

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUCAS YAGOR DOS SANTOS GRENZEL

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E RESIDUAIS DE
CONCRETOS CELULARES PRODUZIDOS COM AREIA NATURAL E DE RCD**

**Alegrete
2023**

LUCAS YAGOR DOS SANTOS GRENZEL

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E RESIDUAIS DE
CONCRETOS CELULARES PRODUZIDOS COM AREIA NATURAL E DE RCD**

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

Orientador: Prof. Dr. Ederli Marangon

Coorientadora: Prof. Dra. Fernanda Bianchi
Pereira da Costa

**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) .

G828a Grenzel, Lucas Yagor dos Santos

Avaliação das propriedades físicas, mecânicas e residuais
de concretos celulares produzidos com areia natural e de RCD /
Lucas Yagor dos Santos Grenzel.

119 p.

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

"Orientação: Ederli Marangon".

1. Concreto celular. 2. Resíduos de construção e demolição.
3. Resistência mecânica residual. I. Título.

LUCAS YAGOR DOS SANTOS GRENZEL**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E RESIDUAIS DE CONCRETOS CELULARES PRODUZIDOS COM AREIA NATURAL E DE RCD**

Dissertação/Tese apresentada ao Programa de (Nome do Programa) da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre/Doutor em (Área do mestrado ou doutorado).

Dissertação defendida e aprovada em: 29/09/2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ederli Marangon

Orientador

UNIPAMPA

Prof^a. Dra. Fernanda Bianchi Pereira da Costa

UNIPAMPA

Prof. Dr. Alisson Simonetti Milani

UNIPAMPA

Prof. Dr. Eduardo Cesar Pachla

UFSM



Assinado eletronicamente por **EDERLI MARANGON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/09/2023, às 17:16, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/09/2023, às 17:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Eduardo Cesar Pachla, Usuário Externo**, em 05/10/2023, às 13:34, 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 **1255351** e o código CRC **AC3BFC81**.

Foi pensando nas pessoas que executei este projeto, por isso dedico este trabalho a todos aqueles a quem esta pesquisa possa ajudar de alguma forma.

AGRADECIMENTO

À Deus, 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, Jair e Marli, 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 grato a vocês por tudo.

À minha esposa, Miriã, minha melhor amiga e companheira de todas as horas, obrigado pelo apoio e compreensão, a você o meu amor.

Ao meu irmão e cunhada, Vitor e Joanna, que sempre estiveram ao meu lado me incentivando a prosseguir.

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.

Ao meu orientador e amigo, Dr. Ederli Marangon, por todo conhecimento compartilhado, pela disponibilidade, paciência e auxílio em todas as etapas deste trabalho. Toda minha gratidão e admiração.

À minha coorientador Dra. Fernanda Bianchi Pereira da Costa, 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, Liga Química e SBR, por terem doado os materiais para a realização da presente pesquisa.

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

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.

“O que precisamos é de mais pessoas
especializadas no impossível.”
(Theodore Roethke)

RESUMO

Neste trabalho foi avaliado a influência da Goma Xantana na qualidade da espuma pré-formada, bem como o uso de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) para a produção de concretos celulares. Assim, foi avaliada a qualidade da espuma através de ensaios de estabilização, densidade, drenagem e micro-estrutura. Após, foram produzidos traços de concreto celulares com e sem goma xantana e RCD, com densidade alvos de 800kg/m^3 , 1000kg/m^3 e 1200kg/m^3 . Os concretos foram avaliados no estado fresco e endurecido. No estado fresco os concretos celulares foram avaliados através da massa específica. No estado endurecido foram avaliados os índices físicos, tais como: massa específica, condutividade térmica, comportamento à compressão e resistência à tração na flexão. Também foi avaliado o comportamento à compressão e a resistência à tração na flexão em três pontos residuais dos concretos celulares quando submetidos a ação de temperaturas de 300°C , 600°C e 900°C . O uso goma xantana demonstrou-se importante na estabilidade da espuma, viabilizando o retardo da drenagem e promoveu poros menores e mais circulares aos concretos celulares. No estado fresco os concretos celulares apresentaram característica aceitáveis, conseguindo alcançar as características desejadas para as densidades estudadas de 800kg/m^3 , 1000kg/m^3 e 1200kg/m^3 . No estado endurecido os índices físicos dos concretos celulares apresentaram resultados estatisticamente iguais. Em relação a condutividade térmica todos os concretos celulares apresentaram valores muito menores que o especificado por norma, sendo que todas as misturas são eficientes nesse quesito. A resistência à compressão aumentou com o uso de goma xantana. A substituição total da areia natural por RCD prejudicou as resistências mecânicas de compressão e tração à flexão, de todos os concretos celulares estudados. Possivelmente esse prejuízo é devido a dimensão máxima do agregado reciclado utilizado. As resistências residuais após a queima do concretos celulares foram prejudicadas, sendo que, conforme foi aumentado a temperatura de queima, menor foi a resistência mecânica obtida. Por fim, a rigidez dos concretos celulares foi fortemente afetada, reduzindo conforme aumentou-se a temperatura de queima dos concretos celulares.

Palavras-chave: Concreto celular. Resíduos de construção e demolição. Resistência mecânica residual.

ABSTRACT

In this work, the influence of Xanthan Gum on the quality of pre-formed foam was evaluated, as well as the use of Construction and Demolition Waste (RCD) for the production of cellular concrete. Thus, the quality of the foam was evaluated through stabilization, density, drainage and microstructure tests. Afterwards, cellular concrete mixtures were produced with and without xanthan gum and RCD, with target densities of 800kg/m³, 1000kg/m³ and 1200kg/m³. The concretes were evaluated in the fresh and hardened state. In the fresh state, cellular concretes were evaluated using specific mass. In the hardened state, physical indices were evaluated, such as: specific mass, thermal conductivity, compression behavior and flexural tensile strength. Compressive behavior and flexural tensile strength were also evaluated at three residual points of cellular concrete when subjected to temperatures of 300°C, 600°C and 900°C. The use of xanthan gum proved to be important in the stability of the foam, enabling delayed drainage and promoting smaller and more circular pores in cellular concrete. In the fresh state, cellular concrete presented acceptable characteristics, managing to achieve the desired characteristics for the studied densities of 800kg/m³, 1000kg/m³ and 1200kg/m³. In the hardened state, the physical indices of cellular concrete showed statistically equal results. In relation to thermal conductivity, all cellular concretes presented values much lower than those specified by standards, and all mixtures are efficient in this regard. Compressive strength increased with the use of xanthan gum. The total replacement of natural sand by RCD impaired the mechanical compression and flexural tensile strength of all cellular concretes studied. This loss is possibly due to the maximum size of the recycled aggregate used. The residual resistance after burning cellular concrete was impaired, and as the firing temperature was increased, the mechanical resistance obtained was lower. Finally, the stiffness of cellular concrete was strongly affected, reducing as the firing temperature of cellular concrete increased.

Keywords: Cellular concrete. Construction and demolition waste. Residual mechanical strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos concretos celulares	22
Figura 2 – Processo de hidratação do concreto celular com espuma estabilizada por sílica ativa	24
Figura 3 – Drenagem da espuma em função do tempo	25
Figura 4 – Microscopia óptica das espumas: a) Espuma referência sem correção de pH e b) Espuma com adição de $Ca(OH)_2$ e pH 9	25
Figura 5 – Microscopia eletrônica das espumas: a) Concreto celular com espuma referência e b) Concreto celular com a espuma de pH 9	26
Figura 6 – Microscopia óptica das espumas: a) Espuma produzida com agente espumante e b) Espuma com adição e 0,5% de goma xantana	27
Figura 7 – Impacto da utilização de goma xantana na drenagem da espuma	27
Figura 8 – Resistência à compressão de concretos celulares com agregados reciclados e resíduos industriais.	34
Figura 9 – Ciclos de molhagem e secagem em diferentes ambientes	35
Figura 10 – Resistência à compressão em relação a quantidade de espuma	36
Figura 11 – Resistência à compressão das amostras em diferentes temperaturas	40
Figura 12 – Resistência à compressão e tração na flexão em diferentes temperaturas	41
Figura 13 – Tensão-deformação e módulo de elasticidade em diferentes temperaturas	42
Figura 14 – Organograma simplificado dos métodos experimentais	43
Figura 15 – Cimento CP V-ARI RS	44
Figura 16 – Distribuição granulométrica cimento	45
Figura 17 – Agregados: a) Areia de rio e b) Areia de RCD	45
Figura 18 – Fração de RCD separada para a contagem de grãos	46
Figura 19 – Granulometria dos agregados miúdos	47
Figura 20 – Agente espumante CELUBLOCK	49
Figura 21 – Gerador de espuma ECOFOAMER-100W-10BP	49
Figura 22 – Goma Xantana	50
Figura 23 – Processo de solubilização da goma xantana em agitador magnético	51
Figura 24 – Ensaio de drenagem da espuma	52
Figura 25 – Microscopia óptica: a) Microscópio óptico e b) Câmera SH-318	53
Figura 26 – Microscopia óptica da espuma	53
Figura 27 – Processo de fabricação do concreto celular	56
Figura 28 – Misturador de eixo vertical	57
Figura 29 – Corpos de prova moldados	58
Figura 30 – Equipamento para os ensaios de condutividade térmica	61
Figura 31 – Máquina de ensaios universais: (a) Emic DL 20000, (b) Corpo de prova instrumentado para ensaio	62
Figura 32 – Equipamento para os ensaios de tração na flexão de três pontos	62
Figura 33 – Equipamento para queima das amostras: (a) Mufla de laboratório, (b) Corpos de prova dentro da mufla	63
Figura 34 – Corpos de prova descartados após a queima	64
Figura 35 – Densidade da espuma	65
Figura 36 – Drenagem da espuma	66

Figura 37 – Drenagem normalizada	67
Figura 38 – Volume total drenado e drenagem no tempo	68
Figura 39 – Microscopia das espumas	69
Figura 40 – Filme líquido das bolhas	70
Figura 41 – Membrana das bolhas	71
Figura 42 – Fluxo gerador	71
Figura 43 – Massa específica em estado fresco	73
Figura 44 – Massa específica seca	74
Figura 45 – Massa específica: a) Massa específica saturada b) Massa específica real	76
Figura 46 – Absorção de água por imersão	77
Figura 47 – Índices de vazios	78
Figura 48 – Absorção de água por capilaridade durante o ensaio	80
Figura 49 – Capilaridade	81
Figura 50 – Ascensão capilar em cm	81
Figura 51 – Condutividade térmica	83
Figura 52 – Resistência à compressão: a) Compressão cilíndricos b) Compressão prismáticos	85
Figura 53 – Resistência à compressão residual: a) Compressão cilíndricos b) Compressão prismáticos	87
Figura 54 – Resistência à compressão residual normalizada: a) Normalizada cilíndricos b) Normalizada prismáticos	89
Figura 55 – Curvas típicas mistura 1000 XG-2	91
Figura 56 – Curvas típicas mistura 1200 XG-2	91
Figura 57 – Curvas típicas mistura 1200 XG-2 RCD	92
Figura 58 – Curvas típicas para a temperatura ambiente	93
Figura 59 – Curvas típicas para a temperatura 300 °C	93
Figura 60 – Curvas típicas para a temperatura 600 °C	94
Figura 61 – Comportamento do módulo de elasticidade para as temperaturas estudadas	95
Figura 62 – Módulo de elasticidade em diversas temperaturas normalizado	96
Figura 63 – Fissuração dos corpos de prova 1200 XG-2 600°C	96
Figura 64 – Resistência à tração na flexão	98
Figura 65 – Resistência à tração na flexão em três temperaturas	99
Figura 66 – Resistência à tração na flexão em três temperaturas normalizada	99
Figura 67 – CDI amostras 1000 XG-2: a) AMB e b) 300°C	100
Figura 68 – CDI amostras 1200 XG-2: a) AMB, b) 300°C e c) 600°C	101
Figura 69 – CDI amostras 1200 XG-2 RCD: a) AMB, b) 300°C e c) 600°C	101
Figura 70 – Curvas tensão/deformação 1000 XG-2 AMB	116
Figura 71 – Curvas tensão/deformação 1000 XG-2 300°C	116
Figura 72 – Curvas tensão/deformação 1200 XG-2 AMB	117
Figura 73 – Curvas tensão/deformação 1200 XG-2 300°C	117
Figura 74 – Curvas tensão/deformação 1200 XG-2 600°C	118
Figura 75 – Curvas tensão/deformação 1200 XG-2 RCD AMB	118
Figura 76 – Curvas tensão/deformação 1200 XG-2 300°C	119
Figura 77 – Curvas tensão/deformação 1200 XG-2 RCD 600°C	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química por FRX do RCD	37
Tabela 2 – Composição química do cimento e da pasta de cimento desidratada	39
Tabela 3 – Determinação da composição dos agregados reciclados	46
Tabela 4 – Caracterização da areia natural e do RCD	48
Tabela 5 – Composição das espumas	51
Tabela 6 – Composição dos traços dos concretos celulares	55
Tabela 7 – Resumo das amostras para o programa experimental	59
Tabela 8 – Resultados dos ensaios de drenagem das espumas	66
Tabela 9 – Resumo dos valores de EF e EM	69
Tabela 10 – Densidades em estado fresco e endurecido	72
Tabela 11 – Massas específicas saturada e real	75
Tabela 12 – Absorção de água e Índice de vazios	77
Tabela 13 – Capilaridade durante o ensaio	79
Tabela 14 – Condutividade térmica	82
Tabela 15 – Resistência à compressão cilíndrica e prismática média	84
Tabela 16 – Resistência à compressão residual cilíndrica e prismática	86
Tabela 17 – Dados do ensaio de comportamento à compressão	90
Tabela 18 – Resistência à tração na flexão média	97
Tabela 19 – Resistência à tração na flexão em três temperaturas	98
Tabela 20 – Teste Tukey para o filme líquido das bolhas	110
Tabela 21 – Teste Tukey para a membrana das bolhas	110
Tabela 22 – Teste de Tukey para os resultados da densidade em estado fluido .	110
Tabela 23 – Teste de Tukey para a massa específica seca das amostra	111
Tabela 24 – Teste de Tukey para a massa específica saturada das amostra . . .	111
Tabela 25 – Teste de Tukey para a massa específica real das amostra	111
Tabela 26 – Teste de Tukey para a absorção de água por imersão das amostras	112
Tabela 27 – Teste de Tukey para o índice de vazios das amostras	112
Tabela 28 – Teste de Tukey para a capilaridade (C) das amostra	112
Tabela 29 – Teste de Tukey para os resultados de condutividade térmica	113
Tabela 30 – Teste de Tukey para os resultados de resistência à compressão . .	113
Tabela 31 – Teste de Tukey para o módulo de elasticidade	114
Tabela 32 – Teste de Tukey para os resultados de resistência à compressão das metades	114
Tabela 33 – Teste de Tukey para os resultados de resistência à tração na flexão	115

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	18
1.2	Estrutura do trabalho	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Concreto Celular	20
2.1.1	Classificação	21
2.1.2	Espuma e estabilização de espuma	23
2.2	Concreto celular produzidos com RCD	30
2.3	Propriedades mecânicas residuais do concreto celular	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	43
3.1	Materiais	44
3.1.1	Cimento Portland	44
3.1.2	Agregados	45
3.1.3	Agente espumante	48
3.1.4	Goma Xantana	49
3.2	Métodos	50
3.2.1	Estabilização da espuma	50
3.2.1.1	Densidade da espuma	51
3.2.1.2	Drenagem da espuma	52
3.2.1.3	Microscopia óptica da espuma	52
3.2.2	Determinação dos traços	54
3.2.3	Métodos de mistura	56
3.2.4	Moldagem dos corpos de prova	57
3.2.5	Massa específica em estado fresco	59
3.2.6	Ensaio em estado endurecido	59
3.2.6.1	Índices físicos	59
3.2.6.2	Ensaio de condutividade térmica	60
3.2.6.3	Comportamento à compressão	61
3.2.6.4	Resistência à tração na flexão em três pontos	62
3.2.7	Propriedades mecânicas residuais	63
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	65
4.1	Estabilização da espuma	65
4.2	Concreto celular	72
4.2.1	Massa específica no estado fresco e endurecido	72
4.2.2	Absorção de água por imersão e índices de vazios	76
4.2.3	Capilaridade	79
4.2.4	Condutividade térmica	82
4.2.5	Resistência à compressão	83
4.2.6	Comportamento à compressão	90
4.2.7	Resistência à tração na flexão	97

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
5.1	Conclusões	102
5.2	Sugestões de Trabalhos futuros	103
	REFERÊNCIAS	104
	APÊNDICE A – TABELAS DE TESTE DE TUKEY	110
	APÊNDICE B – CURVAS TENSÃO/DEFORMAÇÃO	116

1 INTRODUÇÃO

O concreto ao longo dos anos se mantém como o material mais utilizado na construção civil, de forma que sua composição básica é a mistura de um aglomerante, normalmente cimento Portland, com agregados miúdos, graúdos e água. Tal mistura se apresenta muito versátil permitindo a moldagem de diversas formas quando em estado fresco e oferece resistência mecânica adequada no estado endurecido. No entanto, o material apresenta limitações que restringem a sua utilização, como por exemplo a sua elevada massa específica, baixa resistência a esforços mecânicos de tração e baixa resistência ao ataque de agentes químicos, quando em ambientes agressivos. Desta forma, cada vez mais são estudados e utilizados os chamados concretos especiais ou materiais compósitos. Os quais em sua composição são incorporados aditivos, adições minerais e fibras que não são normalmente usados em concretos convencionais e que buscam melhorar as propriedades reológicas no estado fresco, mecânicas e de durabilidade no estado endurecido.

Nesse contexto, entre os concretos especiais existem os concretos leves onde sua principal característica é a reduzida massa específica e por apresentar boas propriedades térmicas e acústicas. A NBR 8.953 (ABNT, 2015) classifica os concretos conforme sua massa específica, sendo considerado concreto leve quando a massa for inferior a 2.000 kg/m^3 . Para alcançar essa massa específica podem ser usados agregados leves, incorporação de ar, água em excesso e a redução ou ausência de materiais finos (CORTEPASSI, 2005). Dentre os concretos leves tem-se destaque os concretos celulares que apresentam em seu interior bolhas de ar distribuídas e retidas durante o processo de produção, cura e endurecimento, o que lhe confere baixa massa específica. Aliado a isso, devido o ar ser um condutor de calor pobre, principalmente quando em repouso, confere ao concreto celular notáveis características de isolamento térmico.

Concretos leves podem ter grande aplicação na construção de edifícios de múltiplos andares. A menor massa específica obtida nesse tipo de concreto vai interferir no dimensionamento estrutural das edificações, pois a utilização de blocos de concreto celular em paredes não estruturais possibilita uma diminuição significativa do carregamento nas vigas e, conseqüentemente, nos pilares e fundações (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000). Devido a isso a utilização de concretos leves pode possibilitar a redução nos custos de fundação em até 30% (ROSSIGNOLO, 2003). Outra aplicação dos concretos celulares é nas reformas de edificações. Esses serviços podem ser caros, pois muitas vezes são necessários reforços na estrutura da edificação. A utilização de materiais leves, como o concreto celular, resulta em carregamentos menores na estrutura. Dessa forma os custos de serviços de reforço estrutural nesses casos podem ser reduzidos, ou até mesmo desnecessários.

Com a implementação da norma de desempenho das edificações NBR 15.575 (ABNT, 2021b) que visa atender aos requisitos dos usuários (desempenhos térmico, acústico, lumínico, entre outros), no que diz respeito aos sistemas que compõem as edificações habitacionais, independentemente dos seus materiais constituintes e do sistema construtivo empregado, a utilização de materiais compósitos é uma alternativa para suprir as exigências prescritas nessa norma. Os concretos leves apresentam bom desempenho nas propriedades de isolamento térmico e acústico, nas ações de congelamento/descongelamento, na resistência ao fogo, entre outras. No entanto devido a grande presença de ar ocorre a redução do desempenho mecânico no estado endurecido (CORTELASSI; CARBONARI, 2008). Então, devido as boas propriedades apresentadas em termos de isolamento térmico e acústico, é cada vez mais comum observar obras onde blocos de concreto celular são utilizados como vedação, com o objetivo de atender a norma de desempenho citada anteriormente. Ainda, esse material tem sido muito utilizado em escadas enclausuradas com a função de parede antichamas, uma vez que o concreto celular costuma atender as exigências de resistência ao fogo prescritas pela NBR 9.077 (ABNT, 2001b).

A capacidade de resistência ao fogo do concreto celular é creditada a sua estrutura de poros fechados, pois a transferência de calor por radiação é uma função inversa do número de interfaces ar-sólido transpostas. Isso, juntamente com sua baixa condutividade térmica, dá uma indicação de que o concreto celular possui propriedades de resistência ao fogo maior ou tão boa quanto o concreto convencional (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000). Shang, Qu e Li (2022) fizeram ensaios de resistência ao fogo de misturas de concreto celular em comparação ao concreto convencional e concluíram que o tempo de resistência ao fogo do concreto celular foi superior a duas vezes. Dessa forma, o aumento do volume de ar e diminuição do volume de pasta de cimento Portland foram as principais características que proporcionaram ao concreto celular a melhora frente a resistência ao fogo. No entanto, poucos estudos avaliaram as propriedades físicas e mecânicas dos concretos celulares após a exposição a temperaturas elevadas, desta forma ficando uma lacuna na linha de conhecimento do assunto.

Outra discussão que se faz presente no contexto atual é o aumento de resíduos sólidos provenientes de entulhos de obras ou demolições, uma vez que historicamente a construção civil é uma atividade causadora de grandes impactos ambientais e de pouca reutilização e reciclagem de seus resíduos. Nesse contexto, a produção de concretos contendo cimento Portland tem impactos negativos e significativos para o meio ambiente. Cerca de 5 a 7% das emissões mundiais de CO_2 são provenientes da produção de cimento Portland (GENCEL *et al.*, 2021b). Aliado a isso o concreto convencional resulta na superexploração dos agregados naturais, levando a diminuição dos recursos naturais não renováveis (SONG; LANGE, 2021; GENCEL *et al.*, 2021b). A utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) resulta em economia de

energia e na redução de CO_2 e NO liberados nos processos de produção. Para a obtenção de 1 tonelada de agregado natural (areia ou brita) são liberados cerca de 23 a 33 kg de CO_2 . No processo de beneficiamento de resíduos de construção para a produção de agregados reciclados de RCD são gerados 12 kg de CO_2 , ou seja, menos da metade quando comparado com o agregado natural extraído (NEDELJKOVIĆ *et al.*, 2021).

Alguns estudos foram realizados para expressar o desempenho do concreto celular contendo agregado reciclado de RCD. Jones *et al.* (2012) utilizaram agregados reciclados e subprodutos industriais na substituição de agregados naturais e avaliaram a consistência, resistência à compressão, retração por secagem e condutividade térmica. Gencil *et al.* (2021b) utilizaram agregado miúdo de RCD em substituição de até 100% do agregado natural, onde foi avaliada a porosidade, resistência à compressão, módulo de elasticidade, velocidade de ultrassom e absorção de água. Nesses dois estudos os autores concluíram que o desempenho para as propriedades verificadas do concreto celular com agregado reciclado foi semelhante ao de referência. Isso indica a possibilidade de substituição parcial ou total do agregado natural por agregado reciclado de RCD.

Dessa forma a utilização dos resíduos de construção e demolição (RCD) visa, principalmente, diminuir a necessidade de extração de novas matérias-primas, a redução da emissão de gases poluentes e a diminuição dos volumes destes materiais nos aterros sanitários. Dessa forma, tem-se uma maneira eficiente de contribuir para a sustentabilidade do planeta, bem como, com a produção de materiais denominados ecologicamente corretos (*eco-friendly*).

Com o exposto, pode-se observar que há uma lacuna na literatura sobre as características residuais do concreto celular em situações pós-fogo, uma vez que existem poucos estudos que se aprofundam no tema. Para preencher a lacuna mencionada, neste trabalho buscou-se desenvolver um compósito cimentício celular com a substituição do agregado natural por agregado reciclado de RCD, avaliar seu desempenho físico/mecânico e verificar as características residuais pós-queima.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um compósito cimentício leve com adição de goma xantana e substituição total do agregado natural por agregado reciclado de origem RCD, e avaliar suas propriedades físico/mecânicas e residuais após a exposição à diferentes temperaturas.

1.1.2 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;
- Avaliar a interação da goma xantana e do RCD nos índices físicos: porosidade, absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão de concretos celulares de diferentes densidades;
- Avaliar o desempenho térmico dos concretos celulares com goma xantana e RCD, através do ensaio de condutividade térmica;
- Determinar as propriedades mecânicas dos concretos celulares através de ensaios para obter o comportamento à compressão e a resistência à tração na flexão;
- Verificar as propriedades mecânicas residuais dos concretos celulares após serem queimados em temperaturas de 300 °C, 600 °C e 900 °C.

1.2 Estrutura do trabalho

- Seção 1
Na Seção 1 está disposta a Introdução, a qual apresenta a importância da pesquisa, justificativa do tema estudado bem como os objetivos gerais e específicos.
- Seção 2
A Seção 2 é constituída pela revisão bibliográfica, na qual é composta pelo estado da arte, além disto serão apresentados resultados obtidos em outros trabalhos que envolvem o tema desta pesquisa.
- Seção 3
A Seção 3 apresenta a metodologia adotada e descreve a parte experimental, abordando condições dos materiais utilizados e suas características, métodos de dosagem e mistura utilizados, além do procedimento técnico para condução dos ensaios realizados.
- Seção 4
Na Seção 4 serão apresentados e analisados os resultados obtidos, colocando os valores encontrados em forma de tabelas e figuras, e discutindo os resultados.
- Seção 5
Aqui serão abordadas as considerações finais do trabalho, relatando de forma resumida os resultados obtidos, a fim de atingir os objetivos expostos na Seção 1.

- Seção 6

Esta seção apresenta as referências utilizadas para embasamento teórico na realização do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto Celular

Concreto celular (CC) ou concreto espumoso é um tipo de concreto leve com estrutura porosa normalmente a base de cimento Portland com ou sem a adição de agregados miúdos e massa específica inferior a dos concretos convencionais. Onde grande parte do seu volume é ocupado por vazios de ar incorporado à matriz (FERREIRA, 1987; TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992; MELO, 2009).

O primeiro registro de um material de construção artificial leve é datado entre os séculos I a.c. a 5 d.c. Onde os romanos observaram que ao misturar sangue de animal em uma mistura de cal quente com areia grossa, cascalho fino e água eram formadas pequenas bolhas de ar no material tornando ele mais leve e durável (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015; KOKSAL; SAHIN; GENCEL, 2020). Seguindo na linha do tempo, algumas tentativas de obter um concreto celular são encontradas. A primeira na Polônia em 1889 onde foi usado para a formação de gás ácido clorídrico e bicarbonato de sódio à pasta de cimento, formando assim um concreto aerado. Na Holanda, em 1917, leveduras orgânicas foram usadas para a formação de gases em materiais cimentícios. A primeira patente aplicada industrialmente surgiu em 1919 na Alemanha, onde seu criador produziu vigas armadas de concreto celular. Em 1923 na Suécia o arquiteto Johan Axel Eriksson, registrou a primeira patente de concreto celular com a utilização de pó de alumínio e peróxido de hidrogênio para a formação de gases em uma pasta de cimento Portland. Estes materiais são utilizados até hoje para a produção de concretos celulares aerados (FERREIRA, 1987; CHICA; ALZATE, 2019).

Nas décadas seguintes a evolução do material se deu principalmente na criação de novos processos de fabricação, métodos de cura e agentes de formação de gases, sendo os agentes à base de proteínas desenvolvidos ao final da década de 1950 e sintéticos por volta dos anos 1990 (CHICA; ALZATE, 2019). Nos últimos 20 anos, melhorias significativas nos equipamentos de produção aliado a melhores aditivos químicos e agentes espumantes, permitiram o uso e evolução do concreto celular em maior escala. Bem como muitas pesquisas foram feitas para estudar suas características e ampliar suas aplicações (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015).

O termo concreto celular é usualmente utilizado para designar o concreto leve com estrutura porosa resultante da pega de uma mistura composta de aglomerantes com agregados finos e massa específica obedecendo os limites entre 400 kg/m³ e 1850 kg/m³. Esse intervalo está relacionado com a menor densidade em que ainda consegue-se obter poros com dimensões regulares e milimétricas e com o limite inferior da massa específica seca da argamassa (FERREIRA, 1987). De acordo com a NBR 17.071 (ABNT, 2022b) essa mistura passa por tratamentos mecânicos e físico/químicos com o

objetivo de incorporar ar em seu interior. Possibilitando como resultado uma mistura que apresenta elevada porcentagem de vazios de ar uniformemente distribuídas que permanecem estáveis, indeformáveis e incomunicáveis durante o processo, gerando dessa forma uma estrutura celular.

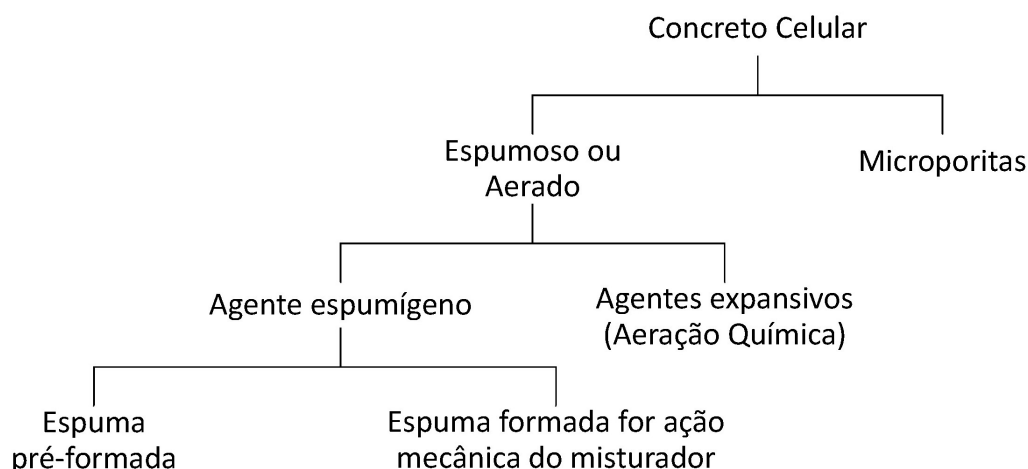
Conforme Bindiganavile e Hoseini (2019) o concreto celular em sua composição é mais semelhante a uma argamassa e é definido como um material leve constituído por cimento Portland e/ou cal, incluindo areia, sem a presença de agregado graúdo, misturado com água para formar uma pasta. A estrutura celular é obtida pela inclusão de vazios de ar macroscópicos na matriz do material. As bolhas aprisionadas reduzem a densidade da mistura e tem efeito plastificante na mesma, também a espuma deve representar no mínimo 20% do volume do material. O controle da densidade é feito pela substituição do agregado miúdo em parte ou totalmente por bolhas de ar. Apesar de normalmente não possuir agregado graúdo pode ocorrer a inclusão de agregados leves como perlita expandida, vermiculita expandida e polietileno expandido (EPS), entre outros.

Conforme a norma internacional C796/C796M-12 (ASTM, 2012) o concreto celular é um material de construção leve, de estrutura celular e homogênea. Sendo composto por um ou mais aglomerantes e com os vazios da estrutura celular obtidos através de produtos químicos formadores de gás ou agentes espumígenos.

2.1.1 Classificação

O concreto celular abrange uma gama de materiais podendo ser classificados de acordo com algumas particularidades de fabricação como pode ser visto na Figura 1. Onde primeiramente são divididos em dois grandes grupos diferenciando pela natureza dos poros. As microporitas que apresentam uma estrutura capilar uniforme resultante da evaporação da excessiva quantidade de água, e os concretos aerados, que possuem em sua estrutura vazios de ar macroscópicos distribuídos uniformemente por toda a sua extensão. Estes por sua vez podem ser divididos novamente em dois grupos distintos devido a natureza do agente formador sendo agente espumígeno (concretos celulares aerados) ou agente químico (concretos celulares gasosos) (FERREIRA, 1987; TEIXEIRA FILHO; TEZUKA, 1992).

Figura 1 – Classificação dos concretos celulares



Fonte: Adaptado de Teixeira Filho e Tezuka (1992)

Concretos celulares obtidos por agentes químicos são resultado da reação química da adição de algum agente como pó de alumínio, pó de zinco, peróxido de hidrogênio ou cal clorada misturados a argamassa. No processo de produção do concreto celular com pó de alumínio é liberado gás de hidrogênio que permanece incorporado na mistura formando a estrutura celular do material. A cura pode ser ao ar, a vapor ou autoclave (MELO, 2009). No que tange a cura em autoclave, essa é um processo industrial onde a mistura é curada a vapor sob pressão de 10 atm e temperatura de 180 °C. Estas condições aceleram cinética de hidratação do cimento Portland e possibilitam uma segunda reação química onde o CSH em vez de apresentar estrutura amorfa cria cristais (tobermorita). Isso dá ao material estabilidade dimensional e boas propriedades mecânicas. Tal material é conhecido como concreto celular autoclavado (CCA) (ROSTIROLA, 2013).

Nos concretos formados por agentes espumígenos, os poros de ar podem ser incorporados de duas formas a mistura: Com espuma pré formada, onde a espuma é previamente formada por equipamentos específicos e misturada a matriz cimentícia, ou com espuma gerada por agitação mecânica. Neste último caso o agente espumígeno é diluído em água e é adicionado juntamente com a argamassa ao misturador, e com o movimento do misturador é formada a espuma (FERREIRA, 1987; MELO, 2009). A espuma pré-formada cria um concreto celular mais eficiente e de melhor qualidade, sendo o mais utilizado devido a algumas vantagens comparativas ao método de agitação mecânica como: baixo consumo de agente espumante e maior eficiência na incorporação de ar na mistura (CHICA; ALZATE, 2019).

2.1.2 Espuma e estabilização de espuma

Uma parte fundamental do concreto celular é a estabilidade da espuma, uma vez que a espuma pode compor de 20% a 80% do volume total do material. Assim a bolha de espuma é um constituinte chave para o concreto celular, cuja qualidade, escala e distribuição na matriz cimentícia influenciam significativamente nas propriedades resultantes (SONG; LANGE, 2021; SHANG; QU; LI, 2022). A estabilidade da espuma é a capacidade de manter o filme líquido em suspensão sem que ocorra drenagem ou o rompimento das bolhas. Essa característica está profundamente relacionada com o desempenho, qualidade e rendimento do concreto celular (HAJIMOHAMMADI; NGO; MENDIS, 2018; ZHU *et al.*, 2020). Bolhas maiores são instáveis e mais suscetíveis ao rompimento e coalescência, dessa forma, para garantir a estabilidade do concreto celular durante a mistura, lançamento e cura, é fundamental obter uma espuma estável com tamanho característico de poros pequenos (HASHIM; TANTRAY, 2021).

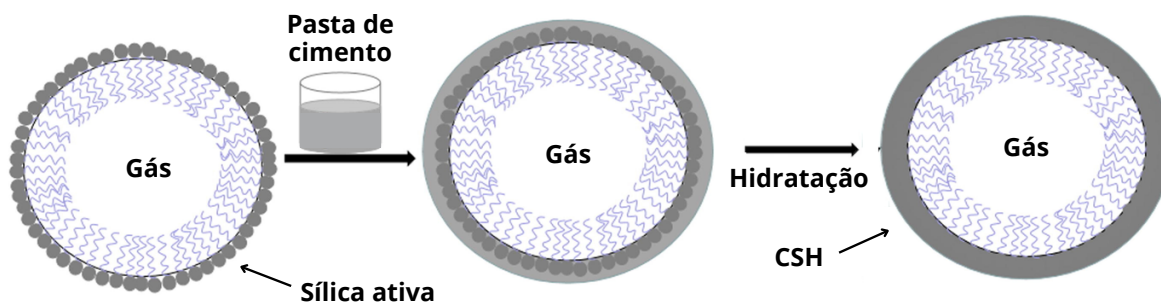
Ainda, segundo She *et al.* (2018) as espumas são um sistema instável que envelhece e muda suas características com o tempo. Elas estão suscetíveis a alguns efeitos que comprometem sua estabilidade como a drenagem do filme líquido, coalescência e envelhecimento de Ostwald. A drenagem ocorre quando o fluido dentro borda de *Plateau* drena devido à gravidade. O amadurecimento é a difusão de gás entre bolhas, isso faz que bolhas maiores se expandam com o tempo enquanto as bolhas menores se dissolvem. A coalescência é a fusão de bolhas adjacentes quando o filme entre elas se rompe devido ao envelhecimento (DHASINDRAKRISHNA *et al.*, 2020). Normalmente espumas compõem um sistema bifásico composto por uma fase líquida e uma gasosa, assim o estudo da transferência de gás de uma bolha para outra ou para a atmosfera é fundamental, pois é o que determina a sua estabilidade (DALVIN, 2011). Em concretos celulares a degradação da espuma é a principal causa da perda de homogeneidade da mistura (SONG; LANGE, 2021).

Existem algumas técnicas utilizadas para estabilizar as espumas. Podendo ser por meio de aumentar a viscosidade e espessura do filme líquido, com algum agente espessante, ou através de partículas finas capazes de recobrir a parede da bolha para formar um sistema trifásico composto de fases líquidas, gasosas e sólidas. Nesse caso as partículas finas se ligam por meio de adsorção à parede da bolha (WANG *et al.*, 2020; YUANLIANG *et al.*, 2021).

Alguns autores utilizaram técnicas e materiais como estabilizadores de espuma. Wang *et al.* (2020) em sua pesquisa realizaram a substituição de 1% de cimento Portland por sílica ativa em diferentes etapas de produção do concreto celular (durante a produção da espuma e durante a mistura da argamassa). Os autores concluíram que devido a sílica ativa apresentar distribuição do tamanho de partículas na faixa de 0,1 a 30 μm , quando utilizada durante a produção da espuma, tem as partículas adsorvidas de forma irreversível e espontânea nas interfaces líquido-gás, formando uma espuma

trifásica. Também devido ao efeito pozolânico o CSH secundário, proveniente da reação entre o hidróxido de cálcio e a sílica, é formado mais rapidamente conservando a estrutura celular mais íntegra. A Figura 2 mostra a interação da sílica ativa, quando adicionada durante a formação da espuma, no processo de produção e cura do concreto celular.

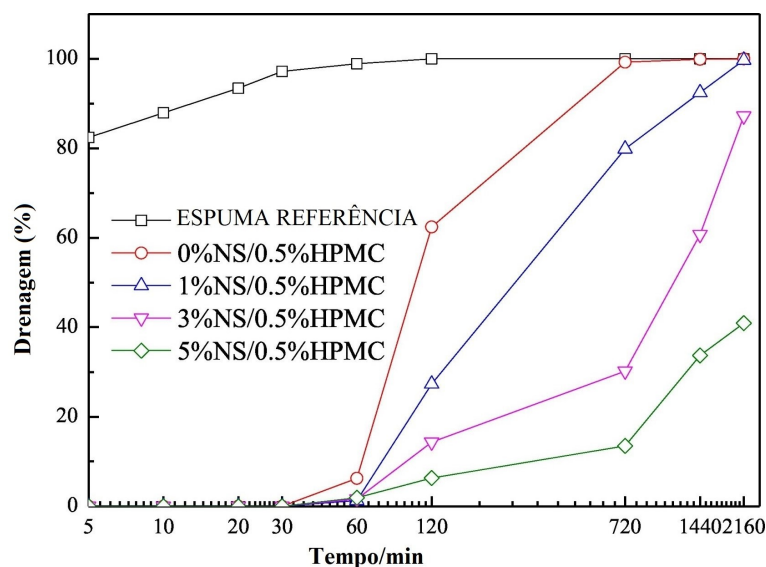
Figura 2 – Processo de hidratação do concreto celular com espuma estabilizada por sílica ativa



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2020)

She *et al.* (2018) utilizou um estabilizante orgânico, hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), combinado com nano-sílica (NS) para a produção de espumas para concreto celular. Os autores concluíram que o uso de HPMC em teor de 0,5% de adição sobre a massa de agente espumante aumentou o filme líquido resultando em menor interconectividade entre os canais de *Plateau*. Para a ação combinada do HPMC com diversos teores de nano-sílica (1%, 3% e 5% em massa do agente espumante) o tamanho das bolhas diminuiu com o aumento do teor de NS e reduziu ainda mais os canais de *Plateau* dificultando a drenagem e melhorando muito a estabilidade. Os efeitos de NS e HPMC na estabilidade da espuma são mostrados na Figura 3 sendo representados por um gráfico de drenagem do volume de líquido em função do tempo. Para a espuma referência nos primeiros 5 minutos, quase 80% do líquido foi drenado e a espuma desapareceu completamente após 30 minutos. Com a utilização de NS e HPMC, a estabilidade apresentou resultados bastante superiores. De modo que não houve drenagem e perda de espuma em 30 min. Os melhores resultados foram obtidos na espuma com adição de 5% de NS e 0,5% de HPMC que apresentou drenagem de apenas 6,3% em 120 minutos.

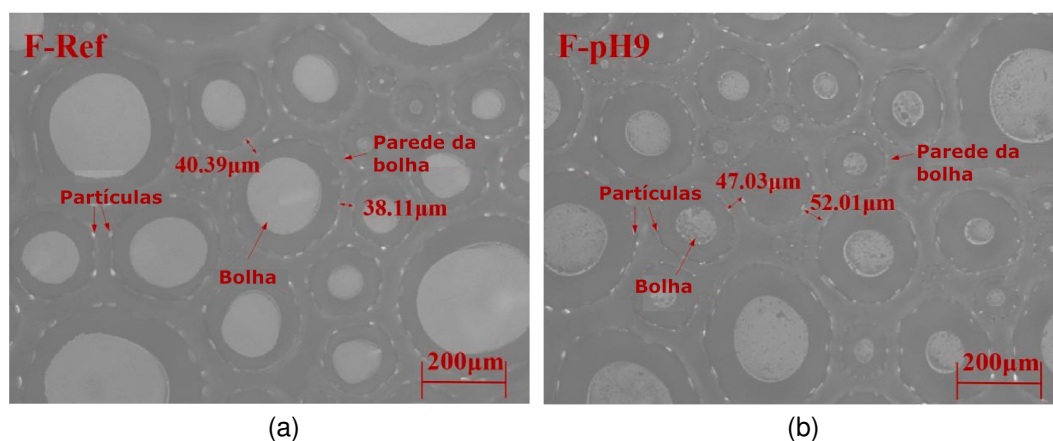
Figura 3 – Drenagem da espuma em função do tempo



Fonte: Adaptado de She *et al.* (2018)

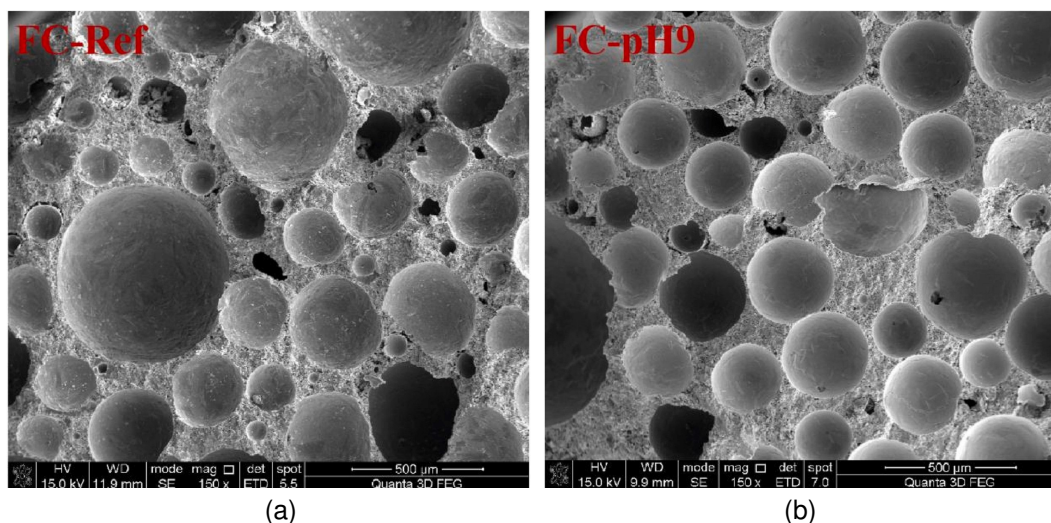
Yuanliang *et al.* (2021) variou o pH da solução tensoativa com a adição de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) em um espumante sintético modificado com nano-alumina. Como pode ser observado na Figura 4 obtida por microscópio óptico (MO) a espuma com o pH9 apresentou um tamanho de poros menor, com filme líquido e parede da bolha mais espessos. Também podem ser observadas a presença das partículas aluminato de cálcio, resultante da reação entre nano-alumina e $Ca(OH)_2$, que recobrem a bolha. Na Figura 5 obtidas com microscópio eletrônico de varredura (MEV) do concreto celular, pode ser observado que uma espuma estável em estado fresco resulta em um concreto celular em estado endurecido com poros menores e menos conectados. O autor conclui que a maior estabilidade da espuma pode ser alcançada usando concentração de $Ca(OH)_2$ em pH9.

Figura 4 – Microscopia óptica das espumas: a) Espuma referênciã sem correção de pH e b) Espuma com adição de $Ca(OH)_2$ e pH 9



Fonte: Adaptado de Yuanliang *et al.* (2021)

Figura 5 – Microscopia eletrônica das espumas: a) Concreto celular com espuma referência e b) Concreto celular com a espuma de pH 9

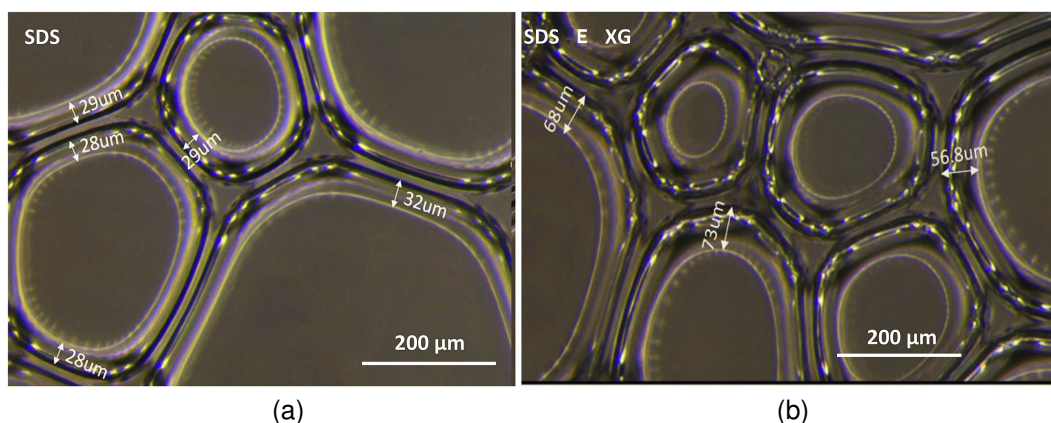


Fonte: Adaptado de Yuanliang *et al.* (2021)

A goma xantana (XG) é outro aditivo utilizado para estabilização de bolhas em concreto celular. A XG é um exopolissacarídeo, obtido a partir da biossíntese no processo de fermentação de açúcares pelas bactérias *Xanthomonas*. Possui alta viscosidade e características pseudoplásticas. No ramo alimentício é bastante usada na estabilização de espumas, mas também tem utilização em outros setores como petroquímico, farmacêutico e têxtil (COSTA; PINHO; SANTOS, 2019). Hajimohammadi, Ngo e Mendis (2018) adicionaram goma xantana como forma de estabilização de espumas para concreto celular em proporções de 0 a 0,45% do peso de agente espumante. Como agente espumante foi utilizado um agente sintético de dodecil sulfato de sódio (SDS) e agitação mecânica para a formação de espuma. A XG foi utilizada como agente espessante para o filme líquido. Assim como a drenagem do líquido das espumas é diretamente afetada pelo fluxo do líquido e esse depende significativamente da viscosidade. Ao aumentar a espessura e viscoelasticidade dos filmes líquidos, é possível aumentar a estabilidade das espumas.

Como resultado os autores obtiveram bolhas com espessura de parede maior. A Figura 6 (a) mostra a microscopia óptica de uma espuma gerada apenas da solução de agente espumante e água. Na Figura 6 (b) foi utilizada uma solução de agente espumante, água e adição de 0,45% em peso do agente espumante de goma xantana. Pode ser observado que nesse caso a parede da bolha apresenta maior espessura quando comparado a espuma sem adição de XG. Aliado a isso os autores realizaram ensaios com um viscosímetro, e observaram que a solução de espuma com XG apresentou maior viscosidade o que dificulta o rompimento e crescimento de bolhas de gás durante os processos de mistura, moldagem e cura do concreto celular.

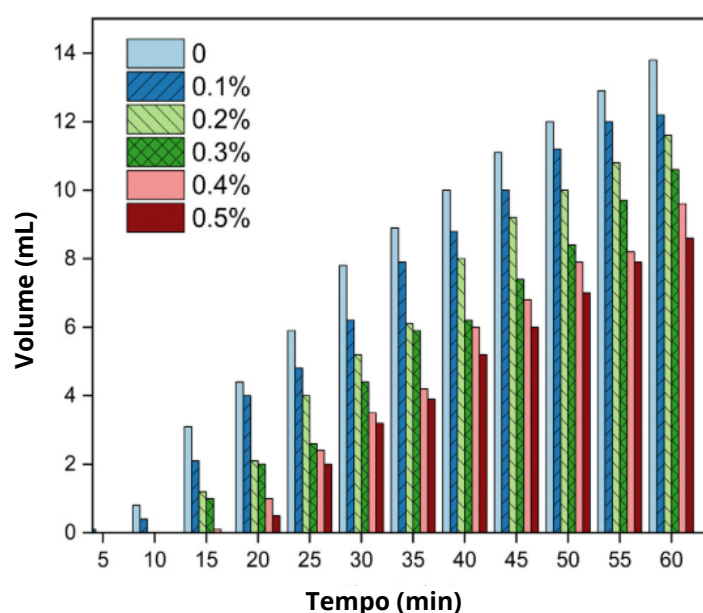
Figura 6 – Microscopia óptica das espumas: a) Espuma produzida com agente espumante e b) Espuma com adição e 0,5% de goma xantana



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

Zhu *et al.* (2020) também utilizaram XG como estabilizador em percentuais até 0,5% em peso do tensoativo. Os autores obtiveram como resultado além do espessamento do filme líquido da espuma as amostras de concreto celular produzidas apresentam menor tamanho de poro, distribuição mais concentrada, maior espessura da parede dos poros e também poros menos conectados. Como pode ser observado na Figura 7 com o aumento do teor de adição de goma xantana na espuma o volume de líquido drenado diminui. Todos os ensaios realizados com o uso da XG apresentaram boa retenção de água e menor volume de líquido drenado. Sendo que a porcentagem de 0,5% apresentou os melhores resultados não drenando líquido nos primeiros 15 minutos e apresentando o menor volume drenado em 60 minutos.

Figura 7 – Impacto da utilização de goma xantana na drenagem da espuma



Fonte: Adaptado Zhu *et al.* (2020)

A influência de uma espuma estabilizada no concreto celular é muito presente. De maneira que, a espuma quando misturada a matriz cimentícia tem seu o filme líquido alterado, deixando de ser composto de água e agente tensoativo e passando a ser constituído de pasta ou argamassa de cimento Portland. Dessa forma as bolhas de ar devido a maior massa específica da matriz cimentícia e pela tensão produzida pela da ação do misturador tendem a romper. Por isso um filme líquido mais viscoso e com maior espessura contribui impedindo o rompimento das bolhas durante a preparação e endurecimento do CC (HAJIMOHAMMADI; NGO; MENDIS, 2018).

Após a mistura entre a pasta/argamassa com a espuma, a matriz cimentícia fornecerá a resistência as forças desestabilizadoras da espuma. Com o tempo, a resistência aumentará à medida que a matriz ligante evolui com o processo de pega, resultando na perda de plasticidade e redução da trabalhabilidade (PASUPATHY; RAMAKRISHNAN; SANJAYAN, 2021). De forma geral o tamanho característico dos poros no concreto celular é definido nos primeiros minutos após o início da pega. Portanto se a drenagem e o colapso das bolhas puderem ser evitadas por um tempo maior é possível obter um concreto celular com um tamanho menor de poros (HAJIMOHAMMADI; NGO; MENDIS, 2018).

Ainda, devido ser composto em grande parte por células de ar a porosidade é considerada a principal propriedade que afeta diretamente as propriedades físico-mecânicas, térmicas e de durabilidade do concreto celular (KUMAR; BHATTACHARJEE, 2003; MELO, 2009; GENCEL *et al.*, 2021b). Três parâmetros podem ser usados para descrever as características do sistema de ar no concreto celular: teor total de ar, tamanho dos vazios de ar e distância entre os vazios de ar (HUANG *et al.*, 2019).

Outro fator importante para a estabilidade da pasta de concreto celular ainda em estado fresco é a densidade (massa específica). Concretos celulares mais densos são mais estáveis que concretos celulares menos densos, uma vez que com baixas densidades a espuma se torna muito instável e suscetível a coalescência (HASHIM; TANTRAY, 2021). Apesar da fusão de bolhas ser significativa em todas as densidades, em concretos com menor densidade a ocorrência é maior, formando bolhas maiores e irregulares em seu interior. Assim, densidade e tamanho característico dos poros são grandezas inversamente proporcionais. Onde, quanto maior a densidade do concreto menor o tamanho característico dos poros e quanto menor a densidade maior o tamanho dos poros (HILAL; THOM; DAWSON, 2015).

A massa específica do concreto celular é representada como inversamente proporcional a porosidade do material. A incorporação das células de ar através da espuma pré-formada, permite um controle de qualidade da espuma gerada e da quantidade adicionada à argamassa, refletindo consideravelmente no produto final. Dessa forma é uma pratica comum na indústria o controle da densidade pela substituição da matriz em parte por células de ar (MELO, 2009; SILVA, 2015; HASHIM; TANTRAY,

2021).

Durante o processo de cura do concreto celular a massa específica no estado fresco (MEF) tem uma redução em função do endurecimento dos materiais, o que acarreta em uma massa específica no estado endurecido (MEE) menor em função da idade do concreto celular (PACHLA, 2017). Existem alguns fatores que podem afetar a MEE tendo destaque a massa específica no estado fresco, idade, maturidade, relação água-cimento (a/c), temperatura, umidade e a área de superfície disponível para evaporação (ACI, 2014). Conforme ocorre evolução no processo de hidratação o concreto celular vai diminuindo sua densidade até estabilizar. Também durante a cura materiais cimentícios vão ganhando resistência conforme a idade. Dessa forma a massa específica e a resistência à compressão axial possuem uma relação proporcional apenas para mesma idade, em diferentes tempos de cura a relação entre densidade e resistência à compressão não pode ser correlacionada (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015; YUANLIANG *et al.*, 2021; SURYANITA *et al.*, 2022).

Durante a pega e cura do concreto celular, ocorre a desespuma (profundidade de assentamento), que é a perda de volume do concreto celular devido ao colapso das bolhas. Esta perda de volume pode ser medida pela variação da cota superior de uma amostra até atingir a estabilidade dimensional. A instabilidade da espuma no meio cimento/geopolímero depende da densidade da mistura fresca. Assim, quanto maior a densidade do concreto celular, menor a instabilidade da mistura e a profundidade de desespuma. Aliado a isso, a homogeneidade dos poros no concreto celular é bastante afetada pela profundidade de desespuma. De forma que, o índice de homogeneidade aumenta com a redução da profundidade de desespuma, sendo um fator importante que garante a distribuição uniforme dos vazios de ar na matriz ligante (DHASINDRAKRISHNA *et al.*, 2020; PASUPATHY; RAMAKRISHNAN; SANJAYAN, 2021).

A inclusão de partículas tende a alterar a morfologia da espuma e diminuir o desempenho mecânico do concreto espumado quando em densidades menores que 800 kg/m^3 . Com a presença de partículas sólidas, o frágil sistema de bolhas de ar na pasta de espuma fresca pode ser perturbado mais facilmente, o que resulta em perda de desempenho ou até mesmo um colapso do volume. Essa tendência de degradação da espuma aumenta com a diminuição da massa específica fresca. Para auxiliar nessa deficiência superplastificante pode ser usado em uma dosagem projetada para garantir que a pasta de cimento fresca possa ser efetivamente misturada com a espuma, sem causar colapso de volume durante a mistura. Também acelerador de pega pode ser dosado para que o endurecimento ocorra mais rápido na pasta, diminuindo assim as tensões que a pasta fresca gera na espuma (SONG; LANGE, 2021).

Para inibir a segregação o uso de aditivo modificador de viscosidade (VMA), juntamente com superplastificante (SP) pode garantir a fluidez e estabilidade adequada

em concretos celulares. A incorporação de VMA afeta a fase aquosa da pasta de cimento aumentando a viscosidade da mistura a fim de evitar a segregação. Isso aumenta a estabilidade, mas reduz a fluidez. O SP aumenta a fluidez, mas reduz a estabilidade. Por esta razão, é necessário um equilíbrio entre a fluidez e a viscosidade dos concretos leves (LI *et al.*, 2018).

2.2 Concreto celular produzidos com RCD

A utilização de subprodutos e entulhos gerados em obras e demolições é um conceito bastante antigo. Tem-se os primeiros registros durante o período da edificação das cidades do Império Romano (séculos I a.c. até 5 d.c.) onde ocorria a reutilização destes materiais em obras novas. Entretanto só a partir de 1928 começaram pesquisas para verificar de forma mais específica as características da utilização destes materiais reciclados em concreto. A primeira grande utilização de entulhos de obras foi ao final da segunda guerra mundial para a reconstrução das cidades europeias, onde escombros de edificações danificadas ou destruídas por bombas foram processados produzindo agregados para a construção de novos concretos (LEVY; HELENE, 1995).

A NBR 15.116 (ABNT, 2021a) define agregado reciclado como o material granular artificial, graúdo ou miúdo, oriundo do beneficiamento de resíduos de construção classe A, que apresenta características técnicas para aplicação em obras de engenharia. Tais agregados podem ser divididos em subcategorias diferenciando a predominância do material de origem, onde o agregado reciclado cimentício (ARCI) é constituído predominantemente por materiais cimentícios diversos como concretos, argamassas, blocos de concreto, entre outros, podendo até incluir teores reduzidos de cerâmica vermelha. A segunda subcategoria é o agregado reciclado de concreto (ARCO) onde é constituído predominantemente por resíduos de concreto. E por último agregado reciclado misto (ARM) composto por uma mistura de materiais cimentícios e materiais cerâmicos (blocos e telhas de cerâmica vermelha etc.).

O uso de agregados reciclados em concreto é bastante comum para a produção de concreto de peso normal. Porém o fator limitante da sua utilização no concreto é a resistência mecânica reduzida das partículas do agregado reciclado. Aliado a isso também existe a alta demanda de água do RCD em comparação aos agregados naturais (PASUPATHY; RAMAKRISHNAN; SANJAYAN, 2021). O Agregado Graúdo Reciclado de Concreto (AGRC) é o mais utilizado em estudos, o Agregado Fino Reciclado de Concreto (AFRC), tem estudos limitados na literatura (ROCHA; FARIAS, 2022).

A utilização ARFC é problemática devido à sua alta absorção de água e formato das partículas. No entanto tais materiais podem efetivamente ser usados em concreto celular para substituir agregados primários devido as propriedades frescas serem dominadas pelas fases espuma/pasta, ao invés do agregado. Isso torna o CC um

material ecologicamente correto com a substituição dos agregados provenientes de rio e de beneficiamento em pedreiras (JONES *et al.*, 2012). Devido suas aplicações não estruturais o concreto celular permite potencialmente uma inclusão de alto volume de partículas, por exemplo, agregados reciclados (SONG; LANGE, 2021).

Gencel *et al.* (2021b) utilizaram cinza volante (FA) em substituição parcial de 4% cimento e RCD como substituição de até 100% da areia natural. O agente espumante utilizado foi à base de proteínas e a relação água/aglomerante de 0,73. Como resultado a incorporação de RCD causou um ligeiro aumento na porosidade aparente do concreto celular. Esse aumento foi atribuído à forma de textura mais porosa em relação à areia natural. Tal resultado aliado à menor resistência do agregado reciclado quando comparado ao natural conferiram às amostras propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo de elasticidade) levemente menores que o traço referência. Também devido a maior porosidade foram observadas menor densidade, maior absorção de água, menor velocidade de ultrassom e condutividade térmica menor.

Com objetivo de compor um material para preenchimento das camadas de base de rodovias Huertas Cobos (2021) utilizou substituição total do agregado natural por RCD. Onde, o agregado reciclado era composto por uma mistura de agregado miúdo e gráudo em proporções de 50-50% e 30-70% também variando a quantidade de cimento Portland. Como resultado obteve concretos celulares com massa variando entre 1600-1800 kg/m³. Após ensaios de resistência à compressão, índice de suporte califórnia (CBR) e absorção de água, verificou-se que existe a possibilidade da utilização concretos celulares com agregados reciclados de RCD.

Freitas (2018) além da substituição do agregado natural por RCD, variou a quantidade superplastificante e espuma no traço do concreto celular. Neste estudo foi utilizada espumação por agitação mecânica. Para os traços a quantidade de superplastificante foi de 0,25% a 1% em peso de cimento Portland e a porcentagem de espuma de 10% a 13%. Também foi utilizada a substituição de areia por RCD de 100%. Como resultado a resistência do CC com RCD foi menor que o referência em todas as combinações. O melhor percentual de aditivo encontrado foi de 0,5% tanto para agregado natural como para o agregado reciclado. Como esperado um percentual menor de espuma obteve maior resistência à compressão. Devido as características físicas do RCD o concreto celular apresentou menor densidade e maior absorção de água, bem como um maior índice de vazios.

Em uma abordagem diferente Pasupathy, Ramakrishnan e Sanjayan (2021) verificaram a influência do agregado reciclado na estabilidade da espuma de concretos celulares geopoliméricos (GFC). Os aglomerantes geopoliméricos são preparados pela ativação alcalina de subprodutos industriais pozolânicos, como cinzas volantes, escórias de alto forno e minerais à base de argila. Em seu trabalho a matriz foi

composta de escória de alto forno e cinza volante como materiais precursores. Como ativador foi usado anidro metassilicato de sódio (Na_2SiO_3). A areia foi substituída por 50% e 100% de RCD, sendo que as densidades obtidas variaram entre 820 a 830 kg/m³. Como resultado a utilização de RCD em GFC reduziu o recalque de desespuma em até 83%, devido a presença de grandes quantidades de $Ca(OH)_2$ no RCD o que acelera a formação de gel de CSH em geopolímeros, diminuindo assim o tempo necessário para atingir a estabilidade das espumas de 120 min para 25 min. Isso indica que a substituição da areia por RCD melhora a estabilidade das espumas geopoliméricas.

Devido a maior utilização de água e menor resistência das partículas do RCD, os resultados de resistência à compressão são inferiores ao GFC com agregado natural. No entanto a utilização de agregado reciclado levou a tamanho de poros menores. Essa análise da porosidade e da distribuição do tamanho dos poros indica que as amostras apresentaram uma distribuição homogênea do tamanho dos poros com vazios de ar menores. Isso se deve à melhor estabilidade em estado fresco (PASUPATHY; RAMAKRISHNAN; SANJAYAN, 2021).

Para a produção de concreto celular autoclavado Rostirola (2013) utilizou cimento Portland e cal como aglomerante. O agente expensor utilizado foi o pó de alumínio e para agregado fino foi utilizado apenas o passante na peneira 0,15 mm tanto para o agregado natural (areia), como para o agregado reciclado. As substituições foram de 25% e 50% de areia por RCD. Por se tratar de um CCA o processo de cura em autoclave foi de 6 horas e pressão de 10 atm. Mesmo ciente da maior demanda de água do RCD não houve compensação de água. Devido a isso durante a mistura e moldagem foi percebido o aumento da viscosidade entre as misturas, crescendo de acordo com o aumento do teor de substituição de areia.

O mesmo autor realizou a caracterização dos agregados e obteve que o tamanho dos grãos de areia variaram de 103 μm a 211,9 μm e o RCD entre 12,45 μm e 191,6 μm . Logo essa diferença leva a um empacotamento maior das partículas. Devido a isso os traços com RCD apresentaram menor expansão e maior densidade onde para as substituições de 0%, 25% e 50% que tiveram densidades de 639,14, 786,18 e 902,61 kg/m³, respectivamente. A resistência à compressão foi verificada em 24 e 72 horas após o fim da cura em autoclave, onde obteve aumento de 33% para a idade mais avançada. Como resultado as médias em 72 horas foram: 1,76, 4,04 e 6,59 MPa para as substituições de 0%, 25% e 50%, respectivamente. Pode ser observado um aumento de 126% e 323% na resistência à compressão com uso de RCD. Tal resultado é creditado ao maior empacotamento dos grãos e também que o uso de RCD diminui a água disponível para a reação do cimento Portland reduzindo o fator água/cimento. Quando observada a porosidade ela foi levemente menor com uso de RCD, a absorção de água não foi muito afetada, sendo muito próximas em todos os teores. Através da caracterização de imagens utilizando o MEV, a micro estrutura foi similar para todas as

misturas estudadas (ROSTIROLA, 2013).

De forma análoga aos concreto celulares Wang *et al.* (2014) em seu estudo desenvolveram um concreto isolante térmico com agregado reciclado (RATIC). Para obter estrutura celular em vez de bolhas de ar, foram usadas esferas ocas de vidro e poros sólidos de perlita expandida, que também atuam como isolantes térmicos. O traço era composto de brita natural, brita reciclada, cimento Portland, areia e material isolante térmico, todos misturados com água, sendo também utilizado um aditivo redutor de água a base de policarboxilato. Como resultado o coeficiente de condutividade térmica e resistência à compressão do concreto diminuíram com o aumento da estrutura celular. Devido a utilização de agregado graúdo a massa específica do material variou de 1904 a 2125 kg/m³. Assim, apesar de apresentar boa resistência, a utilização de agregado graúdo, natural ou reciclado acarreta em um aumento significativo na massa específica do material.

Jones *et al.* (2012) utilizaram agregados reciclados e subprodutos industriais na produção de concretos celulares, onde sete materiais diferentes foram selecionados com base na disponibilidade geográfica e quantitativa no Reino Unido, sendo eles: agregado miúdo de demolição (RCD), cinzas de fundo de incinerador (IBA), resíduo de vidro moído (GF), areia de fundição (FS), resíduo do beneficiamento de caulim (CCS), cinzas volantes (CFA) e borracha de pneu triturada (CR). O traço de referência utilizou areia natural, cimento Portland, e um surfactante sintético comercialmente disponível para a produção de espuma. Os ensaios foram realizados em dois níveis de substituição do agregado natural, 50% e 100%, sendo utilizados dois teores de cimento Portland, 300kg/m³ e 400kg/m³, e quatro níveis de densidade plástica, 600 kg/m³, 1000 kg/m³, 1400 kg/m³ e 1600kg/m³. A relação a/c para todas as misturas foi mantida em 0,50, exceto para as misturas com CR, que foi aumentada para 0,60 para manter o comportamento autofluído.

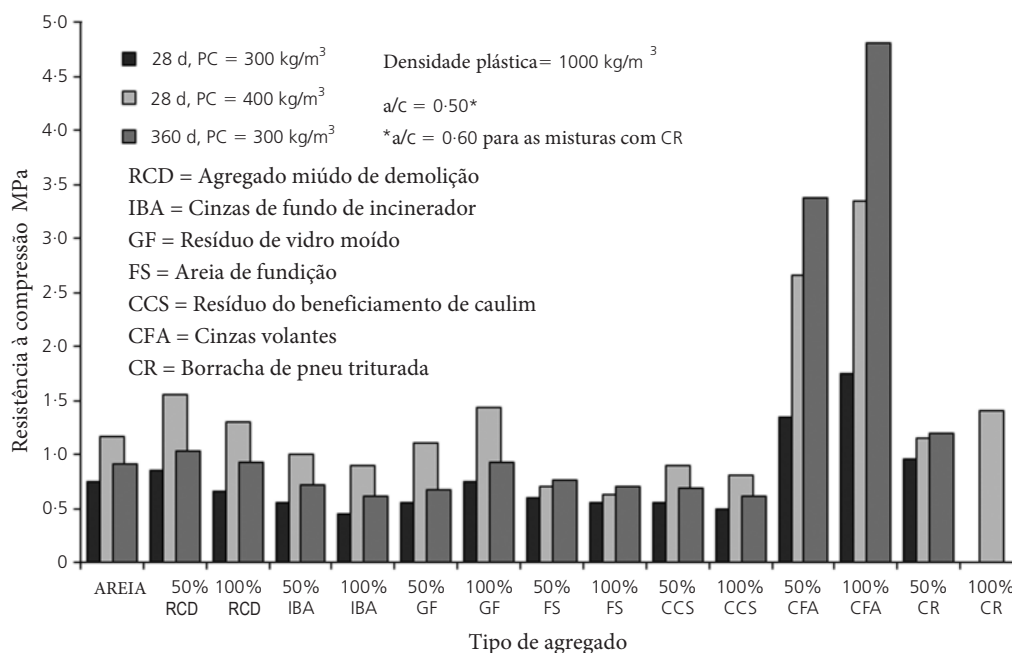
Os efeitos do uso de agregados reciclados e subprodutos industriais nas propriedades de concretos celulares obtidos por Jones *et al.* (2012) foram avaliados em termos de sua:

- (a) Consistência (medida pelo ensaio *slump flow test*): em todos os casos obtiveram comportamento autofluído, exceto substituição de 100% Pneu com teor de cimento Portland de 300 kg/m³. O abatimento aumentou com o teor de cimento Portland, também teve aumento com a densidade plástica, até 1000 kg/m³. Acima dessa densidade apresentou declínio nos resultados devido a redução da fase de espuma/pasta. Portanto, 1000 kg/m³ foi uma densidade plástica ótima em termos de fluxo de queda.
- (b) Resistência à compressão: a resistência à compressão também foi comparável com o concreto celular de referência. No entanto, o efeito pozolânico do CFA

resultou em um aumento significativo da resistência (Figura 8).

- (c) Retração por secagem: a retração por secagem foi superior ao da mistura de areia de referência, variando com as características RSA e nível de substituição de areia. Também aumentou com o teor de cimento Portland, mas diminuiu com o aumento da densidade do concreto celular.
- (d) Condutividade térmica: não foi encontrada diferença significativa entre RSA e concretos espumados de areia em sua propriedade de condutividade térmica. Para a faixa das densidades testadas de 600 a 1600 kg/m³, valores variaram entre 0,10 e 0,70 W/mK.

Figura 8 – Resistência à compressão de concretos celulares com agregados reciclados e resíduos industriais.



Fonte: Adaptado de Jones *et al.* (2012)

Tang *et al.* (2022) utilizaram em conjunto com o RCD, fibra PET e fibra PET reciclada. O RCD foi obtido de blocos de concreto, onde passaram por moagem e peneirado em uma peneira com diâmetro de 74 μ m.

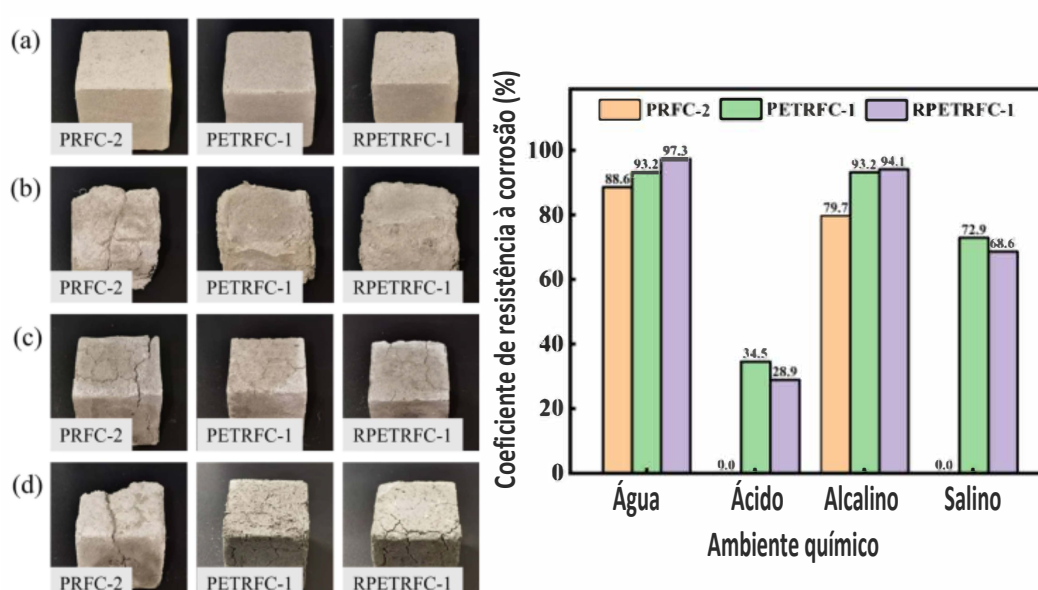
Foi usado cimento em teor de 70%, fator a/c 0,6, e o teor de RCD foi em substituição à FA que compunha os 30% de sólidos restantes. A espumação foi produzida por agitação mecânica. O produto químico utilizado para a formação da espuma foi uma com solução de peróxido de hidrogênio (água oxigenada) a 30%. Como estabilizador da espuma foi utilizado estearato de cálcio, com objetivo espessamento do filme líquido. A fibra PET e a fibra PET reciclada (resíduos de tecido de poliéster) foram usadas como materiais de reforço.

Os autores avaliaram a durabilidade em quatro ambientes químicos diferentes (água, ácido, alcalino e salino) durante 15 ciclos de molhagem e secagem. O dano aparente e a resistência à compressão dos corpos de prova foram registrados. A durabilidade foi avaliada para os traços: PRFC-2 (RCD 10% e FA 20%), PETRFC-1 (RCD 10%, FA 20% e 0,1% FIBRA DE PET) e RPETRFC-1 (RCD 10%, FA 20% e 0,1% FIBRA DE PET RECICLADA):

- (a) ambiente aquático: todos os espécimes não apresentaram danos aparentes na superfície após 15 ciclos seco-úmido.
- (b) ambiente ácido: todos os espécimes exibiram severa abscisão superficial. Os espécimes PRFC-2 foram completamente danificados após 9 ciclos.
- (c) ambiente alcalino: após 15 ciclos, fissuras apareceram nas superfícies de todas as amostras, os espécimes PRFC-2 apresentaram maior degradação que PETRFC-1 e RPETRFC-1.
- (d) ambiente salino: PRFC-2 resistiu apenas 12 ciclos. Corpos de prova com fibras foram cobertos de rachaduras, mas a integridade das amostras foi mantida pela adesão das fibras.

A Figura 9 mostra o modo de falha desses três grupos após ciclos de molhagem e secagem em ambientes de (a) água, (b) ácido, (c) alcalino e (d) salino. Ao lado são apresentados os índices de resistência residual após os ciclos.

Figura 9 – Ciclos de molhagem e secagem em diferentes ambientes



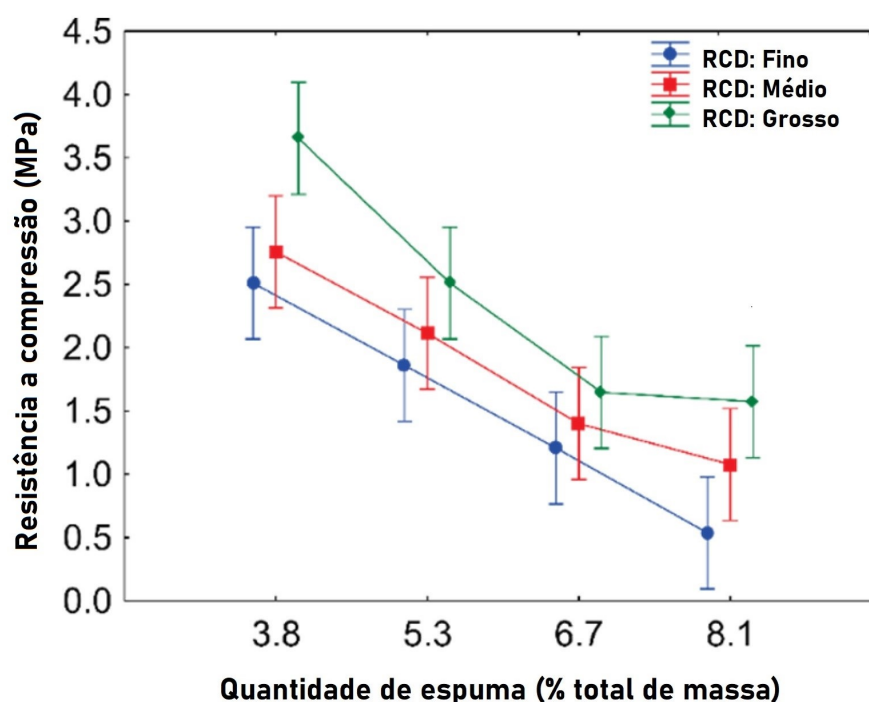
Fonte: Adaptado de Tang *et al.* (2022)

Os efeitos do teor de RCD na densidade seca, resistência à compressão levaram a conclusão que a densidade seca aumentou de 449 kg/m³ para 689 kg/m³ quando o teor de RCD passou de 0% para 30%, devido apresentar maior absorção de água e microestrutura irregular, dessa forma a incorporação dificultou a geração de gás no CC. Devido a esse aumento na densidade a resistência à compressão foi ligeiramente maior nos concretos celulares com RCD. Logo o RCD pode servir como um material alternativo potencial para concretos celulares (TANG *et al.*, 2022).

Favaretto *et al.* (2017) em seu estudo buscou determinar a influência da granulometria do RCD e da quantidade de espuma nas propriedades do concreto celular. Para tal foi utilizado cimento Portland CP V-ARI, como agregado miúdo foi utilizado RCD obtido de uma unidade de triagem localizada em Passo Fundo - RS. Três diferentes granulometrias foram utilizadas na produção: grosso (4,75 mm - 1,18 mm), médio (1,18 mm - 0,6 mm) e fino (< 0,6 mm). O agente espumante utilizado na produção da espuma foi Amida 90 na proporção de 1/30, e agitação mecânica para a formação da espuma com densidade de 75 kg/m³.

Foi observado que o aumento da quantidade de espuma reduz a resistência à compressão devido à incorporação de ar na mistura, a qual também reduziu a sua densidade. As amostras com RCD grosso apresentaram maior resistência à compressão que aqueles com RCD médio, e estes maiores que com RCD fino (Figura 10). O efeito encontrado pelos autores foi explicado devido que o resíduo de grão fino absorve mais água do que o grosso (FAVARETTO *et al.*, 2017).

Figura 10 – Resistência à compressão em relação a quantidade de espuma



Fonte: Adaptado de Favaretto *et al.* (2017)

Ainda, a quantidade de espuma e a granulometria do RCD tiveram influências significativas nas propriedades físico-mecânicas estudadas. A quantidade de espuma foi a variável independente com maior influência nas variáveis dependentes. Os resultados da caracterização do RCD obtido mostram que a granulometria, composição química (Tabela 1), densidade e absorção de água foram adequadas para a utilização em concreto celular, sendo a granulometria média a mais condizente com a NBR 7.211 ABNT (2022c) (FAVARETTO *et al.*, 2017).

Tabela 1 – Composição química por FRX do RCD

Óxidos	Granulometria de resíduos de RCDs		
	Fino	Médio	Grosso
SiO_2	78,38	77,75	73,05
Al_2O_3	3,39	3,74	4,83
TiO_2	0,24	0,23	0,35
Fe_2O_3	1,30	1,39	1,96
MnO	0,06	0,05	0,06
MgO	1,23	1,23	1,38
CaO	6,53	6,72	8,43
Na_2O	Nd	Nd	Nd
K_2O	0,84	0,93	1,15
P_2O_6	0,06	0,04	0,06
SO_4	1,02	0,79	1,02
LOI	6,96	7,13	7,71
Total	100,0	100,0	100,0

Fonte: Adaptado de Favaretto *et al.* (2017)

2.3 Propriedades mecânicas residuais do concreto celular

Incêndios são um dos principais desastres que podem ocorrer em uma construção, podendo danificar ou até mesmo destruir estruturas e/ou sistemas de uma edificação. Pois a estabilidade dos componentes do edifício é muito enfraquecida sob altas temperaturas e a ação do fogo, incluindo as propriedades mecânicas como resistência à compressão, tração, módulo de elasticidade, entre outras (TAN *et al.*, 2017).

Para a NBR 16.945 (ABNT, 2021d) resistência ao fogo é um parâmetro que caracteriza os elementos construtivos por meio de ensaios e definido em termos do tempo em minutos. A norma BS476-20 (BS, 1987) especifica que o objetivo de determinar a resistência ao fogo é avaliar o comportamento de um espécime de um elemento de construção quando submetido a aquecimento definido de condições e pressão. O princípio do método é a utilização de uma amostra representativa do elemento exposto a um regime especificado de aquecimento, durante o ensaio a

amostra é monitorada com base nos critérios descritos como padrão. A resistência ao fogo do elemento de teste é expressa como o tempo para o qual os critérios apropriados foram satisfeitos.

De forma geral apesar de o concreto apresentar resistência ao fogo maior que outros materiais como madeira ou aço ele acaba sendo muito danificado pela exposição a elevadas temperaturas. Nessas situações o concreto sofre alterações químicas e físicas, que resultam na deterioração das propriedades (LI *et al.*, 2020).

A deterioração do concreto causada por altas temperaturas é geralmente atribuída pelos seguintes aspectos: fissuras causadas pela evaporação de água livre; fissuras causadas pela expansão térmica da matriz cimentícia e agregados; decomposição da matriz de cimento endurecido e agregados. Os danos causados pelo primeiro e segundo aspecto podem ser classificados como danos por alterações físicas e o terceiro como danos por alterações químicas. Assim, a deterioração é o resultado combinado dos três aspectos (LI *et al.*, 2020).

Alguns autores estudaram a deterioração de diversos tipos de concreto sob exposição a altas temperaturas, onde Souza *et al.* (2016), Fernandes *et al.* (2017) e Li *et al.* (2020) abordam a ação da temperatura no concreto convencional. Othuman e Wang (2011), Mydin e Wang (2012), Tan *et al.* (2017) e Shang, Qu e Li (2022) estudaram os efeitos no concreto celular. Bardini e Godinho (2019) verificam a ação de altas temperaturas em concreto com utilização de RCD.

Em todos os casos as faixas de temperaturas do processo de desidratação e deterioração do concreto foram muito similares, devido a matriz base ser a mesma, cimento portland, e o agregado reciclado de RCD ser também composto em sua maior parte de argamassa de cimento.

Com o início do incremento de temperatura o primeiro efeito a acontecer é a evaporação da água livre que não tenha reagido com o cimento durante o processo de cura. Pode-se dizer que ela é completamente eliminada em temperaturas de até 120 °C ou 170 °C (OTHUMAN; WANG, 2011; TAN *et al.*, 2017). A perda de água quimicamente ligada ocorre através da decomposição dos principais hidratos do cimento, incluindo gel de silicato de cálcio hidratado (CSH), hidróxido de cálcio (CH) e etringita que irão desidratar quando expostos a altas temperaturas (MEHTA; MONTEIRO, 2008; LI *et al.*, 2020).

O CSH começa a desidratar próximo de 110 a 140 °C e também o início da decomposição da etringita a 120 °C. Na faixa de temperatura entre 200 °C e 300 °C, ocorre a maior parte da perda de água quimicamente ligada, devido a decomposição do gel CSH e das fases de sulfoaluminato da pasta de cimento. Aqui 75% da água quimicamente combinada é liberada. Até 750 °C os 25% restantes da água combinada são evaporados (MYDIN; WANG, 2012; TAN *et al.*, 2017).

Outra fase da deterioração do concreto ocorre com a decomposição de $Ca(OH)_2$

em $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ entre 450 °C a 530 °C. Entre 500 °C e 600 °C ocorre a transformação de α quartzo em β quartzo. Entre 750 °C e 850 °C, ocorre a última etapa das alterações físico-químicas no concreto que pode ser atribuída à liberação de dióxido de carbono (CO_2) do carbonato de cálcio (CaCO_3) (MYDIN; WANG, 2012).

Em casos de combate a incêndio, onde o concreto quente é exposto à água o CaO se hidrata rapidamente transformando-se em $\text{Ca}(\text{OH})_2$ novamente. Com essa transformação ocorre a expansão devido a cristalização do carbonato de cálcio causando mais rachaduras ao concreto (MYDIN; WANG, 2012; COELHO *et al.*, 2020).

Como resultado da exposição a altas temperaturas a desidratação não é simplesmente a inversão da hidratação dos grãos de cimento. A composição química entre o cimento Portland e a pasta de cimento desidratada (DPC) são bem diferentes, como é apresentado na Tabela 2 (LI *et al.*, 2020).

Tabela 2 – Composição química do cimento e da pasta de cimento desidratada

Tipo de material	Temperatura de desidratação (°C)	Composição (%)				
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	CaO
Cimento Portland	-	69,72	6,08	7,76	9,36	-
	700 °C	3,4	60,2	3,4	5,6	20,5
DPC	800 °C	3,7	48,8	1,9	11,1	23,3
	900 °C	1,3	56,6	0,9	12,1	17,0

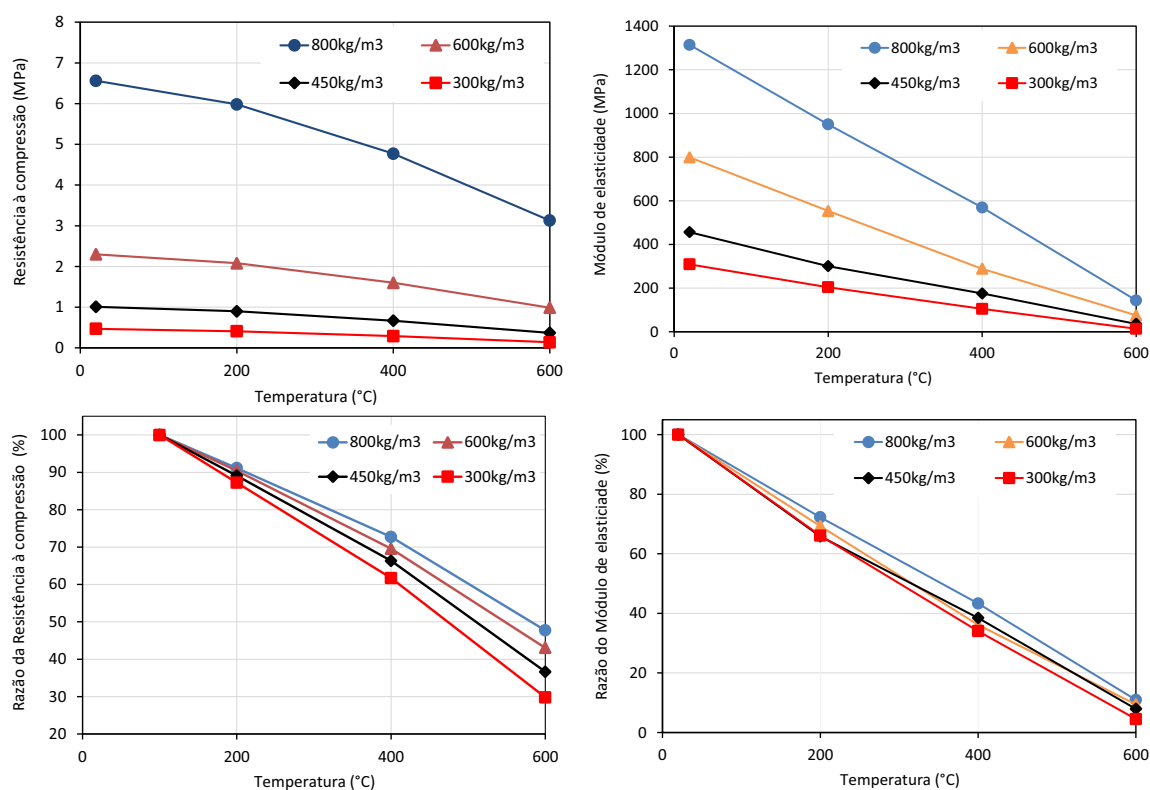
Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2020)

O efeito de altas temperaturas no concreto celular sem a utilização de agregado miúdo foi estudado por Tan *et al.* (2017). Em seu trabalho foram ensaiados concretos em quatro densidades distintas, 300, 450, 600 e 800 kg/m³. Os ensaios foram realizados nas temperaturas de 200 °C, 400 °C e 600 °C. Para mostrar suficientemente a influência da alta temperatura no CC, todas as amostras aquecidas foram mantidas por 60 min em temperatura constante após atingirem o valor alvo.

Os autores verificaram a variação da massa, onde todas as amostras tiveram uma ligeira diminuição na densidade com o aumento da temperatura. Em traços com densidade maior, esta tendência torna-se cada vez mais evidente devido a quantidade de água livre no concreto celular aumentar. Os resultados da resistência à compressão e módulo de elasticidade são demonstrados na Figura 11. A 200 °C a redução dos resultados de resistência à compressão não é significativa, mantendo 87% do valor original sem aquecimento. Acima de 200 °C, a decomposição do gel CSH e das fases sulfoaluminato causaram trincas tendo um efeito significativo na resistência à compressão. Além disso, pode-se verificar que o impacto da temperatura se torna cada vez maior com a diminuição da densidade. O módulo de elasticidade foi mais

afetado, onde o gráfico percentual indicou uma diminuição linear com o acréscimo da temperatura em todas as densidades, sendo que a 600 °C os valores ficaram próximos de 10% do sem aquecimento (TAN *et al.*, 2017).

Figura 11 – Resistência à compressão das amostras em diferentes temperaturas



Fonte: Adaptado de Tan *et al.* (2017)

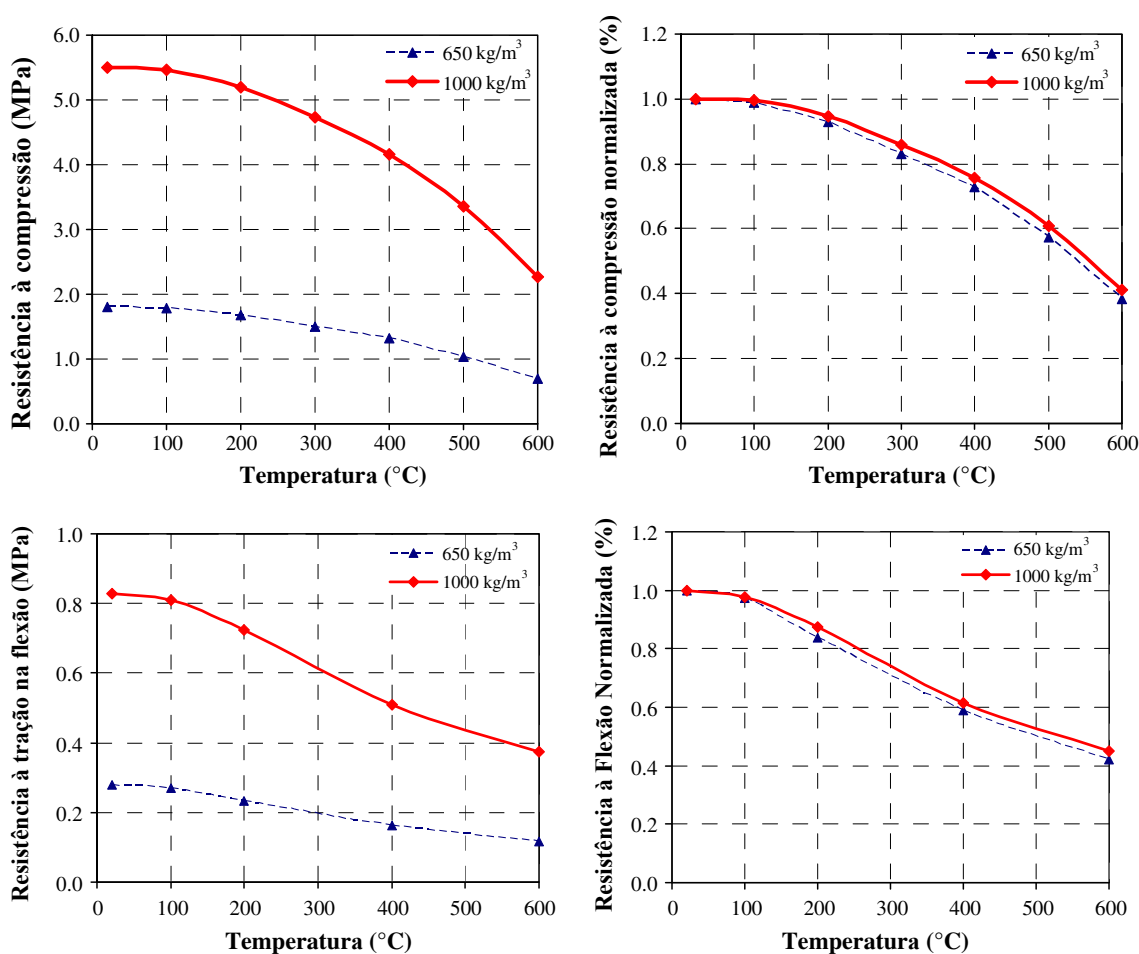
Mydin e Wang (2012) avaliaram a resistência à compressão, tensão-deformação, módulo de elasticidade e a resistência à tração na flexão para concretos celulares de densidades de 650 kg/m³ e 1000 kg/m³, submetidos a temperaturas de 20 a 600 °C. O CC utilizado neste estudo foi feito de cimento Portland, areia fina, água e espuma estável. Os corpos de prova foram ensaiados na compressão e flexão ainda em elevadas temperaturas, isso representa uma situação real onde os elementos estão carregados durante um incêndio.

O efeito da alta temperatura na resistência mecânica do concreto celular pode ser observado na Figura 12. As amostras expostas até 200 °C tiveram a redução nos resultados creditada a liberação de água livre e parte da água quimicamente ligada, isso gera microfissuras e redução da coesão das forças de *Van der Waal* entre as camadas de hidrato de silicato de cálcio. No entanto, a redução na resistência à compressão não foi tão significativa mantendo cerca de 94% do valor original. Nos resultados de tração na flexão a redução foi um pouco mais significativa mantendo

cerca de 85% do valor original.

Entre 200 °C e 400 °C, a decomposição do gel CSH e das fases sulfoaluminato causaram trincas nos corpos de prova. A 400 °C, a resistência à compressão das amostras foi cerca de 75% de seu valor inicial, e a resistência à tração foi aproximadamente 60% da inicial para ambas as densidades. Na temperatura de 600 °C, o CC manteve apenas cerca de 40% da resistência à compressão original para ambas as densidades. A resistência à tração à flexão alcançada foi de apenas cerca de 40% e 45% para densidades de 650 kg/m³ e 1000 kg/m³, respectivamente (MYDIN; WANG, 2012).

Figura 12 – Resistência à compressão e tração na flexão em diferentes temperaturas

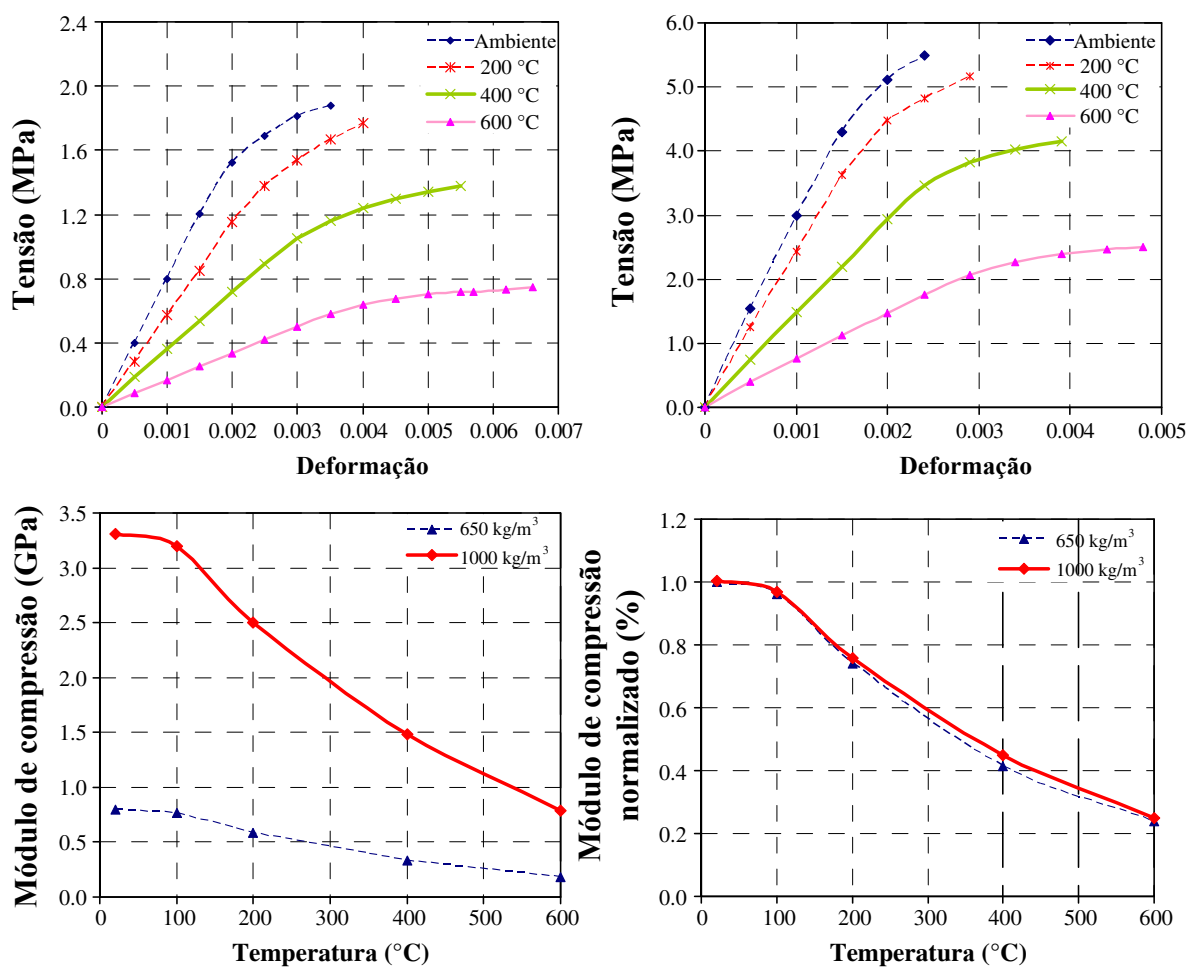


Fonte: Adaptado de Mydin e Wang (2012)

Na sequencia os autores obtiveram os valores de tensão-deformação onde a deformação correspondente ao pico de resistência aumentou com o aumento da temperatura. Esse aumento da deformação resulta da abertura de fissuras iniciadas pelo aquecimento a temperaturas mais elevadas. Também foi verificado o módulo de elasticidade que em comparação com a redução da resistência, e redução do módulo

de elasticidade é maior. A perda no módulo de elasticidade começou imediatamente após o aquecimento quando as amostras começaram a secar. O módulo de elasticidade a 200 °C, 400 °C e 600 °C foi, respectivamente, cerca de 75%, 40% e 25% do valor original para ambas as densidades, como pode ser observado na Figura 13 (MYDIN; WANG, 2012).

Figura 13 – Tensão-deformação e módulo de elasticidade em diferentes temperaturas

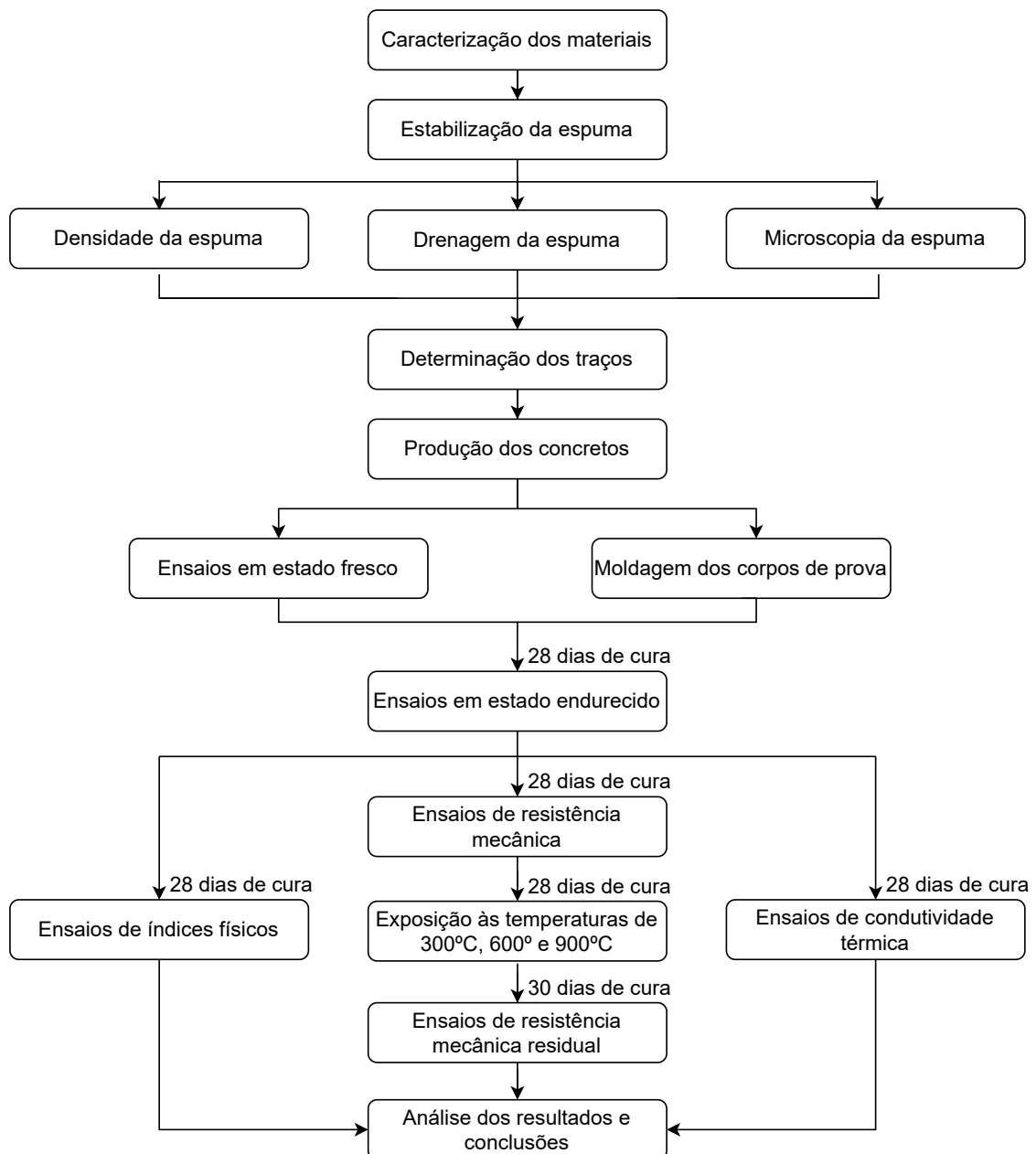


Fonte: Adaptado de Mydin e Wang (2012)

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são abordadas as principais propriedades dos materiais, bem como os métodos e procedimentos utilizados para a realização dos ensaios presentes no trabalho. A Figura 14 ilustra um organograma simplificado da cronologia dos procedimentos experimentais que foram realizados.

Figura 14 – Organograma simplificado dos métodos experimentais



Fonte: Autoria própria

3.1 Materiais

Neste item estão descritos os materiais e os métodos utilizados para a caracterização dos mesmos. Os materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho são: cimento Portland CPV ARI-RS, areia natural de rio, areia de RCD, aditivo espumante e goma xantana.

3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland escolhido para a produção dos concretos celulares foi o cimento brasileiro CP V-ARI RS, devido a sua alta resistência nas primeiras idades e pela menor quantidade de adições. Tal cimento é amplamente utilizado na produção industrial de artefatos pré-moldados, onde é necessário rápida desforma. Este cimento além da alta resistência inicial também possui resistência a sulfatos, recebendo o sufixo RS. O cimento foi adquirido na região de Alegrete/RS.

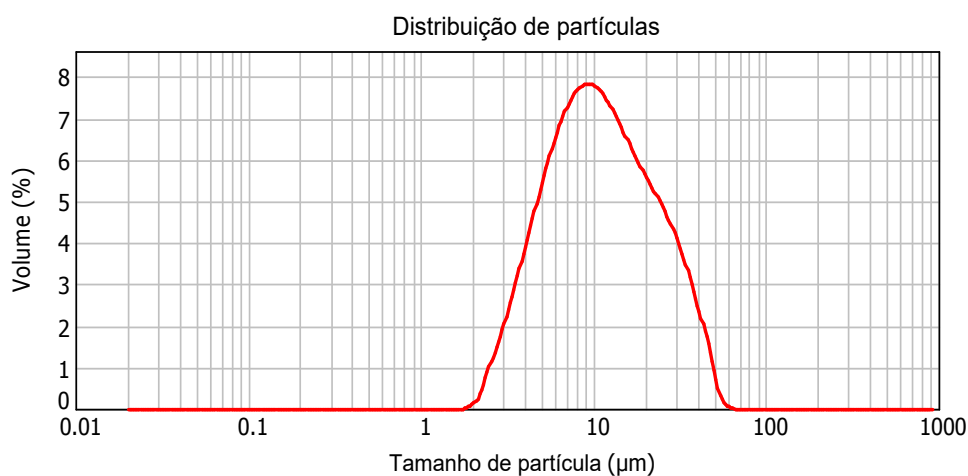
Figura 15 – Cimento CP V-ARI RS



Fonte: Autoria própria

A caracterização do cimento foi realizada a fim de obter os seguintes parâmetros: A determinação da massa específica do cimento Portland de acordo a NBR 16.605 (ABNT, 2017b) por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier, onde obteve-se o resultado de $2,97 \text{ g/cm}^3$. E a determinação da composição granulométrica a laser do material, mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Distribuição granulométrica cimento

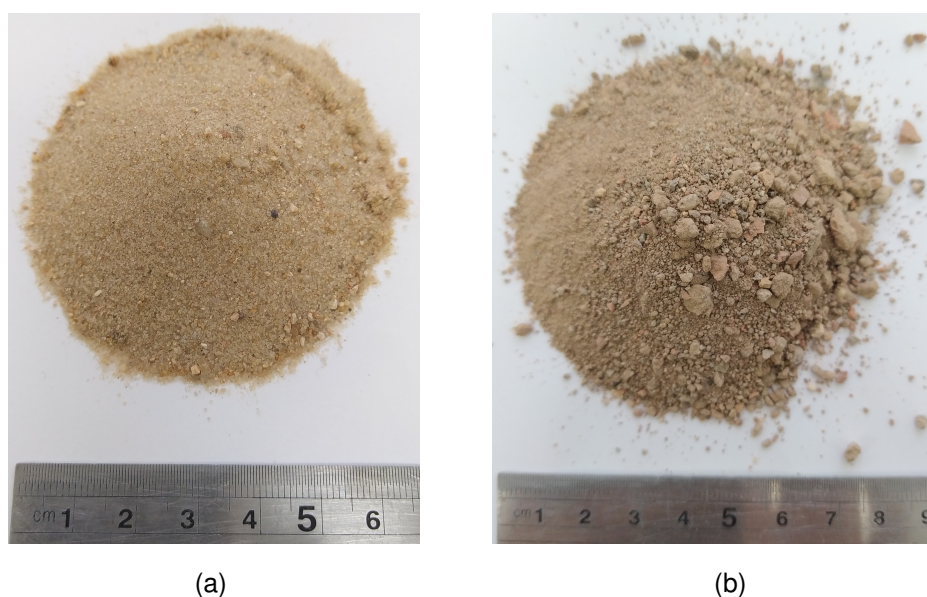


Fonte: Autoria própria

3.1.2 Agregados

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados dois agregados miúdos: areia natural de rio (AN) e agregado miúdo reciclado de RCD. A areia natural (Figura 17(a)) é de proveniente rio e comercializada na região de Alegrete/RS. A areia de RCD (Figura 17(b)) foi fornecida pela empresa Soluções em Beneficiamento de Resíduos e Comércio Ltda (SBR), unidade de Canoas/RS. O material tem origem do processamento de resíduos de obras e de demolições da cidade de Canoas/RS. Como resultado são obtidos agregados graúdos e miúdos que são separados por granulometria.

Figura 17 – Agregados: a) Areia de rio e b) Areia de RCD



Fonte: Autoria própria

Para a caracterização física do RCD foi utilizada a NBR 15.116 (ABNT, 2021a),

a qual especifica os requisitos para produção e recepção dos agregados reciclados obtidos a partir do beneficiamento de resíduos da construção civil, classe A, para a utilização em argamassas e concretos.

A determinação da composição dos agregados reciclados miúdos foi feita conforme especificado na NBR 15.116 (ABNT, 2021a). Foi utilizada uma amostra representativa, a qual foi peneirada, e posteriormente feito uso da fração passante na peneira de nº4, com abertura de malha de 4,8 mm, e retida na peneira de nº8, com abertura de malha de 2,4 mm. Essa fração foi lavada, seca em estufa e por fim resfriada ao ar livre. Após estes procedimentos foi realizada a contagem e identificação de no mínimo 300 grãos (Figura 18). De acordo com os critérios de classificação dos grupos, os fragmentos eram compostos por pasta de cimento (G1), rocha (G2), cerâmica vermelha (G3) e materiais indesejáveis não identificados nos grupos anteriores (G4).

Figura 18 – Fração de RCD separada para a contagem de grãos



Fonte: Autoria própria

Com a finalidade de determinar o percentual de material para cada grupo, foi realizado a divisão da quantidade de grãos de cada grupo pelo número total de grãos da amostra de ensaio. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Determinação da composição dos agregados reciclados

	Classificação	Percentual (%)
G1	Pasta de cimento	54,83%
G2	Rocha	16,36%
G3	Cerâmica vermelha	22,86%
G4	Materiais indesejáveis	5,95%

Fonte: Autoria Própria

Para o uso dos agregados reciclados em concretos sem função estrutural, são utilizadas três subclasses de acordo com o teor de cerâmica vermelha ou branca não

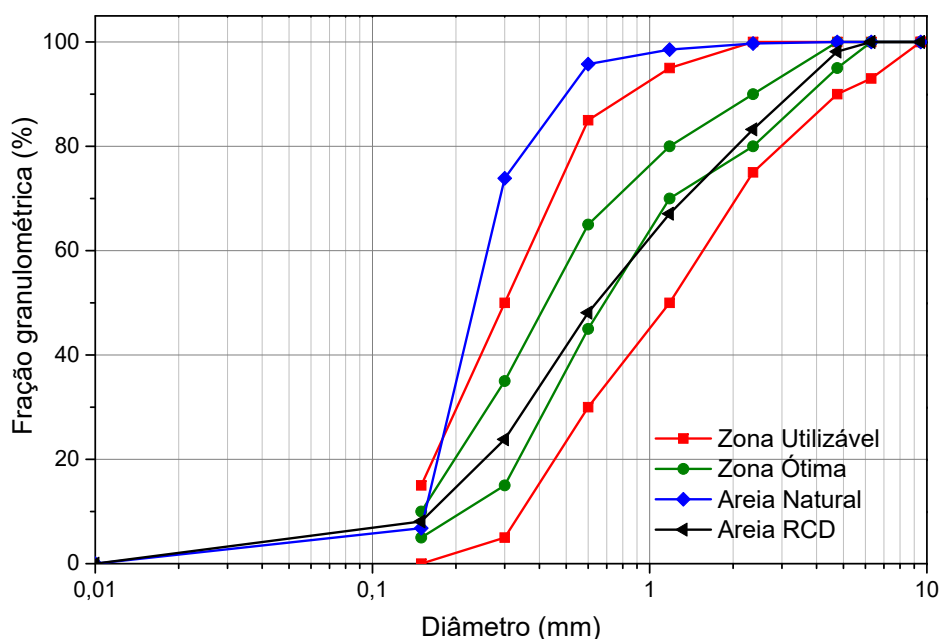
polida (G3), onde: 0% = ARCO (agregado reciclado de concreto); < 10% = ARCI (agregado reciclado cimentício) e < 40% = ARM (agregado reciclado misto). Dessa forma para o RCD avaliado o valor de G3 encontrado foi de 22,86%, logo é classificado como ARM.

O restante da caracterização foi executada de forma igual para os dois agregados, sendo realizadas: a determinação da composição granulométrica pela NBR 17.054 (ABNT, 2022a), a densidade e a absorção de água segundo a NBR 16.916 (ABNT, 2021c), a massa unitária e o índice de vazios de acordo com NBR 16.972 (ABNT, 2021e).

Antes do início dos ensaios, separou-se cerca de 40 kg de cada um dos materiais que foram armazenados em bandejas e secos em estufa pelo período de 24h, em temperatura de $105(\pm 5)$ °C com a finalidade de retirar a umidade existente. Após o tempo, aguardou-se o resfriamento a temperatura ambiente. Para garantir a homogeneidade dos materiais foi utilizado um quarteador para a reduzir a amostra.

Após o peneiramento do material foi obtido as frações de cada tamanho de grãos, sendo esses dados utilizados para a construção das curvas granulométricas mostradas na Figura 19. Na mesma imagem são apresentados os limites aceitáveis e limites ótimos especificados na NBR 7211 (ABNT, 2022c). Como pode ser observado a areia natural é bastante fina, ficando em quase todas as faixas de distribuição fora das zonas aceitáveis. O agregado reciclado permanece em quase todas as frações dentro da zona ótima da norma.

Figura 19 – Granulometria dos agregados miúdos



Fonte: Autoria própria

Apesar dos agregados apresentarem granulometria distinta entre si, foi optado em utilizar os mesmos sem nenhum processamento posterior de peneiramento. Tal escolha foi devido a areia natural ser comumente encontrada na região de Alegrete/RS. E o RCD, por ser um material comercial de fácil aquisição. Nos dois casos a utilização destes materiais *in natura* facilita a reprodução dos resultados obtidos.

A partir do resultados obtidos nos ensaios de caracterização física dos agregados foi montada a Tabela 4, que apresenta as características da areia natural e da areia de RCD.

Tabela 4 – Caracterização da areia natural e do RCD

Norma	Caracterização	Areia	RCD
NBR 16.972	Massa unitária solta (g/cm ³)	1,55	1,19
	Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,69	1,35
NBR 16.916	Densidade seca (g/cm ³)	2,5	2,19
	Densidade sat. sup. seca (g/cm ³)	2,51	2,3
	Absorção de água (%)	0,18	4,73
NBR 17.054	Diâmetro máx. (mm)	0,6	4,75
	Módulo de finura	1,25	2,71

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado a massa unitária solta e a massa unitária compactada do RCD tiveram valores menores que a areia natural, com resultados 23% e 20% menores respectivamente. A densidade seca e a densidade saturada com superfície seca (SSS) também apresentaram valores menores para o RCD com 12% e 8% menores que a areia natural. Em contrapartida a absorção de água do RCD foi superior com valor 26 vezes maior que o resultado da areia natural.

Os valores de diâmetro máximo do agregado também apresentaram valores superiores para o RCD onde o mesmo teve valor de 4,75 mm, para a areia natural o diâmetro máximo encontrado foi de 0,6 mm. O módulo de finura para o RCD foi de 2,71 sendo classificada como areia média, a areia natural apresentou valor de 1,25 e classificada como areia muito fina.

3.1.3 Agente espumante

Como agente espumante foi utilizado o aditivo CELUBLOCK (Figura 20), produzido pela empresa Liga Química Industrial, sendo um tensoativo sintético de coloração amarela com massa específica de 1,01 g/cm³ e teor de sólidos de 14,6%. O agente espumante tem sua aplicação em espuma pré-formada para concreto celular, onde para o preparo da solução deve ser diluído em água na proporção de 1/30 (1 litro de aditivo para 30 litros de água).

Figura 20 – Agente espumante CELUBLOCK



Fonte: Autoria própria

Para a formação da espuma foi utilizado o gerador de espuma ECOFOAMER-100W-10BP (Figura 21), composto por uma bomba hidráulica e um compressor de ar. A bomba é responsável pela sucção da mistura aditivo/água e o compressor responsável pela liberação de ar sob pressão para gerar a espuma.

Figura 21 – Gerador de espuma ECOFOAMER-100W-10BP



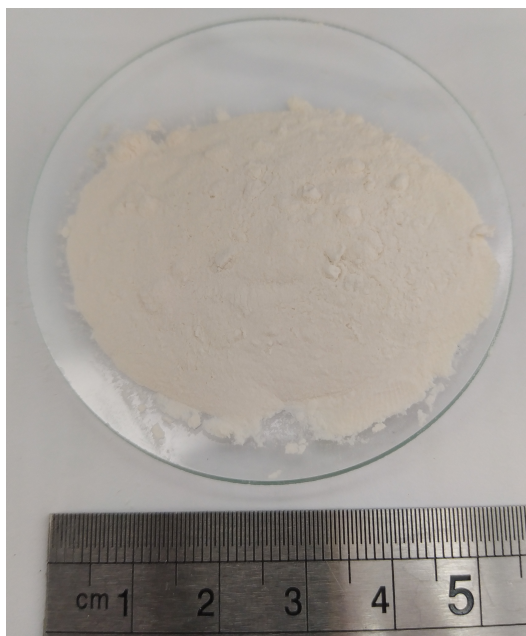
Fonte: Autoria própria

3.1.4 Goma Xantana

A goma xantana foi escolhida como agente espessante para a estabilização da espuma, devido possuir alta viscosidade, características pseudoplásticas e ser solúvel em água. A goma xantana utilizada para o trabalho é de uso alimentício, sendo um pó de coloração branca. Foi adquirida em uma mercearia do comércio da cidade de

Alegrete/RS. A Figura 22 mostra a goma xantana utilizada para a estabilização da espuma utilizada na produção de concretos celulares.

Figura 22 – Goma Xantana



Fonte: Autoria própria

3.2 Métodos

Nesse item são apresentados os procedimentos utilizados durante as etapas experimentais do trabalho para a produção e caracterização dos concretos celulares. Estes foram divididos em: Estabilização da espuma; Determinação dos traços; Método de mistura; Moldagem dos corpos de prova; Ensaio no estado fresco; Ensaio no estado endurecido: Índices físicos, Propriedades mecânicas e propriedades mecânicas residuais após exposição as temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C.

3.2.1 Estabilização da espuma

A fim de obter uma espuma estável e adequada para utilização em concreto celular, a mesma foi ensaiada de forma a obter a densidade da espuma e o percentual de líquido drenado. Aliado a isso foram feitas imagens de microscopia óptica com o objetivo de identificar e medir a espessura da membrana da bolha (EM) e a espessura do filme líquido (EF) formado entre as bolhas.

Os ensaios citados no parágrafo anterior foram realizados para diferentes misturas de agente espumante e goma xantana. Como controle foi ensaiada uma espuma referência denominada REF. Para as demais espumas geradas foram adicionadas diferentes porcentagens de goma xantana (XG), calculadas em relação ao percentual do peso de agente espumante. Os teores utilizados são apresentados na Tabela 5. Tais

valores foram utilizados à fim de ampliar o conhecimento da ação da XG na espuma de concretos celulares, uma vez que Hajimohammadi, Ngo e Mendis (2018) e Zhu *et al.* (2020) utilizaram valores até 0,5% de XG. Durante os ensaios, foi observado para o teor de 2% de XG, que a solubilização da mesma era mais difícil, o que indica a probabilidade de estar próximo do ponto de saturação da goma xantana. Desta forma, foi adotado o percentual de 2% como critério de parada.

Tabela 5 – Composição das espumas

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

Fonte: Autoria própria

Devido a XG ser um pó ela foi solubilizada na água do preparo da solução de agente espumante. O processo de solubilização foi testado previamente, de forma que a melhor homogeneidade e dispersão foram obtidas com o auxílio de um agitador magnético (Figura 23).

Figura 23 – Processo de solubilização da goma xantana em agitador magnético



Fonte: Autoria própria

3.2.1.1 Densidade da espuma

A determinação da densidade da espuma foi realizada a partir do preenchimento com espuma de um recipiente com volume e massa conhecidos. Este, posteriormente foi pesado e calculada a densidade da espuma pela Equação 3.1.

$$\gamma_{esp} = \frac{m_1 - m_0}{V} \quad (3.1)$$

Onde:

γ_{esp} = massa específica da espuma (g/cm³);

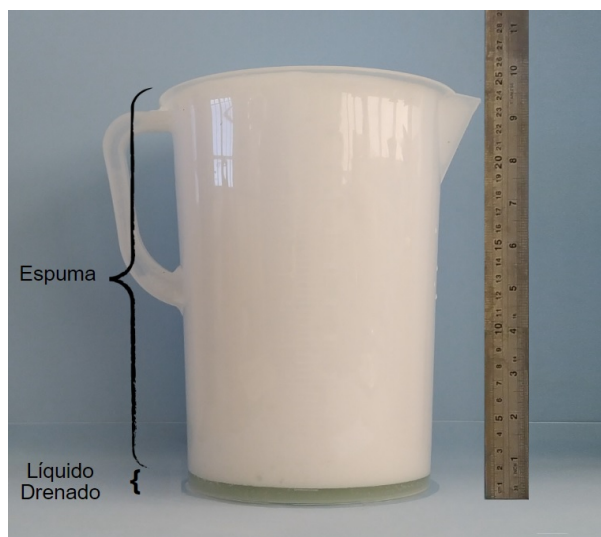
m_1 = massa do recipiente cheio com espuma (g);

m_0 = massa do recipiente vazio (g).

3.2.1.2 Drenagem da espuma

O ensaio de drenagem da espuma consiste em medir o volume de líquido drenado, de uma quantidade conhecida de espuma durante a evolução do tempo. Para o ensaio foi utilizado um bécquer com volume de 6 litros, que foi preenchido com espuma. O volume drenado foi medido a cada cinco minutos, sendo o tempo inicial igual a zero (0) minutos e o tempo final 30 minutos. Os resultados foram expressos em um gráfico do percentual de líquido drenado em função do tempo. A Figura 24 mostra o bécquer com espuma utilizado para a realização do ensaio de drenagem da espuma.

Figura 24 – Ensaio de drenagem da espuma

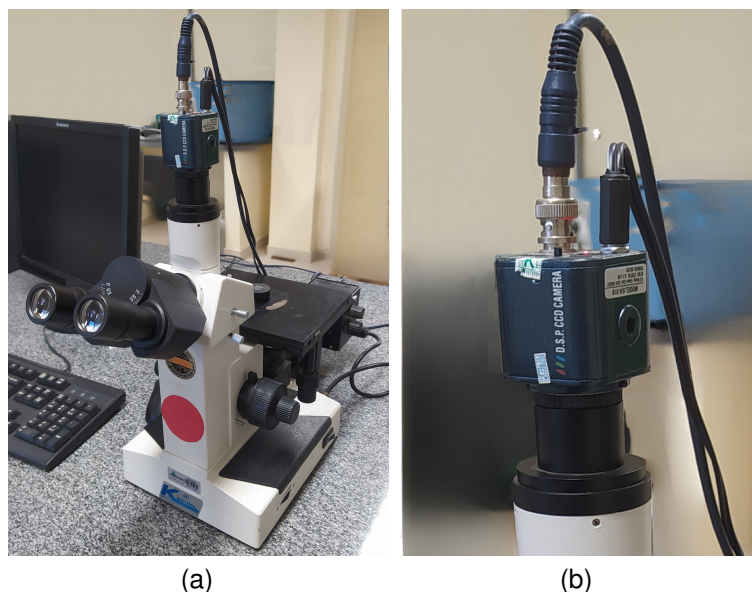


Fonte: Autoria própria

3.2.1.3 Microscopia óptica da espuma

Para os ensaios de microscopia óptica foi utilizado o microscópio metalográfico de platina invertida Kontrol Im100i com aumento de 100x instrumentado com câmera SH-318 1/3 Sony color D.S.P. CCD com resolução de 720x480 px conforme podem ser observados na Figura 25.

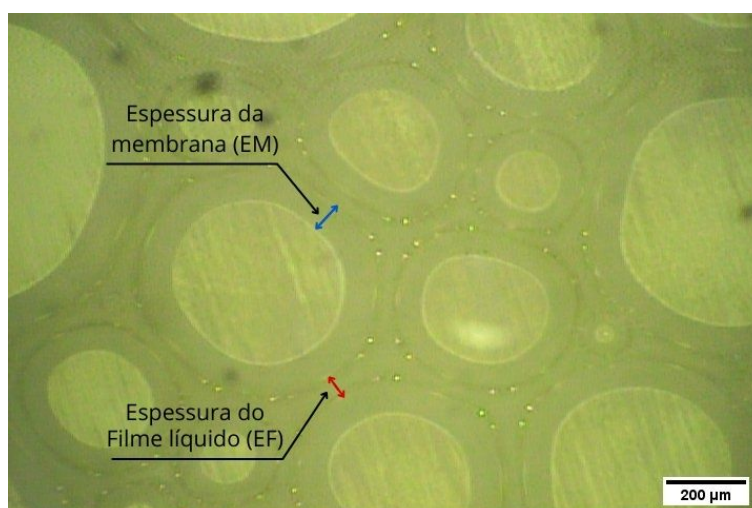
Figura 25 – Microscopia óptica: a) Microscópio óptico e b) Câmera SH-318



Fonte: Autoria própria

Para cada composição de espuma foi retirada uma amostra e a mesma foi levada para análise de microscopia óptica. As espumas foram colocadas em uma lâmina e prensadas com uma lamínula para obtenção das imagens no microscópio. Para garantir que não ocorra o envelhecimento da espuma, o procedimento foi realizado logo após a produção da mesma. Após a obtenção das imagens, e com o auxílio do *software* ImageJ, foi medida a espessura da membrana da bolha (EM) e a espessura do filme líquido da espuma (EF). Para cada composição de espuma foram obtidas quatro imagens, nas quais foram realizadas vinte e cinco medidas da EM e vinte e cinco medidas de EF e calculadas as médias das mesmas. A Figura 26 mostra uma imagem de microscopia óptica com a indicação de EM e EF da espuma.

Figura 26 – Microscopia óptica da espuma



Fonte: Autoria própria

3.2.2 Determinação dos traços

Em concretos celulares a definição dos traços depende, antes de mais nada, das características desejadas para a aplicação. Assim em primeiro lugar deve-se definir as necessidades de massa específica. Com esta definida, teremos enquadradas as demais características físico-mecânicas quando combinadas com o consumo de cimento e fator água-cimento. Desta forma o conhecimento experimental das variações possíveis entre os constituintes levará à decisão da dosagem economicamente adequada à aplicação (FERREIRA, 1987).

Conforme Mydin e Wang (2012) concretos celulares com massa específica próxima de 650 kg/m³ podem ser utilizados em divisórias leves sem função estrutural, enquanto densidades acima de 1000 kg/m³ apresentam propriedades mecânicas adequadas para utiliza-lo como um material de preenchimento de carga leve, podendo ser combinado com aço na construção de painéis compostos leves.

Com base nisso, a determinação dos traços foi feita de acordo com o método de Teixeira Filho e Tezuka (1992). Primeiramente devem ser definidos os parâmetros de: Massa específica em estado fresco do concreto celular ($\gamma_{ef} = \text{kg/m}^3$), relação água-cimento (a/c) e consumo de cimento Portland ($C_c = \text{kg/m}^3$). Após isso o restante dos materiais é calculado para a composição de um metro cúbico de concreto celular.

Devido os vazios de ar influenciarem significativamente na resistência à compressão a Equação 3.2 de Fereti foi adaptada por Tam *et al.* (1987), com intuito de relacionar a resistência à compressão com o volume de ar presente em concretos celulares. Assim utilizando os teores em volume de ar, cimento Portland e água, tem-se a estimativa da resistência à compressão do concreto celular.

$$f_{c28} = K \left[\frac{1}{1 + a/c + ar/c} \right]^n \quad (3.2)$$

Onde:

f_{c28} = resistência à compressão (MPa)

K e n são constantes empíricas em concretos celulares

K = para idade de 28 dias igual a 5350

n = para idade de 28 dias igual a 3,96

Para os traços com utilização de RCD foi feita a correção de água para o agregado conforme a NBR 15.116 (ABNT, 2021a), devido que agregados reciclados apresentam maior absorção de água. Ainda segundo a mesma norma esta correção não é utilizada para o cálculo da relação a/c de materiais cimentícios.

Conforme a ACI 523.3R-14 (ACI, 2014) a massa específica em estado endurecido do concreto celular (γ_{ee}) é aproximadamente 80 kg/m³ menor que a γ_{ef} , podendo chegar até 160 kg/m³ menor em condições de baixa umidade, aproximando-se a uma

densidade seca em estufa. De forma geral para cálculos de engenharia, γ_{ee} é estimada pela Equação 3.3.

$$\gamma_{ee} = \gamma_{ef} - 80 \quad (3.3)$$

Onde:

γ_{ee} = massa específica em estado endurecido calculado (kg/m³)

γ_{ef} = massa específica em estado fresco (kg/m³)

Para a determinação dos traços foi definido primeiramente três densidades em estado fresco, sendo elas 800 kg/m³, 1000 kg/m³ e 1200 kg/m³. O consumo de cimento foi definido como 350 kg/m³ e o fator água-cimento igual a 0,5 para todos os traços, de forma que o cálculo do fator água-cimento leva em conta a soma da água presente na espuma e a água para mistura e hidratação do cimento. Esses valores foram escolhidos devido a previsão da densidade 800 kg/m³ atender a resistência mínima à compressão de 1,5 MPa para blocos de vedação de forma análoga a NBR 15.270-1 (ABNT, 2017a). As densidades de 1000 kg/m³ e 1200 kg/m³ foram definidos devido terem previsão de atender a resistência à compressão mínima da NBR 12.646 (ABNT, 1992) de 2,5 MPa para paredes de concreto celular moldadas no local. As quantidades de areia natural, areia de RCD e também os volumes de espuma e água foram calculados como o descrito por Teixeira Filho e Tezuka (1992). Foram moldadas amostras sem utilização de goma xantana denominadas REF e com a utilização no teor de 2% denominadas XG-2. Para as densidades de 1000 kg/m³ e 1200 kg/m³ a areia natural foi substituída em um traço integralmente por areia de RCD. Nos traços com utilização de RCD foi realizada a correção de água conforme a NBR 15.116 (ABNT, 2021a). A massa específica em estado fresco estimada foi calculada conforme a ACI 523.3R-14 (ACI, 2014). A resistência à compressão estimada aos 28 dias foi calculada conforme a Equação de Fereti adaptada para concretos celulares. A partir dos resultados obtidos foi desenvolvida a Tabela 6 que apresenta os traços para a produção de um metro cúbico de concreto celular.

Tabela 6 – Composição dos traços dos concretos celulares

Traço	γ_{ef} (kg/m ³)	Cimento (kg)	Areia (kg)	RCD (kg)	Espuma (l)	Água (l)	Água total (l)	Fator a/c	$\gamma_{ee\ calc}$ (kg/m ³)	f_{c28} (MPa)
800 REF	800	350	275	-	597,6	127,2	175	0,5	720	1,78
800 XG-2	800	350	275	-	587,6	128,0	175	0,5	720	1,78
1000 XG-2	1000	350	475	-	517,9	133,6	175	0,5	920	2,58
1000 XG-2 RCD	1000	350	-	475	500,6	134,9	175	0,5	920	2,58
1200 REF	1200	350	675	-	438,2	139,9	175	0,5	1120	3,89
1200 XG-2	1200	350	675	-	413,7	141,9	175	0,5	1120	3,89
1200 XG-2 RCD	1200	350	-	675	413,7	141,9	175	0,5	1120	3,89

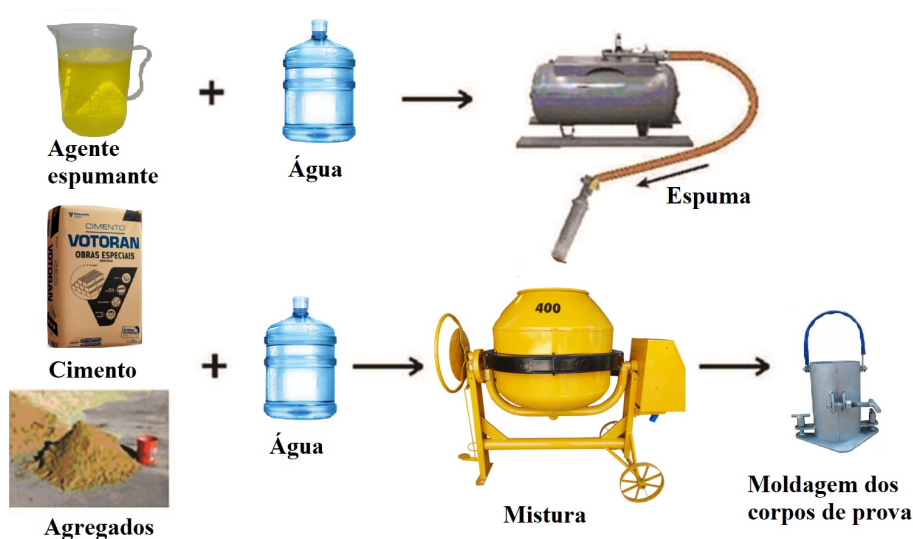
Fonte: Autoria própria

3.2.3 Métodos de mistura

O método de mistura foi baseado na ACI 523.3R-14 (ACI, 2014), onde as sequências específicas de dosagem e mistura foram seguidas. Água e aditivos solúveis em água foram adicionados no misturador planetário, seguido por cimento e agregado(s). Todos os componentes, exceto a espuma pré-formada, foram misturados até obter uma consistência uniforme. Por último foi adicionada a espuma pré-formada ao misturador. Conforme Sun *et al.* (2018) esta sequência minimiza a destruição das bolhas.

A massa específica é influenciada pelo tempo de mistura. Ferreira (1987) variou o tempo de mistura em 3, 5 e 10 minutos, e observou que com o aumento no tempo de mistura a massa específica, bem como a resistência à compressão apresentam aumento. Esse aumento é explicado pelo rompimento das bolhas de ar presentes na mistura. Dessa forma após a adição da espuma na betoneira o tempo de mistura foi definido em 3 (três) minutos para evitar o rompimento de bolhas. A Figura 27 mostra a metodologia de mistura utilizada para a produção dos concretos celulares.

Figura 27 – Processo de fabricação do concreto celular



Fonte: Adaptado ACI 523.3R-14 (ACI, 2014)

Para a adição da espuma, em vez de medir o volume de espuma em recipientes e depois colocá-los na mistura. Foi adotado utilizar a mangueira do equipamento gerador diretamente no misturador. No entanto, devido a dificuldade de medição do volume de espuma gerado pelo equipamento, foi desenvolvida uma metodologia a fim de minimizar este problema e melhor quantificá-la. A metodologia consiste em mensurar o tempo necessário para o preenchimento, com espuma, de alguns recipientes de volumes conhecidos. Por fim, de posse dos resultados e com a finalidade de obter o comportamento do equipamento, foi calculada uma regressão linear. Devido a

composição da mistura de agente espumante influenciar no múltiplo de espuma, ou seja, no volume de espuma em função do tempo, foram calculadas as regressões lineares para a composição REF e para o percentual de XG adotado. Para garantir que o concreto celular fique próximo da densidade alvo. Foi aferida a massa específica fluída ao final do tempo de mistura. Nos casos onde a massa específica ficou muito acima do esperado foi adicionada uma compensação de espuma para atingir densidade próxima da densidade alvo.

Como misturador para o concreto celular, primeiramente foi testado uma betoneira para concreto convencional. No entanto, devido a matriz ser bastante leve e sem agregado graúdo, não ocorria a queda do material com o movimento da betoneira. Desta forma, ocorreu a formação de grumos de cimento que não dispersavam no concreto celular. Como solução, foi optado em utilizar um misturador de eixo vertical para argamassa, como pode ser visto na Figura 28. As pás internas do equipamento foram reguladas rente às paredes do misturador, com intuito de raspar todo o material. Com isso, foi possível a homogeneização do concreto celular sem a formação de grumos de cimento e com comportamento auto-adensável sem a utilização de aditivos plastificantes ou super-plastificantes.

Figura 28 – Misturador de eixo vertical



Fonte: Autoria própria

3.2.4 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova utilizou três tipos de amostras, sendo elas variáveis em função dos ensaios. A fim de evitar a aderência do material às fôrmas

foi utilizado óleo como desmoldante. Para maior representatividade estatística foram moldados 4 corpos de prova para cada um dos ensaios.

Para evitar a perda de água com o ambiente a superfície exposta dos corpos de prova após a moldagem foi coberta com filme plástico como recomendado por Jones e McCarthy (2006) e Pasupathy, Ramakrishnan e Sanjayan (2021).

Para a realização dos ensaios em estado endurecido foram moldados corpos de prova adequados para cada ensaio, de forma que: o comportamento à compressão e resistência à compressão residual foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 100x200 mm. Para os ensaios de tração na flexão em 3 pontos e resistência à tração na flexão em 3 pontos residual foram utilizados corpos de prova prismáticos de 40x40x160 mm. Os ensaios de absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão foram realizados com corpos de prova cilíndricos de diâmetro 100 mm e altura 200 mm. Os ensaios de condutividade térmica foram realizados com corpos de prova prismáticos de 100x100x50 mm. A Figura 29 mostra os corpos de prova dos traços 1000 XG-2, 1200 XG-2 e 1200 XG-2 RCD moldados.

Figura 29 – Corpos de prova moldados



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 7 é apresentado um resumo das geometrias, dimensões e quantidades dos corpos de prova que foram moldados. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e curados em câmara úmida até as idades estabelecidas para os ensaios.

Tabela 7 – Resumo das amostras para o programa experimental

Ensaio	Corpo de prova		
	Geometria	Dimensões (mm)	Quantidade
Comportamento à compressão	Cilíndrico	100x200	28
Tração na flexão de três pontos	Prismático	40x40x160	28
Absorção de água por capilaridade	Cilíndrico	100x200	28
Absorção de água por imersão	Cilíndrico	100x200	28
Condutividade térmica	Prismático	100x100x50	28
Comportamento à compressão residual	Cúbico	100x200	36
Tração na flexão de três pontos residual	Prismático	40x40x160	36

Fonte: Autoria própria

3.2.5 Massa específica em estado fresco

A determinação da massa específica em estado fresco (MEF) foi realizada de acordo com a NBR 12.644 (ABNT, 2014). Para garantir a correta aferição da MEF o espaço de tempo decorrido entre a retirada da amostra e a determinação de sua massa foi inferior a 5 min. O cálculo da massa específica em estado fresco foi feito através da Equação 3.4:

$$MEF = \frac{m}{V} \quad (3.4)$$

Onde:

MEF = densidade do material (g/cm³);

m = massa da amostra (g);

v = volume da amostra (cm³).

3.2.6 Ensaios em estado endurecido

O comportamento do concreto celular no estado endurecido foi determinado através dos seguintes ensaios: índices físicos, comportamento à compressão, resistência à tração na flexão de três pontos, análise da deformação e processo de fissuração por correlação digital de imagem, condutividade térmica e resistência mecânica residual após as amostras serem exposta na temperaturas x y z.

3.2.6.1 Índices físicos

A absorção de água, índice de vazios por imersão e fervura, e massas específicas no estado endurecido para o concreto celular foram realizados baseados na NBR 9.778 (ABNT, 2009). Com a amostra seca foi registrada a massa da amostra (ms).

Para a saturação da amostra ela foi imersa em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e mantida durante 72 h nessa condição. Completada a etapa de saturação em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, a amostra foi colocada em um recipiente cheio de água e progressivamente foi elevada à temperatura à $80 ^\circ\text{C}$ sendo mantida por um período de 5 h. Após isso a água esfriou naturalmente até a temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, onde foi registrada a massa com auxílio de balança hidrostática (mi). Após retirar a amostra da água e enxugá-la com pano úmido, foi registrada sua massa saturada (msat).

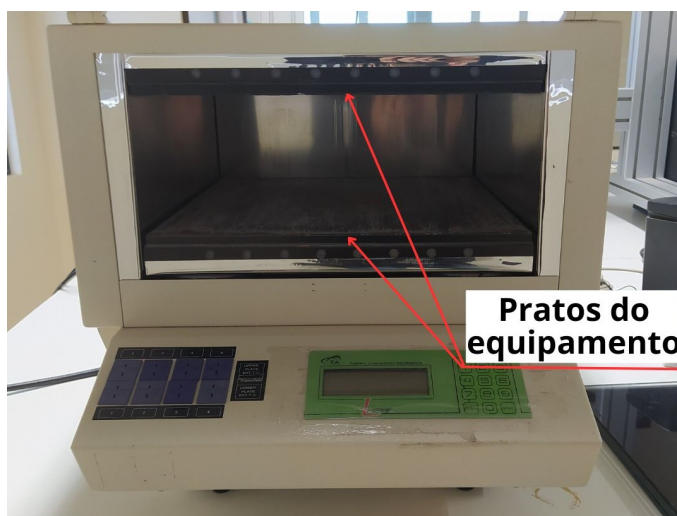
A absorção de água por capilaridade foi realizada com base na NBR 9.779 (ABNT, 2012). Primeiramente, os corpos de prova foram secos em estufa. Após obterem constância de massa e resfriados à temperatura ambiente, os mesmos foram posicionados no equipamento de ensaio, sobre suportes. Em seguida, foi adicionado água até atingir a altura de 5 ± 1 mm acima da face inferior da amostra. Durante o ensaio, foram medidas as massas saturadas (msat) dos corpos de prova, nos tempos de 3, 6, 24, 48 e 72 h, contado à partir do início do ensaio. Após o tempo final de ensaio, as amostras foram rompidas por compressão diametral e verificado a altura de ascensão capilar, em centímetros.

Apesar das normas especificarem a temperatura de secagem dos corpos de prova em $105 \pm 5 ^\circ\text{C}$, alguns autores como Mydin e Wang (2012) e Tan *et al.* (2017) observaram que o CSH começa a desidratar na temperatura de $110 ^\circ\text{C}$. Pachla (2017) também observou que as amostras de concreto celular tendiam a fissuras, quando secas em estufa com temperaturas superiores a $70 ^\circ\text{C}$, podendo assim influenciar nos resultados. Dessa forma, a fim de evitar a desidratação do CSH e a fissuração do concreto celular, neste trabalho foi adotada a secagem das amostras em estufa à temperatura de $60 \pm 5 ^\circ\text{C}$ por período de 72 horas ou até constância de massa.

3.2.6.2 Ensaio de condutividade térmica

Para a realização dos ensaios de condutividade térmica foi usado o equipamento FOX 304 da LaserComp (Figura 30). Esse equipamento consegue determinar a condutividade térmica estabelecida entre $-20 ^\circ\text{C}$ e $75 ^\circ\text{C}$. A precisão da temperatura é de $\pm 0,01 ^\circ\text{C}$ e a condutividade térmica absoluta tem precisão de $\pm 2\%$.

Figura 30 – Equipamento para os ensaios de condutividade térmica



Fonte: Autoria própria

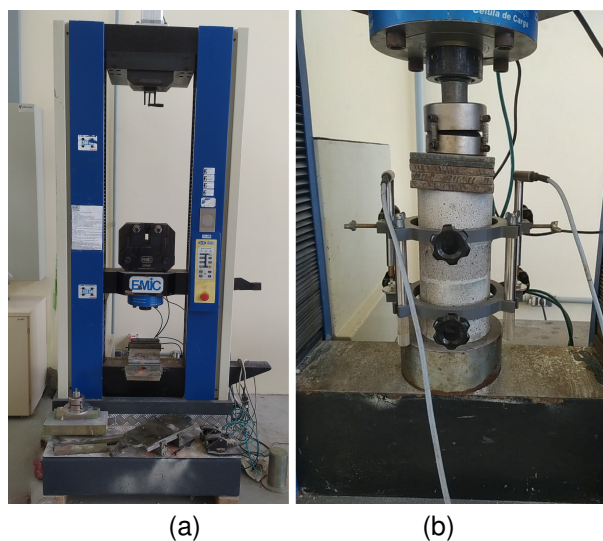
O ensaio foi realizado na idade de 28 dias das amostras. O procedimento do ensaio inicia com o posicionamento da amostra entre os dois pratos do equipamento configurados com uma diferença de temperatura definida em 25 °C (ΔT). A espessura da amostra (L) é ajustada automaticamente. O fluxo térmico (Q/A) médio, sendo “Q” o calor de cada prato e “A” a área de contato da amostra com cada prato, são utilizados para calcular a condutividade térmica (λ) expresso em Watt por metro Kelvin (W/m.K) de acordo com a Lei de Fourier (Equação 3.5).

$$\lambda = \frac{Q}{A} \cdot \frac{L}{\Delta T} \quad (3.5)$$

3.2.6.3 Comportamento à compressão

A resistência à compressão, a deformação e o módulo de elasticidade foram determinados através de ensaios de compressão de corpos de cilíndricos com velocidade de deslocamento do travessão da máquina de ensaios de 0,5 mm/min, instrumentado com extensômetros do tipo LVDT's. O procedimento para o ensaio da resistência à compressão foi baseado na NBR 5.739 (ABNT, 2018). Os ensaios para a deformação e o módulo de elasticidade foram realizados baseados na NBR 8.522-1 (ABNT, 2021f). Para os ensaios foi utilizada uma máquina de ensaios universais Emic DL 20000, que possui capacidade máxima de carga de 200 kN (Figura 31). Também foram ensaiadas à compressão as metades prismáticas obtidas a partir dos corpos de prova rompidos na tração de flexão, conforme a NBR 12.142 (ABNT, 2010) .

Figura 31 – Máquina de ensaios universais: (a) Emic DL 20000, (b) Corpo de prova instrumentado para ensaio

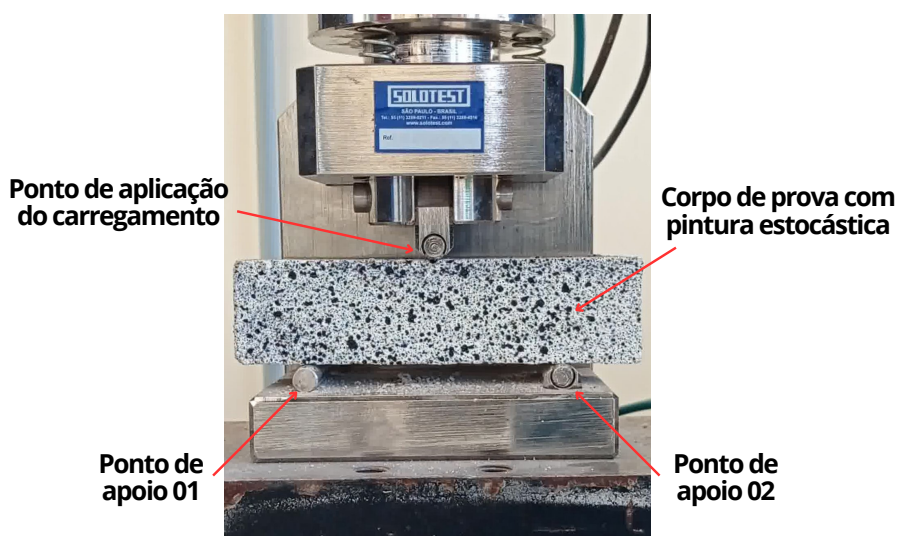


Fonte: Autoria própria

3.2.6.4 Resistência à tração na flexão em três pontos

O procedimento para o ensaio de determinação da resistência à tração por flexão foi realizado conforme a NBR 12.142 (ABNT, 2010) sendo o equipamento utilizado no ensaio a máquina de ensaios universais Emic DL 20000, que possui capacidade máxima de carga de 200 kN. A velocidade para o ensaio de tração na flexão foi de 0,10 mm/min de deslocamento do travessão da máquina. O ensaio ocorreu na idade de 28 dias de cura e foram ensaiadas 4 amostras prismáticas de 40x40x160 mm para cada traço estudado. A Figura 32 mostra a configuração utilizada para a realização dos ensaios.

Figura 32 – Equipamento para os ensaios de tração na flexão de três pontos



Fonte: Autoria própria

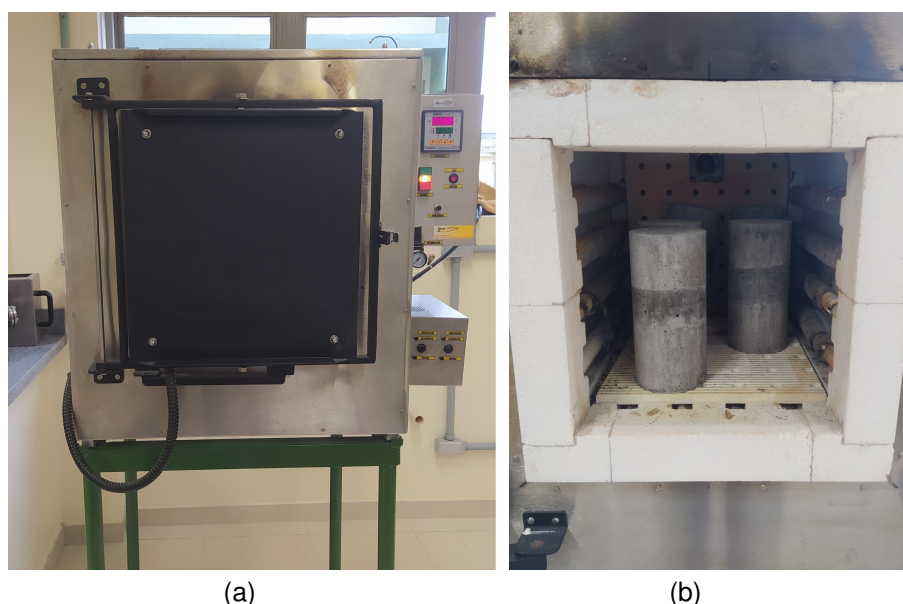
Durante os ensaios de tração na flexão de três pontos, as amostras foram filmadas para verificar o processo de fissuração. Para isso foi utilizado a técnica de correlação digital de imagem (CDI). Essa técnica se baseia na análise de imagens consecutivas, obtidas antes e após a deformação de um objeto, e analisadas por meio de um algoritmo de correlação. A fim de garantir que não exista mais do que uma correspondência para um bloco, foi realizada a pintura estocástica. A pintura estocástica consiste em primeiramente pintar a superfície a analisar do corpo de prova com tinta de coloração branca, e após aplicar sobre ela um padrão aleatório, speckle, de alto contraste com tinta de coloração preta fosca. O algoritmo calcula o movimento que o speckle realizou de uma configuração para outra, obtendo assim os deslocamentos e, através destes, calcula posteriormente as tensões (BELEZA, 2017; SILVA, 2019).

A captura de imagens foi feita com uma câmera digital de 48 mega pixels, auxiliada por iluminação do corpo de prova durante a captura de imagens com o intuito de evitar possíveis sombreamentos, os quais prejudicam a análise posterior.

3.2.7 Propriedades mecânicas residuais

Com objetivo de verificar as propriedades residuais após a exposição à diferentes temperaturas foram realizados os ensaios de comportamento à compressão e de resistência à tração na flexão de três pontos conforme os parâmetros descritos nos itens 3.2.6.3 e 3.2.6.4. As temperaturas em que as amostras de concreto celular foram expostas são de 300 °C, 600 °C, 900 °C. As amostras foram queimadas em uma mufla de laboratório (Figura 33).

Figura 33 – Equipamento para queima das amostras: (a) Mufla de laboratório, (b) Corpos de prova dentro da mufla



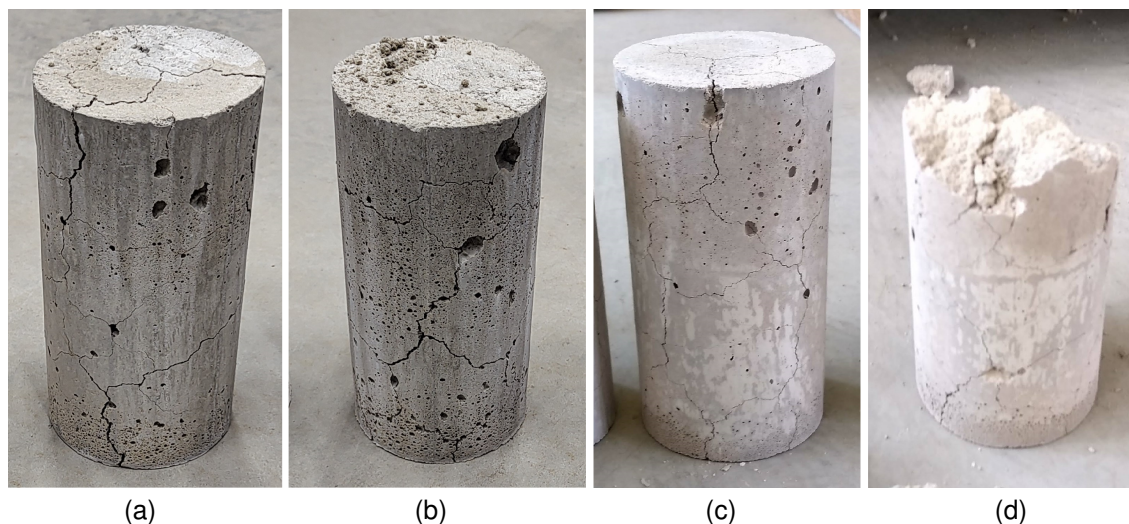
Fonte: Autoria própria

Para a queima dos corpos de prova, a taxa de aquecimento utilizada foi de 1 °C/min para cada corpo de prova, adotada seguindo as recomendações da TC129 MHT (RILEM, 2000), as quais se baseiam na superfície diametral do corpo de prova. Devido a limitação de tamanho do equipamento foram queimados seis (6) corpos de prova de forma simultânea para cada uma das temperaturas estudadas. Desta forma a taxa de aquecimento utilizada foi de 6 °C/min.

Após atingir a temperatura desejada, para mostrar a influência da temperatura, todos os corpos de prova permaneceram por 60 minutos na temperatura alvo. Também este é o tempo mínimo em que se espera que a estrutura resista ao fogo de acordo com a NBR 14432 (ABNT, 2001a). Ao terminar o tempo, a mufla foi desligada e os corpos de prova foram resfriados dentro da mesma, com a porta entreaberta, até atingirem a temperatura ambiente, para posteriormente serem ensaiados.

No entanto, após a queima dos corpos de prova muitas das amostras ficaram danificadas, a ponto de quebrarem ao toque. Desta forma, não foi possível realizar os ensaios previstos para os corpos de prova queimados à temperatura de 900 °C, como também para as amostras do traço 1000 XG-2 queimado à 600 °C e 900 °C. A Figura 34 mostra alguns dos corpos de prova descartados, onde: (a) 1000 XG-2 à 600 °C, (b) 1000 XG-2 à 900 °C, (c) 1200 XG-2 RCD à 900 °C, (d) 1200 XG-2 à 900 °C.

Figura 34 – Corpos de prova descartados após a queima



Fonte: Autoria própria

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

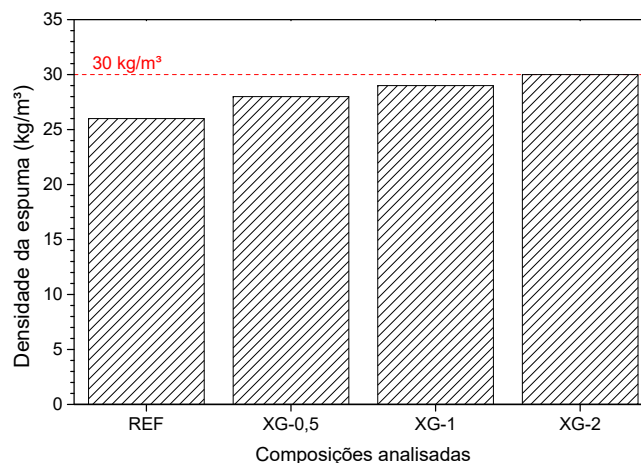
Neste capítulo são apresentados os resultados do programa experimental proposto, como também é feita a análise e interpretação dos mesmos.

4.1 Estabilização da espuma

Neste item são expostos os resultados referentes aos ensaios realizados para a qualidade e estabilização da espuma. Todos os resultados obtidos foram organizados em tabelas e são apresentados no Apêndice A.

Como pode ser visto na Figura 35 a espuma referência (REF) apresentou densidade de 26 kg/m³. Com a adição e aumento nos teores de goma xantana ocorreu o incremento da densidade da espuma. De forma que, a espuma XG-0,5 expressou resultado de 28 kg/m³. A espuma com teor de XG-1,0 resultou na densidade de 29 kg/m³ e por fim a espuma XG-2,0 obteve densidade de 30 kg/m³. É possível observar que a utilização de goma xantana no teor de 2% resultou num aumento de 15% da densidade quando comparado à solução controle. Dessa forma os valores apresentados estão de acordo com o estudo de Raj, Krishnan e Ramamurthy (2022) que observaram o incremento de densidade da espuma com a adição de goma xantana.

Figura 35 – Densidade da espuma



Fonte: Autoria própria

Os parâmetros apresentados pela ASTM (2012) e por Zhu *et al.* (2020) definem como valores ideais para a densidade da espuma a faixa entre 30 kg/m³ a 50 kg/m³. Espumas com densidades muito baixas são sensíveis e facilmente danificadas pelas partículas da matriz do concreto celular e as espumas com densidade mais elevada apresentam muita água em sua composição. Desta forma, para as composições estudadas, apenas a espuma feita a partir da solução com 2,0% de XG se enquadrou dentro dos valores ideais.

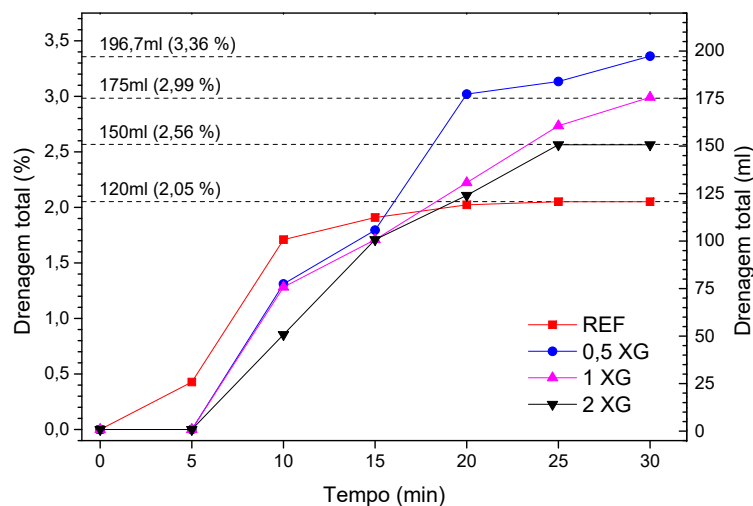
Para os ensaios de drenagem da espuma a Tabela 8 apresenta os valores da drenagem total em ml, da drenagem percentual e a drenagem normalizada, em percentual.

Tabela 8 – Resultados dos ensaios de drenagem das espumas

Composição	Drenagem	Tempo de ensaio (min)					
		5	10	15	20	25	30
REF	Total (ml)	25,00	100,00	111,67	118,33	120,00	120,00
	Total (%)	0,43	1,71	1,91	2,02	2,05	2,05
	Normalizada (%)	20,83	83,33	93,06	98,61	100,00	100,00
XG-0,5	Total (ml)	0	76,67	105,00	176,67	183,33	196,67
	Total (%)	0	1,31	1,79	3,02	3,13	3,36
	Normalizada (%)	0	38,98	53,39	89,83	93,22	100,00
XG-1,0	Total (ml)	0	75,00	100,00	130,00	160,00	175,00
	Total (%)	0	1,28	1,71	2,22	2,74	2,99
	Normalizada (%)	0	42,86	57,14	74,29	91,43	100,00
XG-2,0	Total (ml)	0	50,00	100,00	123,33	150,00	150,00
	Total (%)	0	0,85	1,71	2,11	2,56	2,56
	Normalizada (%)	0	33,33	66,67	82,22	100,00	100,00

Com os resultados dos ensaios de drenagem da espuma foi gerado o gráfico de drenagem em função do tempo (Figura 36), que demonstra o comportamento de todas as espumas a cada 5 minutos. Observando as curvas pode-se notar que a espuma de referência apresentou nos primeiros 10 minutos de ensaio uma drenagem mais rápida. Conforme foi aumentando o teor de XG a drenagem inicial nos primeiros minutos de ensaio foi retardada.

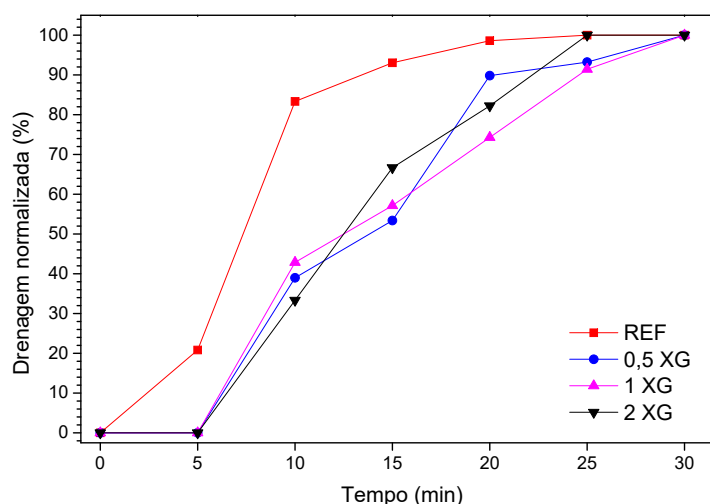
Figura 36 – Drenagem da espuma



Fonte: Autoria própria

De maneira a comparar os percentuais drenados entre os teores, foi feito o gráfico com as curvas normalizadas onde é evidente o retardo da drenagem nos primeiros minutos (Figura 37). É possível observar que logo em cinco minutos de ensaio a espuma referência já havia drenado 20% do volume total de líquido. Em dez minutos resultou em um percentual de 83% drenado. As composições XG-0,5, XG-1,0 e XG-2,0 não apresentaram drenagem durante os primeiros cinco minutos de ensaio e em dez minutos o percentual drenado foi de 38,98%, 42,85% e 33,33%, respectivamente.

Figura 37 – Drenagem normalizada

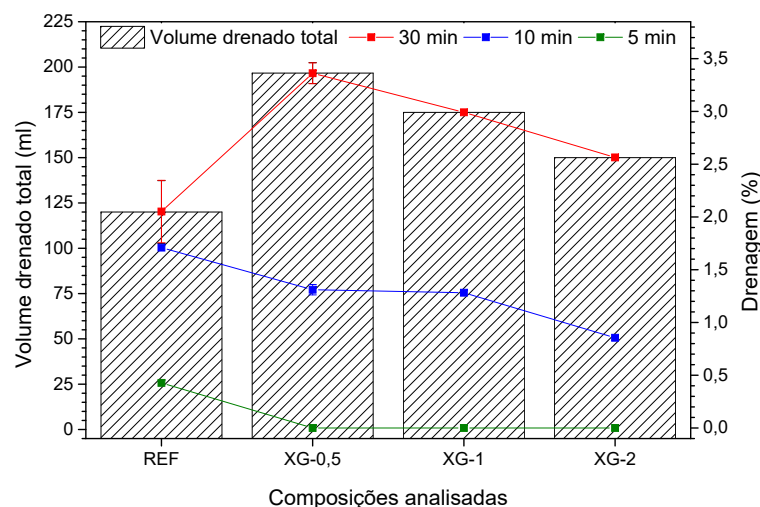


Fonte: Autoria própria

Com o intuito de complementar os resultados foi elaborada a Figura 38, de dois eixos "y", onde no primeiro eixo estão os valores do volume total drenado e no segundo foram traçadas linhas do percentual drenado em determinados momentos do ensaio. Assim, pode ser observado nessa figura que a espuma REF apresentou o menor volume drenado. O maior volume drenado foi obtido quando utilizado o teor XG-0,5 que foi cerca de 63%. Com o acréscimo do teor de XG o volume drenado foi reduzindo apresentando valores 45% e 25% superiores à composição referência.

Apesar de ocorrer um leve aumento na drenagem das espumas produzidas com XG, todas permaneceram dentro da taxa de drenagem padrão que é aferida no tempo de 30 min após a formação da espuma. Segundo Zhu *et al.* (2020) para ter aplicações em engenharia, a espuma deve apresentar volume drenado menor que 20% do volume total.

Figura 38 – Volume total drenado e drenagem no tempo

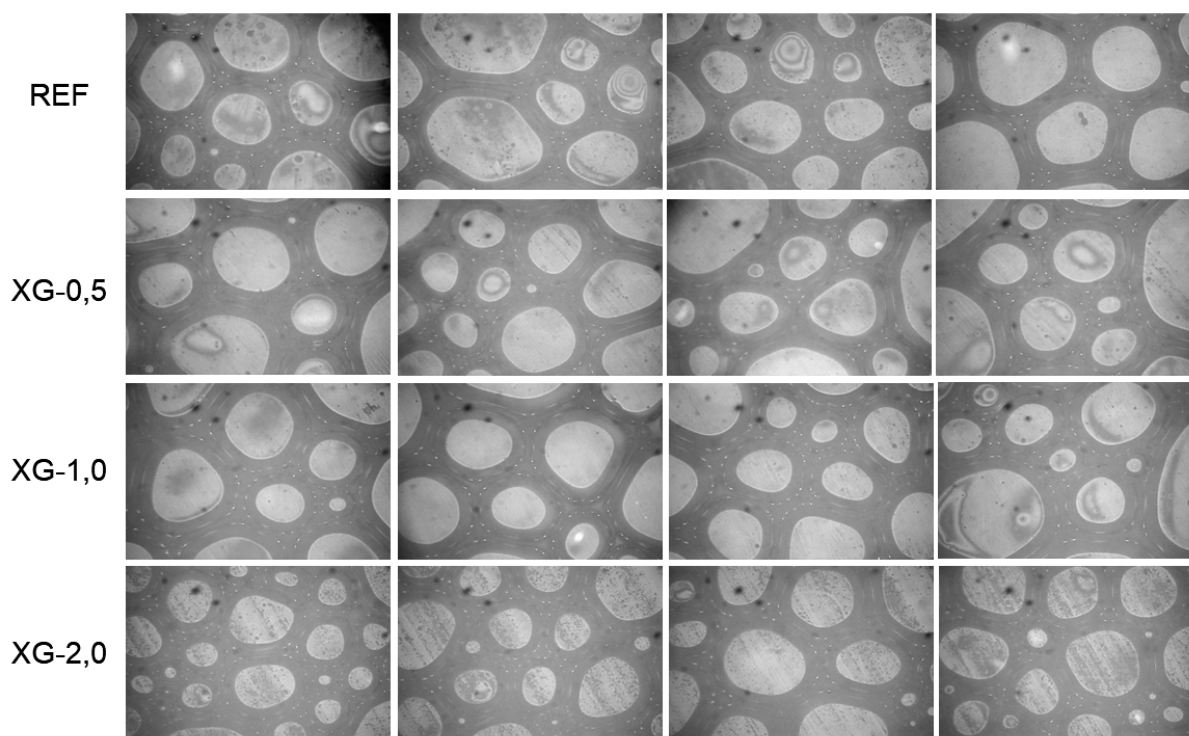


Fonte: Autoria própria

Devido o tempo de mistura e moldagem do concreto celular ser bastante rápido, é muito importante que a drenagem seja retardada nos minutos iniciais (HAJIMOHAMMADI; NGO; MENDIS, 2018). Dessa forma, quando as linhas de percentual drenado em 5 e 10 minutos apresentam menor distância entre elas menor o percentual drenado neste período de tempo. Ainda segundo Hajimohammadi, Ngo e Mendis (2018) a maior viscoelasticidade decorrida da utilização de XG contribui para o retardo na drenagem e favorece a estabilização da espuma. Conforme Raj, Krishnan e Ramamurthy (2022) o aumento do teor de goma xantana proporciona a melhora na capacidade de reter água, sendo evidente principalmente nos primeiros minutos após a formação da espuma.

A Figura 39 apresenta a microscopia ótica de todas as composições de espumas estudadas. Nas linhas são expostas as imagens obtidas em pontos diferentes da lâmina com a amostra, e que foram usadas para as medidas. A partir delas foram medidas e calculados os valores médios da espessura da membrana da bolha (EM) e da espessura do filme líquido (EF) conforme Item 3.2.1.3. É possível observar que todas apresentam estruturas heterogêneas com diversos tamanhos de bolhas. De acordo com She *et al.* (2018) as espumas são um sistema instável que envelhece e muda suas características com o tempo, justificando assim a heterogeneidade das imagens.

Figura 39 – Microscopia das espumas



Fonte: Autoria própria

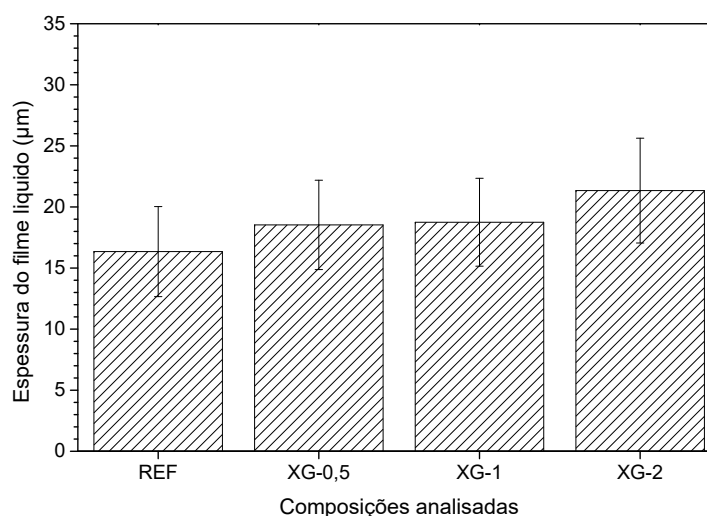
A Tabela 9 apresenta os valores médios de EF e EM, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados.

Tabela 9 – Resumo dos valores de EF e EM

Traço	Espessura média do Filme líquido			Espessura média da Membrana da bolha		
	Espessura média μm	Desvio padrão	CV %	Espessura média μm	Desvio padrão	CV %
REF	16,34	3,68	22,52	22,60	5,91	26,15
XG-0,5	18,53	3,65	19,70	24,53	8,56	34,90
XG-1,0	18,75	3,59	19,15	25,42	5,95	23,40
XG-2,0	21,34	4,28	20,06	25,66	7,39	28,80

A espessura média do filme líquido é representada de forma gráfica na Figura 40. É possível observar que conforme aumenta o teor de XG na solução a espessura do filme líquido também aumenta. A composição com maior valor médio foi XG-2 com 21,3 μm de largura, seguido por XG-1,0 e XG-0,5 com 18,8 μm e 18,5 μm respectivamente. O menor valor obtido foi na composição REF com 16,3 μm .

Figura 40 – Filme líquido das bolhas



Fonte: Autoria própria

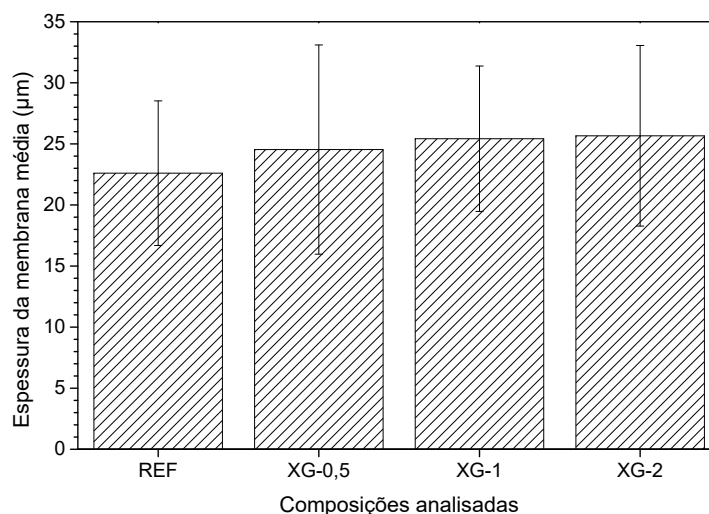
Para verificar a influência da goma xantana no filme líquido foi realizado o teste de Tukey com 95% de confiança que é apresentado na Tabela 20 (Apêndice A). Como pode ser observado apenas a combinação XG-2 e REF apresentou resultado estatisticamente diferente. A utilização de 2% de XG proporcionou um aumento de 30,6% na espessura do filme líquido quando comparado com a solução controle (REF). Estes valores estão de acordo com Hajimohammadi, Ngo e Mendis (2018) e Zhu *et al.* (2020) que observaram um aumento nos valores do filme líquido com a utilização de XG. A maior espessura explica o incremento de densidade das espumas com a utilização de XG, uma vez que a densidade é proporcional ao volume de água suspenso pelo filme líquido.

Também na microscopia ótica foi medida a espessura da membrana das bolhas, representada graficamente na Figura 41. É possível observar que a adição e incremento no teor de goma xantana resultou em uma maior espessura da membrana das bolhas. De maneira que os valores obtidos para a solução REF foram de 22,6 µm, para XG-0,5 foi 24,5 µm, XG-1,0 apresentou como média 25,4 µm e a solução XG-2 obteve resultados de 25,6 µm.

Com intuito de verificar a significância nos resultados de EM a Tabela 21 (Apêndice A) apresenta o teste de Tukey para os resultados. De acordo com a avaliação estatística pelo método de Tukey, apesar dos valores médios maiores a utilização de goma xantana não resultou em aumento estatisticamente diferente da membrana da bolha independente da combinação analisada.

Após a análise dos resultados foi definida a composição XG-2 como a mais adequada para a produção dos concretos celulares. Visto que, demonstrou menor drenagem inicial, apresentou maior membrana do filme líquido e maior membrana

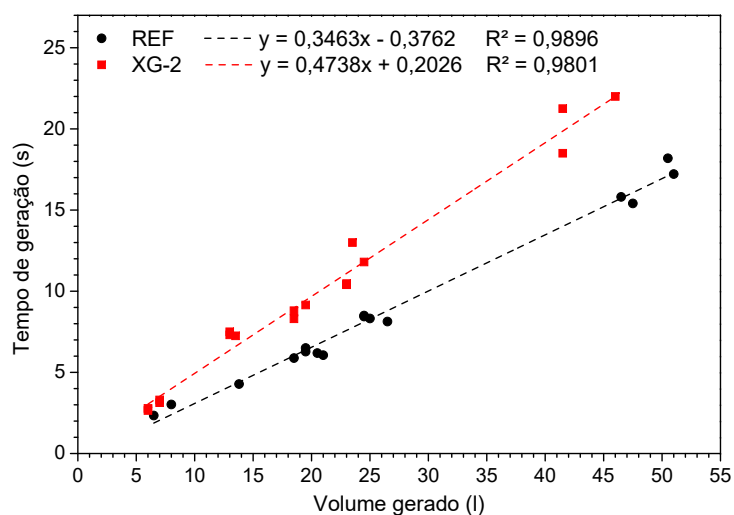
Figura 41 – Membrana das bolhas



Fonte: Autoria própria

de bolhas. Durante a produção das espumas foi observado que a composição da mistura de agente espumante com goma xantana influenciou no comportamento do equipamento (gerador de espuma), onde para um mesmo tempo do equipamento operando o volume de espuma gerado era diferente. Assim, foram calculadas duas regressões, sendo elas para a composição REF e para XG-2,0. As duas regressões são apresentadas na Figura 42.

Figura 42 – Fluxo gerador



Fonte: Autoria própria

4.2 Concreto celular

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios realizados em estado fresco e endurecido dos concretos celulares. Todos os resultados obtidos foram organizados em tabelas e são apresentados no Apêndice A.

4.2.1 Massa específica no estado fresco e endurecido

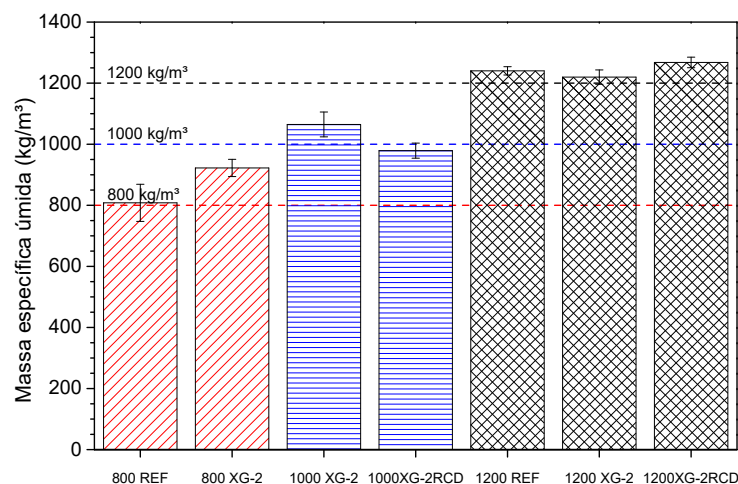
A fim de auxiliar na interpretação dos resultados foi desenvolvida a Tabela 10 que apresenta a massa específica em estado fresco e endurecido para os traços ensaiados, bem como o coeficiente de variação dos resultados.

Tabela 10 – Densidades em estado fresco e endurecido

Traço	Massa específica em estado fresco (kg/m ³)	CV%	Massa específica seca (kg/m ³)	CV%
800 REF	808,08	7,53	727,16	4,20
800 XG-2	922,32	3,07	811,16	4,03
1000 XG-2	1.064,81	3,81	981,76	3,78
1000 XG-2RCD	978,98	2,51	913,19	3,29
1200 REF	1.240,26	1,10	1149,59	0,69
1200 XG-2	1.219,81	1,93	1104,81	1,84
1200 XG-2RCD	1.267,87	1,37	1146,65	5,34

Pode-se observar que o traço com maior diferença da sua densidade alvo foi o 800 XG-2 que resultou em densidade 122,3 kg/m³ acima do previsto, seguido pelo traço 1200 XG-2 RCD com densidade 67,9 kg/m³ maior que o estimado. Os traços 1000 XG-2 e 1200 REF tiveram valores 64,8 kg/m³ e 40,3 kg/m³ superiores às suas densidades alvo. Os traços 1200 XG-2 e 800 REF apresentaram densidades muito próximas da densidades alvo com 19,8 kg/m³ e 8,1 kg/m³ maiores. O traço 1000 XG-2 RCD foi o único que apresentou valor abaixo da densidade alvo com 21 kg/m³ menor que o previsto. Apesar da variação da densidade obtida nesse estudo, os resultados estão dentro dos limites aceitáveis, devido à dificuldade de dosagem e produção dos concretos celulares. A Figura 43 mostra de forma gráfica os valores médios de densidade no estado fresco para todos os traços moldados.

Figura 43 – Massa específica em estado fresco



Fonte: Autoria própria

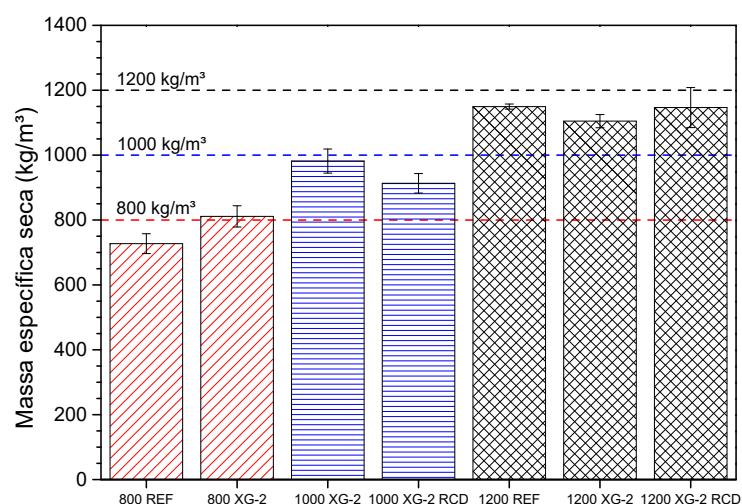
Com os resultados obtidos nos ensaios foi realizado o teste de Tukey para verificar se existe diferença estatística. Tais resultados são apresentados na Tabela 22 (Apêndice A). Como pode ser observado, a utilização de goma xantana para a densidade de 800 kg/m³ resultou em um aumento de 14,13% da massa específica em estado fluido. Para os traços de densidade 1200 kg/m³, apesar de apresentar uma leve redução com o uso de XG, a avaliação entre 1200 REF x 1200 XG-2 não resultou em diferença estatística no teste de Tukey. Quando observada a utilização de RCD, o traço de 1000 kg/m³ com uso de agregado reciclado resultou em uma redução significativa de 8,77% se comparado ao traço 1000 XG-2. O traço de 1200 XG-2 RCD foi estatisticamente igual ao traço 1200 XG-2.

Para o estado endurecido dos concretos celulares, na Figura 44 mostra o comportamento das densidades no estado seco. É possível observar a diminuição de massa quando comparado ao estado fresco. De acordo com a ACI 523.3R-14 (ACI, 2014) a massa específica em estado endurecido do concreto celular é aproximadamente 80 kg/m³ menor que a úmida, podendo chegar até 160 kg/m³ menor. Desta forma, pode-se observar que nos traços em estudo a variação de massa específica manteve em quase todos os casos dentro desta faixa de valores. Os traços 1200 XG-2 RCD, 1200 XG-2 e 800 XG-2 apresentaram as maiores variações, sendo elas de 121,22 kg/m³, 115 kg/m³ e 111,16 kg/m³, respectivamente. Os traços 1200 REF, 1000 XG-2 e 800 REF apresentaram valores próximos do limite inferior de 90,67 kg/m³, 83 kg/m³ e 80,90 kg/m³, respectivamente. O traço 1000 XG-2 RCD foi o único que apresentou redução menor que o limite inferior, sendo a diferença entre o estado seco e endurecido de 65,8 kg/m³.

Quando observada a variação percentual, os traços referência com areia natural

e sem estabilização da espuma apresentaram redução de 11,13% e 7,89%, respectivamente, para os traços 800 REF e 1200 REF. Com a utilização de goma xantana para estabilização da espuma e areia natural, nos traços 800 XG-2, 1000 XG-2 e 1200 XG-2 apresentaram redução de 13,70%, 8,46% e 10,04%, respectivamente. Quando foi empregada a estabilização da espuma e a substituição total do agregado natural por RCD como é o caso dos traços 1000 XG-2 RCD e 1200 XG-2 RCD, a redução na massa específica foi de 7,20% e 10,57% respectivamente. A partir disso é possível supor que a utilização de XG pode ter contribuído na maioria dos casos para uma maior redução percentual da massa específica seca. Ainda, a utilização da ação combinada de XG com RCD também exibiu valores próximos dos obtidos apenas com XG. Estes dados são importantes para refinar as previsões de perda de massa, entre estado fresco e endurecido, na determinação dos traços.

Figura 44 – Massa específica seca



Fonte: Autoria própria

A fim de verificar a variação de densidade seca entre os traços, foi realizado o teste de Tukey apresentado na Tabela 23 (Apêndice A). Com o teste pode-se observar que na massa específica seca para uma mesma densidade de estudo não houve mudança significativa em nenhuma das combinações.

Para os resultados da massa específica saturada e da massa específica real, os resultados são apresentados na Tabela 11, onde estão os valores médios obtidos em kg/m^3 e o coeficiente de variação das amostras.

Tabela 11 – Massas específicas saturada e real

Traço	Massa específica saturada (kg/m ³)	CV%	Massa específica real (kg/m ³)	CV%
800 REF	1239,72	1,73	1493,84	4,31
800 XG-2	1177,68	2,71	1283,66	5,49
1000 XG-2	1434,59	2,74	1793,91	2,70
1000 XG-2RCD	1403,67	1,50	1791,98	1,49
1200 REF	1552,33	0,56	1924,81	0,84
1200 XG-2	1507,08	1,56	1848,50	2,37
1200 XG-2RCD	1505,77	0,36	1792,82	3,40

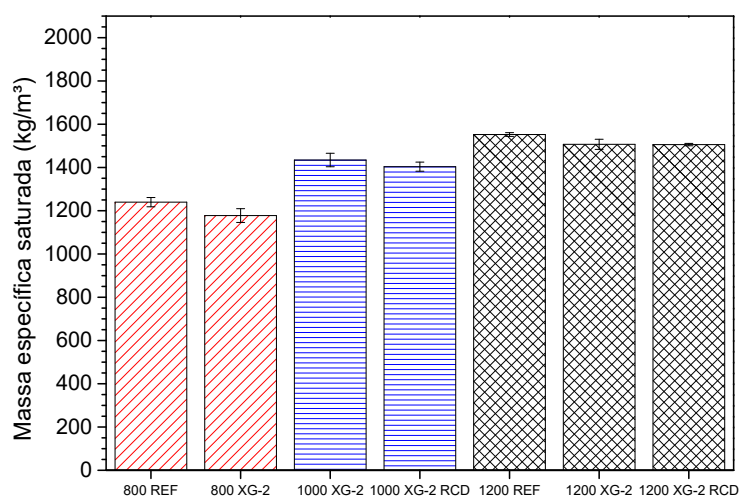
Tais resultados são importantes pois representam na condição saturada da densidade do material, todos os vazios permeáveis preenchidos por água. A massa específica real é a densidade do material com todos os vazios, inclusive os não permeáveis, preenchidos. De forma complementar a Figura 45 mostra a comparação entre as misturas, sendo em (a) a massa específica saturada e em (b) a massa específica real dos concretos celulares ensaiados.

É possível observar que as combinações 800 REF x 800 XG-2 e 1200 REF x 1200 XG-2, apesar de ocorrer uma pequena redução com o uso de goma xantana de 5,27% e 4,05%, respectivamente, não se mostraram estatisticamente diferentes no teste de Tukey (Tabela 24, Apêndice A). As combinações restantes dos traços de 1200 kg/m³ mesmo quando utilizado o RCD em sua composição não apresentaram variação significativas. Apenas as combinações entre densidades diferentes apresentam variação, o que é o esperado.

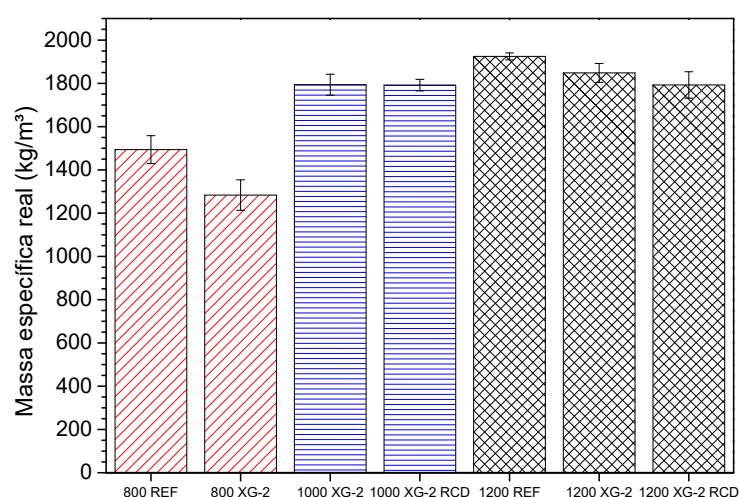
No que diz respeito à massa específica real das amostras, é possível observar que o traço 800 REF teve resultado 16,37% maior que 800 XG-2. Da mesma forma, 1200 REF apresentou resultado 4,13% maior que 1200 XG-2. Com isso é possível afirmar que a utilização de XG pode ter reduzido o percentual de poros não permeáveis no interior das amostras, sendo esta redução apenas significativa para a densidade de 800 kg/m³, como é possível ver na Tabela 25 (Apêndice A), que apresenta o teste Tukey com 95% de significância.

Quando observada a utilização de XG-2 e RCD nos traços de 1000 kg/m³ e 1200 kg/m³, os mesmos não apresentaram redução significativa se comparado aos traços de mesma densidade, apenas com utilização de XG. No entanto, a ação combinada de XG e RCD exibiu redução de 7,36% da massa específica real, quando comparado a mistura 1200 XG-2 RCD em relação à mistura 1200 REF. Esse resultado obtido pode ser atribuído às características do agregado reciclado, uma vez que ele apresenta uma densidade de 12,4% menor que a areia natural.

Figura 45 – Massa específica: a) Massa específica saturada b) Massa específica real



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria

4.2.2 Absorção de água por imersão e índices de vazios

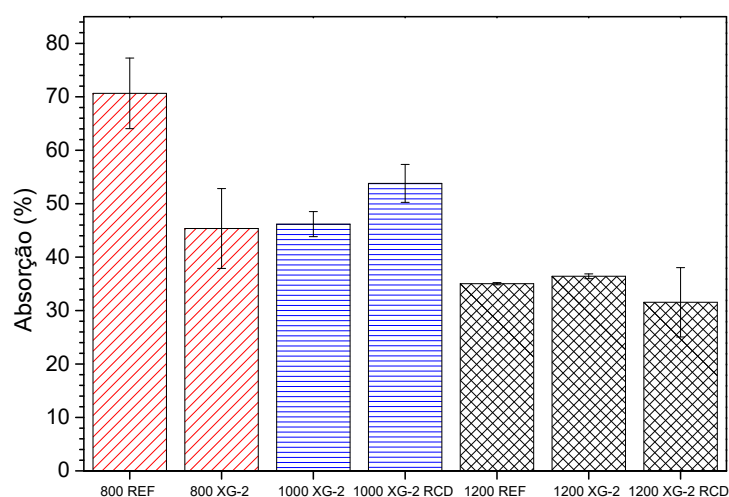
Com os valores obtidos nos ensaios de absorção de água e índice de vazios foi montada a Tabela 12 que apresenta, em percentual, os resultados para os traços ensaiados juntamente com o coeficiente de variação. Tais resultados são importantes pois são um indicador de durabilidade e propriedades físicas do concreto celular.

Tabela 12 – Absorção de água e Índice de vazios

Traço	Absorção %	CV %	Índice de vazios %	CV %
800 REF	70,65	9,34	52,44	9,57
800 XG-2	45,36	16,47	36,65	13,59
1000 XG-2	46,18	5,07	45,28	1,30
1000XG-2RCD	53,80	6,60	49,05	2,81
1200 REF	35,03	0,58	40,27	0,35
1200 XG-2	36,42	1,23	40,23	0,92
1200XG-2RCD	31,55	20,53	35,29	19,29

Como pode ser observado, o traço 800 REF apresentou uma absorção 25% maior que o traço 800 XG-2, sendo a maior diferença entre todos os traços estudados. Para os traços de 1200 kg/m³, devido a maior quantidade de matriz e menor quantidade de espuma na sua produção, todos apresentaram valores muito próximos, onde nenhum resultou em variação significativa no teste de Tukey, como pode ser visto na Tabela 26 (Apêndice A). Com base nos resultados apresentados, sugere-se que a utilização de XG influenciou de forma positiva na absorção de água por imersão, principalmente para a densidade de 800 kg/m³, onde possivelmente houve uma menor interconectividade dos poros. A Figura 46 mostra um histograma dos resultados de absorção de água por imersão.

Figura 46 – Absorção de água por imersão



Fonte: Autoria própria

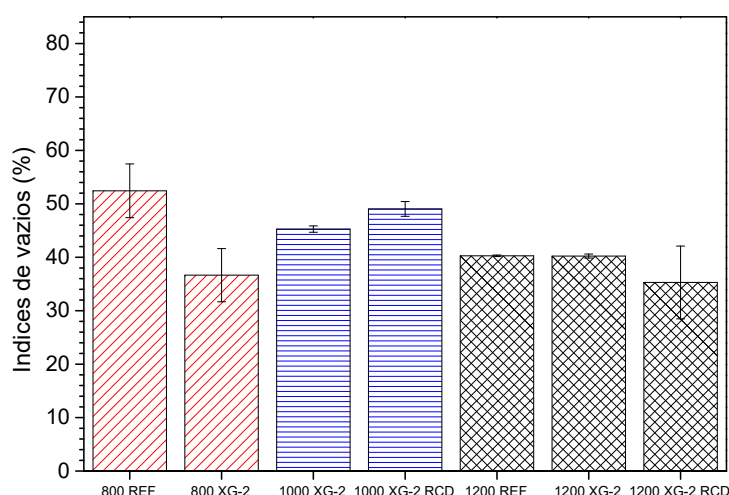
A redução na absorção de água está de acordo com Zhu *et al.* (2020), e conforme os autores a utilização de XG na espuma possibilita que durante a mistura com a pasta/argamassa a espuma não se deteriore ou ocorra a coalescência com

as bolhas próximas entre si. Desta forma em estado endurecido o concreto celular apresenta poros menores e fechados que absorvem menos água.

O traço 1200 XG-2 RCD apresentou o menor valor médio de absorção, com percentual de 4,87% que os valores de 1200 XG-2 e 1200 REF. No entanto a heterogeneidade de composição e formato dos grãos do agregado miúdo de RCD podem ter contribuído para o maior desvio padrão nos seus resultados, o que tornou essa redução não significativa. Esta leve redução nos resultados vai contra o exposto por Gencel *et al.* (2021b) que havia observado uma maior absorção de água em concretos celulares com uso de RCD mas sem XG.

Em relação ao índice de vazios a Figura 47 mostra graficamente os valores obtidos. Este índice tem grande relação com a densidade em estado seco do material onde apresenta relação inversamente proporcional.

Figura 47 – Índices de vazios



Fonte: Autoria própria

Pode ser observado que para o traço de 800 kg/m³ a utilização de goma xantana proporcionou uma redução de 15,79% no índice de vazios. Na densidade de 1200 kg/m³, os traços REF e com XG-2, não apresentaram diferença significativa. O traço com a ação combinada de goma xantana e RCD apresentou o menor percentual médio, sendo 4,95% menor que 1200 REF e 1200 XG-2. Apesar de ser o traço com maior desvio padrão, na análise estatística, conforme pode ser observado na Tabela 27 (Apêndice A), não expressou variação no teste de Tukey. Neste sentido, a utilização de XG apresentou resultados benéficos para a densidade de 800 kg/m³, pois resultou em menor porosidade e/ou poros mais isolados, o que pode ser observado pela redução do índice de vazios.

Em resumo, a utilização Goma Xantana não se mostrou relevante para o índice de vazios para a densidade de 1200 kg/m³. Isso é atribuído devido à matriz mais

densa e quando produzida foi utilizado a menor quantidade de espuma. No entanto, os concretos celulares de 800 kg/m³, que tem cerca de 60% de seu volume formado por espuma, o percentual de 2% de XG se mostrou mais eficiente na estabilização da espuma e proteção das bolhas de ar. Por fim, é possível observar que para a absorção de água por imersão e para o índice de vazios a utilização de XG resultou em resultados mais expressivos e positivos para a densidade de 800 kg/m³. Tais resultados corroboram com Kearsley e Visagie (2002) que concluíram que para densidades menores que 1000 kg/m³ o fator mais determinante para a qualidade de concretos celulares é a espuma. Para densidades maiores a pasta/argamassa tem maior influência no concreto celular, pois os vazios de ar estão mais afastados uns dos outros. Estas suposições também estão de acordo com Hashim e Tantray (2021) que citam concretos celulares com densidades menores mais instáveis em comparação a concretos celulares mais densos.

4.2.3 Capilaridade

De acordo com Niu *et al.* (2020) a capilaridade é um indicativo importante onde é possível avaliar a durabilidade de concretos celulares. Os resultados da absorção de água por capilaridade ao longo do ensaio e a ascensão capilar em centímetros são apresentados na Tabela 13. Para auxiliar na interpretação dos resultados a Figura 48 apresenta de forma gráfica os valores de capilaridade em g/cm³.

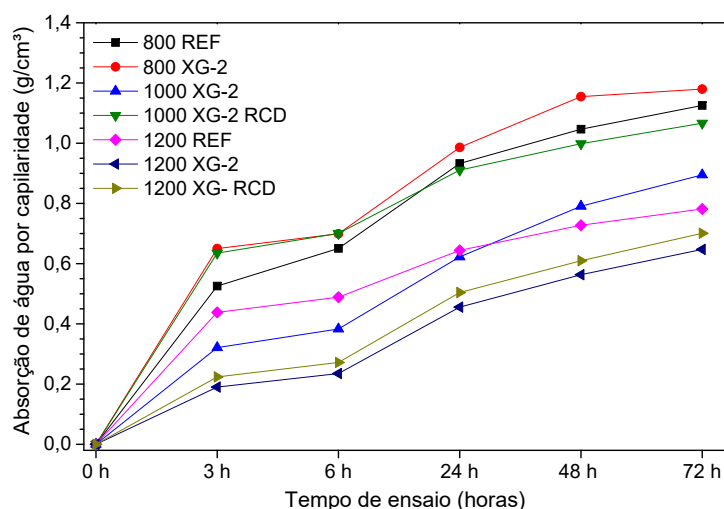
Tabela 13 – Capilaridade durante o ensaio

Traço	Capilaridade durante o ensaio (g/cm ³)					Ascensão capilar (cm)
	3 h	6 h	24 h	48 h	72 h	
800 REF	0,5255	0,6506	0,9326	1,0465	1,1254	4,63 ±0,60
800 XG-2	0,6501	0,6993	0,9862	1,1547	1,1798	7,48 ±0,09
1000 XG-2	0,3212	0,3831	0,6225	0,7907	0,8949	6,17 ±0,49
1000 XG-2 RCD	0,6351	0,7004	0,9107	0,9984	1,0665	3,55 ±0,77
1200 REF	0,4381	0,4886	0,6441	0,7275	0,7816	4,61 ±0,21
1200 XG-2	0,1901	0,2352	0,4557	0,5633	0,6473	5,37 ±0,35
1200 XG-2 RCD	0,2237	0,2718	0,5042	0,6095	0,7008	2,68 ±0,08

Na densidade de 800 kg/m³ a utilização de XG ocasionou um leve aumento na capilaridade das amostras em quase todas as etapas do ensaio. Também é possível notar que com o acréscimo de densidade das misturas estudadas a absorção capilar demonstrou tendência de redução. Desta maneira o traço 1000 XG-2 apresentou valores menores que 800 REF, e os traços de densidade 1200 kg/m³ tiveram as menores absorções capilares. Assim é possível afirmar que a capilaridade em concretos celulares é inversamente proporcional à densidade. Também a capilaridade para 1200

kg/m³ exibiu tendência distinta da capilaridade em 800 kg/m³, onde a utilização de goma xantana no traço 1200 XG-2 resultou em valores menores que 1200 REF. Desta forma é possível supor que em densidades maiores a capilaridade diminui com a utilização de XG. No entanto, nenhum autor verificou a capilaridade em concretos celulares com XG, assim não é possível comparar estes resultados com estudos da literatura.

Figura 48 – Absorção de água por capilaridade durante o ensaio

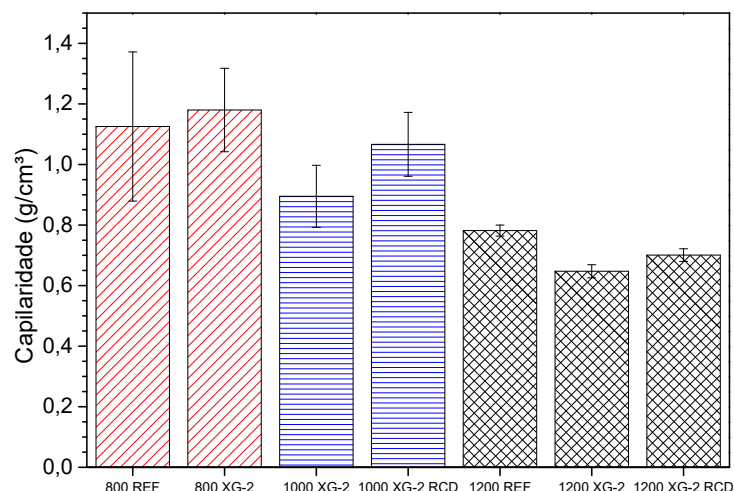


Fonte: Autoria própria

Quando utilizado RCD nas misturas, pode ser observado que os traços 1000 XG-2 RCD e 1200 XG-2 RCD tiveram absorção por capilaridade em todas as faixas do ensaio superiores aos traços apenas com XG-2. Estes resultados tem relação com as características físicas do agregado reciclado (Item 3.1.2) que apresentou percentual de absorção maior que do agregado natural. Esta maior absorção é devido a presença de 22,86% de cerâmica vermelha na composição do RCD, e conforme Batista *et al.* (2022) materiais cerâmicos devido apresentarem estrutura porosa absorvem mais água.

Com os valores obtidos nos ensaios de absorção de água por imersão foi montada a Figura 49 que apresenta os resultados para os traços ensaiados no tempo final do ensaio. Pode ser observado que os traços de densidades 800 kg/m³ apresentaram um alto desvio padrão e na análise estatística pelo teste de Tukey não apresentaram variação significativa entre eles. Quando comparados os resultados do traço 1000 XG-2 RCD com o traço 1000 XG-2 a utilização do agregado reciclado resultou em um aumento significativo que foi de 19,18%. Entre as amostras de densidade 1200 kg/m³, os traços 1200 XG-2 e 1200 XG-2 RCD apresentaram valores 17,18% e 10,34% menores que 1200 REF, respectivamente. Na combinação 1200 XG-2 x 1200 XG-2 RCD é possível notar que o uso do RCD resultou em um aumento de 8,26% na capilaridade. A Tabela 28 (Apêndice A) apresenta o teste de Tukey para as combinações.

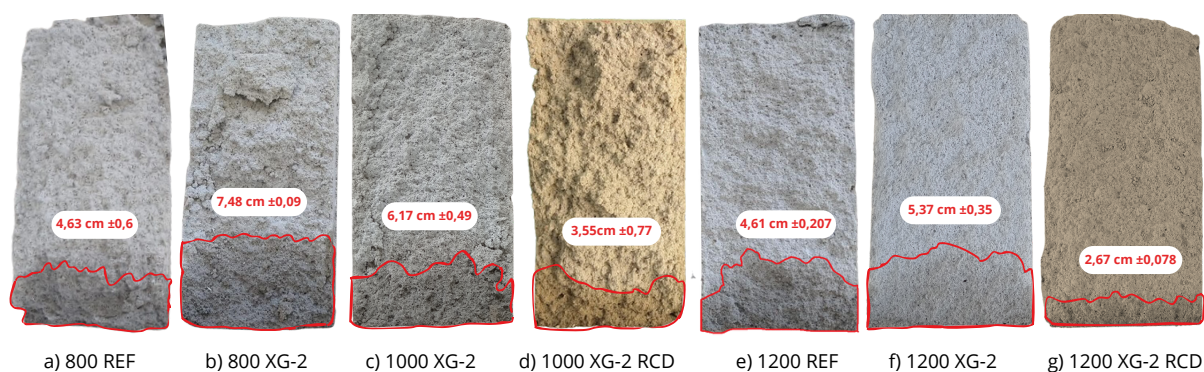
Figura 49 – Capilaridade



Fonte: Autoria própria

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. A Figura 50 apresenta o perfil de absorção dos corpos de prova rompidos em compressão diametral. Observa-se que os resultados estão de acordo com os dados expressos na Figura 48. O traço 800-XG apresenta maior capacidade de absorção de água como também maior altura de ascensão de água por capilaridade e um alto desvio-padrão comparado às demais. Dessa forma, acredita-se que a XG, além de conferir estabilidade à espuma, reduziu efetivamente o diâmetro dos poros. 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, comprovando assim os resultados obtidos nessa pesquisa.

Figura 50 – Ascensão capilar em cm



Fonte: Autoria própria

4.2.4 Condutividade térmica

A Tabela 14 apresenta os valores de condutividade térmica (λ) em W/mK com os valores mínimos, máximos e a média com desvio padrão e coeficiente de variação para todos os traços. Pode ser observado que todos apresentaram valores muito abaixo do máximo especificado pela norma ABNT NBR 15.575-1 (ABNT, 2021b) que é 1,75 W/mK.

Tabela 14 – Condutividade térmica

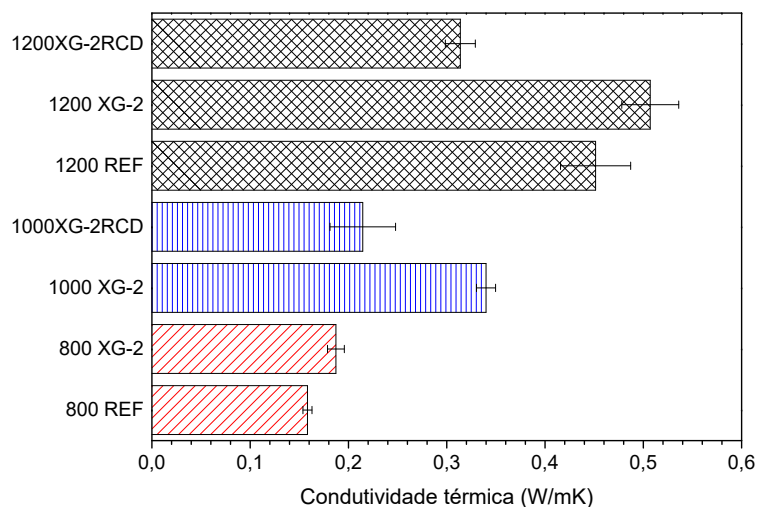
Traço	Condutividade térmica λ (W/mK)			Desvio padrão (W/mK)	CV(%)
	Mínima	Máxima	Média		
800 REF	0,1521	0,1644	0,1583	0,0046	2,92
800 XG-2	0,1782	0,1994	0,1872	0,0086	4,57
1000 XG-2	0,3222	0,3477	0,3400	0,0097	2,85
1000 XG-2 RCD	0,1807	0,2487	0,2146	0,0334	15,54
1200 REF	0,4026	0,4882	0,4514	0,0357	7,91
1200 XG-2	0,4668	0,5351	0,5070	0,0290	5,72
1200 XG-2 RCD	0,2969	0,3387	0,3138	0,0152	4,85

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Figura 51 que expressa graficamente os valores médios da condutividade, os traços de 800 kg/m³ apresentaram os menores valores quando comparados às demais densidades. Isso está de acordo, pois conforme Gencel *et al.* (2021b), a condutividade térmica depende da conectividade, distribuição e tamanhos dos poros. Também é diretamente proporcional à densidade, onde pode ser observada a redução da condutividade com a diminuição da densidade e aumento da porosidade dos concretos celulares.

Conforme o teste de Tukey apresentado na Tabela 29 (Apêndice A) pode ser observado que todas as combinações apresentaram variação significativa de condutividade térmica. Para os traços de 800 kg/m³ é possível identificar o aumento da condutividade com a utilização de XG, onde a mistura 800 XG-2 apresentou condutividade de 18,25% superior ao 800 REF. O traço 1200 XG-2 exibiu valor de condutividade térmica de 12,32% superior ao 1200 REF. Com a utilização de RCD foi possível observar uma redução bastante significativa, de forma que o traço 1000 XG-2 RCD teve resultado 36,88% menor que 1000 XG-2. O traço 1200 XG-2 RCD apresentou resultado 43,85% menor que 1200 REF e 61,57% menor que 1200 XG-2. O aumento nos valores da condutividade com a utilização de XG não estão de acordo com o obtido por Hajimohammadi, Ngo e Mendis (2018) que observaram uma leve redução nos valores de condutividade com o aumento dos teores de XG. Devido os autores não apresentarem dados de porosidade e índice de vazios, que pudessem auxiliar na análise dos dados de condutividade, não é possível justificar a divergência nos resultados. No entanto,

Figura 51 – Condutividade térmica



Fonte: Autoria própria

é possível supor que devido a maior densidade e menor porosidade dos concretos celulares com XG resultou em maior condutividade térmica. Que conforme Gencil *et al.* (2021a) estes fatores são relacionados com a condutividade térmica. Também, conforme Pachla (2017) a água enclausurada no interior do concreto celular, devido ficar dentro de poros fechados, tem dificuldade de ser expulsa. Isso pode aumentar os valores de condutividade, uma vez que a água é condutora térmica.

Quanto à redução da condutividade devido a utilização do RCD, os resultados obtidos na bibliográfica são divergentes, onde Jones *et al.* (2012) não verificou mudança significativa na condutividade com a utilização de RCD, enquanto que Gencil *et al.* (2021b) que também fez a substituição total de agregado natural por areia de RCD verificou redução na condutividade térmica dos concretos celulares estudados por ele. No entanto a redução observada no presente estudo pode ser devido as características do agregado reciclado utilizado, que em sua composição tem cerâmica vermelha, e conforme Batista *et al.* (2022) apresenta estrutura porosa. Isso corrobora com os resultados da massa específica real onde pôde ser verificado um maior número de poros não permeáveis que podem ter influenciado positivamente na condutividade térmica.

4.2.5 Resistência à compressão

A fim de determinar o comportamento mecânico dos concretos celulares foram realizados ensaios de resistência à compressão em corpos de prova cilíndrico, instrumentados conforme Item 3.2.6.2. Do ensaio foram obtidos dados para a construção de gráficos de tensão/deformação e para o cálculo do módulo de elasticidade. Também são apresentados os dados de resistência à compressão de amostras prismáticas,

obtidas após o ensaio de flexão. Para os traços que obtiveram resistência média superior a 1,5 MPa, nas amostras cilíndricas, foram feitos ensaios para determinar o comportamento à compressão em temperatura ambiente e também para determinar o comportamento quando expostos às temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C, sendo assim possível determinar os parâmetros mecânicos residuais. A Tabela 15 apresenta os dados obtidos de resistência à compressão nos corpos de prova cilíndricos e prismáticos. A Figura 52 mostra a comparação de resistência à compressão axial dos corpos de prova cilíndricos e das amostras prismáticas, sem passar pelo processo de queima.

Tabela 15 – Resistência à compressão cilíndrica e prismática média

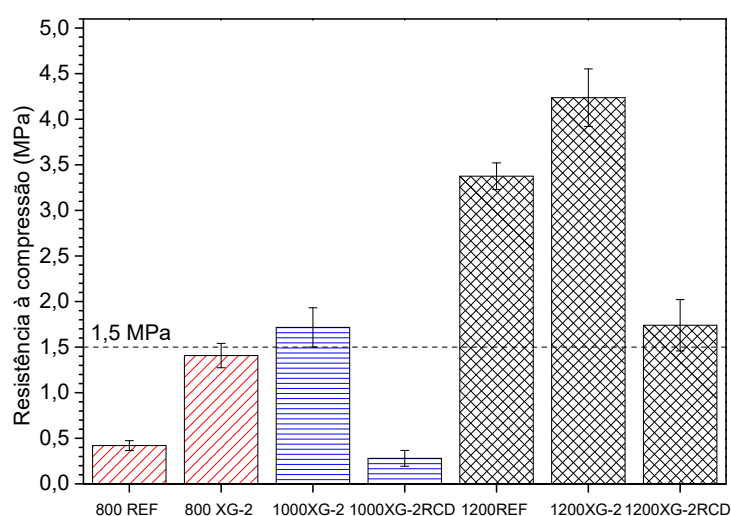
Traço	Resistência a compressão cilíndricos (MPa)	CV %	Resistência a compressão prismáticos (MPa)	CV %
800 REF	0,42	11,90	0,69	17,39
800 XG-2	1,41	9,22	1,73	15,61
1000 XG-2	1,72	12,79	2,11	13,74
1000 XG-2 RCD	0,28	32,14	0,43	30,23
1200 REF	3,38	4,43	4,55	8,57
1200 XG-2	4,24	7,54	4,37	8,47
1200 XG-2 RCD	1,74	16,09	2,03	10,84

Fonte: Autoria própria

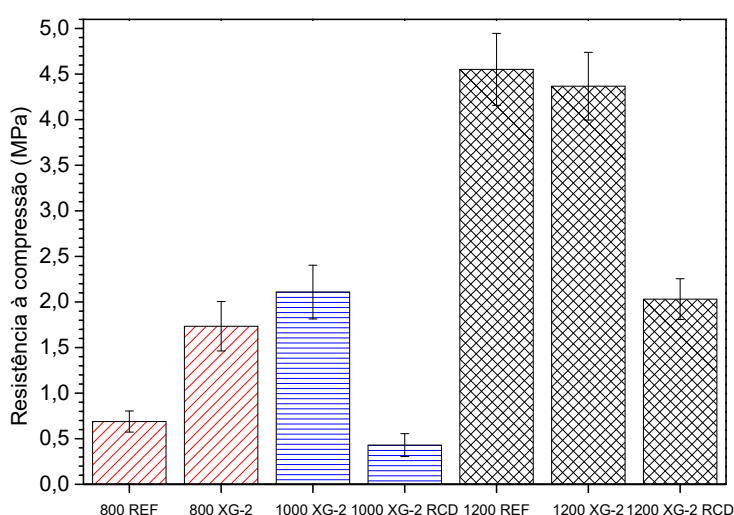
Como pode ser observado na Figura 52 (a), a utilização de goma xantana proporcionou aumento na resistência à compressão cilíndrica. Na densidade de 800 kg/m³, o traço referência apresentou resultado de 0,42 MPa e o traço com goma xantana a resistência média obtida foi de 1,41 MPa. Isso representa um aumento de 236%. A utilização de XG para o traço 1200 XG-2 proporcionou aumento de 25,44% na resistência à compressão média em comparação com o traço 1200 REF. Estes resultados estão de acordo com Hajimohammadi, Ngo e Mendis (2018) e Zhu *et al.* (2020) que também observaram aumento na resistência à compressão de seus concretos celulares, com valores de até 48,5% superiores com a utilização de XG.

Para os traços onde foram utilizados agregados reciclados foi observado uma perda de resistência à compressão. O traço 1000 XG-2 RCD apresentou uma resistência de 16,28% do valor encontrado para o traço 1000 XG-2. Em relação ao traço 1200 XG-2 RCD a resistência foi de 40,04% do valor obtido pelo traço 1200 XG-2. Tais resultados estão de acordo com Jones *et al.* (2012) e Gencel *et al.* (2021b) que verificaram menor resistência à compressão nos concretos celulares produzidos com RCD. Estes resultados podem ser justificados conforme abordado por Pasupathy, Ramakrishnan e Sanjayan (2021), que afirmam que a resistência mecânica reduzida das partículas de RCD aliado com a alta demanda de água do RCD, misturas com menores resistências mecânicas são obtidas. De acordo com Song e Lange (2021)

Figura 52 – Resistência à compressão: a) Compressão cilíndricos b) Compressão prismáticos



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria

a espuma é uma estrutura frágil e suscetível à utilização de partículas maiores, que podem perturbar o frágil sistema de bolhas de ar, formando vazios de ar irregulares, o que resulta em perda de desempenho mecânico. Desta forma é possível supor que o uso do agregado reciclado devido suas características de diâmetro máximo e módulo de finura maiores que o agregado natural, influenciaram negativamente na resistência à compressão do CC com RCD.

Para a resistência à compressão das amostras prismáticas, Figura 52 (b), é possível observar a tendência próxima dos resultados obtidos no ensaio de corpos de prova cilíndricos. No entanto, cabe salientar que conforme observado por Capraro *et al.* (2019) os resultados de compressão axial em corpos de prova cilíndricos, em

sua maioria são menores quando comparados aos corpos de prova prismáticos. Em concretos convencionais o fator de redução de um corpo de prova cúbico para um cilíndrico é de 30 a 40% e em argamassas os valores de redução são próximos à 42%. No presente estudo, para os concretos celulares estudados o fator de redução entre CP's cilíndricos e prismáticos foi de 22%.

A utilização de goma xantana, na avaliação das amostras prismáticas, proporcionou um aumento significativo para a mistura com densidade de 800 kg/m³ (150% maior que a mistura de REF). Nos traços de 1200 kg/m³, a utilização de goma xantana apesar de apresentar valor médio levemente menor que REF, na análise estatística não representa variação significativa (ver Tabela 32 (Apêndice A)). Com a utilização de agregado reciclado nos concretos celulares é possível observar a perda de resistência à compressão. O traço 1000 XG-2 RCD, apresentou resistência à compressão de 20,38%, comparado à mistura 1000 XG-2. O traço 1200 XG-2 RCD apresentou resistência à compressão de 46,45% comparado a resistência obtido pela mistura 1200 XG-2. Estes percentuais apresentam tendências similares às obtidas com os corpos de prova cilíndricos.

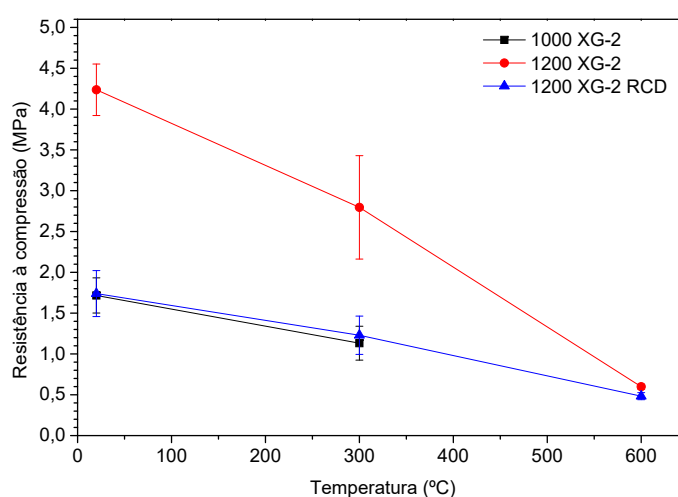
Com a avaliação dos resultados apresentados na Tabela 15, foram escolhidos para os ensaios residuais os traços 1000 XG-2, 1200 XG-2 e 1200 XG-2 RCD. Esses traços foram escolhidos por apresentarem resistência à compressão superior a 1,5 MPa, sendo esta a mínima estabelecida na NBR 15.270-1 (ABNT, 2017a). Os ensaios residuais foram realizados após a queima dos corpos de prova como apresentado no Item 3.2.7. Após a retirada dos corpos de prova da mufla, foi possível notar que todas as amostras submetidas a temperatura de 900 °C e as amostras de 600 °C para o traço de 1000 XG-2 estavam danificadas, a ponto de não ser possível a realização dos ensaios residuais propostos. Desta forma a Tabela 16 apresenta os resultados obtidos de resistência à compressão das amostras cilíndricas expostas nas temperaturas ambiente, 300 °C e 600 °C.

Tabela 16 – Resistência à compressão residual cilíndrica e prismática

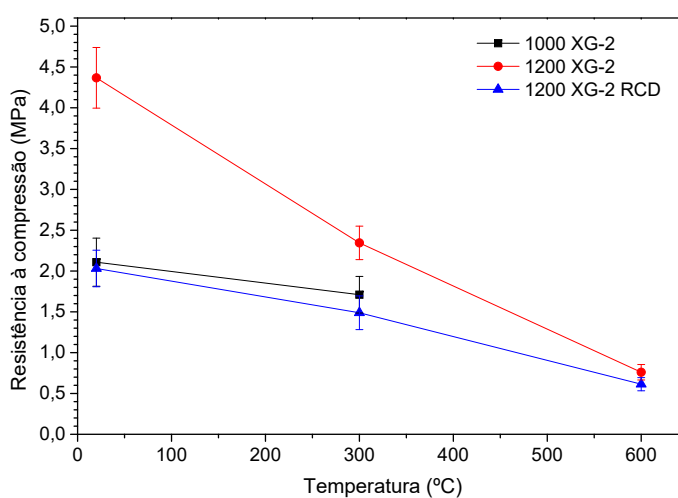
Traço	Compressão cilíndricos			Compressão prismáticos		
	Valor médio (MPa)	CV %	Normalizada (%)	Valor médio (MPa)	CV %	Normalizada (%)
1000 XG-2 AMB	1,72	12,79	100,00	2,11	13,74	100,00
1000 XG-2 300°C	1,13	18,58	65,96	1,71	12,87	81,09
1200 XG-2 AMB	4,24	7,55	100,00	4,37	8,47	100,00
1200 XG-2 300°C	2,80	22,5	65,99	2,35	8,94	53,70
1200 XG-2 600°C	0,60	5,00	14,14	0,76	11,82	17,40
1200 XG-2 RCD AMB	1,74	16,09	100,00	2,03	10,84	100,00
1200 XG-2 RCD 300 ^e	1,23	18,70	70,65	1,49	14,09	73,29
1200 XG-2 RCD 600 ^e	0,48	8,33	27,76	0,61	13,11	30,22

É possível observar que conforme ocorre o aumento da temperatura a resistência à compressão diminui. Tais resultados estão de acordo com o exposto por Mydin e Wang (2012) e por Tan *et al.* (2017), que avaliaram o comportamento do concreto celular em diferentes temperaturas. Para os autores temperaturas de até 170°C, a resistência à compressão diminui muito pouco, devido à liberação de água livre e parte da água quimicamente ligada. Com o incremento da temperatura, a decomposição do gel CSH e das fases de sulfoaluminato causaram trincas nos corpos de prova. Essas trincas tiveram efeito significativo sobre a resistência à compressão do concreto celular, o que pode ser observado nesse estudo também. Para facilitar a visualização os resultados, a Figura 53 apresenta graficamente a resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos nas temperaturas ambiente, 300°C e 600°C

Figura 53 – Resistência à compressão residual: a) Compressão cilíndricos b) Compressão prismáticos



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria

Na resistência à compressão cilíndrica, Figura 53 (a). Para os traços 1000 XG-2 e 1200 XG-2 RCD foi observado que em temperatura ambiente e quando exposta a 300°C, ambos apresentaram valores estatisticamente iguais, uma vez que eles ficaram dentro do intervalo das barras de erro de desvio padrão. O traço 1200 XG-2 foi o que exibiu maiores resultados antes da queima, 4,24 MPa, e também residual, quando exposta a temperatura de 300°C, com resistência de 2,80 MPa. Para a temperatura de 600°C os traços 1200 XG-2 e 1200 XG-2 RCD foram bastante afetados pela temperatura, obtendo-se assim resistência à compressão residual de 0,60 e 0,48 MPa, respectivamente.

Os corpos de prova prismáticos, Figura 53 (b), foram expostos nas mesmas temperaturas e ensaiados na resistência à compressão. Conforme ocorre o aumento da temperatura, a resistência à compressão das amostras prismáticas diminui. Essa redução é representada graficamente na Figura 52 (b). A redução da resistência à compressão é devido ao processo de decomposição da matriz e microfissuração, que segundo Mydin e Wang (2012), Tan *et al.* (2017) esses fatores tem efeito significativos no concreto celular.

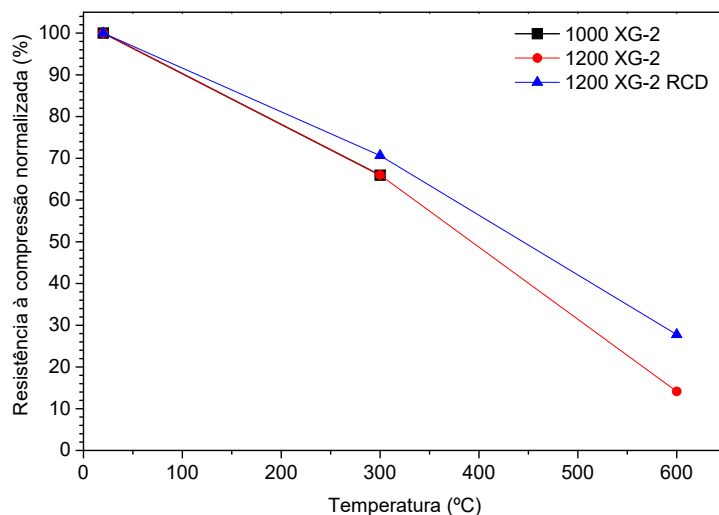
Para os traços 1000 XG-2 e 1200 XG-2 RCD foi observado que para a temperatura ambiente e em 300°C ambos tiveram valores estatisticamente iguais. O traço 1200 XG-2 foi o que apresentou maiores resultados antes da queima e residual de 300°C. Na temperatura de 600°C os traços 1200 XG-2 e 1200 XG-2 RCD foram bastante afetados pela temperatura e apresentaram valores próximos.

De forma complementar, a Figura 54 apresenta as curvas normalizadas em percentual da resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos. Pode ser observado, nos resultados dos corpos de prova cilíndricos, (Figura 54 (a)) que na temperatura de 300°C os concretos celulares de 1200 XG-2 e 1000 XG-2 mantiveram cerca de 66% da resistência original, ou seja àquela obtida para a temperatura ambiente. Na mesma temperatura (300°C) o traço 1200 XG-2 RCD manteve percentual levemente maior, de 70,65% da resistência inicial. Para a temperatura de 600°C foi possível identificar que a utilização de RCD possibilitou um índice de resistência residual maior. Assim o traço 1200 XG-2 RCD manteve 27,8% da resistência enquanto que o traço 1200 XG-2 manteve 14,14%, comparados a resistência em temperatura ambiente.

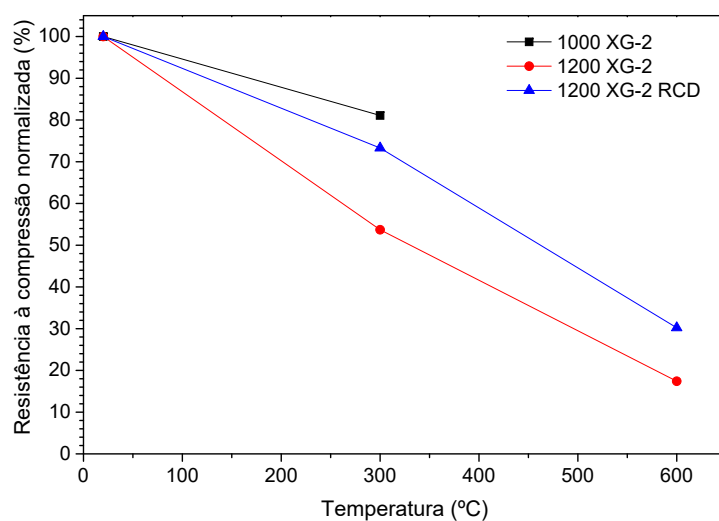
É possível supor que a maior resistência residual seja devido o uso de RCD na mistura, uma vez que esse resíduo possui cerâmica vermelha na sua composição. Conforme Rigão *et al.* (2021) a redução da resistência à compressão para um mesmo patamar de temperatura é maior para materiais cimentícios se comparado aos cerâmicos. E este comportamento é devido ao processo de fabricação, onde as cerâmicas são submetidas à temperaturas superiores as do ensaio. Desta forma não ocorre mudanças em sua composição nas condições do ensaio. Entretanto, para a matriz cimentícia, ocorrem reações deletérias devido a queima, que por consequência reduzem a resistência

mecânica.

Figura 54 – Resistência à compressão residual normalizada: a) Normalizada cilíndricos b) Normalizada prismáticos



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria

A Figura 54 (b) apresenta uma curva normalizada em percentual da resistência à compressão nas amostras prismáticas. Nela pode ser observado que o comportamento foi um pouco diferente dos corpos de prova cilíndricos, principalmente em 300°C. Desta forma, nessa temperatura os concretos celulares de 1000 XG-2 e 1200 XG-2 RCD mantiveram 81,09% e 73,29% da resistência original respectivamente. O traço 1200 XG-2 foi o que resultou em percentual menor dentre os traços com 53,70% da resistência original. Na temperatura de 600°C foi possível identificar que a utilização de RCD possibilitou um índice de resistência residual maior, onde o traço 1200 XG-2 RCD conservou 30,22% em comparação aos 17,40% do traço 1200 XG-2.

Com os resultados da resistência à compressão, antes da queima e residual, nas duas geometrias ensaiadas foi possível verificar os efeitos do RCD no concreto celular. Nessa condição, a cerâmica vermelha contida na composição do RCD, foi capaz de manter percentuais de resistência à compressão maiores daqueles quando utilizado agregado natural. Tais resultados vão de acordo à Rigão *et al.* (2021) que conclui que a redução da resistência à compressão para a mesma temperatura é maior para materiais cimentícios se comparado aos materiais cerâmicos.

4.2.6 Comportamento à compressão

Para construir curvas de tensão/deformação e obter o comportamento à compressão, tais como o módulo de elasticidade e deformação de pico, ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos nos traços 1000 XG-2, 1200 XG-2 e 1200 XG-2 RCD, os quais foram instrumentados e ensaios conforme item 3.2.6.2. A partir dos resultados obtidos foi montado a Tabela 17 que apresenta os valores médios da tensão de compressão em MPa, deformação de pico em mm/m e o módulo de elasticidade secante em MPa para todas as combinações de traço e temperaturas ensaiadas. Assim é possível visualizar os efeitos da degradação da matriz de concreto celular com o incremento de temperatura.

Tabela 17 – Dados do ensaio de comportamento à compressão

Traço	Tensão de Compressão		Deformação de Pico		Módulo de Elasticidade	
	Valor Médio (MPa)	CV (%)	Valor Médio (mm/m)	CV (%)	Valor Médio (MPa)	CV (%)
1000 XG-2 AMB	1,72	14,48	0,94	14,48	2135,26	9,07
1000 XG-2 300°C	1,13	18,28	1,96	18,26	1277,28	11,63
1200 XG-2 AMB	4,24	9,13	1,09	13,07	4350,47	9,01
1200 XG-2 300°C	2,80	27,75	1,60	8,06	2011,40	19,28
1200 XG-2 600°C	0,60	6,33	8,48	14,61	98,54	8,95
1200 XG-2 RCD AMB	1,74	18,69	1,46	26,44	1619,64	14,13
1200 XG-2 RCD 300°C	1,23	22,06	2,14	21,09	687,54	15,55
1200 XG-2 RCD 600°C	0,48	10,30	7,98	10,55	75,81	9,87

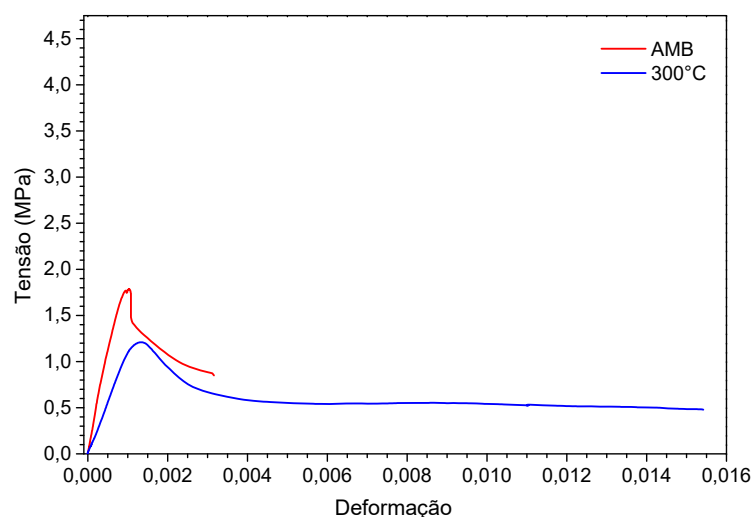
Fonte: Autoria própria

Com os resultados obtidos na Máquina de ensaios, foram plotadas as curvas de tensão/deformação para todos os traços e temperaturas ensaiadas (Apêndice B). Porém, para fazer a comparação do comportamento dos materiais cimentícios, foram escolhidas curvas representativas de cada traço, denominadas curvas típicas.

A Figura 55 mostra as curvas típicas obtidas para o traço 1000 XG-2, que foi ensaiado em duas temperaturas (ambiente e 300°C). É possível observar nas curvas que, com o acréscimo da temperatura ocorreu redução na tensão máxima e aumento na deformação do pico. Comparando os valores médios obtidos, a redução na tensão

de compressão foi de 34,30% e a deformação no pico mostrou aumento de 108,50% (ver Tabela 17).

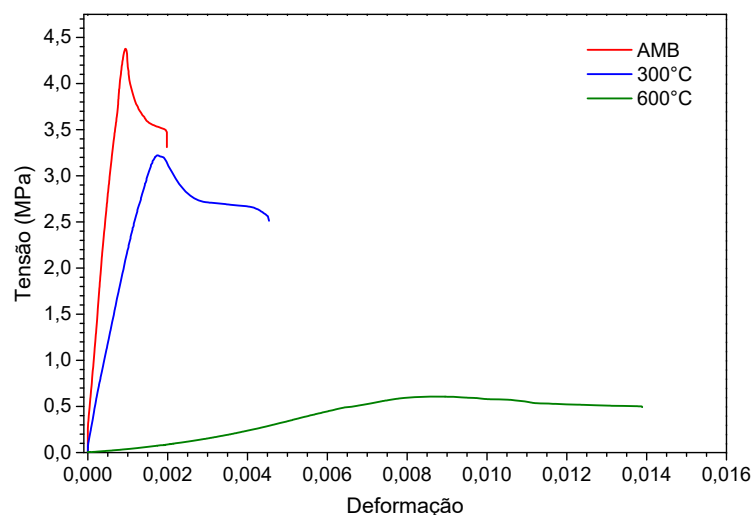
Figura 55 – Curvas típicas mistura 1000 XG-2



Fonte: Autoria própria

As curvas típicas do traço 1200 XG-2 são apresentadas na Figura 56. Pode ser observado que, devido o aumento da temperatura de queima ocorre a perda de resistência e rigidez, e aumento na deformação das amostras. Comparando os valores médios apresentados na Tabela 17, a redução de tensão máxima foi de 33,96% quando as amostras foram expostas a temperatura de 300 °C. Para a exposição das amostras em 600°C os valores apresentaram uma redução da tensão de compressão de 85,84%. A deformação média apresentou aumento de 46,78% (300°C) e 677,98% (600°C).

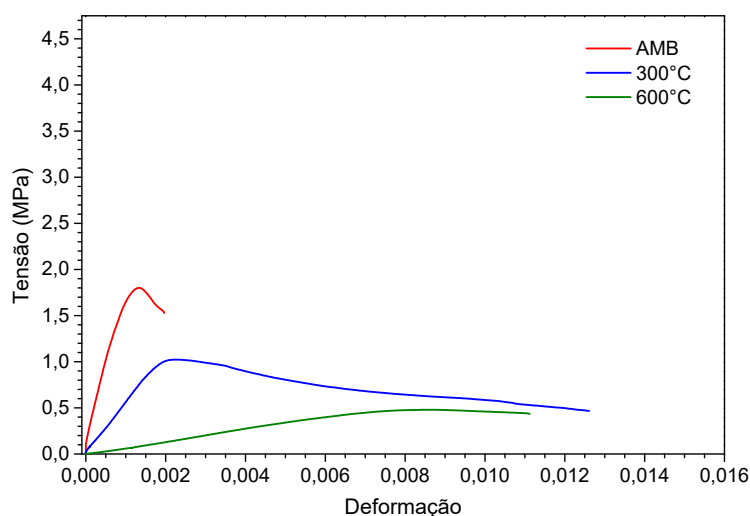
Figura 56 – Curvas típicas mistura 1200 XG-2



Fonte: Autoria própria

A Figura 57 mostra as curvas típicas para o traço 1200 XG-2 RCD. Como pode ser visto, o comportamento da mistura apresentou tendência igual aos demais traços, com redução na tensão de compressão e rigidez, e aumento na deformação. A tensão média obteve redução de 29,31% para a temperatura de exposição de 300°C e de 72,41% na temperatura de exposição de 600°C. A deformação média apresentou aumento com o incremento da temperatura, sendo 46,57% maior na temperatura de 300°C e 446,57% maior em 600°C (ver Tabela 17).

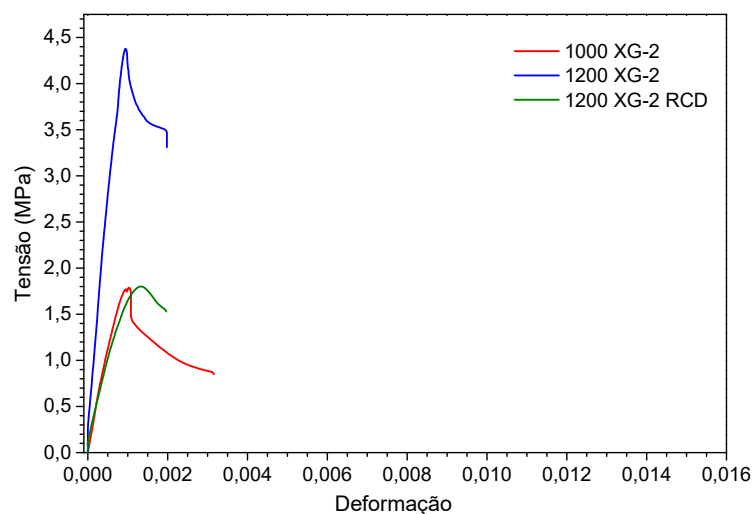
Figura 57 – Curvas típicas mistura 1200 XG-2 RCD



Fonte: Autoria própria

Quando plotadas as curvas dos diferentes traços na mesma condição de temperatura, é possível identificar o comportamento dos concretos celulares. Desta forma, a Figura 58 mostra os resultados para a temperatura ambiente sem queima. É possível observar que o traço 1200 XG-2 obteve pico de tensão aproximadamente de 145% maior que os outros dois traços, os quais tiveram valores muito próximos. As deformações para os corpos de prova sem queima tiveram valores muito próximos entre 1200 XG-2 e 1000 XG-2, onde o traço com maior densidade apresentou resultado 7,55% maior. O traço com a utilização de RCD apresentou resultado 55,31% e 33,95% maior que 1000 XG-2 e 1200 XG-2 respectivamente. Tais resultados podem ser justificados, pois concretos com RCD apresentarem menor módulo de elasticidade que concretos com agregado natural. Também a menor rigidez do traço 1000 XG-2 é justificada pois concretos menos densos apresentam menor módulo de elasticidade.

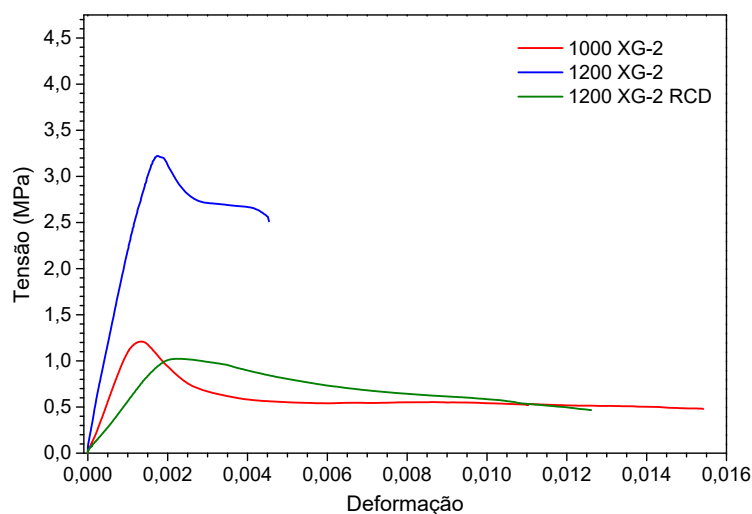
Figura 58 – Curvas típicas para a temperatura ambiente



Fonte: Autoria própria

Quanto as curvas obtidas para a temperatura de 300°C (Figura 59) pode ser observado que a deformação máxima para o traço de 1000 XG-2 foi o que apresentou a menor deformação sendo 20,93% menor que 1200 XG-2 e 41,63% menor que 1200 XG-2 RCD. O traço 1200 XG-2 RCD foi o que exibiu maior deformação com 35,46% maior que 1200 XG-2. No que se refere à tensão máxima o traço 1200 XG-2 permaneceu apresentando os maiores resultados com 215,33% superior à 1200 XG-2 RCD e 167,08% maior que 1000 XG-2. O traço 1000 XG-2 apresentou resultado 18,06% superior ao traço de 1200 XG-2 RCD.

Figura 59 – Curvas típicas para a temperatura 300 °C

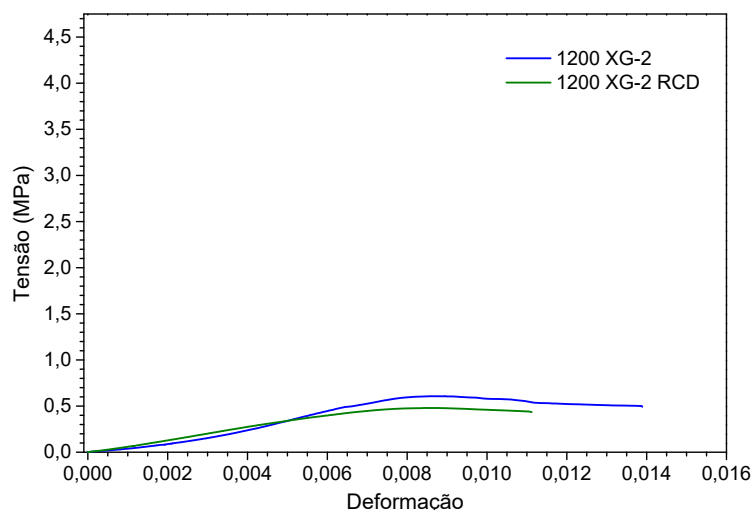


Fonte: Autoria própria

Na Figura 60 são mostradas as curvas típicas das amostras levadas a tempe-

ratura de queima de 600°C. Cabe ressaltar que foi possível ensaiar apenas os traços 1200 XG-2 e 1200 XG-2 RCD. Em ambos os casos os valores de deformação foram muito altos e variando pouco entre si, onde a deformação de 1200 XG-2 RCD foi 4,79% superior que 1200 XG-2. A tensão máxima para os dois traços também foi bastante afetada.

Figura 60 – Curvas típicas para a temperatura 600 °C



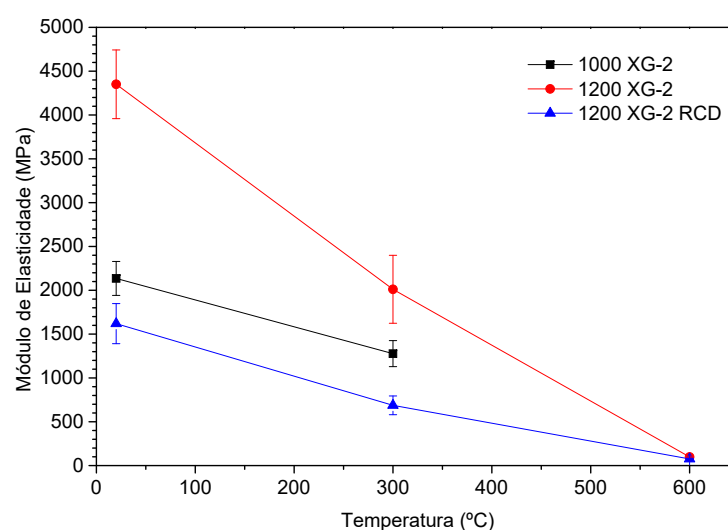
Fonte: Autoria própria

Após a verificação das curvas e da Tabela 17 é possível observar que, apesar de valores de tensão e deformação distintos entre os traços o comportamento nas mesmas condições de ensaio (temperatura de queima) foram similares. Com o aumento da temperatura ocorreu a perda de rigidez das amostras. Mydin e Wang (2012) também verificaram que a deformação correspondente do pico de resistência aumentou com o aumento da temperatura. Em seus resultados, os concretos celulares apresentaram aumento médio da deformação das amostras quando expostas a temperatura de 600°C foi de 97,06%. Para os autores este aumento da deformação é resultado da microfissuração iniciada pelo aquecimento em temperaturas mais elevadas. Para o presente estudo, nos dois traços ensaiados em 600°C, as deformações médias de pico apresentaram aumento de 562% maiores que a deformação média em temperatura ambiente.

O módulo de elasticidade foi calculado como o módulo secante até a carga correspondente a 40% da carga de ruptura. Para a construção da Figura 61, que demonstra as mudanças no módulo de elasticidade do concreto celular em função da temperatura, foram usados os dados da Tabela 17. Em temperatura ambiente é possível notar que devido a redução de densidade ocorre a redução dos valores do módulo de elasticidade. Essa redução já havia sido verificada por Mydin e Wang (2012) e Tan *et al.* (2017) e é justificada devido à menor quantidade de pasta/argamassa

na composição em densidades menores, o que resulta em um comportamento mais deformável. Gencil *et al.* (2021b) verificaram que a utilização do RCD resultou em um menor módulo de elasticidade, principalmente quando realizada a substituição total do agregado miúdo. Essa observação é atribuída à microestrutura mais porosa de concretos celulares contendo RCD em comparação com aqueles que contêm apenas areia natural.

Figura 61 – Comportamento do módulo de elasticidade para as temperaturas estudadas



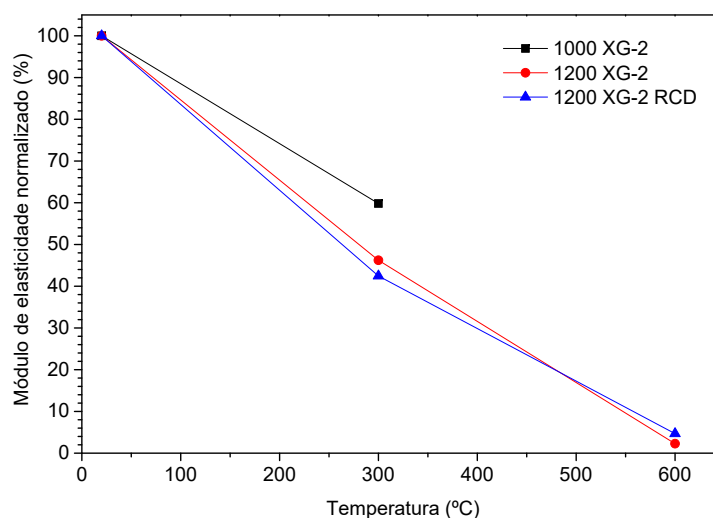
Fonte: Autoria própria

Com o incremento da temperatura ocorreu a redução dos valores do módulo de elasticidade. De forma que, os traços 1000 XG-2, 1200 XG-2 e 1200 XG-2 RCD que em temperatura ambiente apresentaram resultados de 2135,26 MPa, 4350,47 MPa e 1619,64 MPa respectivamente passaram a apresentar resultados de 1277,28 MPa, 2011,40 MPa e 687,54 MPa em 300°C. O módulo residual obtido das amostras exposta a temperatura de 600°C foi de 98,54 MPa e 75,81 MPa para os traços de 1200 XG e 1200 XG-2 RCD. A Tabela 31 (Apêndice A) do teste de Tukey apresenta, para todas as combinações de densidade e temperaturas, a análise estatística dos resultados. É possível observar que todas as combinações foram estatisticamente diferentes.

Com os resultados normalizados (Figura 62) é visto que a redução do módulo de elasticidade é mais acentuada que a redução da resistência do concreto celular. Na temperatura de 300°C o traço 1000 XG-2 manteve cerca de 60% do valor de referência enquanto os traços de 1200 XG-2 e 1200 XG-2 RCD apresentaram 46% e 42% de módulo residual. Os resultados obtidos para a temperatura de 600°C, nos traços 1200 XG-2 e 1200 XG-2 RCD obtiveram resultado residual de apenas 2,27% e 4,68%, respectivamente. É possível notar que o módulo de elasticidade residual, com a utilização de RCD, resultou em maior índice o que também foi observado anteriormente

na resistência à compressão normalizada.

Figura 62 – Módulo de elasticidade em diversas temperaturas normalizado



Fonte: Autoria própria

Mydin e Wang (2012) apontam que a perda no módulo de elasticidade começa imediatamente após o aquecimento devido a perda de água livre e quimicamente ligada. Esta perda de rigidez para material à base de cimento, como concreto celular, em temperaturas elevadas, ocorre independentemente da densidade. Isso indica que o principal mecanismo causador da degradação é a microfissuração, causada pela degradação da matriz.

Conforme Li *et al.* (2020) a deterioração do concreto causada por altas temperaturas é o resultado combinado de: fissuras causadas pela evaporação de água livre; fissuras causadas pela expansão térmica da matriz e agregados; decomposição da matriz de cimento endurecido e agregados. Com isso é possível verificar que na temperatura de 600°C os processos de degradação do concreto foram bastante avançados. A fissuração resultante da queima é mostrada na Figura 63.

Figura 63 – Fissuração dos corpos de prova 1200 XG-2 600°C



Fonte: Autoria própria

4.2.7 Resistência à tração na flexão

A resistência a tração na flexão de três pontos foi ensaiada para todos os traços na temperatura ambiente. Os traços de 1000 XG-2, 1200 XG-2 e 1200 XG-2 RCD também foram ensaiados à tração na flexão pós queima, para as temperaturas de 300°C e de 600°C. Os valores médios de resistência à tração na flexão de três pontos, juntamente com o desvio padrão e coeficiente de variação são apresentados na Tabela 18. A Figura 64 mostra a comparação dos resultados obtidos de tração na flexão ensaiados à temperatura ambiente.

Tabela 18 – Resistência à tração na flexão média

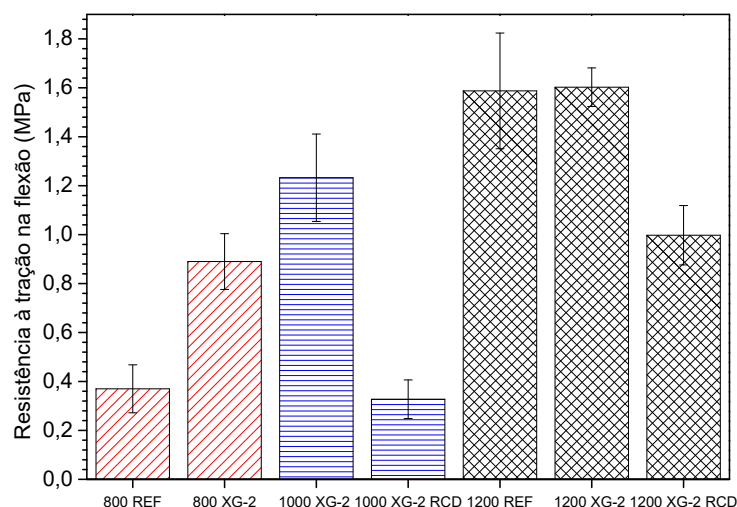
Traço	Resistência à tração na flexão (MPa)	Desvio padrão	CV %
800 REF	0,37	0,10	27,03
800 XG-2	0,89	0,11	12,36
1000 XG-2	1,23	0,18	14,63
1000 XG-2 RCD	0,33	0,08	24,24
1200 REF	1,59	0,24	15,09
1200 XG-2	1,60	0,08	5,00
1200 XG-2 RCD	1,00	0,12	12,00

Fonte: Autoria própria

Conforme pode ser visto na Tabela 18 e na Figura 64 a utilização de goma xantana contribuiu com o acréscimo da resistência para o traço de densidade 800 kg/m³, onde o traço 800 XG-2 apresentou valores 140,54% superiores à 800 REF. Para os traços de densidade 1200 kg/m³ não foi encontrado diferença significativa com a utilização de XG, como pode ser observado na Tabela 33 (Apêndice A). A utilização de RCD proporcionou a redução da resistência a tração na flexão nos dois traços estudados. Os traços 1000 XG-2 RCD e 1200 XG-2 RCD tiveram, respectivamente, 26,83% e 62,5% dos valores obtidos pelos seus equivalentes sem RCD.

Em nenhum dos artigos encontrados foi analisada a tração na flexão de concretos celulares estabilizados com goma xantana ou de concretos celulares com RCD. Desta forma não existe comparativo com a bibliografia. No entanto é esperado que devido a melhora na resistência à compressão encontrada com a adição de XG, a resistência à tração na flexão também apresente resultados superiores ao referência. No caso de concretos celulares com RCD, devido ao maior diâmetro máximo característico do RCD, foi mais representativo em traços mais compactos e criou fragilidades maiores quando ensaiada a tração na flexão. Também com os resultados menores de resistência à compressão, é esperado que a resistência à tração na flexão seja menor, quando comparado aos concretos celulares com agregado natural.

Figura 64 – Resistência à tração na flexão



Fonte: Autoria própria

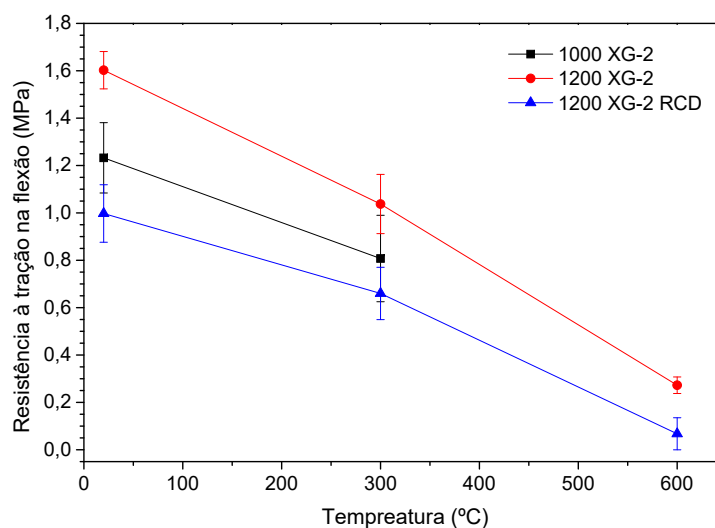
Os traços 1000 XG-2, 1200 XG-2 e 1200 XG-2 RCD foram ensaiados após a exposição às temperaturas de 300°C e 600°C. A Tabela 19 apresenta os valores médios da resistência à tração na flexão em MPa, o desvio padrão, o coeficiente de variação, bem como a resistência à tração na flexão normalizada em percentual. Para auxiliar a Figura 65 mostra de forma gráfica a redução da resistência à tração na flexão com o incremento de temperatura. É possível notar que, ocorreu uma redução na resistência à tração na flexão independente da densidade do concreto celular. Esses resultados são consistentes com as alterações nas outras propriedades mecânicas do CC. Para Mydin e Wang (2012) isso indica que o principal mecanismo causador da degradação é a microfissuração, que ocorre quando a água livre e a água ligada quimicamente evaporam do corpo poroso.

Tabela 19 – Resistência à tração na flexão em três temperaturas

Traço	Resistência à tração na flexão (MPa)	Desvio padrão	CV %	Resistência à tração na flexão normalizada (%)
1000 XG-2 AMB	1,23	0,18	12,20	100,00
1000 XG-2 300°C	0,81	0,26	22,22	65,52
1200 XG-2 AMB	1,60	0,08	5,00	100,00
1200 XG-2 300°C	1,04	0,12	11,54	64,74
1200 XG-2 600°C	0,27	0,03	11,11	17,00
1200 XG-2 RCD AMB	1,00	0,12	12,00	100,00
1200 XG-2 RCD 300°	0,66	0,11	16,67	66,17
1200 XG-2 RCD 600°	0,07	0,02	28,57	6,77

Fonte: Autoria própria

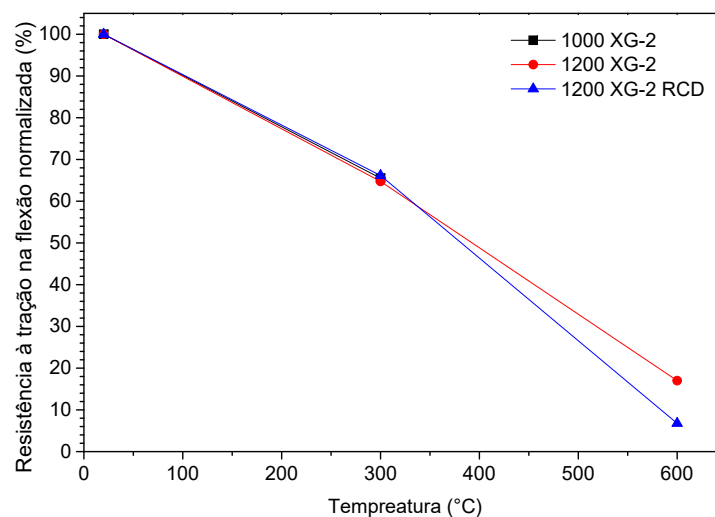
Figura 65 – Resistência à tração na flexão em três temperaturas



Fonte: Autoria própria

Com intuito de comparar a perda de resistência em percentual foi montada a Figura 66 onde é possível observar a resistência à tração na flexão normalizada para os três traços ensaiados. Na temperatura de 300°C a resistência residual em todos os traços foi muito similar, com valores próximos de 65%. Esta redução em 300°C é devido ao início da decomposição do CSH e das fases de sulfoaluminato. A resistência residual em 600°C para os traços 1200 XG-2 e 1200 XG-2 RCD, foi de apenas 17,00% e 6,77%, respectivamente, o que indica processos de deterioração física e química da matriz, pois a degradação encontra-se bastante avançada nestas condições. A queda da resistência mecânica com o aumento de temperatura está de acordo com Mydin e Wang (2012) que verificou comportamento parecido com os obtidos nesse trabalho.

Figura 66 – Resistência à tração na flexão em três temperaturas normalizada

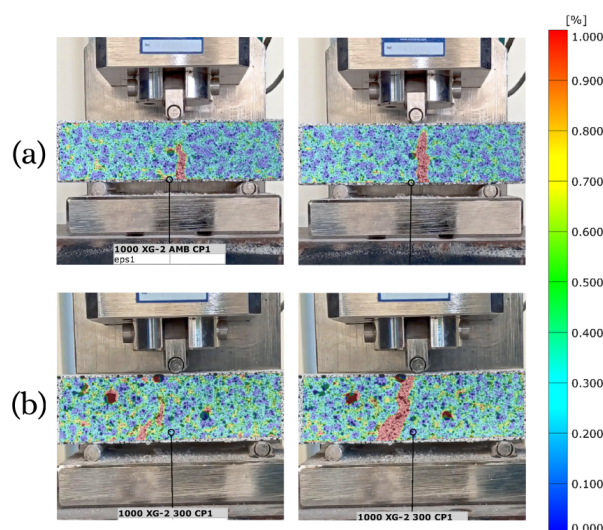


Fonte: Autoria própria

De forma complementar ao ensaio de resistência à tração na flexão, foi realizada a correlação de imagens digitais (CDI). Com isso podem ser identificadas as tensões atuantes durante o ensaio e o método de fratura dos corpos de prova. Para tal, foram usadas imagens que representassem o comportamento típico dos concretos celulares nas temperaturas ensaiadas. As imagens registradas apresentam, para cada traço e temperatura ensaiada, o início e o final do processo de fissuração durante o ensaio.

A Figura 67 mostra em: (a) o ensaio de um corpo de prova sem queima e em (b) o ensaio de um corpo de prova queimado a 300°C, ambos para o traço 1000 XG-2. É possível identificar que ambas temperaturas apresentaram forma de ruptura similar com o comportamento esperado para o ensaio de tração na flexão.

Figura 67 – CDI amostras 1000 XG-2: a) AMB e b) 300°C

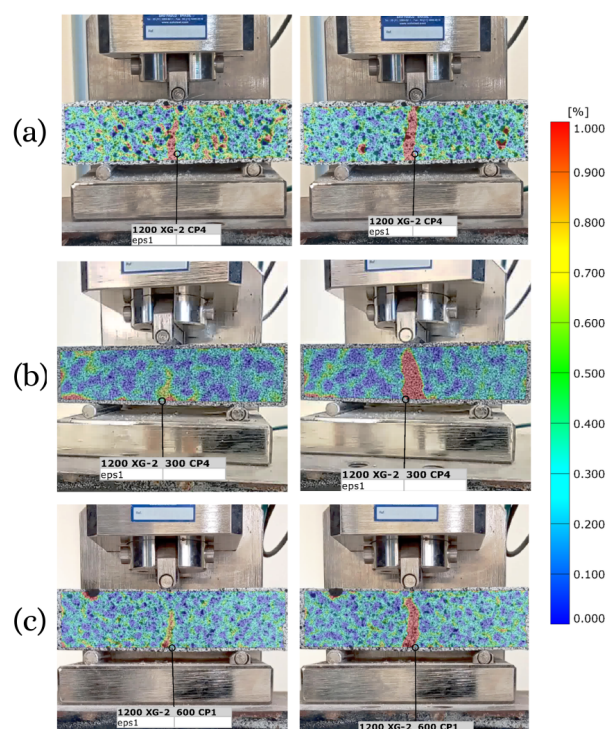


Fonte: Autoria própria

A Figura 68 mostra os ensaios para o traço de 1200 XG-2, onde em (a) é o corpo de prova sem queima, em (b) corpo de prova queimado à 300°C e em (c) corpo de prova queimado à temperatura de 600°C. É possível notar que todos tiveram forma de ruptura padrão, centralizado no comprimento do corpo de prova.

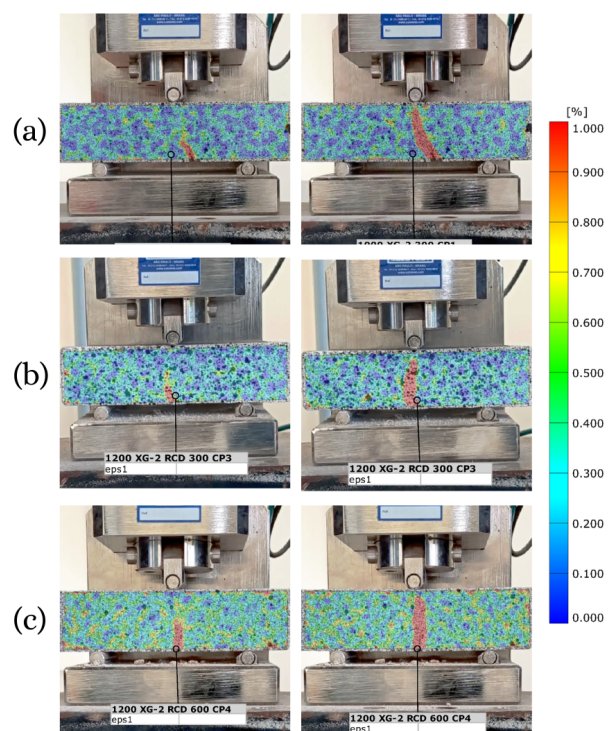
Para o traço 1200 XG-2 RCD a Figura 69 mostra em (a) corpo de prova sem queima, em (b) corpo de prova queimado à 300°C e em (c) corpo de prova queimado à 600°C. É possível notar que todos tiveram forma de ruptura padrão e independente da utilização do agregado reciclado não demonstrou processo de fissuração diferentes entre si.

Figura 68 – CDI amostras 1200 XG-2: a) AMB, b) 300°C e c) 600°C



Fonte: Autoria própria

Figura 69 – CDI amostras 1200 XG-2 RCD: a) AMB, b) 300°C e c) 600°C



Fonte: Autoria própria

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa. Em seguida, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros, as quais foram propostas com base nos resultados e nas conclusões finais.

5.1 Conclusões

Diante de todas as análises realizadas é possível concluir que o objetivo geral da pesquisa foi atingido.

- 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.
- Ao utilizar goma xantana, concluí-se que, para a densidade alvo de 800 kg/m³, promoveu poros menores e mais circulares, e aumento da densidade. Porém, a XG manteve o índice de vazios, a absorção de água por imersão e reduziu a ascensão capilar. Em relação as amostras de 1200 kg/m³, a ação de XG não foi tão expressiva quanto em 800 kg/m³, mas ainda resultando em valores melhores que o traço referência. A utilização de RCD nos traços de 1000 kg/m³ e 1200 kg/m³ resultou em menor densidade, índice de vazios e absorção de água, mas maior capilaridade.
- Foi possível identificar que, a condutividade térmica dos concretos celulares, devido à utilização de goma xantana, apresentaram maior valor de condutividade. No entanto, a ação de RCD e XG possibilitaram a redução da condutividade. Desta forma, se utilizado como vedação o concreto celular com RCD resultaria em uma maior eficiência energética. Cabe ressaltar também que todas as amostra de concreto celular produzidas nesse estudo apresentaram condutividade térmica muito menores que a estabelecida pela NBR 15.575 (ABNT, 2021b).
- No que diz respeito a resistência à compressão, tanto em corpos de prova cilíndricos como nas amostras prismáticas houve aumento quando usado Goma Xantana na composição da espuma. Isso se deve a melhor qualidade da espuma quando utilizado Goma Xantana. O uso de RCD prejudicou a resistência à compressão dos concretos avaliados. É possível supor que o uso do agregado reciclado devido suas características de granulometria, diâmetro máximo e módulo de finura maiores que o agregado natural, influenciaram negativamente na resistência à compressão do CC com RCD.

- Em relação a resistência residual à compressão e tração na flexão das amostras submetidas as temperaturas de queima de 300°C e 600°C, todas as amostras apresentaram perda de resistência com o aumento de temperatura. A diminuição das resistências é atribuída a decomposição dos compostos de hidratação e microfissuração dos corpos de prova.
- Em relação ao comportamento à compressão, além das perdas de resistências após a queima das misturas estudadas, houve a diminuição da rigidez conforme aumentou a temperatura de análise. Por consequência, houve o aumento da deformação de pico quando aumentado a temperatura de queima das misturas.

Por fim, a goma xantana se demonstrou um importante material na geração de espuma, dando estabilidade e uniformidade necessária para a produção dos concretos celulares. A substituição da areia natural por RCD, com as características estudadas aqui, não proporcionaram características técnicas que justifiquem seu uso, tanto para temperatura ambiente como para as demais temperaturas estudadas de 300°C e 600°C.

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:

- Produzir concretos celulares com uma fração mais fina de RCD a fim de não interferir no frágil sistema de bolhas;
- Produzir concretos celulares com substituição parcial de areia natural por RCD;
- Investigar a utilização de goma xantana em concretos celulares com densidades inferiores a 800 kg/m³, assim como aumentar o teor de Goma Xantana;
- Reproduzir o concreto celular a fim de verificar o seu comportamento em relação a retração por secagem e ao comportamento acústico;
- Produzir um concreto celular espumoso com densidade de 1200 kg/m³ com maiores teores de Goma Xantana;
- Investigar a utilização de Goma Xantana e a interação com fibras em concretos celulares.

REFERÊNCIAS

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: Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam**. West Conshohocken, 2012. 6 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.646: Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local - Especificação**. Rio de Janeiro, 1992. 2 p.

_____. **NBR 14.432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações: Procedimento**. Rio de Janeiro, 2001. 14 p.

_____. **NBR 9.077: Saídas de emergência em edifícios**. Rio de Janeiro, 2001. 40 p.

_____. **NBR 9.778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009. 4 p.

_____. **NBR 12.142: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010. 5 p.

_____. **NBR 9.779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

_____. **NBR 12.644: Concreto leve celular estrutural — Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco**. Rio de Janeiro, 2014. 2 p.

_____. **NBR 8.953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2015. 3 p.

_____. **NBR 15.270-1: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2017. 26 p.

_____. **NBR 16.605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017. 5 p.

_____. **NBR 5.739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

_____. **NBR 15.116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2021. 16 p.

_____. **NBR 15.575: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2021. 98 p.

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

_____. **NBR 16.945: Classificação da resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações.** Rio de Janeiro, 2021. 69 p.

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

_____. **NBR 8.522-1: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão.** Rio de Janeiro, 2021. 24 p.

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

_____. **NBR 17.071: Parede de concreto celular estrutural moldada no local para a construção de edificações - Projeto, execução e controle - Requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro, 2022. 49 p.

_____. **NBR 7.211: Agregados para concreto - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2022. 10 p.

BARDINI, C.; GODINHO, D. d. S. d. S. Análise micro estrutural do concreto produzido com agregados reciclados sob altas temperaturas. 2019.

BATISTA, B. C. C. *et al.* Influência da adição de rcd misto na resistência à compressão e na porosidade de argamassa. **Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 59, n. 3, p. 934–946, 2022.

BELEZA, S. C. A. **Medição de deformações através da técnica de Correlação Digital de Imagem.** Dissertação (Mestrado) — Universidade nova de Lisboa, 2017.

BINDIGANAVILE, V.; HOSEINI, M. 16 - foamed concrete. In: MINDESS, S. (Ed.). **Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete (Second Edition).** Second edition. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2019, (Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering). p. 365–390.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **476-20: Fire tests on building materials and structures. Part 20. Method for determination of the fire resistance of elements of construction (general principles).** London, 1987. 36 p.

CAPRARO, D. *et al.* Avaliação experimental e numérica da influência da forma e dimensão de corpos de prova de argamassa em ensaios de compressão. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, SciELO Brasil, v. 12, p. 429–444, 2019.

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

COELHO, A. R. *et al.* Influence of thermal shock by brush cooling of concrete in fire situations. **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 25, 2020.

CORTELASSI, E. M. **Avaliação do comportamento de concretos celulares espumosos de alto desempenho. 2005.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Londrina, Engenharia de Edificações e Saneamento, 2005.

CORTELASSI, E. M.; CARBONARI, B. M. T. Concretos celulares espumosos de alto desempenho – avaliação do comportamento de durabilidade. **Encontro Nacional Betão Estrutural**, BE2008, p. 10, 2008.

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.

COSTA, S. N. O.; PINHO, A. S.; SANTOS, E. D. A. Caracterização física, química e biológica da goma xantana comercial. **Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana**,(10), p. 25–30, 2019.

DALTIN, D. **Tensoativos: química, propriedades e aplicações**. [S.l.]: Editora Blucher, 2011.

DHASINDRAKRISHNA, K. *et al.* Effect of yield stress development on the foam-stability of aerated geopolymer concrete. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 138, p. 106233, 2020.

FAVARETTO, P. *et al.* Characterization and use of construction and demolition waste from south of brazil in the production of foamed concrete blocks. **Applied Sciences**, MDPI, v. 7, n. 10, p. 1090, 2017.

FERNANDES, B. *et al.* Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, SciELO Brasil, v. 10, p. 838–863, 2017.

FERREIRA, O. A. R. **Concretos celulares espumosos**. São Paulo, 1987.

FREITAS, I. M. **Avaliação da Substituição total de areia natural por RCC no desenvolvimento de concreto celular espumigeno**. Monografia (TCC) — Faculdade IMED escola politécnica, 2018.

GENCEL, O. *et al.* 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.

_____. Recycling waste concretes as fine aggregate and fly ash as binder in production of thermal insulating foam concretes. **Journal of Building Engineering**, Elsevier, v. 38, p. 102232, 2021.

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.

HILAL, A. A.; THOM, N. H.; DAWSON, A. R. On entrained pore size distribution of foamed concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 75, p. 227–233, 2015.

HUANG, H. *et al.* Effects of chemical and mineral admixtures on the foam indexes of cement-based materials. **Case Studies in Construction Materials**, Elsevier, v. 11, p. e00232, 2019.

HUERTAS COBOS, N. G. **Diseño de mezcla de un concreto celular de baja densidad utilizando residuos de cantera**. Monografía (TCC) — UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA, 2021.

JONES, M.; MCCARTHY, A. Heat of hydration in foamed concrete: Effect of mix constituents and plastic density. **Cement and concrete research**, Elsevier, v. 36, n. 6, p. 1032–1041, 2006.

JONES, R. *et al.* Use of recycled and secondary aggregates in foamed concretes. **Magazine of concrete research**, Thomas Telford Ltd, v. 64, n. 6, p. 513–525, 2012.

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

KOKSAL, F.; SAHIN, Y.; GENCEL, O. Influence of expanded vermiculite powder and silica fume on properties of foam concretes. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 257, p. 119547, 2020.

KUMAR, R.; BHATTACHARJEE, B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. **Cement and concrete research**, Elsevier, v. 33, n. 1, p. 155–164, 2003.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. Reciclagem de entulhos na construção civil, a solução política e ecologicamente correta. **Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, v. 1, p. 315–325, 1995.

LI, C. *et al.* Effects of viscosity modifying admixture (vma) on workability and compressive strength of structural eps concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 175, p. 342–350, 2018.

LI, L. *et al.* A review on the recovery of fire-damaged concrete with post-fire-curing. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 237, p. 117564, 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. SÃO PAULO: IBRACON, 2008.

MELO, G. F. de. **Concreto celular polimérico: influência na adição de resíduo de poliéster insaturado termofixo**. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

MYDIN, M. A. O.; WANG, Y. Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 26, n. 1, p. 638–654, 2012.

NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K. Structure and properties of aerated concrete: a review. **Cement and Concrete composites**, Elsevier, v. 22, n. 5, p. 321–329, 2000.

NEDELJKOVIĆ, M. *et al.* Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. **Journal of Building Engineering**, Elsevier, v. 38, p. 102196, 2021.

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.

OTHUMAN, M. A.; WANG, Y. Elevated-temperature thermal properties of lightweight foamed concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 25, n. 2, p. 705–716, 2011.

PACHLA, E. C. **DESEMPENHO TÉRMICO-ACÚSTICO-MECÂNICO-DURABILIDADE DE COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA COM REDUZIDA MASSA ESPECÍFICA REFORÇADOS POR CASCA E PALHA DO ARROZ**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pampa, 2017.

PASUPATHY, K.; RAMAKRISHNAN, S.; SANJAYAN, J. Influence of recycled concrete aggregate on the foam stability of aerated geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 271, p. 121850, 2021.

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.

RIGÃO, A. O. *et al.* Desempenho mecânico de alvenaria estrutural cerâmica e seus componentes em temperaturas elevadas. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 22402–22415, 2021.

RILEM, T. 129-mht, “test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, part 4—tensile strength for service and accident conditions,”. **Mater. Struct**, v. 33, n. 228, p. 219–223, 2000.

ROCHA, J. H. A.; FARIAS, L. do N. Fluência de concreto com agregados reciclados: uma revisão. **ES Engineering and Science**, v. 11, n. 1, p. 1–21, 2022.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos-dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2003.

ROSTIROLA, Â. C. F. **Estudos exploratórios da produção de concreto celular autoclavado com o emprego de finos oriundos da reciclagem de concreto como agregados**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, 2013.

SHANG, X.; QU, N.; LI, J. Development and functional characteristics of novel foam concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 324, p. 126666, 2022.

SHE, W. *et al.* Application of organic-and nanoparticle-modified foams in foamed concrete: reinforcement and stabilization mechanisms. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 106, p. 12–22, 2018.

SILVA, A. Q. N. da. **Correlação de imagens digitais em ensaios de compressão diametral em rochas**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

SILVA, C. A. d. O. **Estudo de dosagem e avaliação de concreto celular com fins estruturais**. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS, 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.

SOUZA, L. D. P. d. *et al.* **Análise do comportamento estrutural de vigas de concreto armado submetidas às altas temperaturas utilizando a metodologia do planejamento fatorial**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, 2016.

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**, Elsevier, v. 186, p. 833–839, 2018.

SURYANITA, R. *et al.* The effect of silica fume admixture on the compressive strength of the cellular lightweight concrete. **Results in Engineering**, Elsevier, v. 14, p. 100445, 2022.

TAM, C. *et al.* Relationship between strength and volumetric composition of moist-cured cellular concrete. **Magazine of Concrete Research**, Thomas Telford Ltd, v. 39, n. 138, p. 12–18, 1987.

TAN, X. *et al.* Influence of high temperature on the residual physical and mechanical properties of foamed concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 135, p. 203–211, 2017.

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

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

WANG, W. *et al.* Mix design for recycled aggregate thermal insulation concrete with mineral admixtures. **Magazine of concrete research**, Thomas Telford Ltd, v. 66, n. 10, p. 492–504, 2014.

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.

YUANLIANG, X. *et al.* Properties of foamed concrete with $ca(oh)_2$ as foam stabilizer. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 118, p. 103985, 2021.

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 – TABELAS DE TESTE DE TUKEY

Tabela 20 – Teste Tukey para o filme líquido das bolhas

Combinações	Probabilidade	Significância
XG-0,5 x REF	0,18645	Não
XG-1 x REF	0,12372	Não
XG-1 x XG-0,5	0,99708	Não
XG-2 x REF	6,853E-5	Sim
XG-2 x XG-0,5	0,05182	Não
XG-2 x XG-1	0,08413	Não

Fonte: Autoria própria

Tabela 21 – Teste Tukey para a membrana das bolhas

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

Fonte: Autoria própria

Tabela 22 – Teste de Tukey para os resultados da densidade em estado fluido

Combinações	Probabilidade	Significância
800 XG-2 x 800 REF	1,72E-08	Sim
1000 XG-2 x 800 REF	0	Sim
1000 XG-2 x 800 XG	5,86E-06	Sim
1000 XG-2 RCD x 800 REF	2,01E-06	Sim
1000 XG-2 RCD x 800 XG	0	Sim
1000 XG-2 RCD x 1000 XG	1,53E-08	Sim
1200 REF x 1000 XG-2	0	Sim
1200 REF x 1000 XG-2 RCD	0	Sim
1200 XG-2 x 1000 XG-2	0	Sim
1200 XG-2 x 1000 XG-2 RCD	8,79E-08	Sim
1200 XG-2 x 1200 REF	5,32E-06	Sim
1200 XG-2 RCD x 1000 XG-2	7,65E-09	Sim
1200 XG-2 RCD x 1000 XG-2 RCD	0	Sim
1200 XG-2 RCD x 1200 REF	0,46011	Não
1200 XG-2 RCD x 1200 XG-2	0,12475	Não

Fonte: Autoria própria

Tabela 23 – Teste de Tukey para a massa específica seca das amostra

Combinações	Probabilidade	Significância
800 REF x 800 XG-2	0,05024	Não
800 REF x 1000 XG-2	2,16614E-4	Sim
800 XG-2 x 1000 XG-2	0,00193	Sim
1000 XG-2 x 1200 REF	0,00266	Sim
1000 XG-2 x 1200 XG-2	0,01652	Sim
1200 XG-2 x 1200 REF	0,50213	Não
1000 XG-2 x 1200 XG-2 RCD	0,00298	Sim
1200 XG-2 RCD x 1200 REF	0,99966	Não
1200 XG-2 RCD x 1200 XG-2	0,55352	Não

Fonte: Autoria própria

Tabela 24 – Teste de Tukey para a massa específica saturada das amostra

Combinações	Probabilidade	Significância
800 REF x 800 XG-2	0,08349	Não
800 REF x 1000 XG-2	3,93505E-4	Sim
800 XG-2 x 1000 XG-2	8,24604E-5	Sim
1000 XG-2 x 1200 REF	4,47699E-4	Sim
1000 XG-2 x 1200 XG-2	0,00988	Sim
1200 XG-2 x 1200 REF	0,09538	Não
1000 XG-2 x 1200 XG-2 RCD	0,01095	Sim
1200 XG-2 RCD x 1200 REF	0,08531	Não
1200 XG-2 RCD x 1200 XG-2	0,99981	Não

Fonte: Autoria própria

Tabela 25 – Teste de Tukey para a massa específica real das amostra

Combinações	Probabilidade	Significância
800 REF x 800 XG-2	0,01395	Sim
800 REF x 1000 XG-2	0,00245	Sim
800 XG-2 x 1000 XG-2	1,33921E-4	Sim
1000 XG-2 x 1200 REF	0,03166	Sim
1000 XG-2 x 1200 XG-2	0,49468	Não
1200 XG-2 x 1200 REF	0,24501	Não
1000 XG-2 x 1200 XG-2 RCD	0,99999	Não
1200 XG-2 RCD x 1200 REF	0,03039	Sim
1200 XG-2 RCD x 1200 XG-2	0,47935	Não

Fonte: Autoria própria

Tabela 26 – Teste de Tukey para a absorção de água por imersão das amostras

Combinações	Probabilidade	Significância
800 REF x 800 XG-2	0,00467	Sim
800 REF x 1000 XG-2	0,00551	Sim
800 XG-2 x 1000 XG-2	0,98407	Não
1000 XG-2 x 1200 REF	0,01783	Sim
1000 XG-2 x 1200 XG-2	0,03486	Sim
1200 XG-2 x 1200 REF	0,95938	Não
1000 XG-2 x 1200 XG-2 RCD	0,00371	Sim
1200 XG-2 RCD x 1200 REF	0,62474	Não
1200 XG-2 RCD x 1200 XG-2	0,37287	Não

Fonte: Autoria própria

Tabela 27 – Teste de Tukey para o índice de vazios das amostras

Combinações	Probabilidade	Significância
800 REF x 800 XG-2	0,00451	Sim
800 REF x 1000 XG-2	0,15812	Não
800 XG-2 x 1000 XG-2	0,04710	Sim
1000 XG-2 x 1200 REF	0,22371	Não
1000 XG-2 x 1200 XG-2	0,21773	Não
1200 XG-2 x 1200 REF	1	Não
1000 XG-2 x 1200 XG-2 RCD	0,01714	Sim
1200 XG-2 RCD x 1200 REF	0,31857	Não
1200 XG-2 RCD x 1200 XG-2	0,32670	Não

Fonte: Autoria própria

Tabela 28 – Teste de Tukey para a capilaridade (C) das amostra

Combinações	Probabilidade	Significância
800 REF x 800 XG-2	0,92318	Não
800 REF x 1000 XG-2	0,91101	Não
800 XG-2 x 1000 XG-2	0,71793	Não
1000 XG-2 x 1200 REF	0,00108	Sim
1000 XG-2 x 1200 XG-2	7,1208E-5	Sim
1200 XG-2 x 1200 REF	4,6575E-4	Sim
1000 XG-2 x 1200 XG-2 RCD	1,92749E-4	Sim
1200 XG-2 RCD x 1200 REF	0,00665	Sim
1200 XG-2 RCD x 1200 XG-2	0,04132	Sim

Fonte: Autoria própria

Tabela 29 – Teste de Tukey para os resultados de condutividade térmica

Combinações	Probabilidade	Significância
800 REF x 800 XG-2	0	Sim
800 REF x 1000 XG-2	0	Sim
800 XG-2 x 1000 XG-2	0	Sim
1000 XG-2 x 1200 REF	0	Sim
1000 XG-2 x 1200 XG-2	0	Sim
1200 XG-2 x 1200 REF	0	Sim
1000 XG-2 x 1200 XG-2 RCD	1,3881E-5	Sim
1200 XG-2 RCD x 1200 REF	0	Sim
1200 XG-2 RCD x 1200 XG-2	0	Sim

Fonte: Autoria própria

Tabela 30 – Teste de Tukey para os resultados de resistência à compressão

Combinações	Probabilidade	Significância
800 XG-2 x 800 REF	7,52E-05	Sim
1000 XG-2 x 800 REF	1,41E-06	Sim
1000 XG-2 x 800 XG-2	0,47028	Não
1000 XG-2 RCD x 800 REF	0,97076	Não
1000 XG-2 RCD x 800 XG-2	1,19E-05	Sim
1000 XG-2 RCD x 1000 XG-2	2,98E-07	Sim
1200 REF x 1000 XG-2	4,81E-08	Sim
1200 REF x 1000 XG-2 RCD	3,09E-08	Sim
1200 XG-2 x 1000 XG-2	5,17E-08	Sim
1200 XG-2 x 1000 XG-2 RCD	0	Sim
1200 XG-2 x 1200 REF	0,00104	Sim
1200 XG-2 RCD x 1000 XG-2	1	Não
1200 XG-2 RCD x 1000 XG-2 RCD	2,37E-07	Sim
1200 XG-2 RCD x 1200 REF	5,62E-08	Sim
1200 XG-2 RCD x 1200 XG-2	5,19E-08	Sim

Fonte: Autoria própria

Tabela 31 – Teste de Tukey para o módulo de elasticidade

Temperatura	Traço	Probabilidade	Significância
AMB	1200 XG-2 x 1000 XG-2	0	Sim
	1200 XG-2 RCD x 1000 XG-2	1,29E-08	Sim
	1200 XG-2 RCD x 1200 XG-2	0	Sim
300	1200 XG-2 x 1000 XG-2	0	Sim
	1200 XG-2 RCD x 1000 XG-2	0	Sim
	1200 XG-2 RCD x 1200 XG-2	0	Sim
600	1200 XG-2 RCD x 1200 XG-2	1,74E-08	Sim

Fonte: Aatoria própria

Tabela 32 – Teste de Tukey para os resultados de resistência à compressão das metades

Combinações	Probabilidade	Significância
800 XG-2 x 800 REF	1,11E-05	Sim
1000 XG-2 x 800 REF	0	Sim
1000 XG-2 x 800 XG	0,00164	Sim
1000 XG-2 RCD x 800 REF	0,78292	Não
1000 XG-2 RCD x 800 XG	1,34E-07	Sim
1000 XG-2 RCD x 1000 XG	0	Sim
1200 REF x 1000 XG-2	0	Sim
1200 REF x 1000 XG-2 RCD	0	Sim
1200 XG-2 x 1000 XG-2	0	Sim
1200 XG-2 x 1000 XG-2 RCD	8,93E-07	Sim
1200 XG-2 x 1200 REF	0,9553	Não
1200 XG-2 RCD x 1000 XG-2	0,13912	Não
1200 XG-2 RCD x 1000 XG-2 RCD	6,64E-08	Sim
1200 XG-2 RCD x 1200 REF	0	Sim
1200 XG-2 RCD x 1200 XG-2	0	Sim

Fonte: Aatoria própria

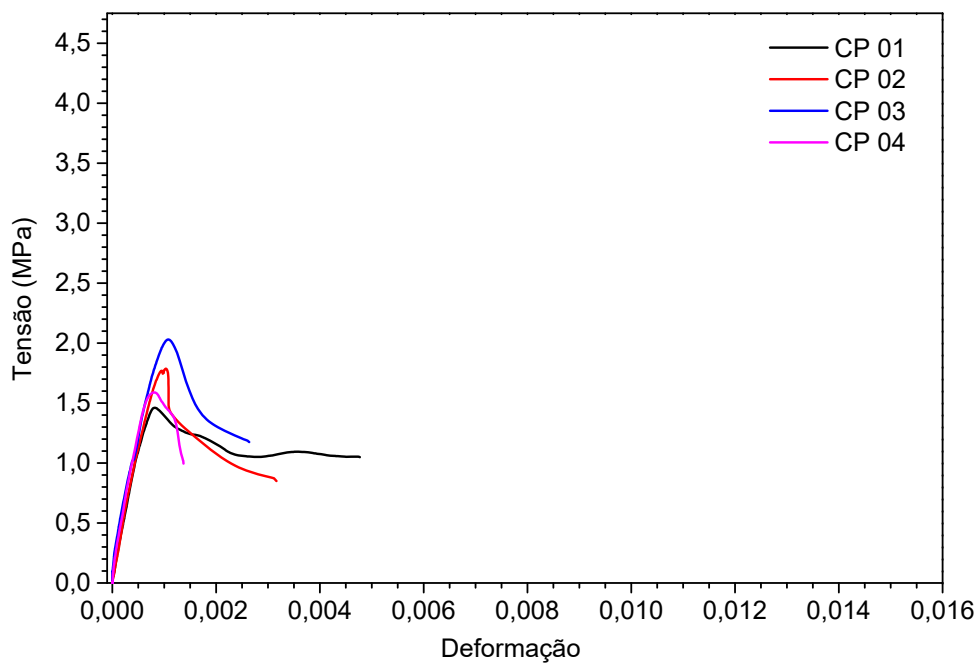
Tabela 33 – Teste de Tukey para os resultados de resistência à tração na flexão

Combinações	Probabilidade	Significância
800 XG-2 x 800 REF	0,01264	Sim
1000 XG-2 x 800 REF	3,91E-05	Sim
1000 XG-2 x 800 XG	0,18853	Não
1000 XG-2 RCD x 800 REF	0,99989	Não
1000 XG-2 RCD x 800 XG	0,00619	Sim
1000 XG-2 RCD x 1000 XG	1,97E-05	Sim
1200 REF x 1000 XG-2	0,15985	Não
1200 REF x 1000 XG-2 RCD	1,47E-07	Sim
1200 XG-2 x 1000 XG-2	0,13023	Não
1200 XG-2 x 1000 XG-2 RCD	1,31E-07	Sim
1200 XG-2 x 1200 REF	1	Não
1200 XG-2 RCD x 1000 XG-2	0,58864	Não
1200 XG-2 RCD x 1000 XG-2 RCD	9,86E-04	Sim
1200 XG-2 RCD x 1200 REF	0,00388	Sim
1200 XG-2 RCD x 1200 XG-2	0,00300	Sim

Fonte: Autoria própria

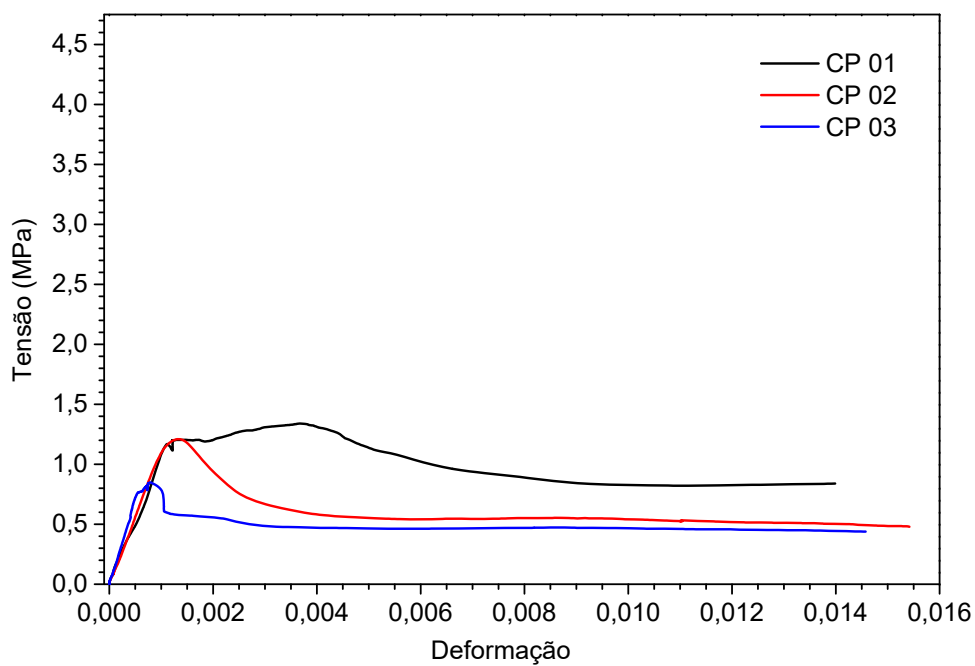
APÊNDICE B – CURVAS TENSÃO/DEFORMAÇÃO

Figura 70 – Curvas tensão/deformação 1000 XG-2 AMB



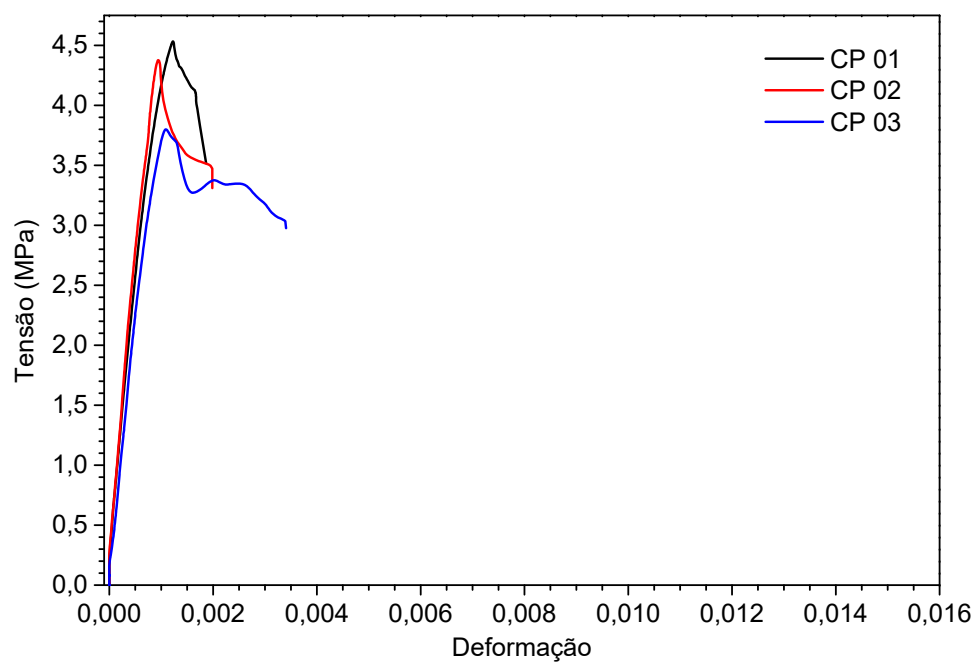
Fonte: Autoria própria

Figura 71 – Curvas tensão/deformação 1000 XG-2 300°C



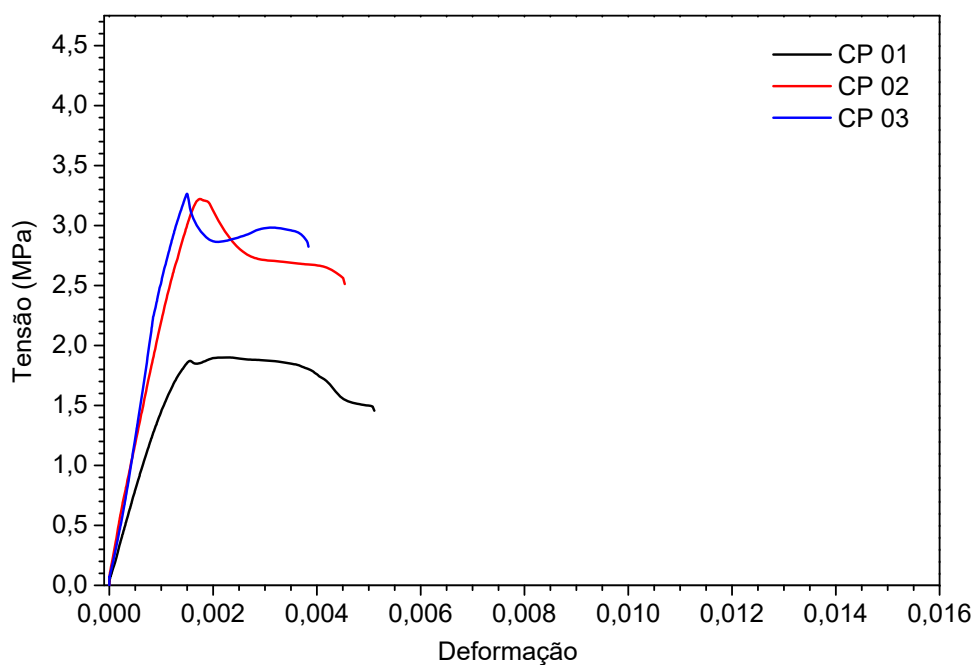
Fonte: Autoria própria

Figura 72 – Curvas tensão/deformação 1200 XG-2 AMB



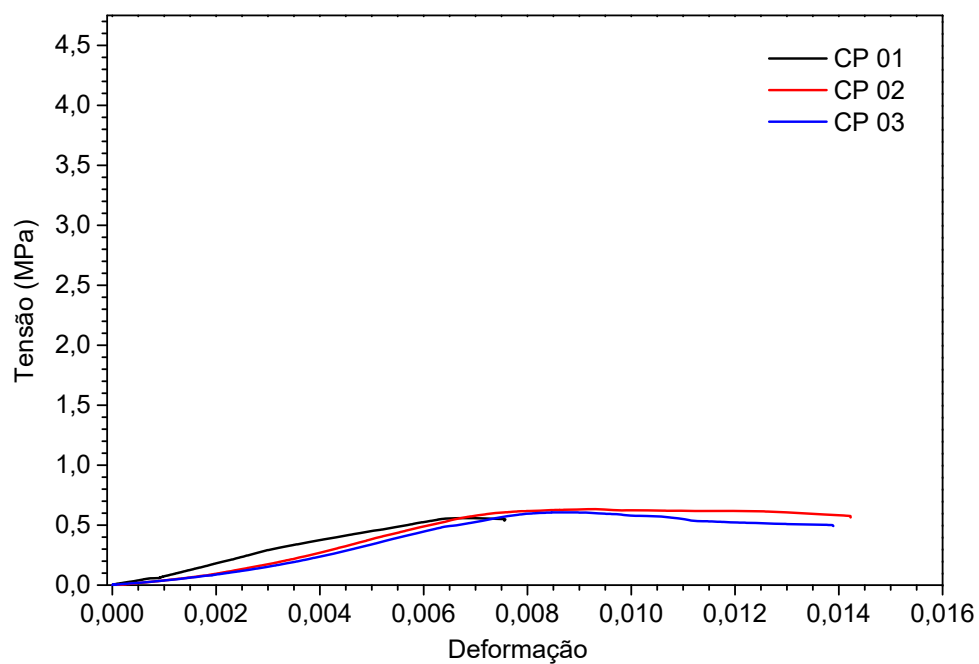
Fonte: Autoria própria

Figura 73 – Curvas tensão/deformação 1200 XG-2 300°C



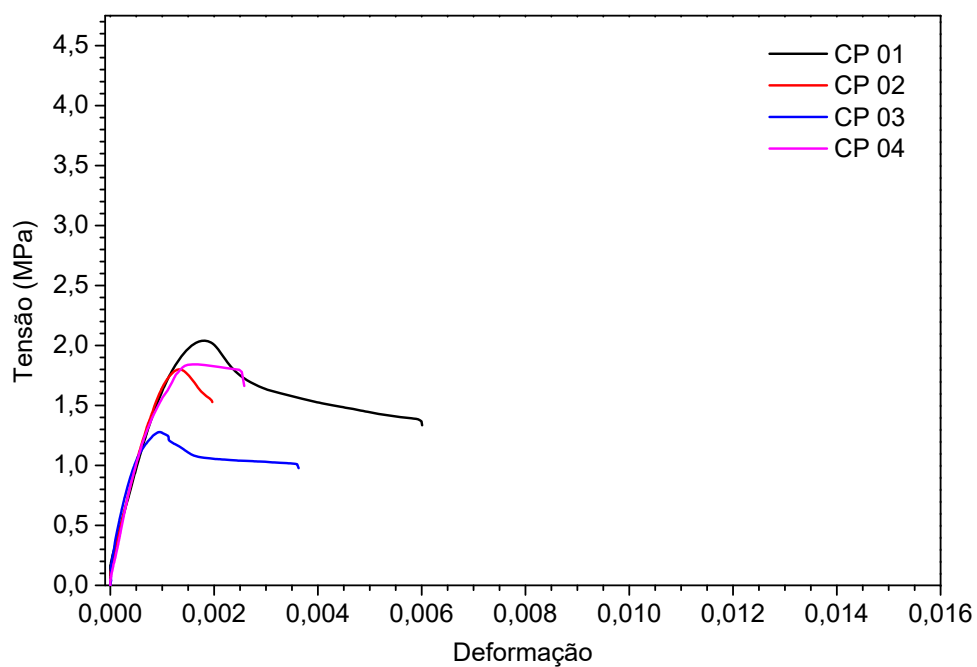
Fonte: Autoria própria

Figura 74 – Curvas tensão/deformação 1200 XG-2 600°C



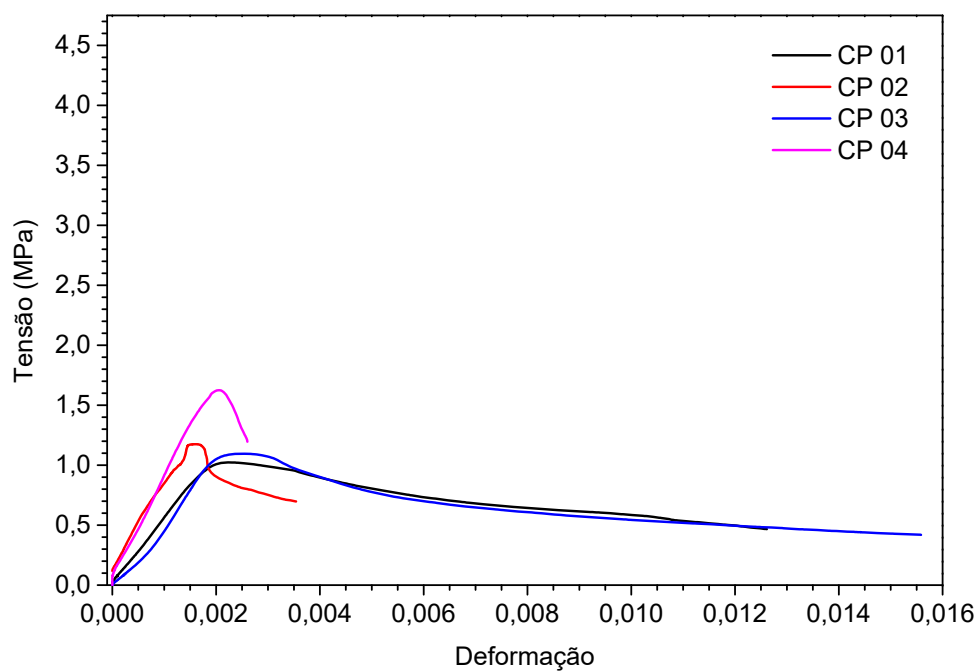
Fonte: Autoria própria

Figura 75 – Curvas tensão/deformação 1200 XG-2 RCD AMB



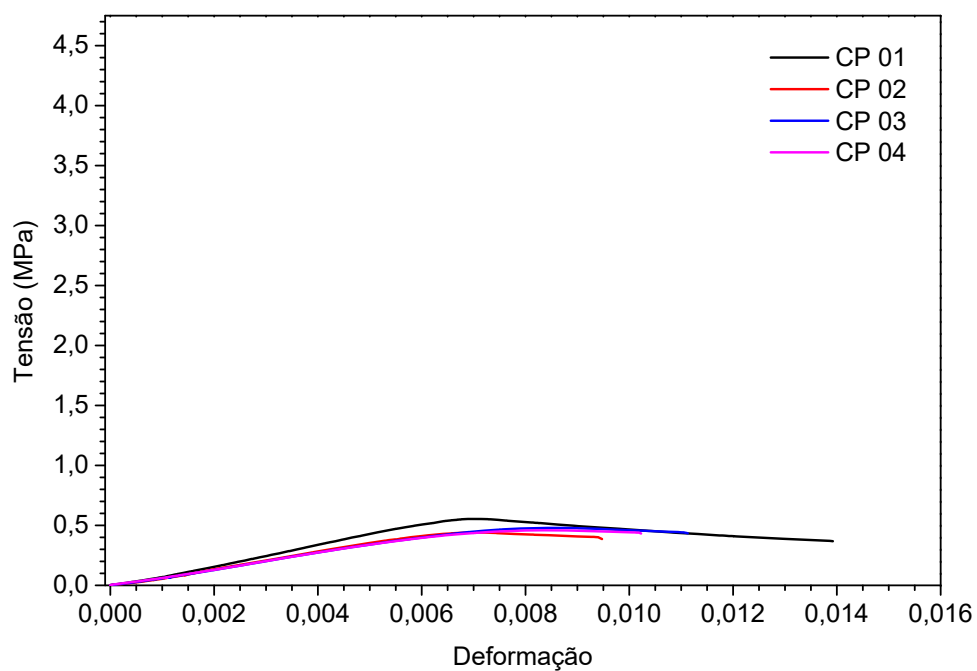
Fonte: Autoria própria

Figura 76 – Curvas tensão/deformação 1200 XG-2 300°C



Fonte: Autoria própria

Figura 77 – Curvas tensão/deformação 1200 XG-2 RCD 600°C



Fonte: Autoria própria