	10	35,02	-6714	7119	0,1698
	10,01	35,02	-6704	7119	0,1697
3	10,01	35,02	-5506	5810	0,1618
	10,01	35,02	-5504	5805	0,1617
	10,02	35,02	-5508	5798	0,1616
	10,02	35,02	-5509	5792	0,1616
	10,01	35,02	-5509	5786	0,1615
	10,02	35,02	-5510	5781	0,1614
	10,02	35,02	-5513	5772	0,1614
	10,01	35,02	-5511	5769	0,1613
	10,01	35,02	-5510	5763	0,1612
	10,01	35,02	-5510	5765	0,1612

800-XG					
CP	Tupper [°C]	Tlower [°C]	Qupper [μV]	Qlower [μV]	Lambda [W/mK]
1	10,03	35,04	-8343	9128	0,2393
	10,03	35,04	-8366	9093	0,2392
	10,02	35,03	-8386	9068	0,2391
	10,02	35,03	-8397	9051	0,2391
	10,02	35,02	-8398	9049	0,239
	10,02	35,02	-8402	9037	0,2389
	10,02	35,02	-8408	9030	0,2389
	10,02	35,02	-8411	9025	0,2389
	10,01	35,02	-8407	9026	0,2389
	10,01	35,02	-8406	9022	0,2388
2	10,02	35,03	-9923	10743	0,2646
	10,02	35,03	-9935	10727	0,2646
	10,02	35,02	-9942	10717	0,2645
	10,02	35,02	-9945	10709	0,2644
	10,02	35,02	-9950	10696	0,2643
	10,01	35,02	-9951	10687	0,2642
	10,01	35,02	-9952	10686	0,2642
	10,02	35,02	-9956	10674	0,2641
	10,01	35,02	-9956	10662	0,264
	10,01	35,02	-9952	10662	0,264
3	10,01	35,02	-9786	9916	0,2539
	10,01	35,02	-9774	9911	0,2537
	10	35,01	-9742	9926	0,2534
	10	35,01	-9709	9943	0,2532
	10	35,01	-9692	9953	0,2532
	10,01	35,02	-9684	9953	0,2531
	10,02	35,03	-9691	9942	0,253
	10,02	35,02	-9693	9931	0,2529
	10,02	35,03	-9701	9916	0,2528
	10,02	35,02	-9707	9909	0,2528

800-PP					
CP	Tupper [°C]	Tlower [°C]	Qupper [μV]	Qlower [μV]	Lambda [W/mK]
1	9,97	35	-9561	9089	0,2448
	9,98	35	-9490	9112	0,2442
	9,99	35,01	-9441	9127	0,2438
	10	35,02	-9417	9127	0,2436
	10,01	35,02	-9405	9123	0,2433
	10	35,02	-9380	9120	0,243
	10,01	35,02	-9377	9105	0,2428
	10,01	35,02	-9377	9096	0,2427
	10,01	35,02	-9376	9090	0,2426
	10,01	35,02	-9377	9081	0,2425
2	10,03	35,03	-10794	11358	0,2803
	10,03	35,03	-10815	11335	0,2803
	10,02	35,03	-10833	11318	0,2803
	10,02	35,02	-10844	11308	0,2803
	10,02	35,02	-10846	11301	0,2803
	10,02	35,02	-10852	11293	0,2802
	10,02	35,02	-10861	11282	0,2802
	10,02	35,02	-10869	11275	0,2802
	10,02	35,02	-10872	11274	0,2803
	10,01	35,02	-10870	11275	0,2803
3	10,02	35,02	-8234	9237	0,2446
	10,02	35,02	-8239	9230	0,2446
	10,01	35,02	-8240	9224	0,2445
	10,02	35,02	-8244	9218	0,2445
	10,02	35,02	-8248	9211	0,2444
	10,02	35,02	-8250	9208	0,2444
	10,01	35,02	-8248	9207	0,2444
	10,01	35,02	-8249	9205	0,2444
	10,01	35,02	-8249	9204	0,2444
	10,01	35,02	-8248	9206	0,2444

800-XG-PP					
CP	Tupper [°C]	Tlower [°C]	Qupper [μV]	Qlower [μV]	Lambda [W/mK]
1	10,04	35,05	-11300	12124	0,308
	10,04	35,05	-11347	12070	0,3079
	10,03	35,04	-11385	12023	0,3078
	10,03	35,04	-11412	11986	0,3076
	10,01	35,03	-11404	11971	0,3072
	9,99	35,01	-11360	11997	0,307
	9,99	35	-11314	12020	0,3067
	9,99	35	-11269	12056	0,3067
	10	35,01	-11241	12071	0,3065
	10	35,02	-11219	12080	0,3063
2	10	35,02	-12653	12466	0,3243
	10,02	35,03	-12654	12448	0,3242
	10,03	35,03	-12677	12420	0,3242
	10,02	35,03	-12695	12401	0,3242
	10,02	35,02	-12700	12390	0,3242
	10,01	35,02	-12698	12385	0,324
	10,01	35,02	-12687	12388	0,3239
	10,01	35,02	-12672	12393	0,3238
	10	35,01	-12648	12400	0,3235
	10	35,01	-12626	12415	0,3234
3	10,04	35,05	-12768	12938	0,3383
	10,04	35,05	-12817	12885	0,3382
	10,03	35,04	-12849	12852	0,3382
	10,02	35,03	-12866	12830	0,3381
	10,02	35,02	-12870	12822	0,3381
	10,01	35,02	-12868	12817	0,338
	10,02	35,02	-12870	12803	0,3379
	10,01	35,02	-12869	12805	0,3379
	10,01	35,02	-12863	12817	0,3379
	10,01	35,01	-12857	12805	0,3378

b) Resultados para a densidade alvo de 1200 Kg/m³.

1200-REF					
CP	Tupper [°C]	Tlower [°C]	Qupper [μV]	Qlower [μV]	Lambda [W/mK]
1	10,04	35,05	-14653	15287	0,4035
	10,04	35,05	-14695	15230	0,4033
	10,03	35,04	-14731	15181	0,4031
	10,03	35,04	-14757	15145	0,403
	10,02	35,03	-14772	15121	0,4028
	10,01	35,02	-14773	15113	0,4028
	10,02	35,02	-14782	15099	0,4028
	10,01	35,02	-14780	15098	0,4027
	10,01	35,02	-14771	15094	0,4026
	10,01	35,02	-14773	15098	0,4026
2	10,02	35,03	-18783	18085	0,4638
	10,02	35,03	-18802	18063	0,4638
	10,02	35,03	-18819	18045	0,4638
	10,02	35,03	-18838	18024	0,4637
	10,02	35,02	-18839	18014	0,4636
	10	35,02	-18821	18019	0,4634
	10,01	35,02	-18808	18023	0,4633
	10,01	35,02	-18803	18023	0,4633
	10,02	35,02	-18816	18009	0,4633
	10,02	35,02	-18825	17999	0,4633
3	10,03	35,04	-17677	17879	0,4882
	10,02	35,03	-17693	17848	0,488
	10,04	35,04	-17737	17801	0,488
	10,04	35,04	-17781	17750	0,4879
	10,03	35,04	-17822	17714	0,488
	10,02	35,03	-17836	17688	0,4878
	10,02	35,03	-17838	17673	0,4876
	10,01	35,02	-17840	17668	0,4876
	10,01	35,02	-17833	17668	0,4875
	10,01	35,02	-17827	17667	0,4874

1200-XG					
CP	Tupper [°C]	Tlower [°C]	Qupper [μV]	Qlower [μV]	Lambda [W/mK]
1	10,04	35,01	-19937	19999	0,5344
	10,03	35,01	-19973	19999	0,5348
	10,03	35,01	-19998	19999	0,5351
	10,02	35,01	-20000	19999	0,5349
	10,01	35,02	-20000	19999	0,5347
	10,01	35,01	-20000	19999	0,5347
	10,01	35,01	-20000	19999	0,5347
	10,01	35,01	-20000	19999	0,5347
	10,01	35,01	-20000	19999	0,5347
	10,01	35,01	-20000	19999	0,5347
2	10,04	35,05	-16680	18547	0,4671
	10,04	35,05	-16731	18489	0,467
	10,03	35,04	-16756	18454	0,4668
	10,02	35,03	-16775	18432	0,4668
	10,03	35,03	-16802	18407	0,4669
	10,03	35,03	-16826	18382	0,4669
	10,02	35,02	-16838	18370	0,467
	10,02	35,02	-16852	18376	0,4672
	10,01	35,02	-16851	18383	0,4673
	10,01	35,01	-16842	18388	0,4672
3	10,04	35,01	-19338	19999	0,5185
	10,02	35,01	-19356	19999	0,5185
	10,03	35,01	-19392	19999	0,5192
	10,04	35,01	-19434	19999	0,5197
	10,03	35,02	-19456	19999	0,5198
	10,02	35,01	-19466	19999	0,5199
	10,01	35,01	-19463	19999	0,5197
	10,01	35,01	-19449	19999	0,5194
	10,01	35,01	-19442	19999	0,5193
	10,02	35,01	-19451	19999	0,5196

1200-PP					
CP	Tupper [°C]	Tlower [°C]	Qupper [μV]	Qlower [μV]	Lambda [W/mK]
1	10,04	35,05	-15304	15431	0,4123
	10,04	35,04	-15354	15378	0,4122
	10,03	35,04	-15391	15341	0,4122
	10,03	35,04	-15429	15307	0,4123
	10,03	35,03	-15454	15289	0,4124
	10,02	35,02	-15460	15281	0,4123
	10,01	35,02	-15459	15282	0,4123
	10,02	35,02	-15462	15286	0,4125
	10,02	35,02	-15472	15285	0,4126
	10,01	35,02	-15474	15288	0,4127
2	10,05	35,04	-14637	14222	0,3608
	10,05	35,04	-14705	14169	0,361
	10,04	35,04	-14764	14130	0,3613
	10,03	35,03	-14796	14114	0,3614
	10,01	35,02	-14784	14110	0,3611
	10	35,01	-14761	14121	0,3609
	10,01	35,02	-14758	14121	0,361
	10,01	35,02	-14746	14121	0,3608
	10,02	35,02	-14755	14117	0,3609
	10,01	35,02	-14749	14117	0,3608
3	10,04	35,05	-18910	18572	0,5062
	10,04	35,05	-18961	18516	0,5062
	10,03	35,03	-18994	18484	0,5063
	10,02	35,02	-19009	18470	0,5063
	10,02	35,02	-19017	18464	0,5063
	10,01	35,01	-19002	18477	0,5062
	10	35,01	-18987	18492	0,5062
	10,01	35,01	-18969	18496	0,506
	10,01	35,01	-18952	18502	0,5058
	10,01	35,02	-18955	18503	0,506

1200-XG-PP					
CP	Tupper [°C]	Tlower [°C]	Qupper [μV]	Qlower [μV]	Lambda [W/mK]
1	10,05	35,05	-14265	14828	0,3964
	10,04	35,04	-14317	14778	0,3964
	10,03	35,03	-14353	14740	0,3964
	10,03	35,03	-14377	14728	0,3965
	10,02	35,02	-14379	14721	0,3964
	10,01	35,02	-14370	14723	0,3963
	10,01	35,02	-14372	14725	0,3964
	10,02	35,02	-14376	14726	0,3965
	10,02	35,02	-14382	14728	0,3965
	10,01	35,02	-14379	14730	0,3965
2	10,06	35,06	-13065	12997	0,3439
	10,05	35,06	-13138	12920	0,3438
	10,04	35,04	-13181	12871	0,3437
	10,03	35,04	-13206	12841	0,3436
	10,02	35,03	-13218	12819	0,3435
	10,01	35,02	-13209	12812	0,3432
	10,01	35,02	-13209	12807	0,3433
	10,02	35,02	-13215	12794	0,3432
	10,01	35,02	-13207	12795	0,3431
	10,01	35,02	-13197	12798	0,343
3	10,04	35,05	-11805	12699	0,3317
	10,03	35,04	-11841	12652	0,3316
	10,03	35,03	-11866	12620	0,3315
	10,02	35,02	-11878	12607	0,3315
	10,02	35,02	-11885	12600	0,3315
	10,01	35,02	-11881	12606	0,3315
	10,01	35,02	-11879	12608	0,3315
	10,01	35,02	-11878	12606	0,3315
	10,01	35,02	-11879	12605	0,3315
	10,01	35,02	-11879	12607	0,3315

APÊNDICE G – RESULTADOS DE RETRAÇÃO

a) Resultados para a densidade alvo de 800 Kg/m³.

800-REF					
Idade (dias)	Deformação (mm)			Deformação média (mm)	Desvio Padrão
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3		
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0
2	-0,113	-0,120	-0,120	-0,118	0,0031
3	-0,243	-0,253	-0,253	-0,250	0,0047
4	-0,313	-0,310	-0,310	-0,311	0,0016
5	-0,313	-0,310	-0,310	-0,311	0,0016
6	-0,393	-0,400	-0,400	-0,398	0,0031
7	-0,393	-0,400	-0,400	-0,398	0,0031
8	-0,403	-0,420	-0,420	-0,414	0,0079
9	-0,413	-0,407	-0,407	-0,409	0,0031
10	-0,487	-0,490	-0,490	-0,489	0,0016
11	-0,490	-0,500	-0,500	-0,497	0,0047
12	-0,420	-0,403	-0,403	-0,409	0,0079
13	-0,497	-0,467	-0,467	-0,477	0,0141
14	-0,463	-0,460	-0,460	-0,461	0,0016
15	-0,507	-0,500	-0,500	-0,502	0,0031
16	-0,470	-0,477	-0,477	-0,474	0,0031
17	-0,453	-0,467	-0,467	-0,462	0,0063
18	-0,453	-0,467	-0,467	-0,462	0,0063
19	-0,453	-0,467	-0,467	-0,462	0,0063
20	-0,490	-0,487	-0,487	-0,488	0,0016
21	-0,502	-0,487	-0,487	-0,492	0,0071
22	-0,517	-0,530	-0,530	-0,526	0,0063
23	-0,510	-0,523	-0,523	-0,519	0,0063
24	-0,517	-0,503	-0,503	-0,508	0,0063
25	-0,547	-0,537	-0,537	-0,540	0,0047
26	-0,547	-0,537	-0,537	-0,540	0,0047
27	-0,504	-0,547	-0,547	-0,533	0,02
28	-0,550	-0,543	-0,543	-0,546	0,0031

800-XG

Idade (dias)	Deformação (mm)				Deformação média (mm)	Desvio Padrão
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3	Espécime 4		
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	-0,242	-0,226	-0,222	-0,235	-0,231	0,008
3	-0,425	-0,368	-0,385	-0,380	-0,389	0,022
4	-0,493	-0,440	-0,450	-0,475	-0,464	0,021
5	-0,545	-0,479	-0,472	-0,495	-0,498	0,029
6	-0,518	-0,469	-0,472	-0,438	-0,474	0,029
7	-0,548	-0,496	-0,502	-0,518	-0,516	0,020
8	-0,578	-0,546	-0,602	-0,535	-0,565	0,026
9	-0,628	-0,593	-0,568	-0,582	-0,593	0,022
10	-0,632	-0,583	-0,575	-0,575	-0,591	0,024
11	-0,632	-0,583	-0,575	-0,575	-0,591	0,024
12	-0,632	-0,583	-0,575	-0,575	-0,591	0,024
13	-0,605	-0,566	-0,572	-0,565	-0,577	0,016
14	-0,655	-0,613	-0,648	-0,648	-0,641	0,017
15	-0,688	-0,666	-0,672	-0,657	-0,671	0,011
16	-0,612	-0,566	-0,568	-0,575	-0,580	0,018
17	-0,705	-0,699	-0,675	-0,682	-0,690	0,012
18	-0,682	-0,629	-0,625	-0,622	-0,639	0,025
19	-0,718	-0,649	-0,665	-0,645	-0,669	0,029
20	-0,658	-0,605	-0,615	-0,612	-0,623	0,021
21	-0,668	-0,613	-0,618	-0,622	-0,630	0,022
22	-0,668	-0,613	-0,618	-0,622	-0,630	0,022
23	-0,668	-0,613	-0,618	-0,622	-0,630	0,022
24	-0,678	-0,626	-0,642	-0,615	-0,640	0,024
25	-0,712	-0,663	-0,668	-0,645	-0,672	0,025
26	-0,712	-0,693	-0,655	-0,657	-0,679	0,024
27	-0,708	-0,658	-0,668	-0,652	-0,671	0,022
28	-0,712	-0,663	-0,660	-0,635	-0,667	0,028

800-PP					
Idade (dias)	Deformação (mm)			Deformação média (mm)	Desvio Padrão
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3		
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	-0,097	-0,087	-0,093	-0,092	0,004
3	-0,203	-0,207	-0,213	-0,208	0,004
4	-0,287	-0,287	-0,277	-0,283	0,005
5	-0,287	-0,287	-0,277	-0,283	0,005
6	-0,287	-0,287	-0,277	-0,283	0,005
7	-0,380	-0,373	-0,383	-0,379	0,004
8	-0,403	-0,417	-0,417	-0,412	0,006
9	-0,363	-0,367	-0,363	-0,364	0,002
10	-0,430	-0,423	-0,427	-0,427	0,003
11	-0,390	-0,377	-0,373	-0,380	0,007
12	-0,367	-0,370	-0,380	-0,372	0,006
13	-0,367	-0,370	-0,380	-0,372	0,006
14	-0,433	-0,437	-0,437	-0,436	0,002
15	-0,427	-0,423	-0,440	-0,430	0,007
16	-0,457	-0,457	-0,463	-0,459	0,003
17	-0,423	-0,420	-0,423	-0,422	0,002
18	-0,423	-0,420	-0,423	-0,422	0,002
19	-0,423	-0,420	-0,423	-0,422	0,002
20	-0,463	-0,460	-0,463	-0,462	0,002
21	-0,453	-0,457	-0,453	-0,454	0,002
22	-0,457	-0,453	-0,450	-0,453	0,003
23	-0,460	-0,463	-0,463	-0,462	0,002
24	-0,460	-0,463	-0,463	-0,462	0,002
25	-0,460	-0,463	-0,463	-0,462	0,002
26	-0,460	-0,463	-0,463	-0,462	0,002
27	-0,477	-0,467	-0,470	-0,471	0,004
28	-0,467	-0,473	-0,473	-0,471	0,003

800-XG-PP					
Idade (dias)	Deformação (mm)			Deformação média (mm)	Desvio Padrão
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3		
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	-0,225	-0,242	-0,225	-0,231	0,008
3	-0,345	-0,362	-0,340	-0,349	0,009
4	-0,413	-0,430	-0,407	-0,417	0,010
5	-0,387	-0,373	-0,377	-0,379	0,006
6	-0,423	-0,450	-0,407	-0,427	0,018
7	-0,453	-0,460	-0,440	-0,451	0,008
8	-0,507	-0,513	-0,493	-0,504	0,008
9	-0,500	-0,507	-0,480	-0,496	0,011
10	-0,460	-0,477	-0,480	-0,472	0,009
11	-0,460	-0,477	-0,480	-0,472	0,009
12	-0,503	-0,493	-0,497	-0,498	0,004
13	-0,557	-0,563	-0,567	-0,562	0,004
14	-0,553	-0,567	-0,560	-0,560	0,005
15	-0,510	-0,510	-0,500	-0,507	0,005
16	-0,627	-0,627	-0,583	-0,612	0,020
17	-0,570	-0,577	-0,543	-0,563	0,014
18	-0,610	-0,620	-0,193	-0,474	0,199
19	-0,553	-0,562	-0,523	-0,546	0,016
20	-0,547	-0,563	-0,533	-0,548	0,012
21	-0,547	-0,563	-0,533	-0,548	0,012
22	-0,547	-0,563	-0,533	-0,548	0,012
23	-0,530	-0,583	-0,557	-0,557	0,022
24	-0,630	-0,603	-0,593	-0,609	0,015
25	-0,610	-0,627	-0,593	-0,610	0,014
26	-0,623	-0,600	-0,597	-0,607	0,012
27	-0,630	-0,623	-0,553	-0,602	0,035
28	-0,553	-0,560	-0,517	-0,543	0,019

a) Resultados para a densidade alvo de 1200 Kg/m³.

1200-REF					
Idade (dias)	Deformação (mm)			Deformação média (mm)	Desvio Padrão
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3		
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0
2	-0,163	-0,212	-0,190	-0,188	0,0198
3	-0,223	-0,237	-0,223	-0,228	0,0065
4	-0,283	-0,297	-0,300	-0,293	0,0072
5	-0,253	-0,243	-0,253	-0,250	0,0047
6	-0,283	-0,313	-0,287	-0,294	0,0134
7	-0,293	-0,323	-0,303	-0,307	0,0125
8	-0,293	-0,323	-0,303	-0,307	0,0125
9	-0,347	-0,367	-0,343	-0,352	0,0103
10	-0,807	-0,367	-0,347	-0,507	0,2123
11	-0,343	-0,357	-0,350	-0,350	0,0054
12	-0,330	-0,333	-0,347	-0,337	0,0072
13	-0,433	-0,453	-0,417	-0,434	0,015
14	-0,413	-0,417	-0,430	-0,420	0,0072
15	-0,317	-0,327	-0,303	-0,316	0,0096
16	-0,371	-0,423	-0,403	-0,399	0,0216
17	-0,347	-0,370	-0,377	-0,364	0,0129
18	-0,397	-0,424	-0,410	-0,410	0,0112
19	-0,343	-0,383	-0,362	-0,363	0,0163
20	-0,353	-0,387	-0,373	-0,371	0,0137
21	-0,353	-0,387	-0,373	-0,371	0,0137
22	-0,353	-0,387	-0,373	-0,371	0,0137
23	-0,460	-0,467	-0,503	-0,477	0,0191
24	-0,367	-0,407	-0,393	-0,389	0,0166
25	-0,403	-0,437	-0,430	-0,423	0,0144
26	-0,417	-0,440	-0,433	-0,430	0,0098
27	-0,403	-0,423	-0,420	-0,416	0,0087
28	-0,423	-0,433	-0,417	-0,424	0,0068

1200-XG						
Idade (dias)	Deformação (mm)				Deformação média (mm)	Desvio Padrão
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3	Espécime 4		
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	-0,057	-0,037	-0,043	-0,067	-0,051	0,012
3	-0,123	-0,154	-0,133	-0,140	-0,138	0,011
4	-0,140	-0,222	-0,206	-0,200	-0,192	0,031
5	-0,255	-0,242	-0,218	-0,213	-0,232	0,017
6	-0,283	-0,253	-0,263	-0,257	-0,264	0,012
7	-0,260	-0,243	-0,203	-0,220	-0,232	0,022
8	-0,280	-0,270	-0,217	-0,230	-0,249	0,026
9	-0,290	-0,290	-0,277	-0,257	-0,278	0,014
10	-0,290	-0,290	-0,277	-0,257	-0,278	0,014
11	-0,330	-0,317	-0,303	-0,297	-0,312	0,013
12	-0,330	-0,330	-0,310	-0,313	-0,321	0,009
13	-0,307	-0,297	-0,260	-0,277	-0,285	0,018
14	-0,297	-0,283	-0,267	-0,283	-0,283	0,011
15	-0,377	-0,373	-0,373	-0,383	-0,377	0,004
16	-0,403	-0,372	-0,373	-0,370	-0,380	0,014
17	-0,290	-0,290	-0,273	-0,257	-0,278	0,014
18	-0,400	-0,367	-0,360	-0,353	-0,370	0,018
19	-0,340	-0,329	-0,301	-0,323	-0,323	0,014
20	-0,378	-0,353	-0,333	-0,357	-0,355	0,016
21	-0,340	-0,323	-0,293	-0,295	-0,313	0,020
22	-0,333	-0,320	-0,293	-0,303	-0,313	0,015
23	-0,333	-0,320	-0,293	-0,303	-0,313	0,015
24	-0,333	-0,320	-0,293	-0,303	-0,313	0,015
25	-0,343	-0,343	-0,327	-0,343	-0,339	0,007
26	-0,370	-0,347	-0,350	-0,345	-0,353	0,010
27	-0,380	-0,370	-0,343	-0,347	-0,360	0,015
28	-0,383	-0,373	-0,370	-0,377	-0,376	0,005

1200-PP					
Idade (dias)	Deformação (mm)			Deformação média (mm)	Desvio Padrão
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3		
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	-0,073	-0,143	-0,118	-0,111	0,029
3	-0,206	-0,198	-0,188	-0,197	0,007
4	-0,186	-0,164	-0,162	-0,171	0,011
5	-0,216	-0,201	-0,202	-0,206	0,007
6	-0,196	-0,221	-0,208	-0,208	0,010
7	-0,196	-0,221	-0,208	-0,208	0,010
8	-0,293	-0,271	-0,275	-0,279	0,009
9	-0,309	-0,244	-0,295	-0,283	0,028
10	-0,293	-0,274	-0,265	-0,277	0,011
11	-0,296	-0,281	-0,278	-0,285	0,008
12	-0,323	-0,351	-0,315	-0,329	0,015
13	-0,386	-0,341	-0,365	-0,364	0,018
14	-0,289	-0,274	-0,255	-0,273	0,014
15	-0,346	-0,367	-0,368	-0,361	0,010
16	-0,323	-0,308	-0,308	-0,313	0,007
17	-0,373	-0,341	-0,355	-0,356	0,013
18	-0,340	-0,301	-0,295	-0,312	0,020
19	-0,319	-0,317	-0,302	-0,313	0,008
20	-0,319	-0,317	-0,302	-0,313	0,008
21	-0,319	-0,317	-0,302	-0,313	0,008
22	-0,349	-0,311	-0,322	-0,327	0,016
23	-0,369	-0,335	-0,355	-0,353	0,014
24	-0,389	-0,351	-0,365	-0,368	0,016
25	-0,393	-0,371	-0,378	-0,381	0,009
26	-0,379	-0,341	-0,358	-0,359	0,016
27	-0,323	-0,271	-0,272	-0,288	0,024
28	-0,323	-0,271	-0,272	-0,288	0,024

1200-XG-PP					
Idade (dias)	Deformação (mm)			Deformação média (mm)	Desvio Padrão
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3		
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	-0,073	-0,130	-0,087	-0,097	0,024
3	-0,120	-0,167	-0,107	-0,131	0,026
4	-0,143	-0,203	-0,178	-0,175	0,024
5	-0,156	-0,265	-0,178	-0,200	0,047
6	-0,226	-0,288	-0,226	-0,246	0,029
7	-0,267	-0,307	-0,250	-0,274	0,024
8	-0,213	-0,280	-0,243	-0,246	0,027
9	-0,240	-0,300	-0,263	-0,268	0,025
10	0,223	-0,320	-0,290	-0,129	0,249
11	0,223	-0,320	-0,290	-0,129	0,249
12	-0,287	-0,350	-0,303	-0,313	0,027
13	-0,287	-0,350	-0,303	-0,313	0,027
14	-0,287	-0,350	-0,303	-0,313	0,027
15	-0,273	-0,337	-0,273	-0,294	0,030
16	-0,338	-0,408	-0,327	-0,358	0,036
17	-0,353	-0,417	-0,377	-0,382	0,026
18	-0,253	-0,330	-0,287	-0,290	0,031
19	-0,357	-0,375	-0,383	-0,372	0,011
20	-0,307	-0,363	-0,310	-0,327	0,026
21	-0,343	-0,407	-0,357	-0,369	0,027
22	-0,293	-0,353	-0,286	-0,311	0,030
23	-0,300	-0,353	-0,307	-0,320	0,024
24	-0,300	-0,353	-0,307	-0,320	0,024
25	-0,300	-0,353	-0,307	-0,320	0,024
26	-0,300	-0,380	-0,313	-0,331	0,035
27	-0,323	-0,397	-0,353	-0,358	0,030
28	-0,347	-0,413	-0,363	-0,374	0,028

APÊNDICE H – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

a) Resultados para a densidade alvo de 800 Kg/m³.

Mistura	Resistência (MPa)			
	7 dias	média	28 dias	média
800-REF	0,22		0,37	
	0,32	0,29	0,49	0,37
	0,3		0,25	
	0,33		0,37	
<hr/>				
800-XG	0,62		1	
	0,86	0,67	0,83	0,89
	0,59		0,76	
	0,62		0,97	
<hr/>				
800-PP	0,48		0,64	
	0,48	0,70	0,59	0,65
	0,57		0,72	
<hr/>				
800-XG-PP	1,26		1,81	
	1,29	1,32	1,62	1,74
	1,45		1,91	
	1,27		1,62	
<hr/>				

b) Resultados para a densidade alvo de 1200 Kg/m³.

Mistura	Resistência (MPa)			
	7 dias	média	28 dias	média
1200-REF	1,46		2,05	
	1,46	1,46	1,72	1,59
	1,42		1,43	
	1,49		1,15	
1,83	1,46			
1200-XG	1,03	1,56	1,89	1,86
	1,81		2,24	
	1,81		1,46	
1200-PP	1,8	1,91	1,96	1,62
	1,69		1,75	
	2,32		1,32	
	0,83		1,24	
1200-XG-PP	0,65	0,76	1,18	1,24
	0,73		1,29	
	0,81		1,26	

APÊNDICE I – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS

a) Resultados para a densidade alvo de 800 Kg/m³.

Mistura	Resistência (MPa)					
	7 dias	média	28 dias	média		
800-REF	0,56		0,69			
	0,5		0,58			
	0,53		0,5			
	0,46	0,5	0,86	0,69		
	0,45		0,76			
	0,48		0,63			
	0,4		0,71			
	0,62		0,78			
1,12			1,55			
1,4			1,43			
1,26			2			
800-XG	1,23	1,24	1,72	1,73		
	1,35		1,72			
	1,13		1,57			
	0,93		1,62			
	1,48		2,26			
	1,08				1,12	
	0,98				1,12	
	1,07		0,98		0,94	1,02
0,93	0,91					
0,95	1,1					
0,89	0,9					
2,65		3,3				
800-XG-PP	2,39		3,02			
	2,48		3,24			
	2,53	2,38	3,07	3,16		
	2,26		3,19			
	2,74		3,03			
	2,1		3,23			
	1,91		3,21			

b) Resultados para a densidade alvo de 1200 Kg/m³.

Mistura	Resistência (MPa)			
	7 dias	média	28 dias	média
1200-REF	2,24		4,14	
	3,27		4,9	
	3,21		3,69	
	3	3,07	4,63	4,55
	3,44		4,6	
	3,46		4,92	
	2,99		4,87	
	2,98		4,66	
1200-XG	3,52		6,57	
	4,02		5,13	
	4,47	3,92	5,63	5,90
	4,61		6,34	
	3,75		5,31	
	3,17		6,4	
1200-PP	5,63		4,84	
	5,48		4,09	
	5,18		4,58	
	5,53	5,46	4,56	4,58
	5,11		4,9	
	4,78		4,44	
	6,03		4,73	
5,95		4,51		
1200-XG-PP	1,72		2,56	
	1,5		2,61	
	1,82		3,13	
	1,32	1,71	2,29	2,89
	1,74		2,86	
	1,69		2,52	
	1,71		3,23	
	2,19		3,88	

APÊNDICE J – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

a) Resultados para a densidade alvo de 800 Kg/m³.

Mistura	Resistência (MPa)			
	7 dias	média	28 dias	média
800-REF	0,39	0,37	0,39	0,42
	0,38		0,49	
	0,35		0,35	
	0,36		0,45	
800-XG	0,94	1,06	1,38	1,41
	1,27		1,62	
	1,16		1,25	
	0,86		1,38	
800-PP	0,73	0,72	0,77	0,78
	0,71		0,85	
	0,7		0,73	
	0,74		0,78	
800-XG-PP	1,8	1,72	2,12	2,06
	1,71		2,16	
	1,73		1,8	
	1,64		2,16	

b) Resultados para a densidade alvo de 1200 Kg/m³.

Mistura	Resistência (MPa)			
	7 dias	média	28 dias	média
1200-REF	2,74		3,4	
	2,59	2,64	3,56	3,38
	2,5		3,15	
	2,73		3,39	
3,92	5,09			
1200-XG	3,77	3,83	5,75	4,54
	4,12		3,63	
	3,51		3,7	
	4,16		4,12	
1200-PP	3,87	4,06	4,45	4,18
	4,09		4,22	
	4,12		3,93	
	2,52		2,55	
1200-XG-PP	2,76	2,51	2,79	2,56
	2,37		2,15	
	2,39		2,74	