

**VIABILIDADE DE USO DA PARCELA DENSA DA CINZA DO BAGAÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR DE FUNDO DE CALDEIRA COMO AGREGADO MIÚDO**

MAYARA LOPES SOUZA DE CASTRO MACIEL

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

OUTUBRO DE 2025

**VIABILIDADE DE USO DA PARCELA Densa DA CINZA DO BAGAÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR DE FUNDO DE CALDEIRA COMO AGREGADO MIÚDO**

MAYARA LOPES SOUZA DE CASTRO MACIEL

“Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.”

Orientador: Prof. Guilherme Chagas Cordeiro

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

OUTUBRO DE 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

M152 Maciel, Mayara Lopes Souza de Castro.

Viabilidade de uso da parcela densa da cinza do bagaço de cana-de-açúcar de fundo de caldeira como agregado miúdo / Mayara Lopes Souza de Castro Maciel. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2025.

119 f. : il.
Bibliografia: 95 - 103.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2025.
Orientador: Guilherme Chagas Cordeiro.

1. Agregado miúdo. 2. Agregado reciclado. 3. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar. 4. Compacidade. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.


CDD - 624

VIABILIDADE DE USO DA PARCELA Densa DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR DE FUNDO DE CALDEIRA COMO AGREGADO MIÚDO


MAYARA LOPES SOUZA DE CASTRO MACIEL

“Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.”


Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **MONICA BATISTA LEITE**
Data: 28/08/2025 14:29:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Mônica Batista Leite (D.Sc. – UEFS)

Documento assinado digitalmente
 **SAMANTHA PINHEIRO PAIVA**
Data: 28/08/2025 14:00:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Samantha Coelho Pinheiro (D.Sc. – UEA)

Documento assinado digitalmente
 **GUILHERME CHAGAS CORDEIRO**
Data: 20/08/2025 08:39:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Guilherme Chagas Cordeiro (Orientador, D.Sc. – UENF)

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

AGOSTO DE 2025

RESUMO

Investigar a produção de areia artificial a partir de resíduos é crucial diante da enorme demanda atual por agregados naturais, pois oferece uma alternativa sustentável para a construção civil. Neste contexto, o presente trabalho visa estudar a viabilidade de uso da areia proveniente da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (A-CBC) como substituta do agregado miúdo natural em argamassas. Para tal, a parcela densa de uma cinza coletada no fundo de uma caldeira de usina sucroalcooleira foi separada da parcela leve por meio de um processo de separação densimétrica e utilizada na produção de um agregado miúdo. Para a avaliação do potencial da A-CBC como agregado, argamassas foram confeccionadas com teores de substituição de 0, 20, 35, 50, 65, 80 e 100%, em massa, de uma areia natural quartzosa de mesma granulometria (A-NAT) pela A-CBC. As duas areias foram caracterizadas em ensaios de massa específica, compactidade, forma e absorção de água. As argamassas, por sua vez, foram avaliadas em ensaios de resistência à compressão, absorção de água total e por capilaridade e durabilidade frente ao ataque ácido. Os resultados obtidos indicaram semelhanças entre as areias de mesma granulometria, especialmente em relação à massa específica, com valores de $2,64 \text{ g/cm}^3$ para a A-NAT e $2,61 \text{ g/cm}^3$ para a A-CBC. Também se observou proximidade nas características de forma das partículas, com arredondamento de 0,650 para a A-NAT e 0,651 para a A-CBC, e esfericidade de 0,823 e 0,804, respectivamente. Com relação à compactidade, A-NAT apresentou o valor de 0,694, enquanto para a A-CBC foi de 0,700. No que se refere à absorção de água, ambas as areias apresentaram valores menores de 1% (0,96% para A-CBC e 0,56% para A-NAT). Em relação às argamassas, o ensaio de resistência à compressão demonstrou que, aos 28 dias, as misturas com 65%, 80% e 100% de substituição de A-NAT por A-CBC apresentaram ganhos significativos em comparação àquelas com até 50% de substituição, alcançando até 26% de incremento em relação à argamassa de referência. Aos 120 dias, todas as formulações com A-CBC apresentaram ganhos de resistência estatisticamente significativos em relação à argamassa de referência, com destaque para a A-A-CBC100, que obteve um incremento de 41%. Os ensaios de absorção por imersão total mostraram aumento na absorção de água para as argamassas com 35% e 50%. Entretanto, não mostraram diferenças significativas na absorção capilar entre as argamassas com até 50% de substituição, indicando comportamento físico semelhante entre elas nesse aspecto. Em contrapartida, os resultados do ensaio de ataque ácido evidenciaram uma maior perda de resistência à compressão nas argamassas com A-CBC em comparação à argamassa de referência, o que sugere uma menor estabilidade química frente a ambientes agressivos. Os resultados não inviabilizam o uso do material, uma vez que as argamassas com A-CBC alcançaram resistência final pós ataque equivalente à da argamassa de referência. No entanto, reforçam a necessidade de uma avaliação criteriosa em situações de exposição química severa. Os resultados obtidos indicaram que a A-CBC apresenta potencial para aplicação como agregado miúdo em argamassas, desde que sejam adotados o controle granulométrico adequado e a remoção das partículas originais da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: agregado miúdo, agregado reciclado, cinza do bagaço da cana-de-açúcar, compactidade.

ABSTRACT

Investigating the production of manufactured sand from residues is crucial given the current high demand for natural aggregates, as it provides a sustainable alternative for the construction sector. In this context, the present study evaluates the feasibility of using sand derived from sugarcane bagasse ash (A-CBC) as a substitute for natural fine aggregate in mortars. To this end, the dense fraction of an ash collected at the bottom of a sugar-alcohol industry boiler was separated from the lighter fraction by a density separation process and used to produce a fine aggregate. Mortars were then prepared by replacing a natural quartz sand of equivalent granulometry (A-NAT) with A-CBC at substitution levels of 0, 20, 35, 50, 65, 80, and 100% by mass. Both sands were characterized through tests of specific gravity, packing density, particle shape, and water absorption. The mortars were evaluated for compressive strength, water absorption by immersion and capillarity, and durability under acid attack. The results revealed similarities between the sands of equivalent granulometry, particularly in specific gravity, with values of 2.64 g/cm³ for A-NAT and 2.61 g/cm³ for A-CBC. Particle shape parameters were also comparable, with roundness values of 0.650 and 0.651 and sphericity of 0.823 and 0.804 for A-NAT and A-CBC, respectively. Packing density was 0.694 for A-NAT and 0.700 for A-CBC. Water absorption values were below 1% for both materials (0.96% for A-CBC and 0.56% for A-NAT). Regarding mortars, compressive strength results at 28 days indicated that mixtures with 65%, 80%, and 100% substitution of A-NAT by A-CBC achieved significant strength gains compared to mixtures with up to 50% substitution, reaching up to 26% higher values than the reference mortar. At 120 days, all A-CBC mixtures exhibited statistically significant strength improvements over the reference, with A-A-CBC100 showing a 41% increase. Water absorption by immersion increased in the mixtures with 35% and 50% substitution, while no significant differences were observed in capillary absorption up to 50% replacement, suggesting similar physical behavior. Conversely, mortars with A-CBC exhibited greater compressive strength losses under acid attack compared with the reference, indicating lower chemical stability in aggressive environments. However, the residual strength of mortars with A-CBC after acid exposure was equivalent to that of the reference mortar, highlighting the importance of careful assessment under severe chemical exposure. Overall, the findings demonstrate that A-CBC has potential for application as fine aggregate in mortars, provided that adequate particle size control and removal of original sugarcane bagasse ash particles are ensured.

Keywords: fine aggregate, recycled aggregate, sugarcane bagasse ash, packing density.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS E UNIDADES	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações iniciais.....	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Justificativa.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. Agregados para misturas a base de cimento Portland.....	7
2.2. Agregados miúdos reciclados	9
2.3. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	10
2.4. Atividade pozolânica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	11
2.5. Utilização da cinza residual como agregado miúdo	14
2.6. Considerações sobre a revisão.....	26
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	29
3.1. Coleta da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e produção do agregado miúdo reciclado	29
3.2. Materiais complementares	34
3.2.1. Agregado miúdo natural	34
3.2.2. Cimento Portland, água e superplastificante.....	34
3.3. Métodos	36
3.3.1. Caracterização dos agregados miúdos	36
3.3.1.1. Absorção de água	36

3.3.1.2. Massa específica	38
3.3.1.3. Compacidade experimental.....	40
3.3.1.4. Forma.....	41
3.3.1.5. Composição química e mineralógica.....	44
3.3.2. Dosagem, produção e caracterização das argamassas.....	45
3.3.2.1. Ensaio de resistência à compressão.....	47
3.3.2.2. Absorção por imersão total e por capilaridade	49
3.3.2.3. Ataque por ácido sulfúrico.....	54
3.4. Análise estatística dos resultados experimentais	58
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	60
4.1. Caracterização das areias.....	60
4.1.1. Composição granulométrica.....	60
4.1.2. Massa específica	62
4.1.3. Absorção de água	63
4.1.4. Forma das partículas.....	64
4.1.5. Compacidade	67
4.1.6. Composição mineralógica	67
4.1.7. Composição química e perda ao fogo.....	68
4.2. Aplicação de A-CBC em argamassas	69
4.2.1. Consistência.....	69
4.2.2. Resistência à compressão	70
4.2.3. Propriedades físicas (absorção de água, índice de vazios e massa específica).....	73
4.2.4. Absorção de água por capilaridade.....	76
4.2.5. Ataque por ácido sulfúrico.....	79
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	91

5.1.	Conclusões	91
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros	94
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
	ANEXO 1 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	104
	ANEXO 2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Operação de colheita mecanizada de cana-de-açúcar.	10
Figura 2: Imagens de MEV da CBCA mostrando suas partículas celulares (Cordeiro, Tavares e Toledo Filho, 2016).....	13
Figura 3: Procedimento de separação por fracionamento densimétrico da cinza residual (Andreão 2018).....	14
Figura 4: Análise de peneiramento da areia de quartzo, SBAS e mistura (adaptado Moretti <i>et al.</i> , 2016).	16
Figura 5: Resistência à compressão de formulações de concreto leve (adaptado Khawaja <i>et al.</i> , 2021).....	17
Figura 6: Absorção de água do concreto leve em diferentes idades de cura (adaptado Khawaja <i>et al.</i> , 2021).....	18
Figura 7: Distribuição do tamanho de partícula dos agregados (Jagadesh <i>et al.</i> , 2019).	20
Figura 8: Distribuição granulométrica dos materiais: cimento, SBAS, areia fina e areia média (Moretti <i>et al.</i> , 2018).....	21
Figura 9: Argamassas contendo cinzas da Usina Tamoio - Araraquara - (a) e argamassas contendo cinzas da Usina Diamante - Jaú - (b), respectivamente (Sales e Lima, 2010).	24
Figura 10: Processo de lavagem da cana-de-açúcar (a), extração de caldo (b) e armazenamento de bagaço da cana-de-açúcar (c).....	30
Figura 11: Cinza do bagaço da cana-de-açúcar <i>in natura</i> coletada na Usina Canabrava, em Campos dos Goytacazes-RJ.	30
Figura 12: Modelo esquemático de separação por fracionamento densimétrico (Andreão, 2018).	31
Figura 13: Fluxograma do processo de fracionamento densimétrico da cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Valores em percentual se referem à massa seca do material em relação à massa seca inicial da cinza <i>in natura</i>	32
Figura 14: Imersão da cinza no recipiente com água (a), agitação manual (b), retirada da cinza sobrenadante (c), e parcela grosseira da cinza depositada no fundo do recipiente (d).	32
Figura 15: Peneirador eletromecânico.....	33
Figura 16: Areia natural proveniente do Rio Paraíba do Sul, em Campos dos Goytacazes-RJ.....	34

Figura 17: Granulometria do cimento utilizado na pesquisa.....	35
Figura 18: Mastersizer 3000 (Malvern).....	36
Figura 19: A-CBC úmida espalhada sobre a bancada (a), verificação da umidade da A-CBC pelo teste do molde tronco-cônico (b), A-CBC na condição saturada superfície seca (c), A-NAT úmida espalhada sobre a bancada (d), verificação da umidade da A-NAT pelo teste do molde tronco-cônico (e), e A-NAT na condição saturada superfície seca (f).	38
Figura 20: Aquecimento das amostras em banho-maria (a), e verificação da temperatura (b).....	39
Figura 21: Preenchimento do cilindro com areia natural (a), início da vibração (b), e fim da vibração – material compactado (c).....	40
Figura 22: Amostras antes do cobrimento metálico (a), amostras após cobrimento metálico (b), e equipamento SCD 050 BAL-TEC (c).	42
Figura 23: Amostras inseridas no equipamento (a), e vista externa do microscópio eletrônico de varredura - Zeiss EVA 40 (b).	42
Figura 24: Delimitação do contorno de uma partícula de A-CBC por meio do programa Image J.	43
Figura 25: Equipamento EDX-720 da Shimadzu.....	44
Figura 26: Difratorômetro de raios X Miniflex 600 Rigaku.	45
Figura 27: Misturador mecânico para argamassa.	47
Figura 28: Mesa de consistência de argamassa (a) e medição do diâmetro de espalhamento (b). Foto da extremidade da argamassa ao final do ensaio (c).....	47
Figura 29: Corpos de prova após 24 horas de cura.	48
Figura 30: Corpos de prova submersos em água saturada de cal.....	48
Figura 31: Preparo do corpo de prova antes do ensaio de resistência à compressão.	49
Figura 32: Máquina universal de ensaios mecânicos Shimadzu UH-F500kNI (a), e destaque do corpo de prova posicionado para a ruptura (b).....	49
Figura 33: Determinação da massa saturada imersa de corpos de prova de argamassa.....	50
Figura 34: Ensaio de absorção por capilaridade em corpos de prova cilíndricos, vista frontal (a) e vista superior (b).	53
Figura 35: Gráfico ilustrativo de absorvidade.	54

Figura 36: Corpos de prova submersos em solução.	55
Figura 37: Corpo de prova cúbico pós ataque, seccionado ao meio para ensaio de absorção por imersão total.	56
Figura 38: Ensaio de absorção por capilaridade de corpos de prova cilíndricos pós ataque, vista frontal (a) e vista superior (b).	57
Figura 39: Lixamento das faces de corpos de prova atacados após aplicação de gesso (a) e corpos de prova após lixamento e prontos para ensaio de resistência à compressão (b).	58
Figura 40: Verificação da resistência à compressão de corpos de prova atacados. .	58
Figura 41: Curva granulométrica das areias (areia da cinza e areia natural).	61
Figura 42: A-NAT - fração 4,75 mm (a), A-CBC - fração 4,75 mm (b), A-NAT - fração 2,36 mm (c), A-CBC - fração 2,36 mm (d), A-NAT - fração 1,18 mm (e), A-CBC - fração 1,18 mm (f), A-NAT - fração 0,6 mm (g), A-CBC - fração 0,6 mm (h), A-NAT - fração 0,3 mm (i), A-CBC - fração 0,3 mm (j), A-NAT - fração 0,15 mm (k) e A-CBC - fração 0,15 mm (l).	65
Figura 43: Imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura de partículas celulares que compõem a A-CBC.	67
Figura 44: Difratogramas de raios X da A-CBC e A-NAT.	68
Figura 45: Resistência à compressão média de todas as argamassas nas idades de 7, 28 e 120 dias.	71
Figura 46: Valores de absorção por imersão total das argamassas com até 50% de substituição, aos 120 dias.	74
Figura 47: Valores de índice de vazios das argamassas com até 50% de substituição, aos 120 dias.	75
Figura 48: Valores de massa específica das argamassas com até 50% de substituição, aos 120 dias.	75
Figura 49: Gráfico de absorção capilar aos 120 dias.	76
Figura 50: Gráfico de absorção acumulada inicial pela raiz quadrada do tempo (a), e gráfico de absorção acumulada secundária pela raiz quadrada do tempo (b)	78
Figura 51: Perda de massa das argamassas expostas ao ataque por ácido sulfúrico em relação ao tempo.	79
Figura 52: Corpos de prova cilíndricos pós ataque por ácido sulfúrico. A-Ref (a), A-A-CBC20 (b), A-A-CBC35 (c), e A-A-CBC50 (d).	80

Figura 53: Corpos de prova cúbicos pós ataque. A-Ref (a), A-A-CBC20 (b), A-A-CBC35 (c), e A-A-CBC50 (d).....	81
Figura 54: Difratoograma de raios X do material degradado desprendido durante o ataque por ácido sulfúrico.	81
Figura 55: Valores de absorção por imersão total de argamassas não atacadas e atacadas aos 120 dias.	82
Figura 56: Índice de vazios de argamassas não atacadas e atacadas.	84
Figura 57: Massa específica de argamassas não atacadas e atacadas.	84
Figura 58: Absorção por capilaridade das argamassas atacadas.	85
Figura 59: Absortividade inicial de argamassas atacadas.....	86
Figura 60: Absortividade secundária de argamassas atacadas.	87
Figura 61: Valores de resistência à compressão média de argamassas não atacadas e atacadas aos 120 dias.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultado dos ensaios de compressão e absorvibilidade de concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar (adaptado Modani e Vyawahare, 2013).....	17
Tabela 2: Propriedades de argamassas com SCBA e relação água/aglomerante (Adaptado Jagadesh <i>et al.</i> , 2019).	20
Tabela 3: Resultados de resistência à compressão das argamassas aos 28 e 91 dias (Adaptado Moretti <i>et al.</i> , 2018).....	21
Tabela 4: Proporção de materiais para produção das argamassas (Adaptado Almeida <i>et al.</i> , 2015).	22
Tabela 5: Propriedades físicas das amostras de argamassa aos 28 dias de idade (Adaptado Almeida <i>et al.</i> , 2015).....	23
Tabela 6: Valores de resistência a compressão, absorção de água e abatimento (Adaptado de Criado <i>et al.</i> , 2024).	25
Tabela 7: Resultados obtidos pelo ensaio de resistência ao ataque ácido (adaptado Ramakrishnan <i>et al.</i> , 2021).	26
Tabela 8: Valores de resistência à compressão em diferentes pesquisas.	28
Tabela 9: Composição química e principais características físicas do CPP Classe G.	35
Tabela 10: Dosagem e valores de consistência das argamassas.....	46
Tabela 11: Percentuais em massa de material retido nas peneiras utilizadas na classificação das areias.	60
Tabela 12: Resultados dos parâmetros de forma da A-NAT e A-CBC (valores de desvio-padrão são indicados entre parênteses).....	65
Tabela 13: Composição de óxidos e perda ao fogo de A-NAT e A-CBC.	69
Tabela 14: Valores de absorvibilidade inicial e secundária das argamassas	78
Tabela 15: Resultados de absorção capilar finais de argamassas não atacadas e atacadas aos 120 dias.	85
Tabela 16: Valores de absorvibilidade inicial das argamassas não atacadas e atacadas	86
Tabela 17: Valores de absorvibilidade secundária das argamassas não atacadas e atacadas.....	88
Tabela 18: Valores de resistência à compressão aos 7 dias.....	104

Tabela 19: Valores de resistência à compressão aos 28 dias.....	104
Tabela 20: Valores de resistência à compressão aos 120 dias.....	104
Tabela 21: Valores de resistência à compressão aos 120 dias de argamassas atacadas.....	105
Tabela 22: ANOVA para resistência à compressão aos 7 dias.....	106
Tabela 23: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de resistência à compressão aos 7 dias.....	106
Tabela 24: ANOVA para resistência à compressão aos 28 dias.....	107
Tabela 25: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de resistência à compressão aos 28 dias.....	107
Tabela 26: ANOVA para resistência à compressão aos 120 dias.....	107
Tabela 27: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de resistência à compressão aos 120 dias.....	108
Tabela 28: ANOVA para absorção por imersão total aos 120 dias.	108
Tabela 29: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de absorção por imersão total aos 120 dias.....	108
Tabela 30: ANOVA para índice de vazios aos 120 dias.....	108
Tabela 31: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de índice de vazios aos 120 dias.....	109
Tabela 32: ANOVA para massa específica aos 120 dias.....	109
Tabela 33: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de massa específica aos 120 dias.....	109
Tabela 34: ANOVA para absorção capilar aos 120 dias.....	109
Tabela 35: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de absorção capilar aos 120 dias.....	110
Tabela 36: ANOVA para absorvidade inicial aos 120 dias.....	110
Tabela 37: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de absorvidade inicial aos 120 dias.....	110
Tabela 38: ANOVA para absorvidade secundária aos 120 dias.....	110
Tabela 39: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de absorvidade secundária aos 120 dias.....	111
Tabela 40: ANOVA para variação de massa aos 28 dias de ataque.....	111
Tabela 41: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de variação de massa aos 28 dias de ataque.....	111

Tabela 42: ANOVA para variação de massa aos 56 dias de ataque.....	111
Tabela 43: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de variação de massa aos 56 dias de ataque.....	112
Tabela 44: ANOVA para variação de massa aos 92 dias de ataque.....	112
Tabela 45: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de variação de massa aos 92 dias de ataque.....	112
Tabela 46: ANOVA para absorção por imersão total após 92 dias de ataque.....	112
Tabela 47: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de absorção por imersão total após 92 dias de ataque.....	113
Tabela 48: Teste t de Student aplicado para comparar a absorção por imersão total entre cada mistura não atacada e sua respectiva mistura atacada.....	113
Tabela 49: ANOVA para índice de vazios após 92 dias de ataque.....	113
Tabela 50: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de índice de vazios após 92 dias de ataque.....	114
Tabela 51: Teste t de Student aplicado para comparar o índice de vazios entre cada mistura não atacada e sua respectiva mistura atacada.....	114
Tabela 52: ANOVA para massa específica após 92 dias de ataque.....	114
Tabela 53: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de massa específica após 92 dias de ataque.....	114
Tabela 54: Teste t de Student aplicado para comparar a massa específica entre cada mistura não atacada e sua respectiva mistura atacada.....	115
Tabela 55: ANOVA para absorção por capilaridade após 92 dias de ataque.....	115
Tabela 56: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de absorção por capilaridade após 92 dias de ataque.....	115
Tabela 57: Teste t de Student aplicado para comparar a absorção capilar entre cada mistura não atacada e sua respectiva mistura atacada.....	116
Tabela 58: ANOVA para absorvidade inicial após 92 dias de ataque.....	116
Tabela 59: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de absorvidade inicial após 92 dias de ataque.....	116
Tabela 60: Teste t de Student aplicado para comparar a absorvidade inicial entre cada mistura não atacada e sua respectiva mistura atacada.....	117
Tabela 61: ANOVA para absorvidade secundária após 92 dias de ataque.....	117
Tabela 62: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de absorvidade secundária após 92 dias de ataque.....	117
Tabela 63: Teste t de Student aplicado para comparar a absorvidade secundária entre cada mistura não atacada e sua respectiva mistura atacada.....	118

Tabela 64: ANOVA para resistência à compressão após 92 dias de ataque.....	118
Tabela 65: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de resistência à compressão após 92 dias de ataque.....	118
Tabela 66: Teste t de Student aplicado para comparar a resistência à compressão entre cada mistura não atacada e sua respectiva mistura atacada.....	119

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS E UNIDADES

%: Porcentagem

Δm : Variação da massa

Δm_t : Variação de massa no tempo t

a/c: Água/cimento

A: Área

A-A-CBC100: Argamassa confeccionada com 100% de substituição do agregado miúdo natural pela areia da cinza do bagaço da cana-de-açúcar

A-A-CBC20: Argamassa confeccionada com 20% de substituição do agregado miúdo natural pela areia da cinza do bagaço da cana-de-açúcar

A-A-CBC35: Argamassa confeccionada com 35% de substituição do agregado miúdo natural pela areia da cinza do bagaço da cana-de-açúcar

A-A-CBC50: Argamassa confeccionada com 50% de substituição do agregado miúdo natural pela areia da cinza do bagaço da cana-de-açúcar

A-A-CBC65: Argamassa confeccionada com 65% de substituição do agregado miúdo natural pela areia da cinza do bagaço da cana-de-açúcar

A-A-CBC80: Argamassa confeccionada com 80% de substituição do agregado miúdo natural pela areia da cinza do bagaço da cana-de-açúcar

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

Abs: Absorção de água

Abs_a: Absorção acumulada

Abs_c: Absorção de água por capilaridade

Abs_t: Absorção por imersão total

A_c: Área da seção transversal interna do cilindro

A-CBC: Areia da cinza do bagaço de cana-de-açúcar

ACV: Análise do Ciclo de Vida

Al₂O₃: Óxido de alumínio

A-NAT: Areia natural

ANOVA: Análise de Variância

A_p : Área da projeção da partícula medida diretamente na imagem bidimensional da projeção da partícula

A_r: Arredondamento

A-Ref: Argamassa de referência confeccionada com 100% agregado miúdo natural

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

C: Compacidade

CaCO₃: Carbonato de cálcio

CaO: Óxido de cálcio

CAU: Conselho de Arquitetura e Urbanismo

CBCA: Cinza do bagaço de cana-de-açúcar

cm/s^{0,5}: Centímetro por raiz quadrada de segundo

CO₂: Dióxido de carbono

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

COPPE: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

CPP: Cimento para poços petrolíferos

C-S-H: Silicato de cálcio hidratado

D_{10} : Diâmetro equivalente abaixo do qual se encontra 10% da massa total do material

D_{50} : Diâmetro equivalente abaixo do qual se encontra 50% da massa total do material

D_{90} : Diâmetro equivalente abaixo do qual se encontra 90% da massa total do material

D_F : Diâmetro de Feret

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DRX: Difractometria de raios X

DTG: Derivada Termogravimétrica

E: Esfericidade

Fe_2O_3 : Óxido férrico

g/cm^3 : Grama por centímetro cúbico

g: Grama

h: Hora

h_c : Altura final do material compactado

Hz: Hertz

K_2O : Óxido de potássio

kg: Quilograma

kPa: Quilopascal

L: Litro

LBCT: Laboratório de Biologia Celular e Tecidual

LECIV: Laboratório de Engenharia Civil

m: Massa

m_0 : Massa do corpo de prova antes da imersão em ácido sulfúrico

m_1 : Massa do picnômetro vazio

m_2 : Massa do picnômetro e amostra

m_3 : Massa do picnômetro, amostra e água

m_4 : Massa do picnômetro preenchido com água

m_a : Massa de água

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura

m_{Fa} : Massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água

MgO: Óxido de magnésio

m_i : massa do corpo de prova imerso

min: Minuto

MIP: Porosimetria por intrusão de mercúrio (*mercury intrusion porosimetry*)

mL: Mililitros

mm/min: Milímetro por minuto

mm: Milímetro

MP: Megapixels

MPa: Megapascal

m_s: Massa seca

m_{sat}: Massa na condição saturada superfície seca

m_t: massa do corpo de prova imerso em ácido sulfúrico em uma idade t

Na₂O: Óxido de sódio

NBR: Norma Brasileira da ABNT

°C: Graus Celsius

ONU: Organização das Nações Unidas

pH: Potencial hidrogeniônico

PIB: Produto interno bruto

RCC: Resíduos da construção civil

RCD: Resíduo de construção e demolição

RJ: Rio de Janeiro

s: Segundo

SBAS: Areia da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (*sugarcane bagasse ash sand*)

SCBA: Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (*sugarcane bagasse ash*)

SINDUSCON: Sindicato da Indústria da Construção Civil

SiO₂: Óxido de silício

SO₃: Trióxido de enxofre

SP: Superplastificante

TG: Termogravimetria

UENF: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro

UNEP: *United Nations Environment Programme*

UNICA: União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia

µm: Micrômetro

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

O setor da construção civil é um dos que mais geram impactos ambientais, tendo em vista a enorme demanda por recursos naturais, como areia, rochas, madeira, água, entre outros. Os impactos causados pela construção civil contribuem para a formação de áreas degradadas, que surgem desde a extração e fabricação de materiais de construção, até a disposição dos resíduos gerados pelo setor (SINDUSCON, 2021). Entre os danos avaliados, destacam-se: o gradativo esgotamento de matérias-primas naturais, danos ecológicos causados pela extração de recursos naturais, e gasto energético elevado durante as etapas de produção e transporte dos materiais (SINDUSCON, 2021). Além disso, a essa atividade está atrelado um consumo elevado de cimento Portland, que na sua produção libera grande quantidade de dióxido de carbono (CO₂), além de outros gases intensificadores de efeito estufa.

Do ponto de vista relacionado à extração da areia, um relatório emitido pela UNEP (*United Nations Environment Programme*), em 2019, estima que cerca de 50 bilhões de toneladas são extraídas por ano no mundo, causando diversos impactos ambientais (UNEP, 2019). Trata-se do segundo recurso natural mais extraído no mundo, atrás apenas da água (Rentier e Cammeraat, 2022). De forma geral, a areia é um material abundante encontrado em diversas partes do mundo. Contudo, para que esse material possa ser usado na construção civil é necessário que suas características e propriedades sejam aplicáveis para esse fim, o que reduz significativamente as fontes disponíveis. Desta forma, a areia é extraída principalmente dos leitos de rios, leito marinho ou cavas (Tammaro, 2021). Esse processo gera poluição da água e do ar devido ao uso de máquinas e ao manuseio inadequado dos resíduos, alteração do leito dos rios, que causam mudanças no padrão de sedimentação, erosão costeira, que reduz a proteção natural contra tempestades, além de contribuir para o desmatamento da vegetação e outras alterações que podem causar perda de biodiversidade (ONU News, 2022).

Diante deste cenário, surge a necessidade de criação de alternativas sustentáveis que possam ser empregadas no setor da construção civil, e que colaborem na redução dos impactos ambientais causados pelo exercício dessa atividade. A sustentabilidade se caracteriza pela busca de soluções que levem em consideração os aspectos econômicos, sociais e ambientais de maneira integrada, visando garantir um futuro viável e saudável para as gerações presentes e futuras. Isso inclui a conservação dos recursos naturais, por exemplo. Uma alternativa que tem sido amplamente estudada é a substituição dos agregados naturais por diversos tipos de resíduos como, por exemplo: finos de pedreiras (Cordeiro, De Alvarenga e Rocha, 2016; Singh *et al.*, 2016), vidros (Zhao, Poon e Ling, 2023; Ganiron Jr., 2013), cerâmicas (Debieb e Kenai, 2008; Keerthinarayana e Srinivasa, 2010), borrachas (Gupta, Chaudhary e Sharma, 2014; Su *et al.*, 2015), cinzas de carvão (Raju e Aboobacker, 2014; Wongsu *et al.*, 2016), e resíduos de construção e demolição (Moretti *et al.*, 2016; Rajathi e Kanth, 2014). A implementação de práticas de extração sustentáveis, reciclagem e uso de materiais alternativos na construção civil são essenciais para mitigar os impactos e evitar danos irreversíveis ao meio ambiente.

Nesse sentido, o Brasil é um grande produtor de cana-de-açúcar, e os resíduos gerados pelas indústrias sucroalcooleiras tem sido objeto de estudo há alguns anos. Durante a fabricação de açúcar e etanol, grande quantidade de bagaço é gerada. Esse bagaço é queimado em uma caldeira, e o vapor produzido gira uma turbina interligada a um gerador, transformando a energia térmica em energia elétrica (Alcarde, 2022). Como resultado da queima, obtém-se a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Estudos apontam que essa cinza pode apresentar atividade pozolânica, sendo possível o seu emprego como material cimentício suplementar (Cordeiro *et al.*, 2008; Minnu, Bahurudeen e Athira, 2021; Jagadesh, Ramachandramurthy e Murugesan, 2018). Entretanto, para que o emprego dessa cinza traga benefícios para argamassa ou concreto, é necessário que ela passe por um processo controlado de moagem (Cordeiro, Tavares e Toledo Filho, 2016). Em alguns casos, além da moagem, processos como requeima (Cordeiro, Andreão e Tavares, 2019) e de separação das partículas de quartzo (Cordeiro, Linhares e Lemos 2022; Andreão *et al.*, 2019) podem ser necessários para a adequação das características físicas e químicas da cinza ao emprego como pozolana.

Um dos principais problemas associados à cinza do bagaço consiste na alta contaminação por quartzo, especialmente para as cinzas de fundo de caldeira (Cordeiro, Tavares e Toledo Filho, 2016; Alvarenga e Cordeiro, 2024). Esse material considerado inerte é levado às usinas junto com a cana-de-açúcar e, após a queima, mantém-se misturado à cinza, o que reduz a atividade pozolânica do material (Cordeiro, Linhares e Lemos, 2022). Durante a separação densimétrica (Andreão *et al.*, 2019), ocorre a remoção significativa da sílica cristalina (quartzo), de modo que a fração de cinza utilizada é predominantemente composta por sílica amorfa (Cordeiro, Linhares e Lemos, 2022).

Em razão da elevada concentração de quartzo presente na cinza do bagaço de cana-de-açúcar, há um crescente interesse em pesquisas que investiguem seu potencial como substituto da areia natural. Contudo, observa-se que, enquanto os estudos que utilizam a cinza como material pozolânico incluem diversas etapas de tratamento, visando a melhoria de suas propriedades (Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn, 2009; Jagadesh, Ramachandramurthy e Murugesan, 2018; Cordeiro e Kurtis, 2017; Andreão *et al.*, 2019), essa prática não é amplamente adotada quando a cinza é empregada como agregado miúdo. A maioria dos pesquisadores opta por utilizar a cinza sem qualquer tratamento prévio, realizando sua incorporação em argamassas e concretos. Ao analisar a literatura, que será melhor discutida na sequência do trabalho, verifica-se que os melhores desempenhos foram obtidos com uma substituição de apenas 10%, em massa, da areia natural pela cinza (Modani e Vyawahare, 2013; Khawaja *et al.*, 2021; Dayo *et al.*, 2019; De Sande *et al.*, 2021).

Outro aspecto que merece atenção diz respeito à granulometria do material. Em geral, a prática comum consiste na substituição de um material por outro com granulometrias completamente distintas. Em diversos estudos, a cinza foi aplicada com granulometria típica de um fíler (Moretti *et al.*, 2016; Jagadesh *et al.*, 2019; Moretti *et al.*, 2018; Almeida *et al.*, 2015), o que compromete a comparação precisa com os agregados miúdos naturais típicos para argamassas e concretos e dificulta, em muito, a avaliação de seu desempenho real. Diante disso, torna-se essencial implementar procedimentos que possibilitem o aperfeiçoamento desse material, ampliando sua viabilidade de uso com o emprego de técnicas simples e de uso corriqueiro na construção civil, como peneiramento, por exemplo.

1.2. Objetivos

Inserida no contexto apresentado acima, a presente pesquisa de dissertação tem como objetivo analisar os efeitos da substituição parcial e total da areia natural por uma areia artificial, obtida a partir da fração densa da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, sobre as propriedades mecânicas e a durabilidade de argamassas. Para tanto, três objetivos específicos foram definidos: (i) produção de um agregado miúdo artificial através da separação densimétrica da parcela densa da cinza do bagaço de cana-de-açúcar; (ii) desenvolvimento de argamassas de resistência à compressão aos 28 dias em torno de 30 MPa, com areia de cinza em teores variados (20 a 100% de substituição de areia natural); e (iii) análise da durabilidade de argamassas através da submissão dos corpos de prova ao ataque por ácido sulfúrico.

1.3. Justificativa

O aumento da urbanização e o investimento cada vez maior em infraestrutura tem feito com que o setor da construção civil experimente crescimento significativo em muitas partes do mundo. A demanda por materiais de construção só tende a crescer, juntamente com a extração de recursos naturais com a finalidade de suprir essa necessidade. A areia natural é um recurso indispensável para a indústria da construção civil; contudo, sua extração descontrolada e excessiva tem acarretado significativos impactos ambientais. Segundo Rentier e Cammeraat (2022), a mineração de areia provoca efeitos indesejáveis em diversos âmbitos. No ambiente físico, são evidenciados o alargamento e o rebaixamento dos leitos fluviais; no ambiente biológico, observa-se a redução da biodiversidade da flora e da fauna; e, no ambiente químico, registra-se a deterioração da qualidade da água, do ar e do solo, em razão da poluição.

Além da degradação ambiental provocada pela extração de areia, há uma grande preocupação com a escassez progressiva desse recurso, que pode culminar em sua extinção. Estudos estimam que, caso não sejam implementadas intervenções para desacelerar o ritmo atual de extração, a areia natural poderá estar extinta até o ano de 2050 (Sverdrup, Koca e Schlyter, 2017). Nesse contexto, intensificam-se as

buscas por materiais alternativos capazes de substituir a areia natural, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais associados.

O emprego de resíduos e subprodutos industriais em argamassas e concretos tem se destacado como uma alternativa viável para promover a sustentabilidade na construção civil. Dentre esses materiais, destaca-se a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, que vem sendo estudada, no Brasil e em outros países, como possível substituta do agregado miúdo natural em matrizes cimentícias. No contexto brasileiro, esse interesse está diretamente relacionado à importância da cana-de-açúcar no cenário nacional, pois se trata de uma cultura de grande relevância econômica, energética e ambiental para o país. O Brasil é o maior produtor mundial de açúcar e um dos principais fornecedores globais de etanol, que é um biocombustível que contribui significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa (UNICA, 2025). De acordo com a União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia, a cadeia sucroenergética movimenta mais de 100 bilhões de dólares em valor bruto, sendo responsável por um produto interno bruto em torno de 40 bilhões de dólares (aproximadamente 2% do PIB do Brasil), e gera mais de 730 mil empregos diretos e 2,2 milhões, considerando também os indiretos (UNICA, 2025). Além disso, a cana se destaca como fonte de energia renovável: cerca de 15,4% da energia ofertada no país é proveniente da cultura, sendo que o bagaço responde por aproximadamente 8% da eletricidade gerada (Raízen, 2025).

Diante desse panorama, o aproveitamento da cinza resultante da queima do bagaço de cana-de-açúcar surge como uma estratégia promissora para agregar valor a um resíduo abundante e, ao mesmo tempo, reduzir o consumo de recursos naturais. No entanto, é importante destacar que a maioria das pesquisas realizadas até o momento utilizou a cinza *in natura* nos sistemas cimentícios, contendo tanto a fração densa, rica em sílica cristalina (quartzo), quanto a fração leve, composta majoritariamente por sílica amorfa, que possui maior potencial pozolânico. Embora a cinza apresente características físicas que justifiquem o seu uso como agregado miúdo, a ausência de um pré-tratamento adequado desse resíduo mostrou-se prejudicial às propriedades mecânicas de argamassas e concretos quando utilizado em substituições superiores a 10% (Modani e Vyawahare, 2013; Khawaja *et al.*, 2021; Dayo *et al.*, 2019; De Sande *et al.*, 2021; Jagadesh *et al.*, 2019; Muthadhi e Banupriya,

2022). Em escala global, esse percentual já é considerado significativo no contexto da redução do consumo de areia natural. No entanto, acredita-se que há potencial para substituições em níveis bem superiores, desde que o material seja adequadamente preparado.

Dessa forma, a presente pesquisa se justifica pela possibilidade de avaliar o desempenho desse resíduo ao utilizar, nas argamassas, um agregado artificial produzido apenas com a fração densa da cinza (rica em quartzo) e com granulometria adequada ao emprego como agregado miúdo. Espera-se que essas iniciativas contribuam tanto para o avanço das pesquisas voltadas à preservação da areia natural, quanto para oferecer um destino mais adequado para esse importante resíduo gerado no Brasil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Agregados para misturas a base de cimento Portland

De acordo com Lisboa, Souza e Silva (2017), os agregados são classificados de acordo com diferentes critérios: dimensão dos grãos, origem e massa específica. Quanto à dimensão dos grãos, eles são divididos em miúdos, com partículas entre 0,075 e 4,75 mm, como areia, e graúdos, com partículas entre 4,75 e 75 mm, como brita e seixo rolado. Em relação à origem, os agregados podem ser naturais, como areias e seixos, provenientes de fontes naturais, ou artificiais, como britas e argilas expandidas, provenientes de processos industriais. Quanto à massa específica, os agregados são categorizados como leves, normais ou pesados. Por exemplo, a escória expandida é classificada como agregado leve devido à sua baixa densidade, enquanto britas, seixos e areias são considerados agregados normais. Já os agregados pesados, como a barita, possuem elevada densidade (Lisboa, Souza e Silva, 2017).

A forma das partículas também é importante para as propriedades do concreto fresco e endurecido. Uma das maneiras de analisá-la, é utilizando um parâmetro conhecido como índice de forma, sugerido pela NBR 7809 (2019). Contudo, esse método tem aplicabilidade limitada, pois está disponível apenas para frações graúdas. Devido a isso, o uso de técnicas baseadas na análise de imagem das partículas tem se destacado, por permitir a medição de várias partículas ao mesmo tempo (incluindo os agregados miúdos) e melhorando a análise estatística dos parâmetros de forma (Bauer, 2019).

Além disso, as propriedades dos agregados são influenciadas por alguns fatores como: porosidade, composição química e mineralógica e condições de fabricação. A porosidade está diretamente relacionada à massa específica aparente, à absorção de água, à resistência, ao módulo de elasticidade e à sanidade. A composição química e mineralógica tem vínculo com a resistência do agregado, módulo de elasticidade, e cargas elétricas. Por sua vez, as condições de fabricação afetam o tamanho, a forma e a textura das partículas (Lisboa, Alves e Melo, 2017).

Essas propriedades dos agregados são fundamentais para a melhor seleção dos materiais conforme a finalidade proposta, além de auxiliar na dosagem adequada do concreto ou argamassa.

De acordo com a NBR 7211 (2022), que trata dos agregados para concreto, agregado graúdo é o material cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm. Já o agregado miúdo é aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm. Essa caracterização é realizada por meio de um ensaio de granulometria, conforme a NBR 17054 (2022), utilizando peneiras das séries normal e intermediária, conforme definido na NBR NM ISO 3310-1 (2010).

Os agregados graúdos são geralmente compostos por pedra britada, seixo rolado e outros materiais de origem natural ou artificial. A NBR 7211 (2022) sugere ensaios como a granulometria, absorção de água, desgaste por abrasão e a resistência ao esmagamento para garantir a qualidade dos agregados graúdos na produção do concreto.

As areias naturais (provenientes dos leitos dos rios e cavas) e areias artificiais como a areia de britagem, por exemplo, são os agregados miúdos mais utilizados. Com a finalidade de avaliar as propriedades físicas dos agregados miúdos é necessário realizar ensaios de caracterização nesses materiais. A norma NBR 7211 (2022) sugere os ensaios de granulometria, massa unitária, absorção de água, massa específica e teor de materiais pulverulentos.

Os finos de rocha, classificados como agregados manufaturados, são materiais com partículas de pequenas dimensões, geradas como subproduto do processo de britagem e moagem de rochas. Quando ocorre a fragmentação das rochas por meio de processos mecânicos, essas partículas, com dimensões menores que as desejadas, são separadas e classificadas como pó de pedra ou areia de brita fina. Esse material pode ser utilizado no concreto ou na argamassa em substituição parcial da areia (Cordeiro, De Alvarenga e Rocha, 2016), promovendo o preenchimento dos vazios entre os grãos maiores, o que melhora a compactação e a resistência. Além disso, há outras aplicações possíveis para esse material. Os finos de rocha podem

ser empregados como lastro de pavimentos e também na fabricação de blocos e pré-moldados, por exemplo.

2.2. Agregados miúdos reciclados

Os agregados miúdos reciclados têm se destacado significativamente devido aos benefícios ambientais e econômicos que proporcionam (CAU/AL, 2020). São materiais obtidos através do reaproveitamento de resíduos industriais, agrícolas e da própria atividade da construção civil, como os provenientes de demolições. Conforme a Future Eco (2024), a utilização desses materiais, além de diminuir a extração de recursos naturais, contribui para a redução dos níveis de poluição atmosférica, uma vez que as atividades de extração, processamento e transporte são reduzidas. Esses processos também afetam o custo final do agregado, tornando a reutilização e reciclagem dos resíduos uma opção economicamente viável.

Os resíduos de construção civil (RCC) são materiais gerados durante obras de construção, reforma, demolição e escavação de edificações, e têm sido utilizados como agregados reciclados (Moretti *et al.*, 2016). Eles são compostos por materiais como concreto, tijolo, argamassa, vidro, entre outros. A heterogeneidade desse resíduo é um fator que dificulta o uso, pois interfere diretamente na resistência mecânica, porosidade e densidade do material.

Os resíduos de cerâmica, por sua vez, possuem um grande potencial de uso na construção civil. Azulejos quebrados, louças sanitárias, telhas e outros produtos cerâmicos descartados podem ser reaproveitados de diversas formas. Esse material pode ser triturado e utilizado como substituto parcial do agregado miúdo na produção de argamassas e concretos (Golla, Gunesan e Samad, 2022), na fabricação de blocos de concreto (Penteado, De Carvalho e Lintz, 2016), e também podem ser utilizados como base e sub-base em estradas e pavimentos (Cabalar, Hassan e Abdulnafaa, 2017).

Além dos resíduos citados anteriormente, existe uma variedade de subprodutos industriais que podem ser utilizados em substituição ao agregado miúdo, como cinzas residuais, resíduos de areia de fundição, escória de cobre, escória de aço, cinza de

fundo de carvão, entre outros. Thomas, Damare e Gupta (2013) verificaram que a escória de cobre, em substituição parcial da areia natural, aumenta a resistência mecânica e a durabilidade do concreto. Al-Jabri *et al.* (2009) também avaliaram a escoria de cobre como agregado miúdo artificial no concreto, e observaram um incremento significativo na trabalhabilidade. O ganho de resistência mecânica foi observado em estudos utilizando resíduos de escoria de aço (Chavan e Kulkarni, 2013), cinza volante (Siddique *et al.*, 2015), e cinzas de fundo de carvão (Rafieizonooz *et al.*, 2016), em substituição parcial do agregado miúdo natural em concretos. Os estudos citados demonstram que a utilização de resíduos pode contribuir para o aumento da resistência mecânica, melhoria na trabalhabilidade e durabilidade de concretos.

2.3. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Segundo levantamento realizado pela Conab, as estimativas para a safra 2025/26 apontam para uma produção de 663,4 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (CONAB, 2025). A previsão é de que sejam destinados 8,79 milhões de hectares para a colheita de cana-de-açúcar, 0,3% superior à área colhida em 2024/25. A Figura 1 ilustra uma operação de colheita mecanizada de cana-de-açúcar.



Figura 1: Operação de colheita mecanizada de cana-de-açúcar.

A produção de cana-de-açúcar é destinada à fabricação de açúcar e etanol. Durante a extração do caldo, gera-se uma grande quantidade de bagaço, que é

utilizado como combustível na própria usina, alimentando o processo industrial. A cinza do bagaço da cana-de-açúcar é produzida durante a queima desse bagaço. Souza *et al.* (2011) relataram que, para cada tonelada de cana-de-açúcar, são gerados cerca de 250 kg de bagaço. Essa quantidade de bagaço gera aproximadamente 6,2 kg de cinza residual, resultando em 24,8 kg para cada tonelada de bagaço que alimenta a caldeira. Assim, de acordo com a previsão de produção para a safra de 2025/26 feita pela CONAB (2025), o Brasil possui um potencial de produção de cerca de 4,11 milhões de toneladas de cinza de bagaço. Isso equivale a aproximadamente 0,62% da massa total de cana-de-açúcar produzida. A queima do bagaço gera dois tipos de cinza: a cinza pesada de fundo de grelha e a cinza leve proveniente da lavagem dos gases das chaminés. Essas cinzas têm sido alvo de muitas pesquisas voltadas para seu uso na construção civil, seja como material pozolânico, substituindo parte do cimento em argamassas e concretos, ou como material substituto do agregado miúdo natural.

2.4. Atividade pozolânica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar

Estudos apontam que as cinzas provenientes da queima do bagaço da cana-de-açúcar possuem um bom potencial de atividade pozolânica. Contudo, sua reatividade está sujeita à algumas variáveis, como as condições de queima (Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn, 2009), a moagem do material (Cordeiro, Tavares e Toledo Filho, 2016; Jagadesh, Ramachandramurthy e Murugesan, 2018), e a presença de contaminantes (Cordeiro, Linhares e Lemos 2022). A incorporação de cinzas pouco reativas ao sistema cimentício pode resultar em consequências adversas, pois reduz a quantidade de compostos disponíveis para a formação dos hidratos do cimento, substituindo-os por um material de baixa reatividade. Desta forma, um tratamento prévio da cinza do bagaço da cana-de-açúcar se faz necessário para aumentar sua atividade pozolânica. Caso contrário, seu uso como substituto parcial do cimento pode ser inviável.

As condições de queima do material influenciam diretamente na reatividade da cinza, sendo necessário um controle de temperatura que permita a liberação do carbono presente no material em forma de gás, sem converter a sílica amorfa para o

estado cristalino. Essa transição ocorre porque o calor proporciona a energia necessária para reorganizar a estrutura desordenada da sílica amorfa em uma estrutura ordenada e cristalina. Estudos indicam que a temperatura máxima de calcinação do bagaço para manter a sílica no estado amorfo é de até 700°C (Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn, 2009).

A moagem é outro tratamento que influencia no grau de reatividade da cinza. Há uma correlação inversa entre o tamanho das partículas da cinza e seu potencial pozolânico (Cordeiro e Kurtis, 2017). Partículas menores apresentam uma superfície específica maior, o que facilita as reações pozolânicas. Essa influência da moagem pode ser observada em um estudo realizado por Jagadesh, Ramachandramurthy e Murugesan (2018). Os autores utilizaram dois tipos de cinza do bagaço da cana-de-açúcar como substituição parcial do cimento: a cinza original sem tratamento de moagem (apenas peneirada e denominada O-SCBA) e a cinza P-SCBA, obtida pela moagem do O-SCBA em moinho de bolas de laboratório por 45 min. O estudo fez uma comparação entre os concretos com substituição, e também com o concreto de referência, e obteve resultados superiores para o concreto com substituição de cinza moída. A maior massa específica do concreto P-SCBA (2422 kg/m³) em comparação ao O-SCBA (2409 kg/m³) indicou um preenchimento dos poros por partículas de cinza processada mais fina. Quando o P-SCBA foi comparado ao concreto de referência, observou-se um aumento de aproximadamente 28% na resistência, ao substituir 10% do cimento por P-SCBA. A mistura P-SCBA apresentou módulo de ruptura 10,64% maior do que O-SCBA, e módulo de elasticidade também superior. Esses resultados evidenciam a influência da moagem na atividade pozolânica da cinza.

Em relação à presença de contaminantes, a areia de quartzo é a principal preocupação. Proveniente do solo aderido aos colmos da cana, esse material, essencialmente inerte, não é completamente removido durante o processo de lavagem da cana. Após a extração do caldo e a queima do bagaço, o quartzo aparece no resíduo final, misturada às cinzas provenientes do bagaço (ricas em sílica amorfa). Como mencionado anteriormente, a sílica em seu estado cristalino é um material inerte, portanto, atua como um contaminante que compromete o grau de pozolanicidade da cinza. Cordeiro, Tavares e Toledo Filho (2016) apresentaram uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), na qual é possível

observar a presença das partículas de quartzo na cinza. As partículas de superfície lisa e superfícies de fratura concoidal identificam claramente o quartzo, enquanto a estrutura porosa evidencia as partículas celulares da cinza, como pode ser observado na Figura 2.

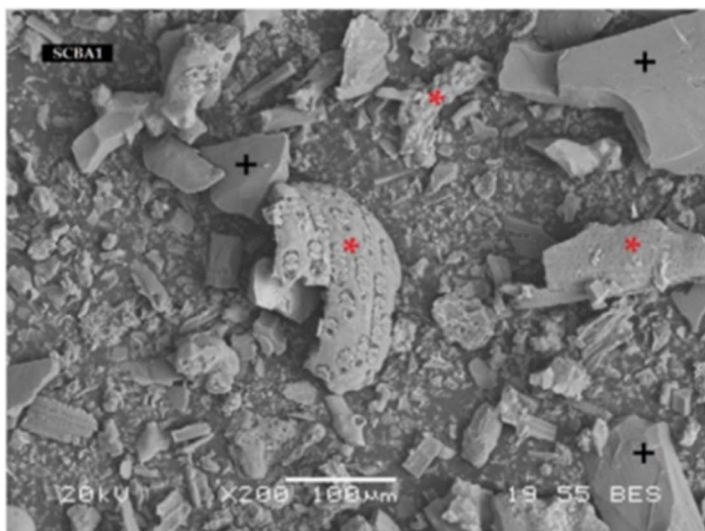


Figura 2: Imagens de MEV da CBA mostrando suas partículas celulares (Cordeiro, Tavares e Toledo Filho, 2016).

A separação densimétrica é um método que se mostra bastante eficiente para realizar a separação das partículas de quartzo, quando necessário. Idealizada por Andreão *et al.* (2019), o método consiste em depositar a cinza contaminada em um recipiente cheio de água. As partículas mais densas do quartzo decantam rapidamente, e as menos densas flutuam ou permanecem suspensas na solução, como pode ser visto na Figura 3. Conforme as partículas se separam, com base em suas densidades, é possível coletar as diferentes frações.



Figura 3: Procedimento de separação por fracionamento densimétrico da cinza residual (Andreão, 2018).

Andreão *et al.* (2019) investigou o efeito do fracionamento densimétrico, comparando amostras de cinza do bagaço de cana-de-açúcar tratadas e não tratadas com esse procedimento, avaliando a atividade pozolânica por meio do método de Chapelle modificado. Os autores observaram que a classificação seletiva das partículas, por meio da separação densimétrica, contribuiu para a obtenção de cinzas com menor conteúdo de sílica cristalina e desempenho pozolânico superior, em função da redução da contaminação por quartzo presente na amostra original.

Após a revisão desses estudos, foi possível observar que a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material pozolânico requer um tratamento minucioso e uma alta demanda de energia para requeima e moagem ultrafina. Diante disso, foi proposta a utilização das cinzas com pouca reatividade pozolânica, como materiais predominantemente inertes utilizados em substituição parcial ou total do agregado miúdo nos concretos e argamassas. O próximo tópico abordará a utilização dessas cinzas como agregado miúdo.

2.5. Utilização da cinza residual como agregado miúdo

Com base em pesquisas destinadas a avaliar as propriedades físicas e químicas das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, notou-se que a cinza residual

possui potencial para ser empregada como substituta parcial da areia natural na produção de concretos e argamassas. Alguns benefícios podem ser obtidos com essa substituição, como a redução da extração de areia natural, a melhoria de certas propriedades dos sistemas cimentícios e a diminuição dos impactos ambientais decorrentes da disposição inadequada desses resíduos. No entanto, vale ressaltar, que sua utilização requer uma caracterização prévia a fim de garantir que suas propriedades atendam aos requisitos técnicos necessários para a produção de concretos e argamassas de qualidade.

De Sande *et al.* (2021) investigaram o uso de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como substituto parcial da areia no concreto. Foram analisadas cinzas leves, provenientes da queima em suspensão, e cinzas pesadas, obtidas no fundo da caldeira. A combustão, entre 750 °C e 800 °C, gerou cinzas com alto grau de cristalinidade. As cinzas leves apresentaram predominância de sílica na forma de quartzo, justificando sua aplicação como substituto da areia. Já as pesadas continham mistura de pedriscos, bagaço e contaminantes, com predominância de CaCO_3 e partículas angulosas, confirmadas por difração de raios X (DRX).

Em outro estudo conduzido por Subedi *et al.* (2021), também foram identificados picos característicos de quartzo, os quais indicaram a presença de sílica cristalina. No entanto, os autores também observaram a presença de sílica amorfa ao realizarem a análise quantitativa. A análise revelou a composição do SCBA bruto, com 52,9% de sílica amorfa, 38,9% de quartzo e 5,5% de albita. Huang *et al.* (2023) também encontraram picos difusos no padrão de DRX que indicaram a presença de sílica amorfa. Devido ao uso de cinzas sem tratamento, grande parte de sílica amorfa permanece misturada ao material, sendo possível identificá-la a partir dos resultados obtidos.

A composição granulométrica do material, por sua vez, afeta diretamente o índice de vazios do agregado e interfere na compacidade do sistema cimentício. Moretti *et al.* (2016) analisaram concreto com substituição parcial de agregado graúdo por RCC e de agregado miúdo por areia da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (SBAS). A caracterização mineralógica da SBAS indicou quartzo e ausência de halo amorfo, enquanto a composição química revelou 80,2% de SiO_2 . Apesar de a

granulometria da SBAS estar fora da zona utilizável, sua mistura com areia de quartzo (30% de substituição) enquadrou-se na zona útil para agregado miúdo, conforme mostra a Figura 4.

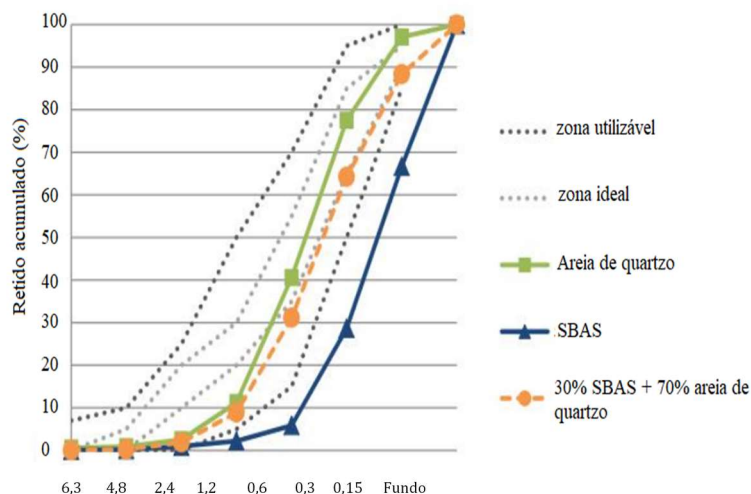


Figura 4: Análise de peneiramento da areia de quartzo, SBAS e mistura (adaptado de Moretti *et al.*, 2016).

Ainda com base no estudo desenvolvido por Moretti *et al.* (2016), foram produzidos concretos com diferentes proporções de agregados reciclados, incluindo 30% de substituição do agregado miúdo por areia da cinza de bagaço de cana (30SBAS). Os resultados mostraram que essa substituição não gerou diferenças significativas em relação ao concreto controle quanto à absorção de água, profundidade de carbonatação e resistência à compressão.

Modani e Vyawahare (2013) avaliaram concretos com substituição, em volume, do agregado miúdo por cinza de bagaço de cana em até 40%. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e de absorvidade podem ser vistos na Tabela 1. Apenas a mistura com 10% (M10) apresentou resistência à compressão superior ao controle aos 28 dias. Os autores indicaram que 10% e 20% podem ser usados sem perdas relevantes de trabalhabilidade e resistência. Já o ensaio de absorvidade mostrou aumento da permeabilidade com maiores teores de cinza, devido à sua natureza porosa e das impurezas contidas nela.

Tabela 1: Resultado dos ensaios de compressão e absorvidade de concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar (adaptado de Modani e Vyawahare, 2013).

Amostra	Resistência à compressão (MPa)		Absortividade (cm/s ^{1/2})
	7 dias	28 dias	
M0	13,91	22,36	1,53
M10	12,16	23,85	1,72
M20	10,37	21,9	2,01
M30	10,05	19,17	2,71
M40	6,19	14,7	3,78

Um resultado semelhante foi encontrado em um estudo de Khawaja *et al.* (2021), que avaliaram concreto leve com substituição volumétrica da areia natural por cinza de bagaço de cana (5 a 25%). O maior ganho de resistência à compressão ocorreu com 10% de cinza, conforme Figura 5.

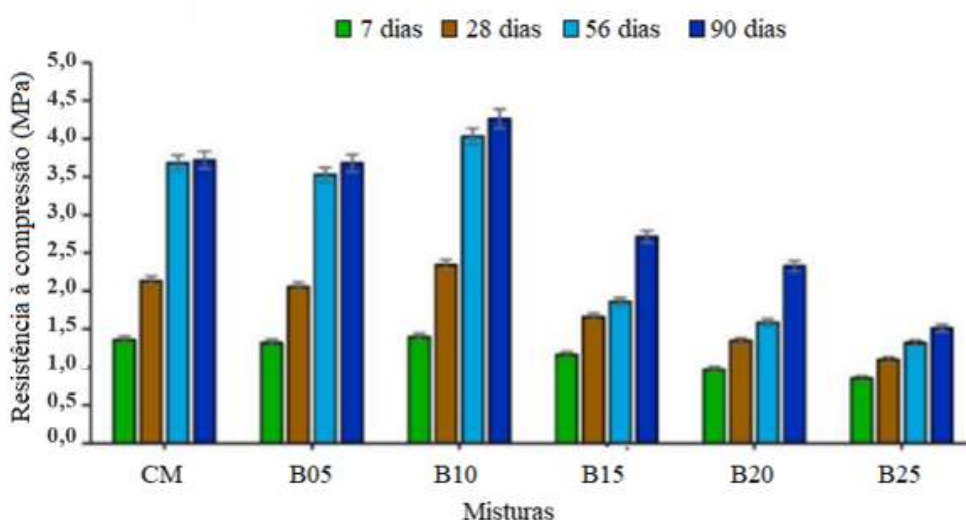


Figura 5: Resistência à compressão de formulações de concreto leve (adaptado de Khawaja *et al.*, 2021).

O aumento da resistência foi atribuído à formação de gel secundário de silicato de cálcio hidratado. Em contrapartida, maiores teores de substituição reduziram a resistência por alterarem a distribuição dos poros e provocarem implosão das bolhas de espuma. Ensaios de absorção de água e massa específica no estado endurecido corroboraram os resultados obtidos de resistência à compressão. Observou-se redução da absorção de água com o avanço da cura (Figura 6), atribuída ao entupimento dos poros por compostos das reações de hidratação e pozolânica. A

adição da cinza reduziu a massa específica no estado endurecido, em razão da menor massa específica da cinza em comparação à da areia natural, mas houve aumento em idades maiores de cura. Verificou-se relação inversa entre absorção e massa específica, e concluiu-se que a cinza de bagaço de cana é adequada como substituto parcial da areia, conferindo propriedades físico-mecânicas e térmicas favoráveis.

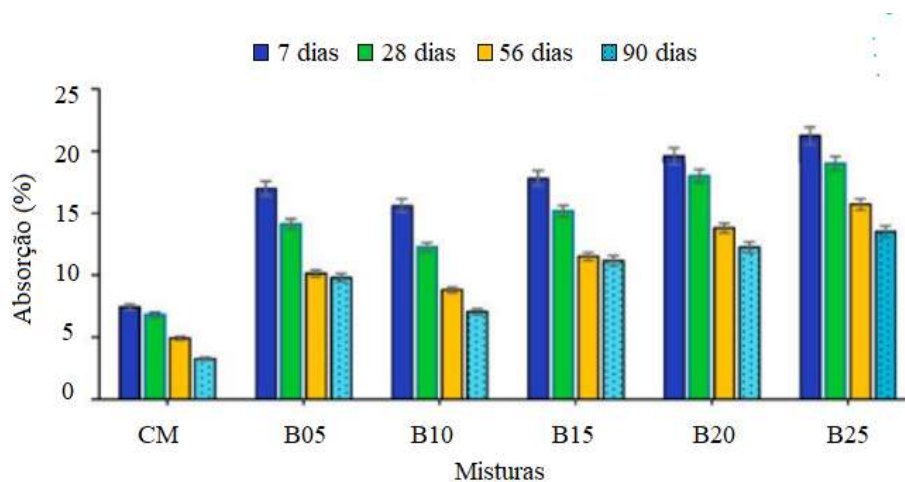


Figura 6: Absorção de água do concreto leve em diferentes idades de cura (adaptado de Khawaja *et al.*, 2021).

De Sande *et al.* (2021) também observaram melhores resultados quando 10% da areia natural foi substituída pela cinza, com aumento de até 4% na resistência à compressão aos 28 dias. Entretanto, para teores maiores de substituição, como 20% e 30%, a resistência diminuiu 6,8% e 8,9%, respectivamente. Os autores informaram que a adição da cinza reduziu a massa específica no estado endurecido e aumentou o índice de porosidade aberta, ambos parâmetros relacionados ao desempenho da resistência à compressão.

Conforme observado nos estudos analisados, a maior absorção de água, decorrente da elevada porosidade da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, influenciou negativamente propriedades importantes de argamassas e concretos. Esse efeito se tornou mais evidente em teores mais elevados de substituição. Isso também foi observado para concretos autoadensáveis, conforme discutido em Sua-iam e Makul (2013) e Muthadhi e Banupriya (2022). Em sua pesquisa sobre a substituição parcial da areia natural por cinza do bagaço de cana-de-açúcar, combinada com resíduos de pó de calcário, Sua-iam e Makul (2013) concluíram que o aumento do teor de cinza

provocou redução na resistência do concreto, atribuída à maior porosidade do material e ao aumento da demanda por água. Essa observação também foi feita por Muthadhi e Banupriya (2022), em seu estudo sobre a substituição parcial da areia natural por cinza em concreto autoadensável. Foi verificado que a adição crescente de cinza reduziu a resistência à compressão em virtude do aumento da demanda por água nos concretos com areia de cinza.

Jagadesh *et al.* (2019) utilizaram a cinza do bagaço da cana-de-açúcar como substituta da areia natural em proporções entre 5% e 20% em argamassas. As argamassas foram denominadas F1 (5%), F2 (10%), F3 (15%) e F4 (20%). Os autores mencionaram que a cinza foi utilizada diretamente como recebida das indústrias, sem qualquer tipo de pré-tratamento. A cinza e a areia natural foram empregadas na mesma faixa de tamanho de grãos, entre 850 e 150 μm . Vale ressaltar que, embora os materiais tenham sido utilizados na mesma faixa de tamanho, a granulometria não era equivalente, pois as proporções de cada tamanho de partícula eram diferentes, conforme pode ser observado na Figura 7. A curva FA indica a granulometria da areia natural (agregado fino), enquanto a curva FSCBA indica a granulometria da cinza utilizada como substituta. Após a caracterização dos materiais, verificou-se que a areia natural apresentou massa específica maior que a da cinza e menor absorção de água, resultados semelhantes aos encontrados nos estudos anteriormente mencionados. A areia natural apresentou uma massa específica de 2,72 g/cm^3 e uma absorção de água de 2,0%, enquanto a cinza apresentou um valor de 1,95 g/cm^3 para massa específica e 10,75% de absorção de água. Foi verificado que a massa específica da argamassa no estado endurecido diminuiu à medida que a taxa de substituição aumentou. Observou-se um ganho na resistência à compressão das argamassas com substituição de até 10%; por outro lado, a resistência diminuiu em proporções superiores. Os dados obtidos nos ensaios podem ser consultados na Tabela 2.

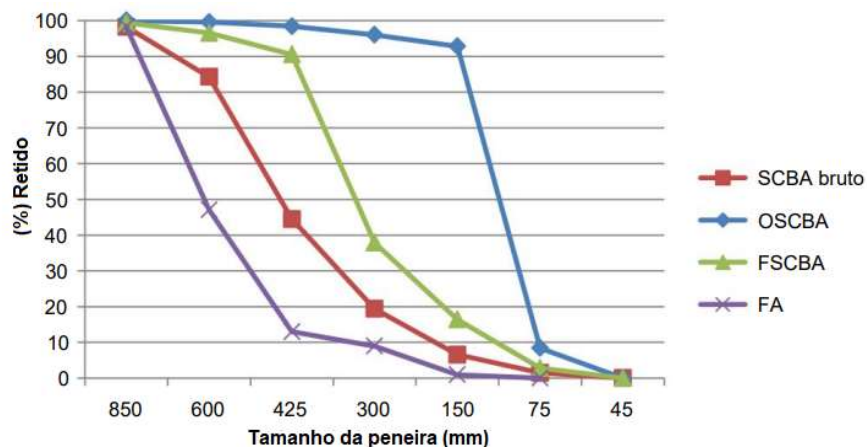


Figura 7: Distribuição do tamanho de partícula dos agregados (adaptado de Jagadesh *et al.*, 2019).

Tabela 2: Propriedades de argamassas com SCBA e relação água/aglomerante (adaptado de Jagadesh *et al.*, 2019).

Misturas	Massa específica (g/mm ³)		Resistência à compressão (MPa)		Relação a/c
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	
CM	2350	2355	18,41	28,26	0,67
F1	2339	2345	18,97	29,08	0,69
F2	2313	2318	19,41	29,49	0,70
F3	2294	2298	17,96	27,49	0,72
F4	2271	2276	14,04	20,91	0,74

A incorporação de SCBA em maiores proporções tende a comprometer a massa específica e a resistência das argamassas, principalmente devido à presença de partículas muito finas e irregulares, que acabam formando porosidade superficial indesejada. Essas partículas também favorecem a absorção de água em diferentes níveis, exigindo maior consumo hídrico nas misturas. Entre os percentuais analisados, os autores destacaram que a substituição de 10% apresentou desempenho mais satisfatório tanto em termos de propriedades mecânicas quanto de trabalhabilidade.

Moretti *et al.* (2018) analisaram a distribuição do tamanho dos poros de argamassas produzidas com a areia da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (SBAS). A areia natural foi parcialmente substituída por SBAS em proporções que variam de 10% a 40% em volume. O agregado miúdo empregado nas argamassas consistiu em uma mistura de areia fina, areia média e SBAS. Os autores utilizaram a SBAS moída como substituta da areia fina, mantendo constante a quantidade de areia média.

Contudo, as partículas de SBAS eram menores que os da areia fina, conforme ilustrado na Figura 8.

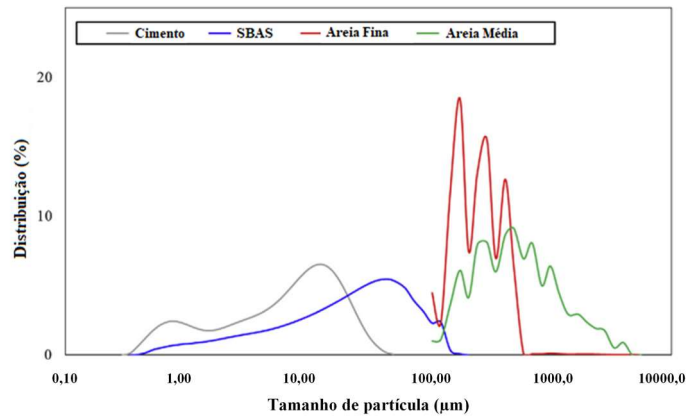


Figura 8: Distribuição granulométrica dos materiais: cimento, SBAS, areia fina e areia média (adaptado de Moretti *et al.*, 2018).

A relação água/cimento foi mantida constante, com o objetivo de evitar influências na porosidade e na resistência à compressão. Os autores relataram que a incorporação de até 30% de SBAS afetou levemente a consistência das argamassas. No entanto, a substituição de 40% resultou em uma redução significativa na avaliação da consistência na mesa de espalhamento. Apesar disso, as argamassas com SBAS apresentaram valores de resistência à compressão superiores à argamassa de referência em todas as proporções de substituição, tanto aos 28 dias quanto aos 91 dias (Tabela 3). No que se refere à distribuição de poros das argamassas, constatou-se que a incorporação de SBAS modificou a distribuição dos poros, porém não influenciou a porosidade das argamassas.

Tabela 3: Resultados de resistência à compressão (MPa) das argamassas aos 28 e 91 dias (adaptado de Moretti *et al.*, 2018).

Idade	REF	10%SBAS	20%SBAS	30%SBAS	40%SBAS
28 dias	45,8	48,9	48,3	49,7	50,2
91 dias	52,9	53,5	54,6	53,4	57,0

A análise da distribuição e do tamanho dos poros também foi realizada em um estudo conduzido por Almeida *et al.* (2015). Nesse estudo, a areia natural foi substituída pela areia proveniente da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (SBAS) em argamassas, nas proporções de 30% e 50%. O SBAS foi previamente padronizado

por peneiramento em malha de 4,8 mm e moído em moinho mecânico (almofariz e pilão) por três min. A quantidade de água foi ajustada de modo a manter a consistência das argamassas em níveis equivalentes, conforme ilustrado na Tabela 4.

Tabela 4: Proporção de materiais para produção das argamassas (adaptado de Almeida *et al.*, 2015).

Argamassa	SBAS (%)	Cimento	Areia	SBAS	Água	Consistência (mm)
RM	0	1,000	2,010	-	0,420	250±10
M30	30	1,000	1,407	0,603	0,440	251±10
M50	50	1,000	1,005	1,005	0,470	258±10

Os autores identificaram que o uso do SBAS exigiu mais água no preparo das argamassas, mas que não houve perda de resistência, mesmo com o aumento da relação a/c. Isso ocorreu pois o SBAS possuía maior área superficial, devido à maior finura, em comparação com a areia natural. A argamassa de referência apresentou resistência à compressão aos 28 dias de 45,94 MPa, enquanto as argamassas com substituição de 30% e 50% apresentaram 46,27 MPa e 45,63 MPa, respectivamente. Em relação à absorção de água e índice de vazios, as argamassas contendo SBAS apresentaram valores superiores aos da argamassa de referência, conforme Tabela 5. Esse aumento pode ter sido causado pela maior absorção de água do SBAS de 0,9% em relação à areia natural que apresentou 0,5%. Além disso, o aumento da relação a/c causou um aumento na porosidade das argamassas, o que pode ter contribuído para maior absorção de água das argamassas com SBAS. Embora tenha ocorrido aumento da porosidade, esse efeito só foi significativo quando a amostra RM foi comparada com a M50. Foi relatado que as argamassas contendo SBAS apresentaram uma redução na quantidade de microporos (poros com diâmetros inferiores a 150 µm) e um aumento na quantidade de macroporos (poros com diâmetro superior a 360 µm). Os autores concluíram que o teor de 30% é benéfico para a mistura, pois proporciona à argamassa uma distribuição de poros com diâmetros equivalentes à amostra de referência.

Tabela 5: Propriedades físicas das amostras de argamassa aos 28 dias de idade (adaptado de Almeida *et al.*, 2015).

Argamassa	Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica aparente seca (g/cm³)
RM	10,17	20,64	2,03
M30	10,72	21,56	2,01
M50	10,92	21,79	2,00

A maioria das pesquisas avaliadas sobre o uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em substituição à areia natural apresentou resultados similares. No entanto, Sales e Lima (2010) obtiveram resultados significativamente melhores em argamassas com diferentes proporções de substituição do agregado miúdo (10%, 15%, 20%, 30%, 50% e 100%). As cinzas foram coletadas em duas usinas distintas. A Figura 9 apresenta a resistência à compressão das duas amostras para todas as porcentagens adotadas. A amostra de referência foi denominada BA, enquanto as amostras contendo cinzas foram denominadas SBA, seguidas do teor de substituição e da inicial da usina de origem. Após análise dos resultados, foi verificado que todas as amostras confeccionadas com as cinzas, exceto SBA100A, apresentaram resultados superiores de resistência à compressão em comparação à amostra de referência. Segundo os autores, esses resultados provavelmente se devem ao efeito físico de empacotamento, uma vez que as amostras de cinzas possuíam menor massa específica em relação à areia natural. Após análise dos resultados, foi verificado que todas as amostras confeccionadas com as cinzas, exceto SBA100A, apresentaram resultados superiores de resistência à compressão em comparação à amostra de referência. Segundo os autores, esses resultados provavelmente se devem ao efeito físico de empacotamento, uma vez que as amostras de cinzas possuíam menor massa específica em relação à areia natural.

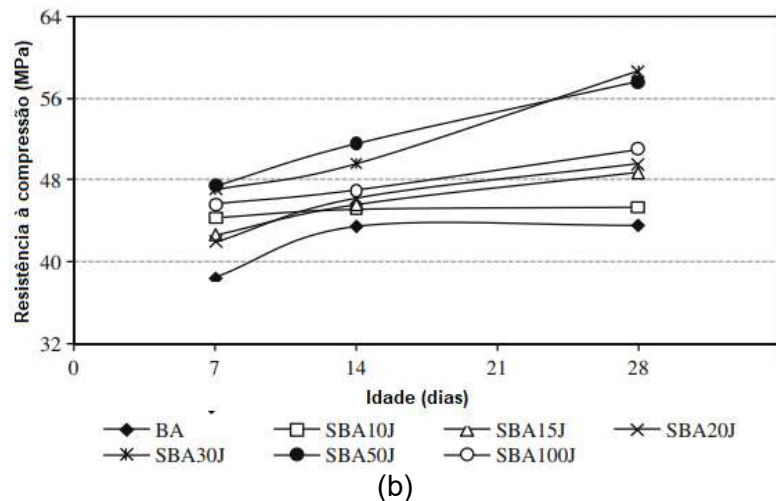
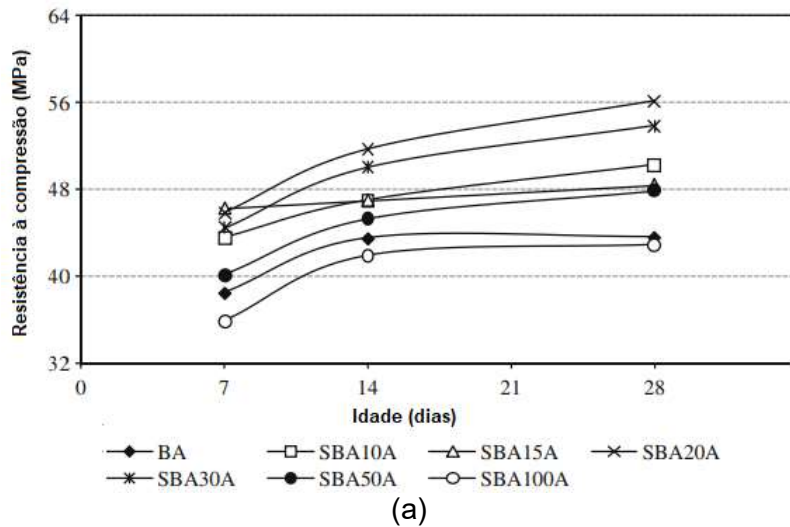


Figura 9: Argamassas contendo cinzas da Usina Tamoio - Araraquara - (a) e argamassas contendo cinzas da Usina Diamante - Jaú - (b), respectivamente (adaptado de Sales e Lima, 2010).

Uma pesquisa realizada por Criado *et al.* (2024) utilizou a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, sem moagem, como substituição parcial do agregado miúdo em concretos destinados à produção de blocos intertravados de pavimentação, nos teores de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. Os resultados de resistência à compressão apresentaram um comportamento não linear, em que os autores reconheceram que o estudo não seguiu a tendência observada em outras pesquisas, registrando redução de resistência nas menores porcentagens de substituição e aumento no teor de 20%, conforme demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6: Valores de resistência a compressão, absorção de água e abatimento (adaptado de Criado *et al.*, 2024).

Mistura (%)	Resistência aos 28 dias (MPa)	Absorção de água (%)	Abatimento (mm)
Referência	43,95	6,1	160
5	38,15	6,4	60
10	35,49	6,3	70
15	38,30	5,9	50
20	42,50	5,3	110

Os autores relataram que a adição da cinza reduziu a trabalhabilidade dos concretos. Os valores de abatimento diminuíram em relação ao concreto de referência. Em relação à absorção de água, foi registrada uma redução no traço com 15% e 20% de cinza em comparação ao concreto de referência, atribuída ao fato de a cinza ser um material muito fino, capaz de preencher os vazios no concreto.

Ramakrishnan *et al.* (2021) avaliaram a substituição do agregado miúdo natural por cinza do bagaço da cana-de-açúcar (SCBA) em concretos de 0 a 20%, com incrementos de 5%. Os testes de absorção de água, porosidade, absorvidade e resistência à compressão indicaram melhor desempenho para 15% de cinza, com absorção em torno de 3%, porosidade abaixo de 10% e resistência à compressão de 51,62 MPa aos 28 dias. O concreto com 20% de cinza apresentou aumento da absorção, porosidade e absorvidade, e resistência à compressão de 46,31 MPa, enquanto a mistura controle atingiu 42,31 MPa. Outro aspecto fundamental em estudos de substituição de materiais em argamassas e concretos é a durabilidade, já que alterações na composição podem comprometer o desempenho das misturas. Para o ensaio de resistência ao ataque ácido, analisaram-se apenas o concreto de referência e o com 15% de substituição, imersos em solução de ácido sulfúrico por 45 dias (Tabela 7). O concreto com SCBA apresentou menor perda de massa e maior resistência ao ataque ácido, atribuída às reações pozolânicas e à menor porosidade proporcionada pelas partículas finas de SCBA, que restringem a penetração do ácido.

Tabela 7: Resultados obtidos pelo ensaio de resistência ao ataque ácido (adaptado de Ramakrishnan *et al.*, 2021).

SCBA (%)	Massa antes do ataque (kg)	Massa após ataque (kg)	Resistência antes da imersão (MPa)	Resistência depois da imersão (MPa)
0	8,10	4,78	48,32	14,12
15	8,19	5,82	53,72	21,51

2.6. Considerações sobre a revisão

Após a revisão da literatura, constatou-se que os autores utilizaram a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, composta tanto pela fração densa (quartzo) quanto pela fração leve (partículas originalmente provenientes do bagaço) nas substituições da areia natural. A fração leve da cinza apresentou potencial pozolânico e contribuiu para o aumento da resistência à compressão em substituições de até 30% da massa/volume de agregado miúdo. No entanto, em substituições superiores, os efeitos negativos decorrentes das alterações nas propriedades dos sistemas cimentícios superaram os benefícios. A absorção de água, por exemplo, foi maior em concretos e argamassas contendo a fração leve da cinza. Isso ocorreu porque esse material apresenta morfologia porosa, além de características higroscópicas e adsorventes. Outra propriedade alterada foi a massa específica do sistema cimentício, em função da menor densidade da cinza em comparação com a da areia natural (Khawaja *et al.*, 2021). Esses fatores exerceram influência direta sobre o desempenho do sistema cimentício, sobretudo para teores de substituição de areia natural acima de 10% (De Sande *et al.*, 2021; Muthadhi e Banupriya, 2022; Sua-iam e Makul, 2013).

A Tabela 8 apresenta um resumo dos valores de resistência à compressão obtidos por alguns autores analisados neste capítulo, que utilizaram a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição à areia natural, destacando os traços que apresentaram os melhores desempenhos, e uma síntese dos principais argumentos apresentados para justificar o ganho ou a perda de resistência. A maior parte dos trabalhos sugeriu teores de substituição entre 10% e 30%, indicando que, acima desse limite, houve prejuízos decorrentes da perda de resistência à compressão e trabalhabilidade. Outro fator que demanda atenção foi a substituição do agregado miúdo natural por cinzas do bagaço com granulometrias distintas. Nas substituições realizadas não houve equivalência entre as granulometrias, o que dificultou uma

comparação precisa entre os materiais. As pesquisas analisadas neste capítulo evidenciam a necessidade de um tratamento prévio da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, visando aumentar o teor de substituição do agregado miúdo natural no sistema cimentício. Isso contribuiria diretamente para uma maior redução na extração de areia natural.

Tabela 8: Valores de resistência à compressão em diferentes pesquisas.

Referência	Porcentagem de substituição	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Melhor traço	Ganho de resistência atribuído à/ao:	Perda de resistência atribuída à/ao:
Sales e Lima (2010)	0% (massa)	43 (Aprox.)	Foi feito até 100%. 20% (Araraquara) e 30% (Jaú)	Efeito físico de empacotamento	Mais água na mistura para manter a mesma trabalhabilidade
	20% (massa) (Araraquara)	56,15			
	30% (massa) (Jaú)	58,7			
Modani e Vyawahare (2013)	0% (volume)	22,36	10 e 20%	Reação pozolânica	Não informado
	10% (volume)	23,85			
	20% (volume)	21,9			
	30% (volume)	19,17			
	40% (volume)	14,7			
Moretti et al. (2016)	0% (massa)	37,79	30%	Não apresentou diferenças significativas	Não apresentou diferenças significativas
	30% (massa)	37,19			
Moretti et al. (2018)	0% (volume)	45,8	40%	Não informado	Não informado
	10% (volume)	48,9			
	20% (volume)	48,3			
	30% (volume)	49,7			
	40% (volume)	50,2			
Jagadesh et al. (2019)	0% (massa)	28,26	10%	Reação pozolânica	Aumento de poros na superfície das argamassas que resulta no aumento do teor de água
	5% (massa)	29,08			
	10% (massa)	29,49			
	15% (massa)	27,49			
	20% (massa)	20,91			
Ramakrishnan et al. (2021).	0% (massa)	42,31	15%	Reação pozolânica	Hidratação lenta da SCBA que contribuiu para lixiviação de C-S-H.
	15% (massa)	51,62			
De Sande et al. (2021)	0% (massa)	56,33	10% (cinza leve)	Reação pozolânica	Com 20% e 30% houve redução da massa específica no estado endurecido, e aumento do índice de porosidade aberta
	10% (massa) (cinza volante)	58,58			
	10% (massa) (cinza de fundo)	50,63			
Muthadhi e Banupriya (2022)	0% (volume)	56 (Aprox.)	10%	Reação pozolânica e efeito de empacotamento	Aumento da demanda por água
	10% (volume)	58,3			
	20% (volume)	54 (Aprox.)			
Criado et al. (2024)	0% (massa)	43,95	20%	Reação pozolânica e granulometria	Menor trabalhabilidade
	5% (massa)	38,15			
	10% (massa)	35,49			
	15% (massa)	38,3			
	20% (massa)	42,5			

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com o intuito de cumprir os objetivos definidos nesta pesquisa, o programa experimental foi desenvolvido em três etapas principais. Na primeira etapa, foram realizadas a coleta da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e a produção do agregado miúdo artificial por meio de separação densimétrica da parcela densa (rica em quartzo) presente na cinza. Nesta etapa, a areia da cinza e uma areia natural com mesma granulometria foram caracterizadas quanto à sua mineralogia, composição química, absorção de água, massa específica, compacidade e forma. A segunda etapa consistiu na dosagem e produção de argamassas confeccionadas com substituição parcial e total da areia natural por areia reciclada, bem como na avaliação da resistência à compressão, absorção por imersão total e absorção por capilaridade. A terceira e última etapa consistiu na análise da durabilidade das argamassas frente à exposição de corpos de prova ao ataque por ácido sulfúrico ao longo de 92 dias. A seguir, as três etapas serão descritas em detalhes.

3.1. Coleta da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e produção do agregado miúdo reciclado

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar foi coletada na Usina Nova Canabrava, localizada no município de Campos dos Goytacazes-RJ. A Figura 10 mostra as etapas de lavagem da cana, extração do caldo e armazenamento do bagaço, que são as etapas iniciais do processo industrial para a produção de etanol na usina.



Figura 10: Processo de lavagem da cana-de-açúcar (a), extração de caldo (b) e armazenamento de bagaço da cana-de-açúcar (c).

Foram realizadas três coletas distintas no decorrer das operações de limpeza das caldeiras nas safras de 2022 (uma coleta) e de 2023 (duas coletas em meses distintos). Optou-se pela coleta de cinzas de fundo de caldeira, tendo em vista que a cinza pode ser coletada em outros pontos da usina (Alvarenga e Cordeiro, 2024). Segundo informações da usina, a cinza de fundo corresponde a cerca de 75% de toda cinza gerada na Usina Nova Canabrava.

Em laboratório, as três amostras de cinza foram devidamente homogeneizadas com formação de pilha alongada. A Figura 11 apresenta uma imagem da cinza de fundo de caldeira após a coleta, sem nenhum tipo de tratamento. Neste caso, foi possível observar que se trata de uma cinza composta por diferentes tamanhos de partículas e que contém fragmentos de bagaço não queimado.



Figura 11: Cinza do bagaço da cana-de-açúcar *in natura* coletada na Usina Canabrava, em Campos dos Goytacazes-RJ.

Após a coleta e homogeneização, a cinza *in natura* foi submetida a um processo de fracionamento densimétrico no intuito de separar as parcelas densa e leve da cinza. O fracionamento densimétrico é uma alternativa simples comparado a métodos de separação pneumática ou do tipo *scrubber*, que requerem maior aporte de energia elétrica (Luz *et al.*, 2010). A separação das frações que compõem as cinzas ocorre em razão da diferença de densidade entre a fração mais fina, rica em cinza oriunda do bagaço (menos densa), e a fração mais grossa, rica em quartzo (mais densa), que se deposita no fundo do tanque. Esse método foi inicialmente proposto por Andreão *et al.* (2019) e, em seguida, aperfeiçoado por Cordeiro, Linhares e Lemos (2022) para a separação da parcela mais leve e fina da cinza com vista ao emprego como material cimentício suplementar pozolânico. A Figura 12 apresenta o modelo esquemático da separação densimétrica. No presente trabalho, utilizou-se a mesma metodologia; no entanto, o objetivo do procedimento foi a captação da parcela densa da cinza, que é mais adequada à produção de agregado miúdo artificial devido à sua granulometria.

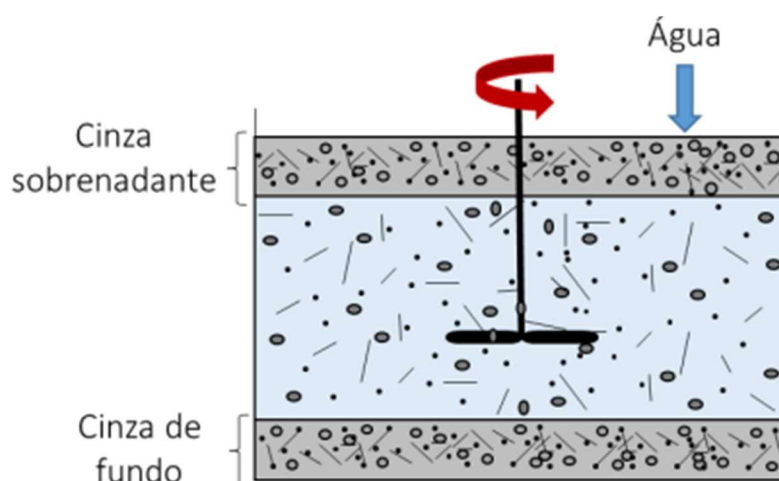


Figura 12: Modelo esquemático de separação por fracionamento densimétrico (Andreão, 2018).

No fracionamento densimétrico adotado, esquematizado no fluxograma da Figura 13 e demonstrado na Figura 14, uma amostra com 5 kg da cinza original *in natura* foi imersa em um recipiente com 15 L de água (a), e essa polpa sofreu agitação manual por 1 min (b). Em seguida, a polpa foi mantida em repouso por 3 min e, imediatamente, o material sobrenadante foi retirado com o auxílio de uma peneira de 2 mm de abertura (c). Logo em seguida, cerca de 1 min após o repouso, a polpa foi

removida por sifonamento, e a parte do fundo composta pela fração densa da cinza foi devidamente coletada (d). O procedimento foi repetido inúmeras vezes até que todo material coletado (cerca de 200 kg) fosse devidamente separado nas frações leve e densa. O sifonamento é uma técnica utilizada para remover líquidos de um recipiente por meio de uma mangueira, dispensando a necessidade de incliná-lo. O rendimento da parcela densa foi de 85% da massa inicial seca de cinza *in natura*. O rendimento da parcela leve, que não foi utilizada neste trabalho e apresenta excelente potencial pozolânico (Cordeiro, Linhares e Lemos, 2022), foi de 12%. A perda do processo de fracionamento densimétrico foi de apenas 3% em massa.

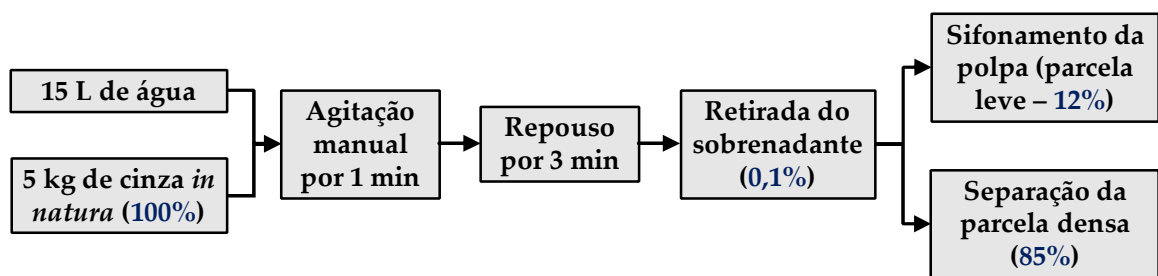


Figura 13: Fluxograma do processo de fracionamento densimétrico da cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Valores em percentual se referem à massa seca do material em relação à massa seca inicial da cinza *in natura*.

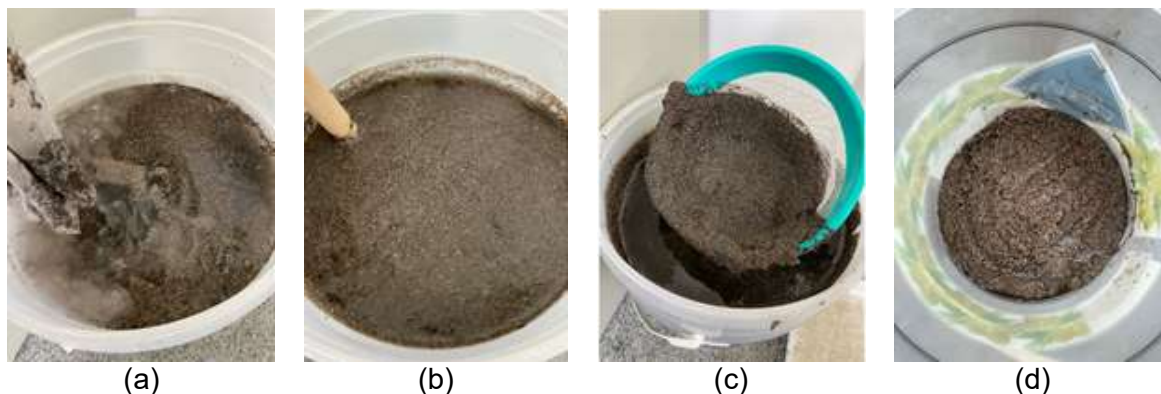


Figura 14: Imersão da cinza no recipiente com água (a), agitação manual (b), retirada da cinza sobrenadante (c), e parcela grosseira da cinza depositada no fundo do recipiente (d).

Após a finalização da separação densimétrica, a fração densa foi seca ao ar livre por 24 h e, posteriormente, seca em estufa por mais 24 h à temperatura de 100°C. Após secagem, o material foi classificado conforme as diretrizes da NBR 17054 (2022), com uso de um conjunto de peneiras da série normal (4,75, 2,36, 1,18, 0,6, 0,3 e 0,15 mm), conforme especificado na NBR NM ISO 3310-1 (2010). Além dessas,

foram inseridas peneiras intermediárias (2,0, 1,7, 0,85 e 0,075 mm) com o objetivo de proporcionar maior refinamento na análise granulométrica, permitindo melhor caracterização da distribuição de partículas. Para o processo de peneiramento a seco, foi utilizado um peneirador eletromecânico (Figura 15) da marca Pavitest, modelo I-1016-A, do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV).



Figura 15: Peneirador eletromecânico.

Após o peneiramento, todo material foi lavado com água corrente para eliminar possíveis impurezas ou materiais pulverulentos que possam ter permanecido aderidos às partículas, seguido de secagem em estufa por 24 h a 100°C.

Após esse processo foi realizada a elaboração da composição granulométrica das areias de forma que atendesse aos requisitos da NBR 7211 (2022). Os percentuais retidos em cada peneira foram definidos em função da granulometria típica de uma areia média utilizada no município de Campos dos Goytacazes-RJ e os limites da zona ótima da NBR 7211 (2022).

Com o objetivo de mitigar os impactos ambientais decorrentes da geração de efluentes durante a separação densimétrica e a lavagem das partículas, torna-se necessária a adoção de uma estratégia de descarte sustentável. Neste estudo, buscou-se propor alternativas viáveis para a destinação da fração densa da cinza, geralmente removida no processo de aproveitamento da cinza como adição pozolânica (Cordeiro, Linhares e Lemos 2022). Durante a separação densimétrica, a polpa rica em partículas leves deve ser coletada e, para a recuperação da fração sólida, podem ser empregados procedimentos como filtração ou decantação e

secagem em estufa (Cordeiro, Linhares e Lemos 2022). Em escala industrial, o processo de separação densimétrica poderia ser realizado na própria usina sucroalcooleira, empregando a água em sistema fechado, o que permitiria seu reaproveitamento contínuo e reduziria o lançamento de efluentes no meio ambiente.

3.2. Materiais complementares

3.2.1. Agregado miúdo natural

Uma areia proveniente do Rio Paraíba do Sul em Campos dos Goytacazes-RJ foi utilizada para a comparação com a A-CBC. Essa areia foi classificada em laboratório para a mesma granulometria da A-CBC e foi utilizada na confecção das argamassas, após a sua completa caracterização. A areia natural de mesma granulometria da A-CBC foi denominada A-NAT (Figura 16).



Figura 16: Areia natural proveniente do Rio Paraíba do Sul, em Campos dos Goytacazes-RJ.

3.2.2. Cimento Portland, água e superplastificante

O cimento utilizado neste trabalho foi o CPP Classe G, cujas especificações estão descritas na NBR 9831 (2020). Esse cimento foi utilizado por não conter adição mineral suplementar, o que possibilita isolar o efeito de possível atividade pozolânica da parcela densa da cinza. A Tabela 9 mostra a composição química e as principais propriedades físicas do cimento, incluindo os tamanhos característicos D_{10} , D_{50} e D_{90} . A composição de óxidos e perda ao fogo foram obtidas junto ao fabricante do cimento, Lafarge-Holcim. A massa específica foi obtida pelo método de *Le Chatelier*, conforme NBR 16605 (2017).

Tabela 9: Composição química e principais características físicas do CPP Classe G.

Composto	Valor
SiO ₂ (%)	21,9
Al ₂ O ₃ (%)	3,60
Fe ₂ O ₃ (%)	4,50
CaO (%)	64,3
K ₂ O (%)	0,30
SO ₃ (%)	2,70
Na ₂ O (%)	0,10
MgO (%)	1,50
Perda ao fogo (%)	1,10
Massa específica (g/cm³)	3,17
<i>D</i> ₁₀ (μm)	3,70
<i>D</i> ₅₀ (μm)	18,5
<i>D</i> ₉₀ (μm)	47,2

A Figura 17 mostra a distribuição granulométrica do cimento, que foi obtida através de ensaio de granulometria a laser, utilizando o equipamento Mastersizer 3000 (Malvern), com unidade de dispersão HydroLV (Figura 18). O ensaio foi realizado com amostra dispersa em álcool por 5 min na velocidade de 2200 rpm durante 15 min e 1 min de ultrassom a 50% de intensidade.

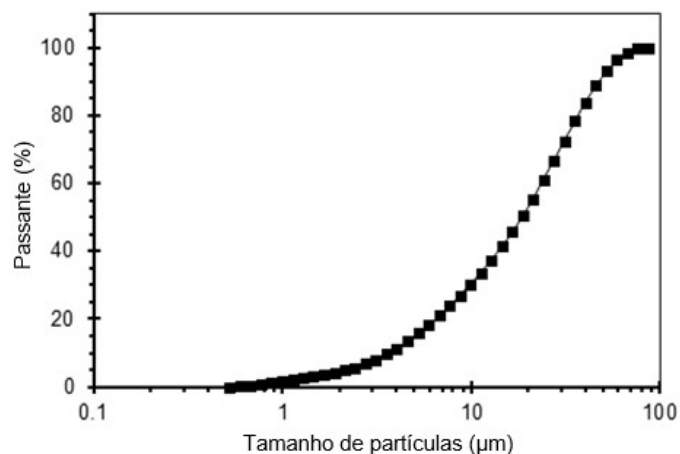


Figura 17: Granulometria do cimento utilizado na pesquisa.



Figura 18: Mastersizer 3000 (Malvern).

A água utilizada neste trabalho foi proveniente da concessionária Águas do Paraíba, Campos dos Goytacazes-RJ. Ela foi filtrada e deionizada antes de sua utilização na confecção das argamassas. Em todas as argamassas foi utilizado um aditivo superplastificante de éter carboxílico modificado (Glenium 51, Basf) com um teor de sólidos de 28,9% (em massa) e massa específica de $1,12 \text{ g/cm}^3$.

3.3. Métodos

3.3.1. Caracterização dos agregados miúdos

Os agregados A-CBC e A-NAT foram caracterizados por meio dos ensaios de absorção de água, massa específica, compactidade, forma, composição mineralógica, composição química e perda ao fogo, cujas metodologias estão descritas a seguir.

3.3.1.1. Absorção de água

Quanto à absorção de água pelo agregado, é importante destacar que esta é uma avaliação crucial no contexto da produção de argamassas e concretos. Isso porque a absorção de água pelos agregados influencia diretamente na quantidade de água efetiva disponível para hidratação do cimento, impactando na resistência final do sistema cimentício (Ding, She e Yao, 2023).

A absorção de água dos agregados foi obtida conforme a NBR 16916 (2021). As amostras de A-CBC e A-NAT foram espalhadas em bandejas e cobertas com água por 24 h. Após isso, as amostras foram retiradas da água e estendidas sobre uma superfície limpa e seca de granito conforme a Figura 19a (A-CBC) e Figura 19d (A-NAT). As amostras foram constantemente revolvidas para garantir uma secagem uniforme dos grãos. Ao longo do processo de secagem, foram realizados diversos testes, nos quais as amostras foram inseridas em um molde tronco-cônico e receberam 25 golpes com a haste de compactação conforme a Figura 19b (A-CBC) e Figura 19e (A-NAT). Esse procedimento teve como objetivo verificar a consistência das amostras, que deveria atingir a condição de saturada superfície seca. Essa condição foi atingida quando, ao remover o molde, o agregado não conservou a forma e desmoronou conforme a Figura 19c (A-CBC) e Figura 19f (A-NAT). Neste momento, foram coletadas duas amostras de 500 g de cada agregado, que foram então colocadas para secar na estufa a 100°C até que atingissem a constância de massa (48 h). Em seguida, as amostras foram pesadas e, a partir dessas pesagens, foram determinadas as massas secas para a avaliação da absorção de água. A absorção de água dos agregados foi calculada pela Equação 1.

$$Abs = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

Abs: absorção de água, em %;

m_s: massa da amostra seca em estufa a 105 ± 5°C, em g;

m_{sat}: massa da amostra na condição saturada superfície seca, em g;

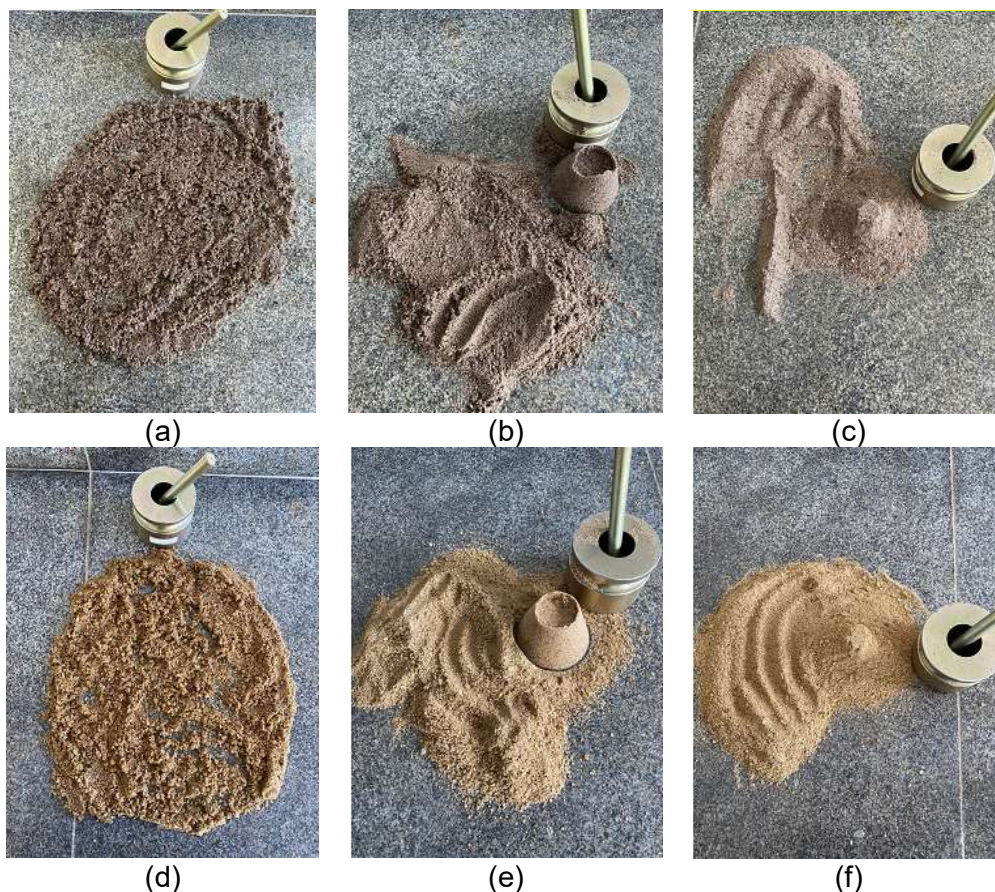


Figura 19: A-CBC úmida espalhada sobre a bancada (a), verificação da umidade da A-CBC pelo teste do molde tronco-cônico (b), A-CBC na condição saturada superfície seca (c), A-NAT úmida espalhada sobre a bancada (d), verificação da umidade da A-NAT pelo teste do molde tronco-cônico (e), e A-NAT na condição saturada superfície seca (f).

3.3.1.2. Massa específica

Para a determinação da massa específica das duas areias, utilizou-se o método do picnômetro, conforme os procedimentos descritos pelo DNER-ME 093/94. Desta forma, as amostras foram secas em estufa a 100°C até atingirem a constância de massa. Em seguida, a pesagem de 10 g de cada areia foi realizada em uma balança analítica. Com o auxílio de um funil de vidro, cada areia foi inserida em um picnômetro com capacidade de 100 mL. Neste ponto, os picnômetros foram pesados antes e depois da inserção das amostras. Foi adicionada água destilada até a metade dos picnômetros. Os recipientes foram aquecidos em banho-maria durante 15 min para expulsar todo ar existente. Durante esse processo, os recipientes foram agitados para evitar superaquecimento. Após o término do período de aquecimento, os recipientes foram resfriados em um banho de água a 25°C, e o volume vazio restante dos

picnômetros foi completado com água deionizada. Os recipientes foram novamente pesados. Por fim, os recipientes foram lavados e posteriormente cheios apenas com água destilada, e as massas foram obtidas. A Figura 20 apresenta algumas etapas do ensaio.

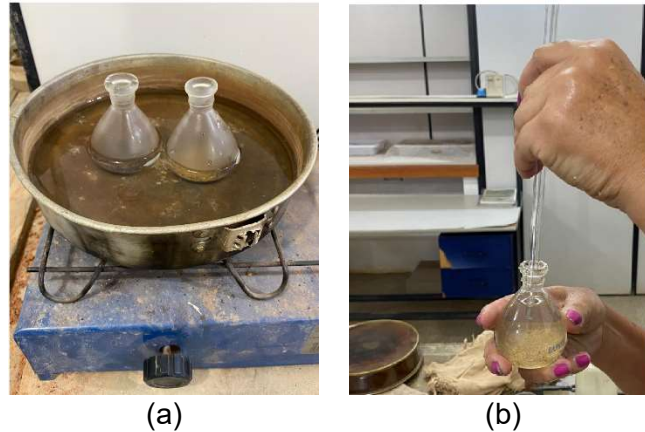


Figura 20: Aquecimento das amostras em banho-maria (a), e verificação da temperatura (b).

Após a obtenção das massas foi possível determinar a massa específica das areias utilizando a Equação 2. O ensaio foi realizado em duplicata para ambas as areias.

$$\delta = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo:

δ : massa específica, a 25°C, em g/cm³;

m_1 : massa do picnômetro vazio, em g;

m_2 : massa do picnômetro e amostra, em g;

m_3 : massa do picnômetro, amostra e água, em g;

m_4 : massa do picnômetro preenchido com água, em g.

3.3.1.3. Compacidade experimental

O ensaio de compacidade experimental foi realizado em duplicata nas duas areias utilizando um método proposto por De Larrard (1999), que associa a compressão de uma amostra de agregado com a vibração em mesa vibratória. Neste ensaio, adaptado por Silva (2004), um cilindro metálico de 320 mm de altura e 160 mm de diâmetro foi preenchido com 3,0 kg de material (A-CBC ou A-NAT). O preenchimento foi feito com simples lançamento do agregado, que teve sua superfície regularizada manualmente (Figura 21a). O ensaio foi realizado com aplicação de uma pressão de 10 kPa por um pilão posicionado dentro do cilindro, seguida de vibração com frequência de 68 Hz por 3 min em uma mesa vibratória (Figura 21b). Após esse tempo verificou-se a altura final da camada de material compactado (Figura 21c). A compacidade, ao final do ensaio, foi calculada pela Equação 3. O ensaio foi realizado no Laboratório de Estruturas e Materiais do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.

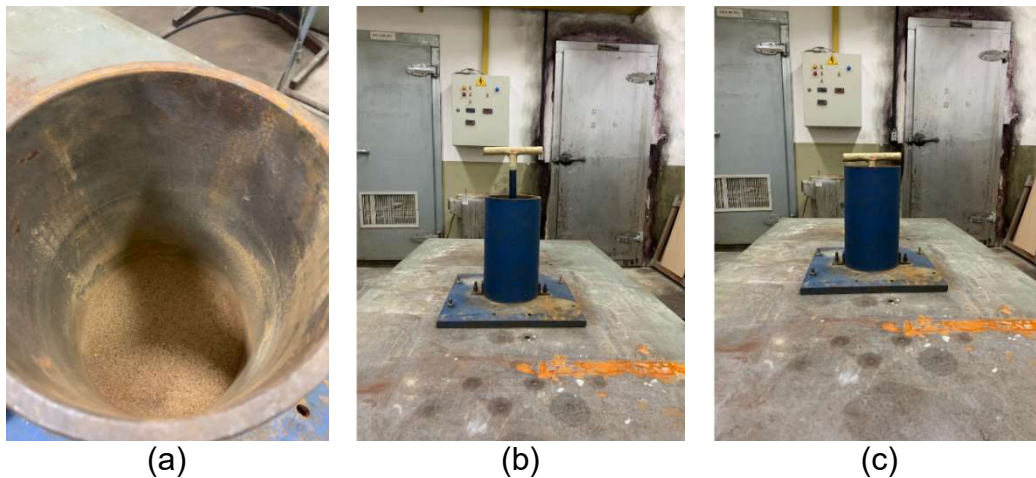


Figura 21: Preenchimento do cilindro com areia natural (a), início da vibração (b), e fim da vibração – material compactado (c).

$$C = \frac{m}{A_c h_c \delta} \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo:

C: compacidade;

m : massa de material empregada, em g;

A_c : área da seção transversal interna do cilindro, em cm^2 ;

h_c : altura final do material compactado, em cm;

δ : massa específica do material ensaiado, em g/cm^3 .

3.3.1.4. Forma

A forma das partículas foi representada, neste trabalho, pelo grau de esfericidade e de arredondamento, sendo o primeiro um indicativo do quanto a partícula se assemelha à forma esférica, enquanto o segundo tem relação com o grau de curvatura dos cantos da partícula. Para a análise dos agregados miúdos quanto à forma, foi realizado o procedimento sugerido por Goldoni *et al.* (2015).

Para este ensaio foram selecionadas as frações de 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm de cada areia. As imagens das partículas nos tamanhos de 4,75 mm e 2,36 mm foram obtidas utilizando uma câmera digital com 12 MP e resolução de 4000 x 3000 *pixels*. As imagens das demais partículas foram obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura. Neste caso, as partículas das areias foram selecionadas aleatoriamente e posicionadas sobre uma fita adesiva de carbono previamente fixada ao porta amostra. Na sequência, os porta amostras foram inseridos no equipamento (Figura 22a) para realização do revestimento metálico com paládio (Figura 22b). O equipamento utilizado foi o SCD 050 BAL-TEC (Figura 22c) e, após o revestimento metálico, as amostras foram inseridas no microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVA 40 (Figura 23a), ambos do Laboratório de Biologia Celular e Tecidual (LBCT) – UENF. A Figura 23b apresenta a vista externa do equipamento. A detecção das imagens foi feita a partir de elétrons secundários.

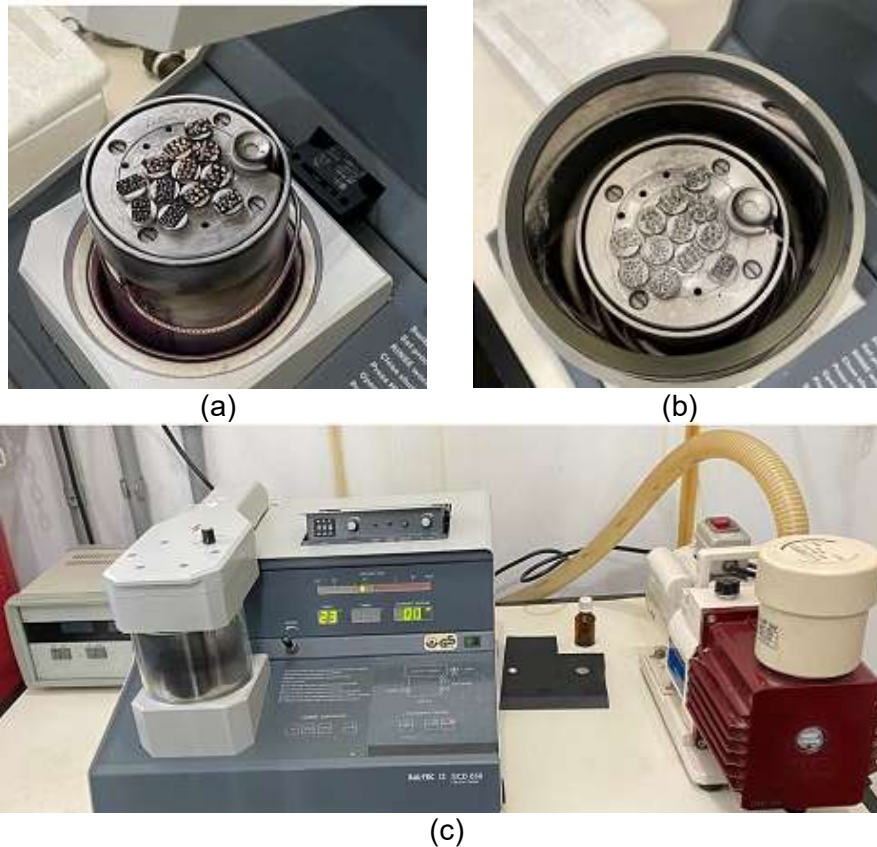


Figura 22: Amostras antes do cobrimento metálico (a), amostras após cobrimento metálico (b), e equipamento SCD 050 BAL-TEC (c).

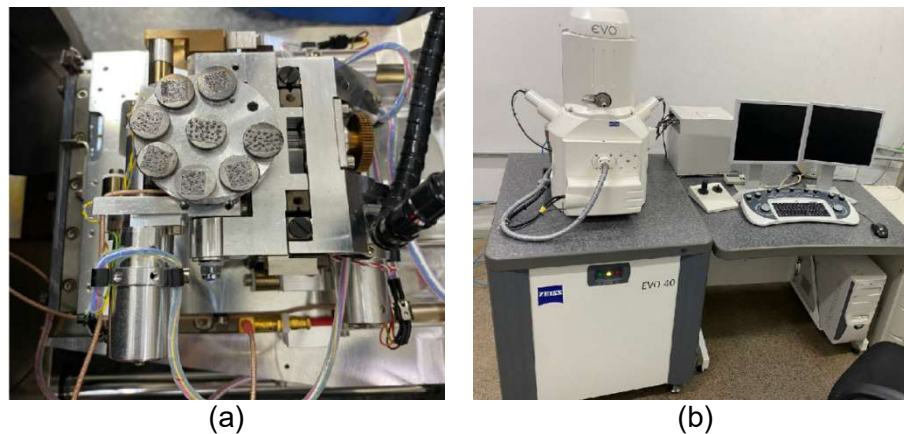


Figura 23: Amostras inseridas no equipamento (a), e vista externa do microscópio eletrônico de varredura - Zeiss EVA 40 (b).

Com base em Goldoni *et al.* (2015), 50 partículas individuais de cada areia, para cada fração mencionada anteriormente, foram selecionadas. Após a obtenção das imagens, a área de projeção das partículas e o diâmetro de Feret foram determinados com o auxílio do programa Image J. O programa permite delimitar o

contorno das partículas (Figura 24), fornecendo os parâmetros necessários para a aplicação das fórmulas de esfericidade (E) e de arredondamento (A), conforme especificado nas Equações (4) e (5), respectivamente.

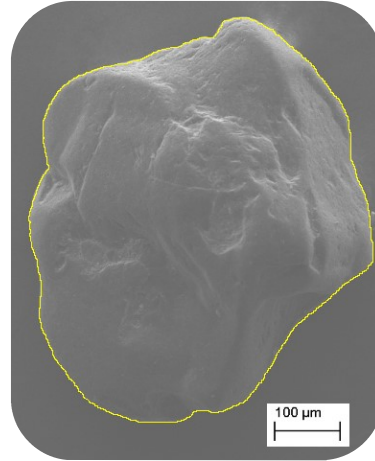


Figura 24: Delimitação do contorno de uma partícula de A-CBC por meio do programa Image J.

A esfericidade foi calculada conforme a Equação 4. Por sua vez, o arredondamento foi calculado de acordo com a Equação 5.

$$E = \frac{\sqrt{\frac{4A_p}{\pi}}}{D_F} \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo:

E : esfericidade;

A_p : área da projeção da partícula medida diretamente na imagem bidimensional da projeção da partícula, em mm^2 ;

D_F : diâmetro de Feret, em mm.

$$A_r = \frac{4A_p}{\pi D_F^2} \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo:

A_r : arredondamento;

A_p : área da projeção da partícula medida diretamente na imagem bidimensional da projeção da partícula, em mm²;

D_F : diâmetro de Feret, em mm.

3.3.1.5. Composição química e mineralógica

A composição química das areias foi obtida pelo método semi-quantitativo com emprego de espectroscopia de fluorescência de raios X em equipamento EDX-720 da Shimadzu, do LECIV. As amostras foram secas em estufa a 100 ± 5 °C por 24 horas e, em seguida, moídas com auxílio de almofariz de ágata. A Figura 25 mostra uma imagem do equipamento.



Figura 25: Equipamento EDX-720 da Shimadzu.

Para obtenção da composição mineralógica, as amostras também foram moídas com o auxílio de um almofariz de ágata até obtenção de um pó fino. Foi realizada a técnica de difratometria de raios X com o objetivo de analisar as fases cristalinas das amostras. Os dados de difração de raios X foram obtidos em um equipamento Rigaku Miniflex 600, com radiação monocromática Cu-K α ($\lambda = 0,1542$ nm) e detector Dtex Ultra (Figura 26). Os parâmetros do gerador foram de 40 kV e 15 mA. A faixa de varredura em 2θ foi de 10° a 70° , com passo de $0,03^\circ/s$ e velocidade de varredura de $5^\circ/min$.



Figura 26: Difratorômetro de raios X Miniflex 600 Rigaku.

3.3.2. Dosagem, produção e caracterização das argamassas

Para a avaliação da eficiência da A-CBC como agregado miúdo foram confeccionadas argamassas para ensaios de resistência à compressão, absorção por imersão total de água, absorção de água por capilaridade e durabilidade frente ao ataque por ácido sulfúrico. Inicialmente, uma argamassa de referência foi dosada para uma resistência à compressão aos 28 dias em torno de 30 MPa e uma consistência, medida no ensaio de espalhamento em mesa (NBR 7215, 2019), de 240 ± 10 mm. Essa argamassa, denominada A-Ref, foi confeccionada com 100% de A-NAT e relações água-cimento e areia-cimento iguais a 0,48 e 3,0, respectivamente. O teor de superplastificante utilizado nessa mistura foi de 0,03% para o alcance da consistência desejada.

Na sequência, seis misturas foram dosadas com a substituição de A-NAT por A-CBC nos teores de 20, 35, 50, 65, 80 e 100% em massa. Embora pesquisas

anteriores indicassem que 10% seria a porcentagem mais viável, optou-se por iniciar em 20% para garantir que os efeitos da substituição fossem mais perceptíveis, além de permitir uma progressão equilibrada dos teores para análise comparativa. Foi possível manter o mesmo teor de superplastificante utilizado na mistura de referência para todas as demais misturas, mantendo-as na mesma faixa de consistência. A Tabela 10 apresenta as dosagens utilizadas, em kg/m³, o teor de superplastificante usado nas argamassas e a consistência das misturas. A nomenclatura de cada mistura aparece na primeira coluna. Neste caso, as argamassas com areia da cinza foram denominadas como A-A-CBCx, onde x representa o teor de A-CBC utilizado na mistura.

Tabela 10: Dosagem e valores de consistência das argamassas.

Mistura	Cimento (kg/m³)	A-NAT (kg/m³)	A-CBC (kg/m³)	Água (kg/m³)	SP* (%)**	Consistência (mm)
A-Ref	508,8	1526,3	-	243,8	0,03	245
A-A-CBC20	509,2	1222,2	305,5	244,1	0,03	235
A-A-CBC35	509,6	993,7	535,0	244,2	0,03	240
A-A-CBC50	509,9	764,9	995,0	244,4	0,03	245
A-A-CBC65	510,2	535,8	764,9	244,5	0,03	240
A-A-CBC85	510,6	306,4	1225,4	244,7	0,03	245
A-A-CBC100	511,0	-	1533,1	244,9	0,03	250

* SP: superplastificante. ** Porcentagem de superplastificante em relação à massa de cimento.

As argamassas foram preparadas de acordo com a NBR 7215 (2019) com o auxílio de um misturador mecânico, no qual toda a água da mistura e o aditivo superplastificante foram adicionados à cuba. Em seguida, o cimento foi adicionado e a primeira fase da mistura foi realizada com o misturador na velocidade baixa por 30 s. Após esse tempo, o agregado miúdo foi adicionado gradualmente durante 30 s. Após a conclusão da colocação da areia, a velocidade foi ajustada para alta, e os materiais continuaram a ser misturados por mais 30 s. Em seguida, o misturador foi desligado por 1 min, e, nos primeiros 30 s, procedeu-se à raspagem do material aderido na lateral da cuba. Após repouso, o misturador foi ligado novamente na velocidade alta, e a argamassa foi misturada por mais 1 min. A Figura 27 mostra o misturador mecânico utilizado para confecção das argamassas.



Figura 27: Misturador mecânico para argamassa.

Os ensaios de espalhamento em mesa de consistência, conforme a NBR 7215 (2019), foram realizados após o final da mistura e imediatamente antes da moldagem dos corpos de prova para os ensaios definidos nesta pesquisa. A Figura 28 mostra a mesa de consistência utilizada no ensaio (Figura 28a), a medição do diâmetro de espalhamento de uma das argamassas (Figura 28b), e a extremidade da argamassa ao final do ensaio, que possibilita observar ausência de segregação (Figura 28c). Não houve sinais de segregação em nenhuma das misturas confeccionadas.

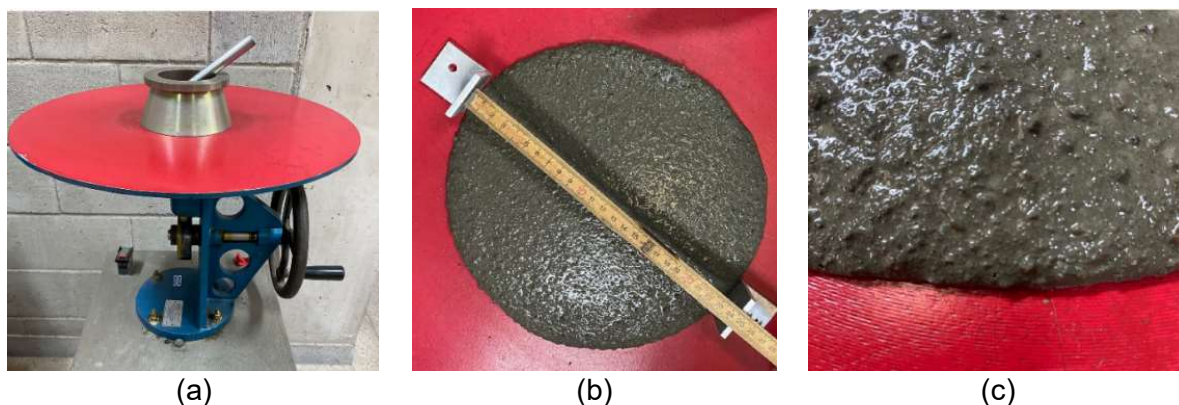


Figura 28: Mesa de consistência de argamassa (a) e medição do diâmetro de espalhamento (b). Foto da extremidade da argamassa ao final do ensaio (c).

3.3.2.1. Ensaio de resistência à compressão

Todas as argamassas foram caracterizadas em ensaios de resistência à compressão após 7, 28 e 120 dias de cura. Para tal, moldes cúbicos com arestas de 50 mm foram utilizados e a moldagem foi realizada de acordo com as diretrizes da

ASTM-C109/109M (2021). Os cubos foram moldados em duas camadas, sendo a primeira camada adensada em mesa vibratória por 20 s e a segunda camada por 40 s. Após a conclusão do adensamento, os moldes com os corpos de prova foram colocados em câmara úmida pelo período de 24 horas, e posteriormente foram desmoldados. A Figura 29 mostra uma imagem dos corpos de prova momentos antes de serem desmoldados.



Figura 29: Corpos de prova após 24 horas de cura.

Os corpos de prova desmoldados foram mantidos em cura submersa em água saturada de cal (Figura 30) até as idades de ensaio. Três corpos de prova foram moldados para cada mistura. Antes dos ensaios, as dimensões das arestas foram medidas com um paquímetro e o topo e a base dos corpos de prova foram lixados manualmente com o objetivo de assegurar a planicidade e o paralelismo entre eles (Figura 31).



Figura 30: Corpos de prova submersos em água saturada de cal.



Figura 31: Preparo do corpo de prova antes do ensaio de resistência à compressão.

Os ensaios de resistência foram realizados em uma máquina universal de ensaios mecânicos servo-controlada Shimadzu UH-F500kNI (LECIV/UENF), com velocidade de carregamento de 0,5 mm/min (Figura 32).

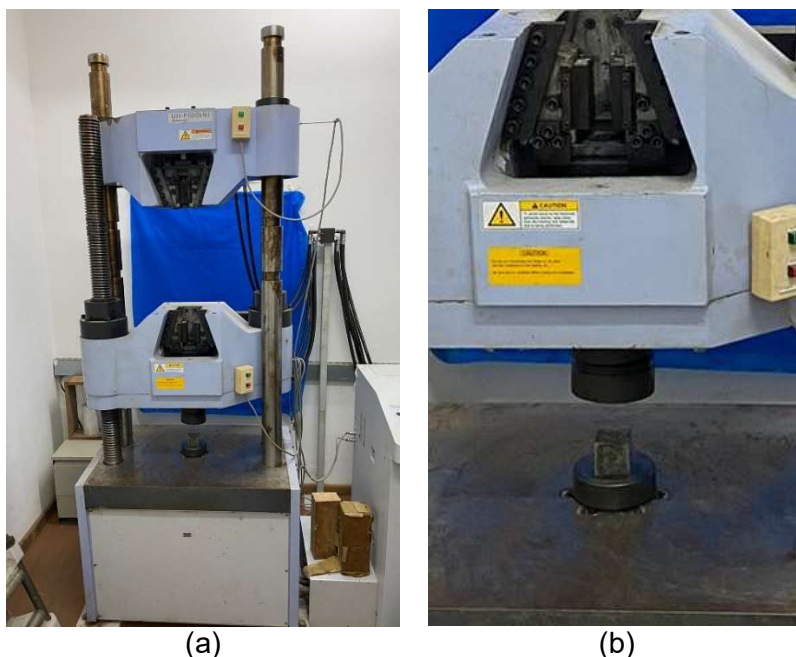


Figura 32: Máquina universal de ensaios mecânicos Shimadzu UH-F500kNI (a), e destaque do corpo de prova posicionado para a ruptura (b).

3.3.2.2. Absorção por imersão total e por capilaridade

Para as verificações das propriedades físicas e da durabilidade, foram selecionadas quatro argamassas (A-Ref, A-A-CBC20, A-A-CBC35 e A-A-CBC50), dando continuidade à pesquisa por meio de ensaios de absorção de água por imersão

total e por capilaridade, além de ensaios de durabilidade frente ao ataque por ácido sulfúrico. Devido à limitação de tempo para a execução experimental, não foi possível aplicar estes ensaios a todas as proporções de substituição, sendo, portanto escolhidas apenas as formulações com até 50% de substituição para as análises citadas.

Para o ensaio de absorção por imersão total, foram moldados três corpos de prova cúbicos de cada mistura, utilizando moldes com arestas de 50 mm e seguindo os mesmos procedimentos aplicados aos corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão, conforme descrito anteriormente. O ensaio de absorção por imersão total foi realizado em conformidade com as diretrizes da NBR 9778 (2009), exceto pela temperatura utilizada na secagem dos corpos de prova, que foi mantida em $60 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingir constância de massa (7 dias). Após 120 dias de cura por submersão em água saturada com cal, a massa dos corpos de prova saturados submersos foi obtida com o auxílio de uma balança hidrostática, conforme ilustrado na Figura 33. Posteriormente, procedeu-se a determinação da massa saturada com a superfície seca dos corpos de prova. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa, a uma temperatura de $60 \pm 2^\circ\text{C}$, até atingirem constância de massa (5 dias), momento em que foi determinada a massa seca. Após a determinação das massas, os parâmetros absorção por imersão total ($Abst_t$), índice de vazios (I_v) e massa específica no estado endurecido (ρ_r) foram obtidos conforme as Equações 6, 7 e 8, respectivamente.



Figura 33: Determinação da massa saturada imersa de corpos de prova de argamassa.

$$Abs_t = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (\text{Equação 7})$$

$$\delta_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (\text{Equação 8})$$

Sendo:

Abs_t : absorção por imersão total, em %;

m_{sat} : massa do corpo de prova saturado com a superfície seca, em g;

m_s : massa do corpo de prova seco, em g;

I_v : índice de vazios, em (%);

m_i : massa do corpo de prova imerso, em g;

δ : massa específica, em g/cm³.

Para os ensaios de absorção por capilaridade, foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para cada mistura, conforme adaptação do procedimento descrito na NBR 7215 (2019). A adaptação consistiu na colocação da argamassa em três camadas de alturas aproximadamente iguais, em vez das quatro recomendadas, sendo cada camada adensada em mesa vibratória por 40 s. Após o completo adensamento, os corpos de prova foram encaminhados para a câmara úmida e, após 24 h, os corpos de prova foram submersos em um tanque de cura com água saturada de cal, onde permaneceram até o momento do ensaio.

O ensaio de capilaridade, que foi realizado de acordo com a NBR 9779 (2012), seguiu a mesma metodologia de secagem dos corpos de prova empregada no ensaio de absorção por imersão total. As amostras com 120 dias de cura foram secas em estufa e, em seguida, duas camadas de verniz epóxi foram aplicadas nas faces laterais das amostras. Esse procedimento foi realizado para garantir o fluxo exclusivamente vertical e, principalmente, evitar a evaporação da água durante o ensaio. Após a secagem do verniz ao ar livre, as amostras foram novamente secas em estufa até atingirem constância de massa, momento em que foi determinada a massa seca. Posteriormente, as amostras foram posicionadas no recipiente de ensaio sobre uma tela plástica, que impediu o contato direto da base das amostras com o fundo do recipiente. Em seguida, o recipiente foi preenchido com água até alcançar o nível de 5 ± 1 mm acima da face inferior das amostras (Figura 34). Medidas de massa foram realizadas em diferentes intervalos de tempo entre 1 min após o início do ensaio e 22 dias, com maior frequência nas primeiras horas do ensaio, a fim de capturar com mais precisão a fase inicial do processo de absorção. Os tempos utilizados foram: 1, 5, 10, 20 e 30 min; 1 h, 1 h 30 min, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 6 h, 8 h, 10 h, 12 h, 24 h, 33 h, 36 h, 60 h, 84 h, 107 h, 131 h, 156 h, 180 h, 203 h, 227 h, 275 h, 323 h, 395 h, 467 h e 539 h. A absorção por capilaridade foi calculada pela *Equação 9*.

$$Abs_c = \frac{m_{Fa} - m_s}{A} \quad (\text{Equação 9})$$

Sendo:

Abs_c : absorção de água por capilaridade, em g/cm²;

m_{Fa} : massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, em g;

m_s : massa do corpo-de-prova seco, assim que este atingir a temperatura de 23 ± 1 °C, em g;

A: área da seção transversal, em cm².

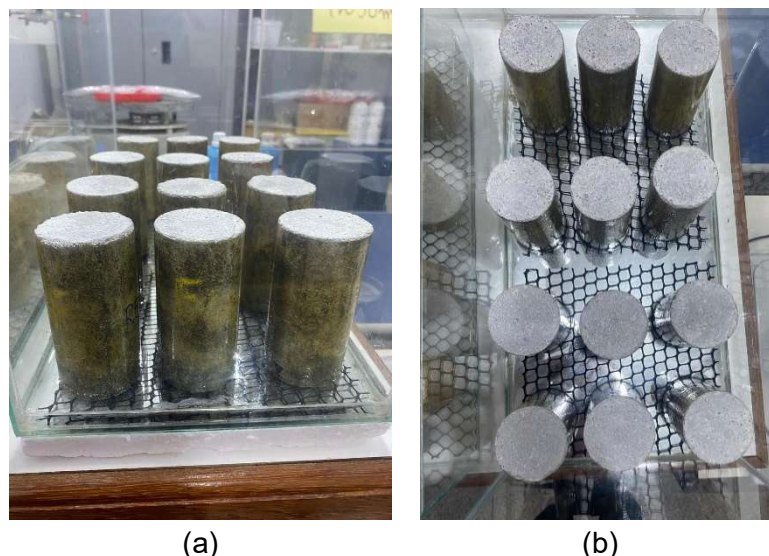


Figura 34: Ensaio de absorção por capilaridade em corpos de prova cilíndricos, vista frontal (a) e vista superior (b).

A absorvidade foi calculada de acordo com a ASTM-C1585 (2020). Esse indicador representa a velocidade com que a água é absorvida por sucção capilar, especialmente nos primeiros instantes de contato com o material. Segundo a norma, o cálculo é realizado com base na análise da quantidade de água absorvida pela argamassa (no caso específico deste trabalho) ao longo do tempo, considerando a relação entre o volume absorvido e a raiz quadrada do tempo de exposição. A determinação da absorvidade permite identificar características importantes da microestrutura, como o grau de conectividade entre os poros, a presença de microporos abertos na superfície e até mesmo a maior vulnerabilidade à penetração de agentes agressivos. Em geral, valores mais elevados de absorvidade indicam uma rede porosa mais interligada, o que pode comprometer a durabilidade do compósito em ambientes úmidos ou agressivos.

Para determinar a absorvidade inicial, a absorção acumulada (mm^3/mm^2) foi registrada nas primeiras 6h de ensaio e plotada em função da raiz quadrada do tempo em segundos. A partir do ajuste linear dos pontos iniciais, obteve-se a absorvidade inicial por meio do coeficiente angular da reta. A absorvidade secundária foi calculada da mesma forma, utilizando os dados após 24h. A Figura 35 apresenta um gráfico ilustrativo típico de absorvidade, com as retas representando as fases inicial e

secundária da absorção, utilizadas para a determinação dos coeficientes angulares. O cálculo da absorvidade foi realizado pela Equação 10.

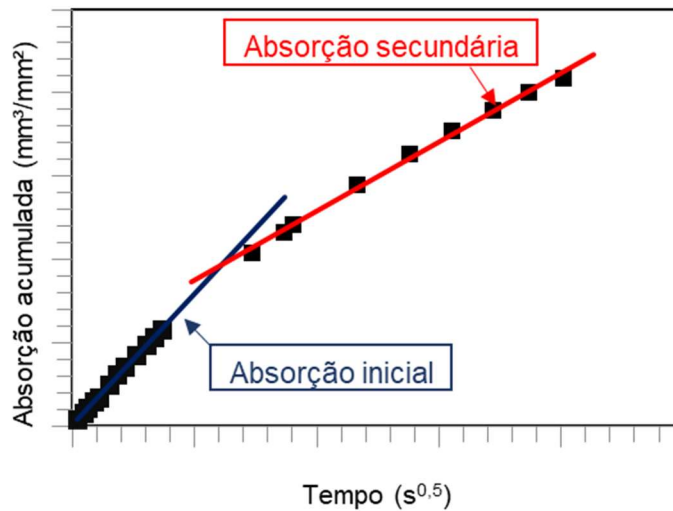


Figura 35: Gráfico ilustrativo de absorvidade.

$$Abs_a = \frac{\Delta m_t}{A \times \delta} \quad (\text{Equação 10})$$

Sendo:

Abs_a : absorção acumulada mm^3/mm^2 ;

Δm_t : variação de massa do corpo de prova, no tempo t, em g;

A: área exposta do corpo de prova, em mm^2 ;

δ : massa específica da água, em g/mm^3 .

3.3.2.3. Ataque por ácido sulfúrico

A resistência das argamassas ao ataque por ácido sulfúrico foi usada como parâmetro para a análise da durabilidade. O ensaio foi realizado com base nos parâmetros de Arif, Clark e Lake (2016) e Paiva (2016). Para este ensaio, seis corpos de prova cúbicos (com arestas de 50 mm) e três corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura das argamassas A-Ref, A-A-

CBC20, A-A-CBC35 e A-A-CBC50 foram moldados conforme descrito anteriormente (item 3.3.2). Esses corpos de prova, após cura em água saturada de cal por 28 dias, foram expostos ao ataque em solução com ácido sulfúrico (1,5%) por 92 dias.

Os corpos de prova cúbicos e cilíndricos de cada argamassa foram acondicionados em uma caixa plástica com a solução ácida na razão volumétrica de 4 entre a solução e os corpos de prova. A Figura 36 mostra o início do ataque com os corpos de prova das argamassas A-A-CBC20 submersos na solução ácida.



Figura 36: Corpos de prova submersos em solução.

O pH inicial da solução foi de aproximadamente 1,0 e foi limitado a 2,0, com monitoramento semanal durante o período de exposição. Aos 35 dias, tornou-se necessário substituir a solução de todas as misturas devido à elevação do pH. Ao longo dos 92 dias de exposição, a massa dos seis corpos de prova cúbicos foi lida duas vezes por semana. Neste ponto, vale destacar que antes da leitura das massas, os corpos de prova foram lavados em água corrente filtrada, visando à remoção de material desagregado na superfície. Após a conclusão do ataque, o material sedimentado no fundo do recipiente foi cuidadosamente coletado e, em seguida, analisado por DRX. O objetivo foi, primordialmente, validar a formação de sulfato de cálcio (gipsita), composto esperado da reação entre a solução ácida e o hidróxido de cálcio presente nas matrizes cimentícias. Foram empregados os mesmos parâmetros definidos para a caracterização das areias.

A variação de massa foi obtida através da Equação 11.

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100 \quad (\text{Equação 11})$$

Sendo:

Δm : variação da massa é a comparação entre a massa do corpo de prova antes da imersão na solução ácida (aos 28 dias) e após a imersão, em %;

m_0 : é a massa do corpo de prova antes da imersão em ácido sulfúrico aos 28 dias, em g.

m_t : é a massa do corpo de prova imerso em ácido sulfúrico em uma idade t, em g;

Após conclusão do ataque ácido, o ensaio de absorção por imersão total foi realizado nos corpos de prova cúbicos, seguindo os mesmos procedimentos metodológicos utilizados para os corpos de prova curados em água. Visando aumentar a quantidade de amostras disponíveis para os ensaios de absorção, os corpos de prova foram cuidadosamente seccionados ao meio (Figura 37), garantindo a integridade da superfície e respeitando as dimensões mínimas exigidas pelo método de ensaio. O ensaio foi realizado com 4 amostras de cada mistura, obtidas após o seccionamento de dois corpos de prova de cada mistura.



Figura 37: Corpo de prova cúbico pós ataque, seccionado ao meio para ensaio de absorção por imersão total.

Os corpos de prova cilíndricos foram submetidos ao ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas que sofreram ataque (Figura 38), seguindo os mesmos procedimentos metodológicos aplicados aos corpos de prova curados em

água, com exceção de um lixamento realizado manualmente, com o propósito de nivelar a base. O nivelamento foi realizado para assegurar que a altura da lâmina de água em contato com o corpo de prova permanecesse uniforme ao redor de toda a base.

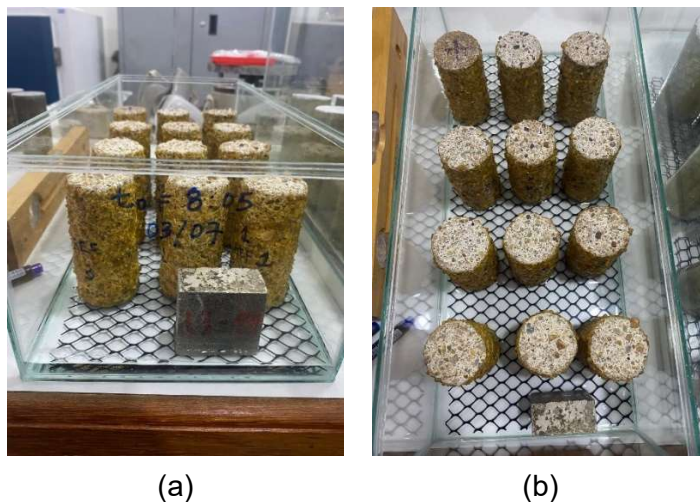


Figura 38: Ensaio de absorção por capilaridade de corpos de prova cilíndricos pós ataque, vista frontal (a) e vista superior (b).

Com o auxílio do programa Image J, foram determinadas as áreas das seções transversais das amostras, o que possibilitou a aferição da absorção por capilaridade utilizando a Equação 6, já citada anteriormente.

Para o ensaio de resistência à compressão, quatro corpos de prova cúbicos de cada mistura ao término de 120 dias (28 dias de cura e 92 dias de exposição ao ataque) foram preparados. Para que o ensaio pudesse ser realizado, foi necessária a aplicação de uma fina camada de gesso tipo IV da marca Herostone nas faces inferior e superior dos corpos de prova, a fim de uniformizá-las. Após a aplicação e secagem do gesso, realizou-se um lixamento manual (Figura 39a) a fim de garantir a planicidade e o paralelismo entre as faces. A Figura 39b mostra 4 corpos de prova prontos para a realização do ensaio de resistência à compressão.

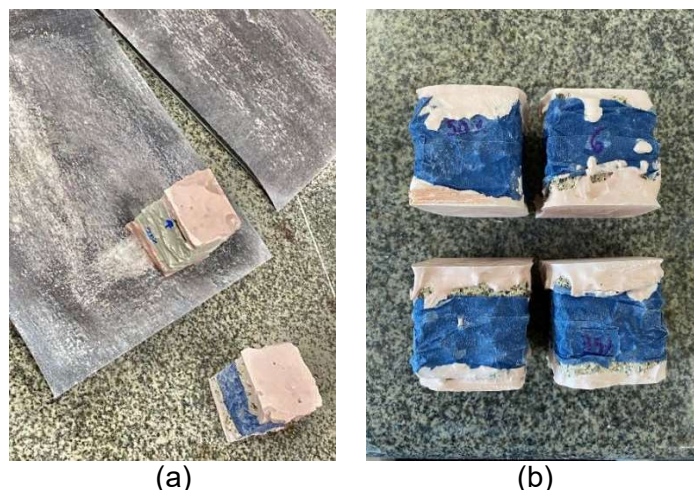


Figura 39: Lixamento das faces de corpos de prova atacados após aplicação de gesso (a) e corpos de prova após lixamento e prontos para ensaio de resistência à compressão (b).

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com o auxílio de uma máquina universal de ensaios mecânicos servo-controlada Shimadzu UHF500kNI (LECIV/UENF), com velocidade de carregamento de 0,5 mm/min (Figura 40).

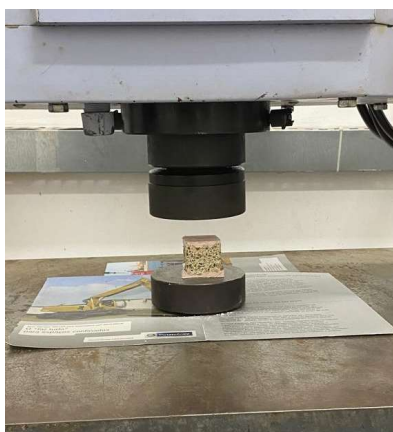


Figura 40: Verificação da resistência à compressão de corpos de prova atacados.

3.4. Análise estatística dos resultados experimentais

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, absorção de água por imersão total, absorção por capilaridade e durabilidade frente ao ataque por ácido sulfúrico foram submetidos à análise estatística por meio da análise de variância (ANOVA), seguida do teste de comparações múltiplas de Duncan (teste de Duncan), adotando-se um nível de significância de 5%. Foi realizada uma análise estatística adicional entre os resultados das misturas não expostas ao ataque por ácido sulfúrico

e aquelas submetidas ao ataque. Para tal, utilizou-se o teste t de Student com correção de Welch, adequado para situações com tamanhos amostrais distintos (por exemplo, três corpos de prova em um grupo e quatro no outro). Como a comparação foi realizada apenas entre dois grupos (formulação x atacada em comparação a formulação x não atacada), o teste t mostrou-se mais apropriado e direto, ao contrário da ANOVA, que é recomendada para análises com três ou mais grupos.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios e análises realizados conforme a metodologia descrita anteriormente. Os dados são discutidos à luz dos objetivos propostos, considerando a literatura científica atual e as hipóteses formuladas no início da pesquisa. Inicialmente, são apresentados os resultados relacionados à caracterização dos materiais, seguidos pelas análises de desempenho nas propriedades das argamassas estudadas (resistência mecânica, absorção de água por imersão total e por capilaridade e ataque ácido).

4.1. Caracterização das areias

4.1.1. Composição granulométrica

A elaboração da granulometria das areias foi realizada com o intuito de atender os requisitos estabelecidos pela NBR 7211 (2022), bem como utilizá-las com granulometrias equivalentes. Na Tabela 11 estão os percentuais em massa de material retido em cada peneira utilizados para a produção do agregado miúdo reciclado a partir da parcela densa da cinza do bagaço, denominado de A-CBC.

Tabela 11: Percentuais em massa de material retido nas peneiras utilizadas na classificação das areias, além do percentual de descarte.

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (%)
4,75	1,7
2,36	10,2
2,00	2,6
1,70	2,6
1,18	8,5
0,85	11,1
0,60	10,2
0,30	25,5
0,15	10,2
0,075	2,6
Descarte	15,0

A curva granulométrica desenvolvida para a produção das areias se enquadrou completamente na zona utilizável estabelecida pela norma e quase integralmente na zona ótima (Figura 41), o que resultou na formação de agregados de elevada qualidade. As areias apresentaram dimensão máxima de 4,75 mm e módulo de finura de 2,83.

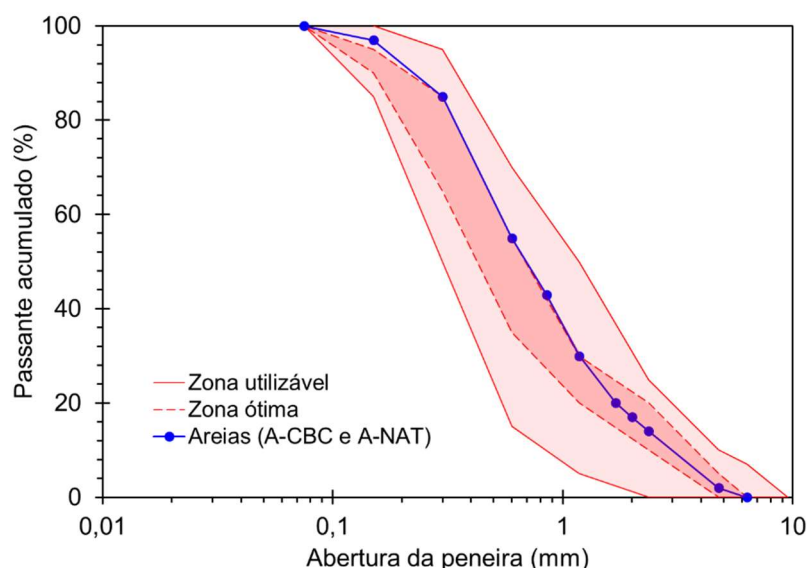


Figura 41: Curva granulométrica das areias (areia da cinza e areia natural).

Conforme mencionado acima, a areia natural foi utilizada na mesma granulometria da A-CBC. De acordo com Neville (2011), a granulometria dos agregados finos, tem influência direta nas propriedades do sistema cimentício, impactando aspectos importantes como a trabalhabilidade, a resistência mecânica e a durabilidade. Além disso, a padronização das granulometrias possibilita uma comparação precisa entre os materiais, eliminando quaisquer interferências resultantes de variações no tamanho das partículas. Isso garante uma análise mais eficiente e objetiva, já que as diferenças de granulometria podem afetar significativamente as propriedades físicas e o desempenho dos materiais em estudo.

O procedimento de equiparação da granulometria da areia natural e da areia proveniente da cinza do bagaço não foi realizado ou não foi descrito de forma clara na maioria das pesquisas avaliadas, o que resultou na produção de argamassas e concretos com agregados de composições granulométricas variadas. Isso fica evidente no estudo realizado por Khawaja *et al.* (2021), que efetuaram as

substituições, gerando uma curva granulométrica distinta para cada porcentagem de substituição aplicada. O mesmo se verifica no estudo realizado por Moretti *et al.* (2016), no qual a curva granulométrica da areia proveniente da cinza não se ajustou à zona utilizável definida pela NBR 7211 (2022). No entanto, após a substituição de 30% da areia natural pela areia da cinza, uma nova composição granulométrica foi obtida, a qual difere da composição da areia natural usada na fabricação do concreto de referência.

4.1.2. Massa específica

Os resultados de massa específica indicaram valores bem próximos para as duas areias, sendo de $2,64 \text{ g/cm}^3$ para A-NAT e $2,61 \text{ g/cm}^3$ para a A-CBC. Essa diferença de apenas 1% entre os valores de massa específica possibilita altas taxas de substituição de areia natural sem o comprometimento da massa específica do sistema cimentício. Esses resultados estão em consonância com dados relatados em outras pesquisas, como Moretti *et al.* (2016), que obtiveram $2,67 \text{ g/cm}^3$ para a areia natural e $2,60 \text{ g/cm}^3$ para a cinza; Muthadhi e Banupriya (2022), com $2,67 \text{ g/cm}^3$ para a areia natural e $2,07 \text{ g/cm}^3$ para a cinza. Observou-se que, nestas pesquisas, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar apresentou massa específica levemente inferior à da areia natural. Em outros estudos, essa diferença foi mais acentuada, como nos trabalhos de Modani e Vyawahare (2013), que relataram $2,64 \text{ g/cm}^3$ para a areia natural e $1,25 \text{ g/cm}^3$ para a cinza. Isso ocorre provavelmente devido a quantidade de cinza leve presente na areia da cinza do bagaço. A cinza leve, geralmente composta por sílica amorfa e carbono não liberado, possui massa específica menor que a parcela de cinza densa, geralmente composta por quartzo.

O procedimento de separação densimétrica garantiu que grande parte de cinza leve fosse removida, predominando a parcela de cinza densa. A massa específica dos materiais é uma propriedade crucial a ser analisada, pois a incorporação da areia de cinza pode reduzir a massa específica do sistema cimentício no estado endurecido, conforme observado por Khawaja *et al.* (2021).

4.1.3. Absorção de água

Outro fator de extrema importância na caracterização de agregados é a absorção de água desses materiais. Ambos apresentaram valores menores de 1%, com a A-CBC apresentando uma porcentagem ligeiramente superior (0,96%), em contraste com apenas 0,56% para A-NAT. A absorção de água do agregado influencia diretamente na relação água/cimento efetiva dos sistemas cimentícios. Jagadesh *et al.* (2019) destacaram que houve um aumento no teor de água para argamassas que possuíam maior quantidade de areia da cinza do bagaço. A parcela de cinza leve presente na areia da cinza possui morfologia porosa, além de características higroscópicas e adsorventes devido à alta superfície específica. A diferença na absorção de água entre a areia natural e a areia proveniente de cinzas pode ser considerável, a depender da quantidade de cinza leve presente na composição da areia de cinza. Não foi o caso dos resultados obtidos nesta pesquisa, pois o tratamento para a remoção da parcela de cinza leve (separação densimétrica) permitiu reduzir essa diferença. Em contrapartida, pesquisas que não realizaram esse tipo de tratamento apresentaram perda de resistência à compressão em porcentagens maiores de substituição, e os autores atribuíram tal diminuição à maior absorção de água da areia da cinza (Muthadhi e Banupriya, 2022; Sua-iam e Makul, 2013 e Modani e Vyawahare, 2013).

Resultados próximos para os dois materiais também foram observados nas pesquisas de Moretti *et al.* (2016), que identificaram 0,74% de absorção para a areia natural e 0,79% para a cinza, e de Muthadhi e Banupriya (2022), com 0,9% para a areia natural e 1,5% para a cinza. Entretanto, Jagadesh *et al.* (2019) relataram uma diferença significativa na absorção de água, com valores de 2,04% para a areia natural e 10,75% para a cinza. De forma ainda mais expressiva, o estudo de Khawaja *et al.* (2021) apresentou os resultados mais críticos, registrando 1,9% de absorção para a areia natural e 16,4% para a areia proveniente da cinza.

4.1.4. Forma das partículas

De modo geral, a preocupação com a geometria das partículas dos agregados é frequentemente restrita à análise da distribuição granulométrica. No entanto, é sabido que a forma das partículas pode exercer grande influência nas propriedades físicas de sistemas cimentícios. A morfologia das partículas está diretamente relacionada à origem da rocha e aos processos envolvidos em sua formação. Conforme Fabro *et al.* (2011), as areias naturais, formadas por atrito, tendem a apresentar grãos mais arredondados devido ao desgaste e à perda de vértices. Por outro lado, os grãos com maior angularidade são geralmente resultantes de processos de britagem.

Em relação aos resultados obtidos neste estudo, foram analisadas trezentas partículas de cada areia, sendo 50 partículas individuais de cada tamanho (4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,6 mm; 0,3 mm; e 0,15 mm). A Figura 42 ilustra, de forma representativa, imagens de partículas de cada fração, selecionadas dentre as 50 obtidas para cada tamanho. As partículas das frações de 4,75 mm e 2,36 mm foram obtidas com câmera de 12 MP, enquanto as demais foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura. A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos após a análise dos dados.

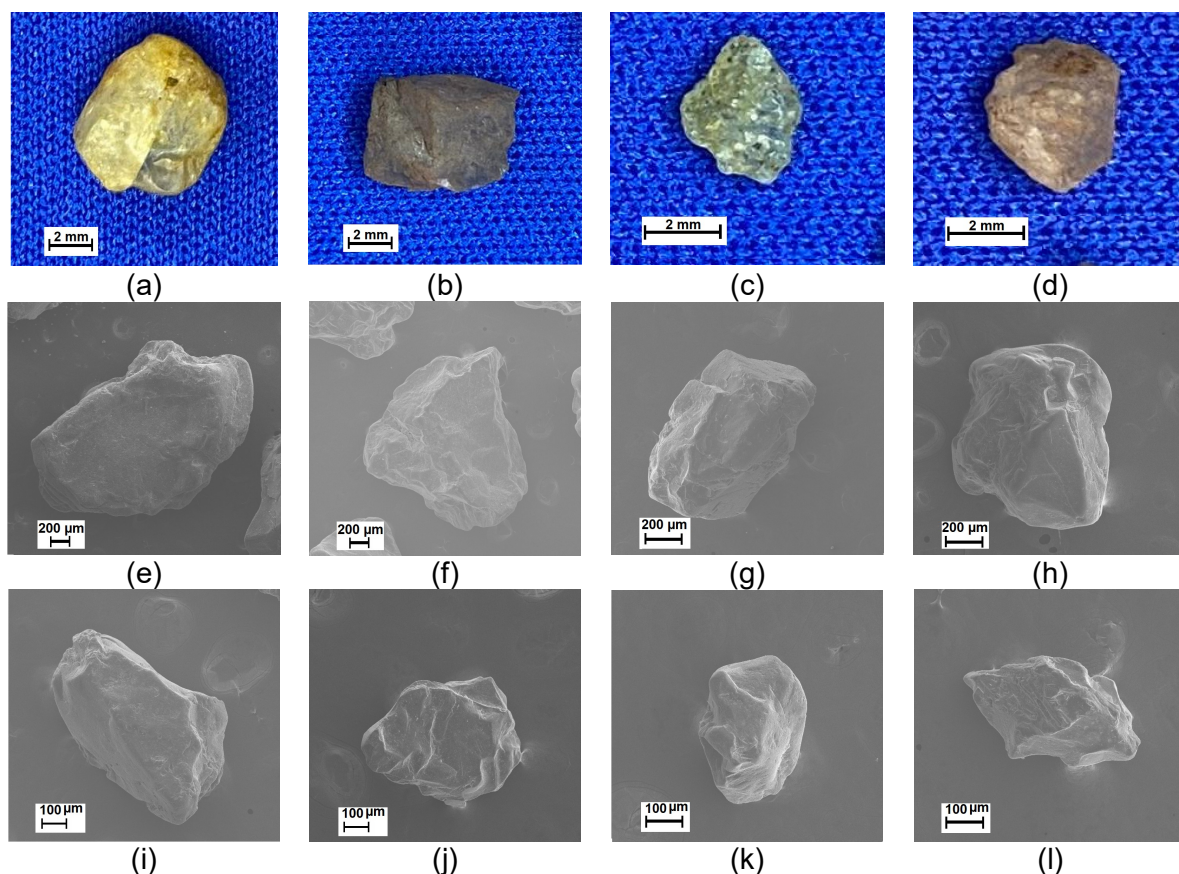


Figura 42: A-NAT - fração 4,75 mm (a), A-CBC - fração 4,75 mm (b), A-NAT - fração 2,36 mm (c), A-CBC - fração 2,36 mm (d), A-NAT - fração 1,18 mm (e), A-CBC - fração 1,18 mm (f), A-NAT - fração 0,6 mm (g), A-CBC - fração 0,6 mm (h), A-NAT - fração 0,3 mm (i), A-CBC - fração 0,3 mm (j), A-NAT - fração 0,15 mm (k) e A-CBC - fração 0,15 mm (l).

Tabela 12: Resultados dos parâmetros de forma da A-NAT e A-CBC (valores de desvio-padrão são indicados entre parênteses).

Tamanho de partícula (mm)	Arredondamento		Esfericidade	
	A-NAT	A-CBC	A-NAT	A-CBC
4,75	0,715 (± 0,091)	0,693 (± 0,088)	0,844 (± 0,054)	0,831 (± 0,054)
2,36	0,668 (± 0,099)	0,686 (± 0,099)	0,930 (± 0,061)	0,826 (± 0,060)
1,18	0,654 (± 0,105)	0,648 (± 0,097)	0,806 (± 0,067)	0,803 (± 0,061)
0,6	0,632 (± 0,110)	0,643 (± 0,076)	0,792 (± 0,071)	0,800 (± 0,048)
0,3	0,608 (± 0,108)	0,611 (± 0,121)	0,777 (± 0,071)	0,777 (± 0,087)
0,15	0,626 (± 0,096)	0,624 (± 0,099)	0,789 (± 0,061)	0,787 (± 0,064)
Média	0,650 (± 0,038)	0,651 (± 0,032)	0,823 (± 0,057)	0,804 (± 0,021)

Observa-se que, embora as duas areias possuam origens distintas e tenham sido expostas a diferentes condições de intempéries, os resultados de

arredondamento e esfericidade foram bastante similares. De acordo com os resultados obtidos, a A-NAT apresenta partículas ligeiramente mais arredondadas e esféricas em comparação com a A-CBC. Embora as diferenças nos valores de arredondamento sejam pequenas e próximas, a A-NAT demonstra, em média, valores superiores, indicando maior arredondamento das partículas. No que tange à esfericidade, a A-NAT também apresenta valores geralmente mais elevados, destacando-se pelo valor máximo de 0,930 para partículas de 2,36 mm, enquanto a A-CBC atingiu 0,826 no mesmo caso. Esses dados indicam que, em geral, as partículas da A-NAT possuem formas mais arredondadas e esféricas, embora as diferenças sejam pequenas. Os valores obtidos para a areia natural são semelhantes com os apresentados por Cordeiro, De Alvarenga e Rocha (2016), com um índice de arredondamento em torno de 0,68 e esfericidade de 0,83. Entretanto, não foram encontradas pesquisas que avaliassem especificamente a A-CBC em relação a esses parâmetros de forma.

Uma observação adicional foi feita ao analisar as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), que evidenciaram a presença de partículas celulares (Figura 43), originárias do bagaço da cana-de-açúcar, misturadas às partículas de quartzo, mesmo após a separação densimétrica e lavagem dos grãos. Essas partículas, encontradas principalmente nas frações de 0,3 mm e 0,15 mm, apresentaram morfologia irregular e porosa, característica típica de materiais pozolânicos (Alvarenga e Cordeiro, 2024). As superfícies exibiram textura rugosa e fragmentada, com bordas indefinidas geometricamente. Tal porosidade e aspereza elevam a área superficial específica, o que pode favorecer a reatividade da cinza em misturas cimentícias.

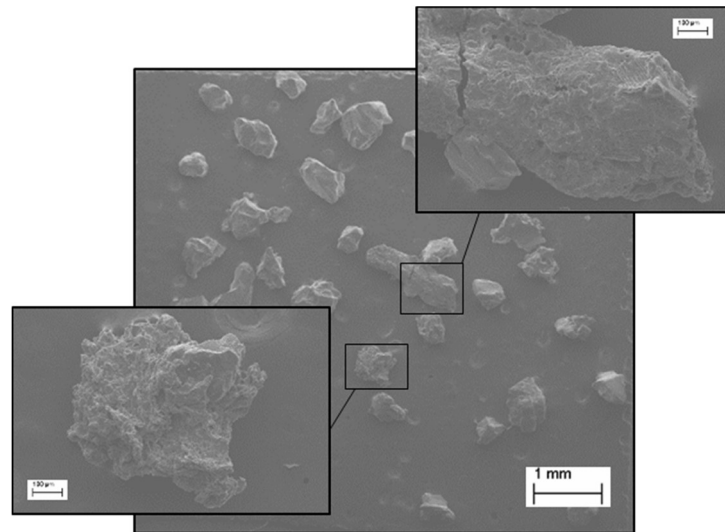


Figura 43: Imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura de partículas celulares que compõem a A-CBC.

4.1.5. Compacidade

A compacidade dos agregados está diretamente associada à densidade do material e ao arranjo das partículas no espaço. Esse parâmetro varia de 0 a 1, sendo que valores mais próximos de 1 indicam um melhor empacotamento dos grãos e, conseqüentemente, menor volume de vazios. No presente estudo, a compacidade das areias apresentou valores semelhantes, de 0,698 para a A-NAT e 0,701 para a A-CBC. Essa proximidade pode ser atribuída à semelhança tanto na granulometria quanto na forma das partículas (Cordeiro, 2006). De modo similar, Cordeiro, De Alvarenga e Rocha (2016) encontraram para a areia natural um valor de 0,663, reforçando a consistência dos resultados observados.

4.1.6. Composição mineralógica

A composição mineralógica das areias é apresentada na Figura 44. É possível identificar picos característicos de quartzo em ambas as areias, bem como a ausência de halo amorfo na A-CBC. Esse resultado é semelhante ao obtido por Moretti *et al.* (2016). Em contrapartida, algumas pesquisas apresentaram resultados divergentes em relação à areia de cinza do bagaço. No estudo de Khawaja *et al.* (2021), por

exemplo, a análise feita por DRX não evidenciou picos agudos identificados na SCBA, indicando que sua estrutura é predominantemente amorfa.

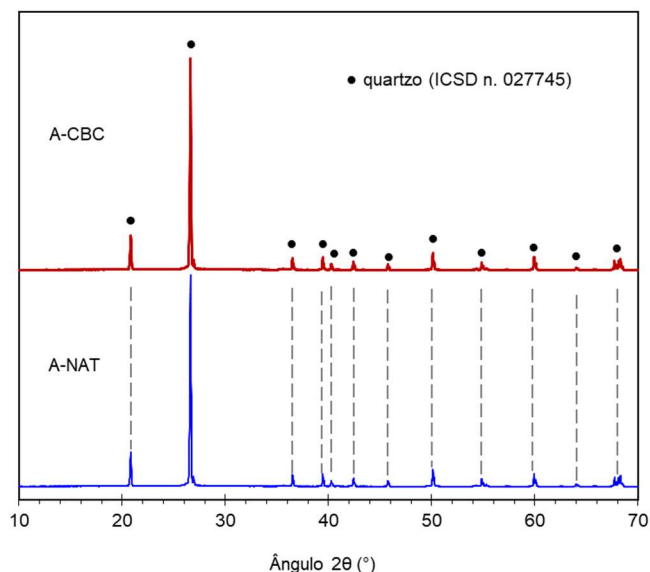


Figura 44: Difratogramas de raios X da A-CBC e A-NAT.

A cinza de fundo do bagaço da cana-de-açúcar geralmente é composta por sílica cristalina e sílica amorfa. A sílica cristalina, predominantemente na forma de quartzo, é proveniente do solo aderido aos colmos da cana após a colheita, enquanto a sílica amorfa tem origem no próprio bagaço. Os resultados dessa análise indicaram que os procedimentos de separação densimétrica e lavagem das frações da areia proveniente da cinza foram eficazes na redução da presença de sílica amorfa, assegurando maior incidência da sílica no estado cristalino. Isso corrobora os resultados de massa específica e de absorção de água da A-CBC.

4.1.7. Composição química e perda ao fogo

A Tabela 13 apresenta a composição de óxidos e os valores de perda ao fogo para as duas areias. Como esperado, a sílica (SiO_2) foi o composto predominante nas areias, corroborando as análises de difração de raios X. Os resultados obtidos nesta análise indicaram elevada pureza da A-CBC, composta por 86,1% de sílica, percentual superior ao encontrado na A-NAT. O teor de óxido de alumínio (Al_2O_3) foi menor na A-CBC, indicando menor presença de minerais argilosos ou feldspatos, o

que contribui para os valores mais altos de sílica observados. Os baixos valores de perda ao fogo sugerem que as areias apresentavam baixa contaminação por materiais carbonáceos e/ou matéria orgânica. A A-CBC apresentou percentual de perda ao fogo inferior ao da A-NAT, o que se explica pelo fato de já ter passado por queima a altas temperaturas, eliminando praticamente toda a matéria orgânica e compostos voláteis. A detecção de K_2O , por sua vez, exige atenção, pois esse composto pode favorecer reações álcali-agregados. Contudo, a sílica está predominantemente em estado cristalino, o que diminui sua propensão a participar dessas reações. A comparação entre a composição química da A-CBC e das cinzas analisadas em outros estudos revela que o teor de sílica presente na A-CBC (86,1%) é superior ao relatado em diversas pesquisas como as de Modani e Vyawahare (2013), 62,4%; Khawaja *et al.* (2021), 74,1%; De Sande *et al.* (2021), 21,8%; Subedi *et al.* (2021), 42,8%; Muthadhi e Banupriya (2022), 64,7%; e Moretti *et al.* (2016), 80,2%.

Tabela 13: Composição de óxidos e perda ao fogo de A-NAT e A-CBC.

Óxido (%)	A-NAT	A-CBC
SiO_2	82,6	86,1
Al_2O_3	9,7	6,8
K_2O	3,4	1,3
Fe_2O_3	0,9	3,0
SO_3	1,4	3,0
CaO	0,9	0,4
TiO_2	0,2	0,3
Perda ao fogo (%)	0,9	0,6

4.2. Aplicação de A-CBC em argamassas

4.2.1. Consistência

A incorporação da A-CBC em teores de substituição de A-NAT entre 20 e 100% não promoveu alterações na consistência das argamassas, como apresentado no item 3.3.2. Como mostrado na Tabela 10, um teor fixo de superplastificante de 0,03% foi suficiente para manter os valores de consistência das argamassas entre 230 e 250 mm. Esse resultado pode ser atribuído ao fato de as areias terem sido utilizadas com

a mesma granulometria, com poucas diferenças nos parâmetros relacionados à forma das partículas, compactidade e absorção de água. Esse comportamento não é comum em argamassas que utilizam areia proveniente da cinza do bagaço de cana, pois diversos estudos apontam que a adição desse material aumenta a demanda de água da mistura para manter a trabalhabilidade. Moretti *et al.* (2018) observaram que a substituição de 40% da areia natural por areia de cinza resultou em uma redução significativa na consistência, medida pelo ensaio de mesa de espalhamento. De forma semelhante, Almeida *et al.* (2015) verificaram que o uso da areia de cinza do bagaço (SBAS) elevou a necessidade de água no preparo das argamassas, e que o aumento da relação água/cimento (a/c) provocou maior porosidade no material. Além disso, Jagadesh *et al.* (2019) também relataram aumento na relação a/c com o acréscimo de SCBA na argamassa, atribuindo esse efeito à elevada porosidade da SCBA.

4.2.2. Resistência à compressão

Os valores de resistência à compressão média e de desvio-padrão nas idades de 7, 28 e 120 dias podem ser observados na Figura 45. Os valores individuais de resistência de cada corpo de prova encontram-se disponíveis no Anexo 1 – Tabela 18 (7 dias), Tabela 19 (28 dias) e Tabela 20 (120 dias). Os resultados da análise de variância (ANOVA), registrados no Anexo 2 (Tabela 22), não indicaram diferenças significativas entre as resistências aos 7 dias das argamassas A-Ref, A-A-CBC20, A-A-CBC35, A-A-CBC50 e A-A-CBC65, ao nível de significância de 5%. Os resultados do teste de Duncan das resistências aos 7 dias podem ser consultados no Anexo 2 (Tabela 23). A argamassa A-A-CBC100 apresentou um incremento de aproximadamente 11% em relação a A-Ref, e diferenças significativas em relação a todas as argamassas, exceto A-A-CBC80. Vale ressaltar que a única argamassa que apresentou diferenças significativas de resistência em relação à A-A-CBC80 foi a A-A-CBC35, o que indica que a mistura com 35% teve uma redução inesperada. Essa mistura também apresentou diferenças significativas em relação à A-A-CBC100, assim como as misturas com até 65% de substituição.

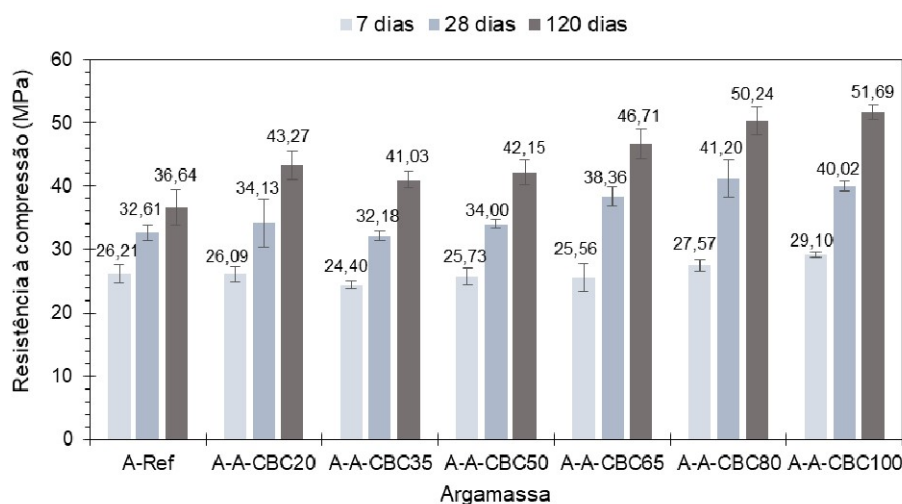


Figura 45: Resistência à compressão média de todas as argamassas nas idades de 7, 28 e 120 dias.

Aos 28 dias, o ganho de resistência para as taxas de substituição de A-NAT acima de 65% foram mais evidentes. Os resultados da análise de variância (Anexo 1 - Tabela 24) e teste de Duncan (Tabela 25) indicaram que aos 28 dias os valores de resistência de A-Ref e das argamassas com até 50% de substituição não apresentaram diferenças significativas entre si, embora todas tenham apresentado diferenças em relação aos valores de resistência das argamassas A-A-CBC65, A-A-CBC80 e A-A-CBC100 ($p < 0,05$). Adicionalmente, do ponto de vista estatístico, as resistências dessas últimas misturas foram semelhantes entre si, ao nível de 5% de probabilidade. Em comparação com a A-Ref, a argamassa A-A-CBC80 apresentou o maior ganho de resistência, com valor aproximado de 26%, seguida pelas argamassas A-A-CBC100 (22%) e A-A-CBC65 (17%).

Aos 120 dias de cura, todas as argamassas apresentaram aumento significativo na resistência à compressão em comparação à mistura de referência (A-Ref), de acordo com os resultados da análise de variância (ANOVA – Anexo 2, Tabela 26) e do teste de Duncan (Tabela 27). O valor máximo de resistência foi registrado para A-A-CBC100 com 51,7 MPa, que correspondeu a um incremento de 41% em comparação com A-Ref (36,6 MPa). As argamassas A-A-CBC20, A-A-CBC35, A-A-CBC50 não apresentaram diferenças significativas entre si, bem como a A-A-CBC80

em relação à A-A-CBC65 e A-A-CBC100. Os resultados indicaram que a presença da A-CBC exerceu influência positiva no desempenho mecânico das argamassas.

Os ganhos de resistência aos 28 dias, observados nas pesquisas de Modani e Vyawahare (2013), Jagadesh *et al.* (2019), Sande *et al.* (2021), Muthadhi e Banupriya (2022) e Ramakrishnan *et al.* (2021), se limitaram às porcentagens de 10% ou 15% de substituição. Por sua vez, o estudo de Moretti *et al.* (2016) e Criado *et al.* (2024) registraram ganhos com até 20% ou 30% de substituição. Modani e Vyawahare (2013), por exemplo, realizaram a substituição até 40%, mas observaram perda de resistência a partir de 20%. Jagadesh *et al.* (2019) e Khawaja *et al.* (2021) realizaram substituições de até 20% e 25%, respectivamente, mas ambos identificaram perda a partir de 15%. A comparação dos resultados destes estudos com os da presente pesquisa mostra-se relativamente complexa, devido às diferenças significativas entre os procedimentos adotados neste trabalho e aqueles descritos nas pesquisas citadas acima.

No presente trabalho, a produção da A-CBC foi iniciada pelo processo de separação densimétrica que permitiu produzir um agregado miúdo artificial rico em sílica no estado cristalino, reduzindo os efeitos indesejados causados pela presença predominante de partículas de cinza leve, que contribuem para maior absorção de água da matriz, redução da trabalhabilidade e redução de massa específica no estado endurecido, fatores esses que foram usados como justificativas pela maioria dos autores para as perdas de resistência em maiores teores de substituição (Sales e Lima, 2010, Jagadesh *et al.*, 2019, Sande *et al.*, 2021, Muthadhi e Banupriya, 2022 e Criado *et al.*, 2024). Adicionalmente, a equiparação das curvas granulométricas das areias permitiu minimizar interferências relacionadas às variações no tamanho das partículas, possibilitando uma melhor comparação entre A-NAT e A-CBC. Isso significa que a mistura com 80% de areia natural e 20% de areia de cinza (A-A-CBC20) apresentou a mesma proporção de partículas de 4,75 mm, por exemplo, que o traço com 100% de A-NAT (A-Ref) ou com 100% de A-CBC (A-A-CBC100). Essa correspondência foi mantida para todas as faixas de tamanho e para todas as porcentagens de substituição avaliadas. A produção da A-CBC rica em quartzo e equiparação das granulometrias das areias contribuíram para evitar perda de resistência à compressão, especialmente nos traços com maiores percentuais de

substituição. Moretti *et al.* (2018) e Sales e Lima (2010) também demonstraram atenção à granulometria das cinzas, que associada à predominância de quartzo e massas específicas próximas às da areia natural, contribuiu para evitar perda de resistência das argamassas.

Destaca-se a importância de uma análise criteriosa das características físicas do material empregado nas substituições antes de sua aplicação, uma vez que essa etapa contribuiu significativamente para a obtenção de resultados favoráveis nesta pesquisa. No entanto, há indícios de que o expressivo aumento na resistência aos 120 dias, especialmente nas maiores proporções de substituição, pode ter ocorrido devido às reações pozolânicas, uma vez que essas reações ocorrem de forma mais lenta (Cordeiro *et al.*, 2018) e os agregados apresentam características físicas muito semelhantes, como compacidade, forma dos grãos e massa específica. As partículas finas de cinza favorecem a ocorrência dessas reações, que aumentam a resistência mecânica da argamassa (Subedi *et al.*, 2021). As análises realizadas por MEV mostraram que, mesmo após os processos de lavagem e separação densimétrica, ainda permaneciam partículas derivadas do bagaço de cana misturadas ao quartzo (Figura 43).

4.2.3. Propriedades físicas (absorção de água, índice de vazios e massa específica)

A Figura 46 mostra os valores médios de absorção de água, bem como o desvio-padrão. Os resultados da análise de variância (ANOVA) e teste de Duncan, apresentados no Anexo 2 (Tabela 28 e Tabela 29), respectivamente, não indicaram diferenças significativas na absorção total de água entre as argamassas A-Ref e A-A-CBC20. No entanto, ambas apresentaram diferenças estatisticamente significativas, ao nível de 5% de significância, em relação às argamassas A-A-CBC35 e A-A-CBC50. As formulações com 35% e 50% de A-CBC apresentaram aumentos na absorção total de água de aproximadamente 4,5% e 5,2%, respectivamente, em comparação com a mistura A-Ref. Esse aumento pode ser atribuído à maior absorção de água da A-CBC (0,96%), em relação à A-NAT (0,56%), refletindo-se nas argamassas com maiores

teores de substituição. Esses resultados indicaram que a substituição da A-NAT por A-CBC, nas proporções de 35% e 50%, provocou pequenas alterações no volume dos poros interconectados de menor diâmetro nas argamassas. Os valores dos índices de vazios das argamassas (Figura 47) corroboram essa informação, uma vez que as argamassas A-Ref e A-A-CBC20 apresentaram diferenças significativas no índice de vazios em relação às argamassas A-A-CBC35 e A-A-CBC50, conforme indicado no Anexo 2 (Tabela 30 e Tabela 31).

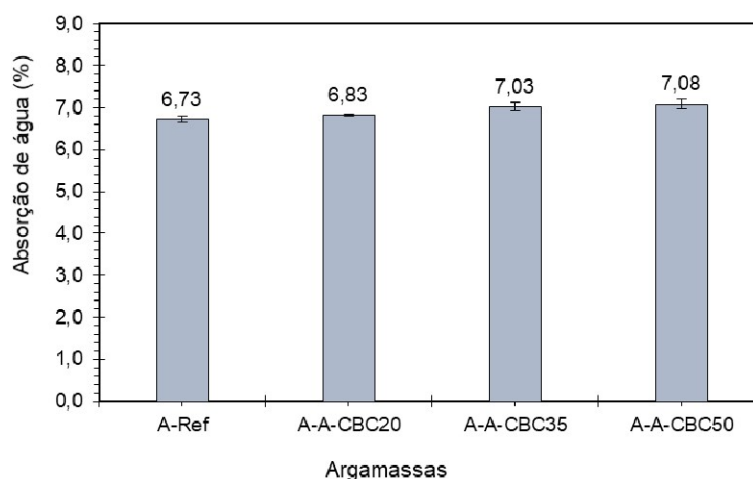


Figura 46: Valores de absorção por imersão total das argamassas com até 50% de substituição, aos 120 dias.

As argamassas com 35% e 50% apresentaram aumento de 5% no índice de vazios em relação à A-Ref. Embora tenham sido observadas diferenças estatisticamente significativas, essas diferenças são quantitativamente pequenas e não acarretaram perda de resistência à compressão, como observado em algumas outras pesquisas (Muthadhi e Banupriya, 2022; Sua-iam e Makul, 2013; Khawaja *et al.*, 2021). No estudo de Khawaja *et al.* (2021), por exemplo, a mistura contendo 25% de substituição de areia por cinza apresentou, aos 90 dias, absorção de água aproximadamente três vezes superior à da mistura de referência, o que resultou em impacto significativo na resistência. Além disso, estudos apontam redução da massa específica dos sistemas cimentícios no estado endurecido, devido à menor massa específica da areia da cinza (Khawaja *et al.*, 2021, De Sande *et al.* (2021) e Jagadesh *et al.*, 2019), o que não foi observado na presente pesquisa, conforme ilustrado na Figura 48. As formulações contendo A-CBC apresentaram maior massa específica no

estado endurecido em comparação à mistura A-Ref. A análise de variância e o teste de Duncan evidenciaram diferenças estatisticamente significativas de massa específica entre a mistura A-Ref e as misturas A-A-CBC20, A-A-CBC35 e A-A-CBC50 (Anexo 2 – Tabela 32 e Tabela 33). Um dos principais diferenciais desta pesquisa, em relação aos estudos anteriores, foi o método de preparo do agregado miúdo artificial. A separação densimétrica e a lavagem dos grãos foram etapas intencionalmente adotadas com o objetivo de remover partículas finas. Esse procedimento foi fundamental para que a A-CBC não provocasse grandes variações na absorção de água, no índice de vazios e na massa específica das argamassas no estado endurecido, as quais, embora estatisticamente significativas, foram de baixa magnitude.

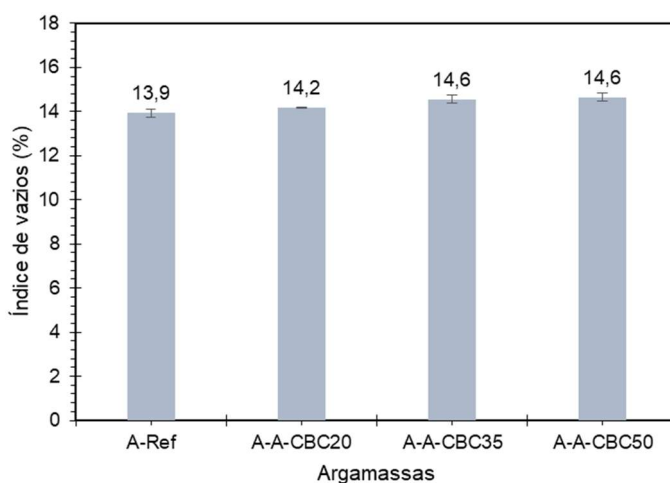


Figura 47: Valores de índice de vazios das argamassas com até 50% de substituição, aos 120 dias.

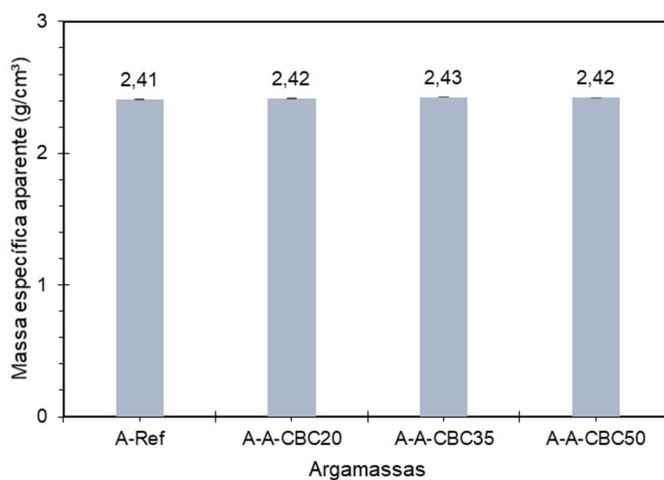


Figura 48: Valores de massa específica das argamassas com até 50% de substituição, aos 120 dias.

4.2.4. Absorção de água por capilaridade

A Figura 49 mostra o gráfico de absorção capilar das quatro misturas ao longo de 22 dias de ensaio. É possível observar que as curvas geradas pelos resultados de absorção capilar em relação à raiz quadrada do tempo estão praticamente sobrepostas, exceto por uma leve alteração para a mistura A-A-CBC35. Os resultados da análise de variância (ANOVA) e teste de Duncan, registrados no Anexo 2 (Tabela 34 e Tabela 35), respectivamente, não indicaram diferenças significativas entre as argamassas A-Ref, A-A-CBC20, A-A-CBC35 e A-A-CBC50, ao nível de significância de 5%. O ensaio com aproximadamente 22 dias apresentou resultados finais de 0,86 g/cm²; 0,87 g/cm²; 0,87 g/cm²; e 0,85 g/cm²; para as argamassas A-Ref, A-A-CBC20, A-A-CBC35 e A-A-CBC50, respectivamente. A substituição da A-NAT pela A-CBC não aumentou a conectividade dos poros e demonstra não comprometer a durabilidade dos compósitos em ambientes expostos à umidade constante. Por outro lado, os resultados obtidos por Sande *et al.* (2021) demonstraram que a absorção capilar dos concretos com areia de cinza foi superior à do concreto de referência.

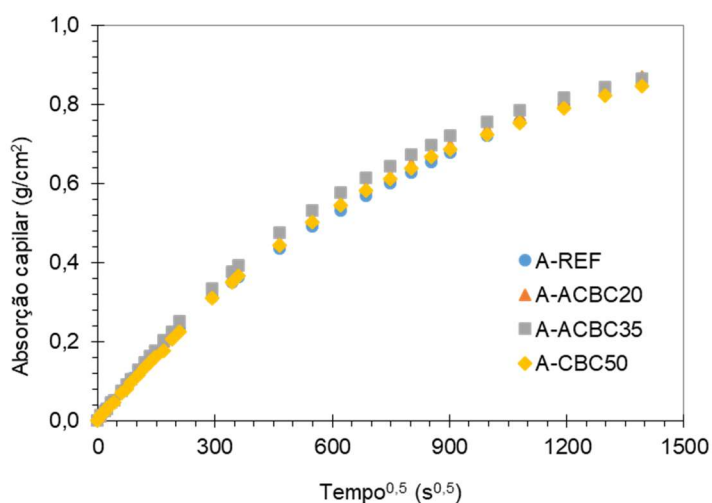


Figura 49: Gráfico de absorção capilar aos 120 dias.

Como análise complementar aos resultados de absorção capilar, destaca-se a absorptividade das argamassas. A Figura 50 ilustra as retas ajustadas aos pontos experimentais obtidos durante o ensaio, e a Tabela 14 apresenta os valores de absorptividade inicial e secundária das argamassas. A análise de variância (ANOVA) e o teste de Duncan da absorptividade inicial das argamassas A-Ref, A-A-CBC20, A-A-

CBC35 e A-A-CBC50 não revelaram diferenças estatisticamente significativas ao nível de 5 % (Anexo 2 - Tabela 36 e Tabela 37). Esses resultados sugerem que a substituição parcial da A-NAT por A-CBC não alterou a resistência inicial à penetração de umidade. A absorvidade inicial representa a absorção rápida de água no início da exposição, predominantemente controlada pela ação capilar em grandes poros (SHANKARAMURTHY *et al.*, 2025). Como essa etapa está diretamente relacionada à fração de grandes poros interconectados, a semelhança dos valores obtidos indica que não ocorreram mudanças significativas na distribuição e no tamanho médio desses poros nas misturas avaliadas. A distribuição dos poros, por sua vez, influencia a tortuosidade, ou seja, o quão indireto é o percurso que um fluido precisa percorrer para atravessar o material, o que pode facilitar ou dificultar a absorção dependendo de seu grau (SHANKARAMURTHY *et al.*, 2025). Em contrapartida, Modani e Vyawahare (2013) verificaram aumento da absorvidade com a elevação do teor de SCBA, atribuindo o efeito à presença de partículas porosas, não queimadas ou parcialmente queimadas, que retêm maior quantidade de água.

Em relação à absorvidade secundária, observou-se que a inclinação da reta na fase inicial é maior do que na fase secundária, indicando que a taxa de absorção de água por capilaridade é mais rápida nos primeiros instantes de contato. De fato, a absorvidade secundária corresponde à absorção mais lenta, predominantemente controlada por difusão, que ocorre em uma rede de poros muito finos, como os poros de gel < 100 nm (SHANKARAMURTHY *et al.*, 2025). Valores elevados de absorvidade secundária indicam maior risco de degradação a longo prazo. Contudo, a análise de variância (ANOVA) e o teste de Duncan não revelaram diferenças estatisticamente significativas ao nível de 5 % na absorvidade secundária das argamassas A-Ref, A-A-CBC20, A-A-CBC35 e A-A-CBC50 (Anexo 2 - Tabela 38 e Tabela 39). Isso significa que a difusão de água dentro das argamassas com A-CBC ocorre praticamente na mesma taxa que a A-Ref, indicando que não houve alterações relevantes na porosidade mais fechada, que é responsável pela absorção lenta e de longo prazo. Ramakrishnan *et al.* (2021) identificaram uma redução da absorvidade até o nível ótimo de 15 % de substituição do agregado miúdo por cinza do bagaço, associada à menor porosidade e absorção de água dessa mistura. A partir desse teor, os valores voltaram a crescer, indicando aumento da conectividade dos poros. A

mistura de referência apresentou os maiores valores de absorvidade, enquanto a com 15% de areia de cinza registrou os menores coeficientes nas fases inicial e secundária do ensaio.

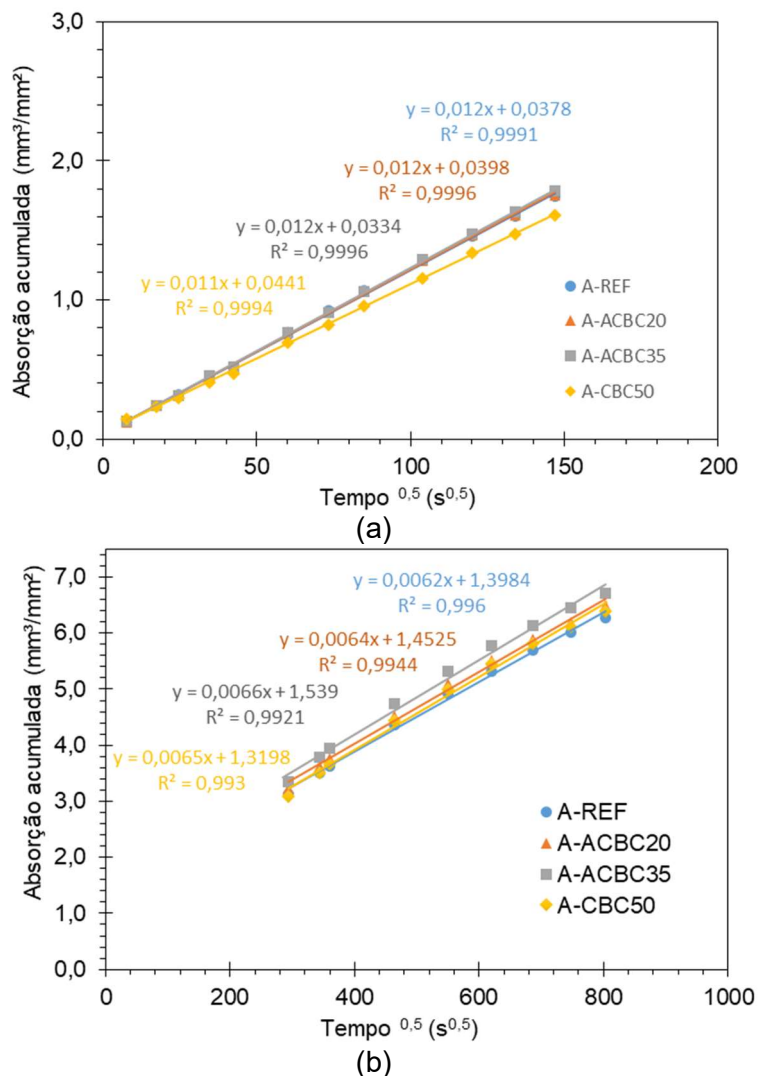


Figura 50: Gráfico de absorção acumulada inicial pela raiz quadrada do tempo (a), e gráfico de absorção acumulada secundária pela raiz quadrada do tempo (b).

Tabela 14: Valores de absorvidade inicial e secundária das argamassas.

Misturas	Absortividade inicial (mm/s ^{0,5})	Absortividade secundária (mm/s ^{0,5})
A-Ref	0,012	0,006
A-A-CBC20	0,012	0,006
A-A-CBC35	0,012	0,007
A-A-CBC50	0,011	0,006

4.2.5. Ataque por ácido sulfúrico

A Figura 51 apresenta a perda de massa das argamassas no tempo. Observa-se uma mudança na inclinação da curva, marcada por um aumento repentino na perda de massa. Esse comportamento está associado à troca da solução realizada aos 35 dias. A elevação gradual do pH da solução ácida ocorre ao longo do tempo, causada pelas reações entre o ácido e os compostos da matriz cimentícia que reduzem a acidez do meio. No entanto, com a troca da solução a fim de manter o $\text{pH} \leq 2$, o ambiente voltou a se tornar altamente agressivo, intensificando os mecanismos de degradação química. Esse efeito é particularmente evidente a partir dos 40 dias de exposição.

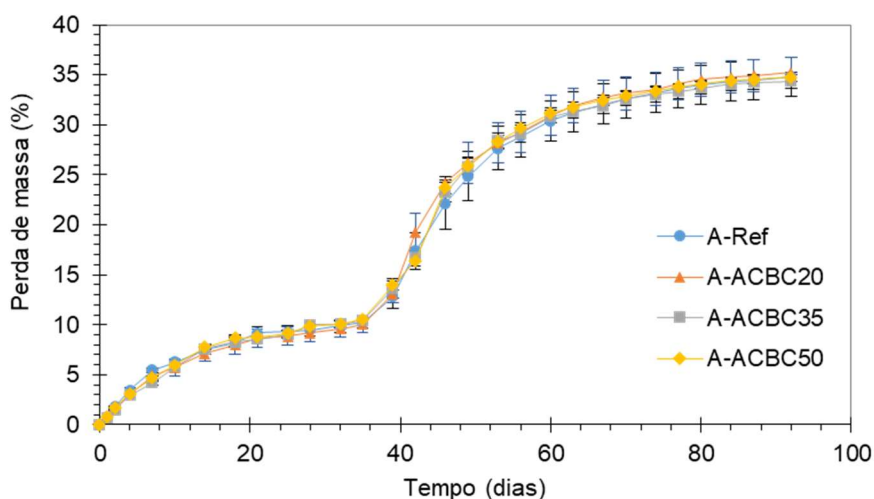


Figura 51: Perda de massa das argamassas expostas ao ataque por ácido sulfúrico em relação ao tempo.

Aos 28 dias de ataque as argamassas A-Ref, A-A-CBC20, A-A-CBC35 e A-A-CBC50 apresentaram perda de massa de 9,5%, 9,2%, 9,9% e 9,9%, respectivamente. A A-A-CBC35 apresentou maior perda de massa em relação a argamassa de referência (cerca de 5%) e possui diferenças estatísticas em relação a todas as argamassas, exceto A-A-CBC50. A perda de massa das demais argamassas não apresentaram diferenças estatísticas entre si (Anexo 2 - Tabela 40 e Tabela 41).

Aos 56 dias, as perdas de massa foram de 28,9%, 29,3%, 29,2% e 29,7% e aos 92 dias foram de 34,8%, 35,2%, 34,4% e 34,8 para A-Ref, A-A-CBC20, A-A-CBC35 e A-A-CBC50, respectivamente. A análise estatística revelou que não há

diferenças significativas entre as argamassas nos períodos de 56 e 92 dias, de acordo com os resultados da análise de variância (ANOVA – Anexo 2, Tabela 42 e Tabela 44) e dos testes de Duncan (Tabela 43 e Tabela 45), respectivamente. A ausência de diferenças nas perdas de massa indica que a matriz cimentícia com A-CBC manteve sua integridade independentemente do teor de substituição adotado, apresentando desempenho estável frente ao meio agressivo. Essa estabilidade, em comparação com a A-Ref pode estar relacionada à composição da matriz e ao grau de porosidade das amostras, que não foram suficientemente distintos para influenciar de forma significativa a taxa de degradação. A Figura 52 apresenta a aparência dos corpos de prova após 92 dias de exposição ao ataque por ácido sulfúrico. Observa-se que o mecanismo de degradação foi semelhante entre as argamassas.

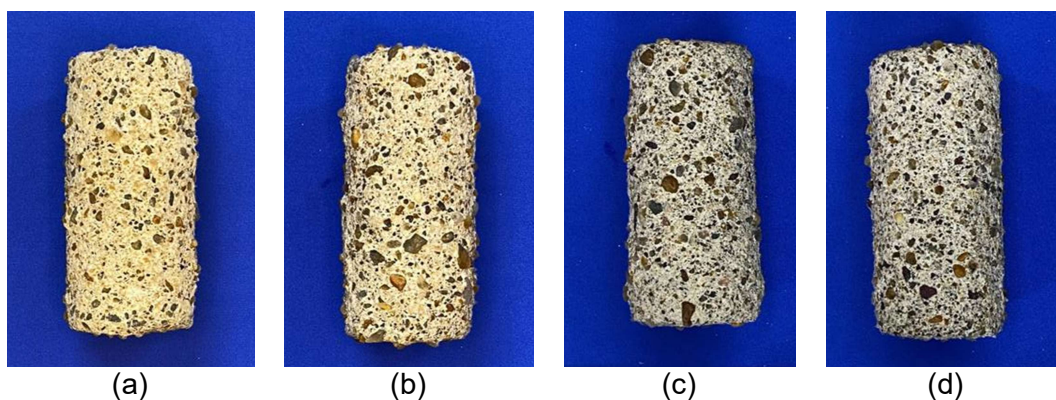


Figura 52: Corpos de prova cilíndricos pós ataque por ácido sulfúrico. A-Ref (a), A-A-CBC20 (b), A-A-CBC35 (c), e A-A-CBC50 (d).

A Figura 53 apresenta os corpos de prova cúbicos após o ataque ácido. A secção dos espécimes revelou o quase total desprendimento da camada superficial degradada ao longo da exposição. Apenas uma fina espessura residual foi observada entre as diferentes formulações, sugerindo que a incorporação da A-CBC não alterou significativamente o processo de deterioração das argamassas. Essa aparência é semelhante à observada na argamassa de referência no estudo de Alvarenga e Cordeiro (2024), que investigaram o comportamento de argamassas com substituição parcial de cimento por cinzas do bagaço submetidas ao ataque por ácido sulfúrico. No entanto, os autores relataram variações na espessura das camadas degradadas nas formulações com cinza, diferentemente do comportamento uniforme observado neste estudo.

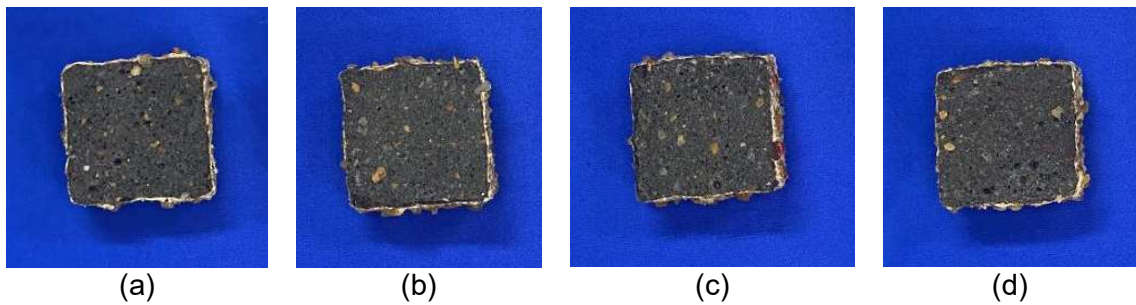


Figura 53: Corpos de prova cúbicos pós ataque. A-Ref (a), A-A-CBC20 (b), A-A-CBC35 (c), e A-A-CBC50 (d).

A análise por difração de raios X do material degradado, desprendido dos corpos de prova durante o ataque, revelou a presença predominante de gipsita, formada principalmente pela reação entre o hidróxido de cálcio presente na matriz cimentícia, e o ácido sulfúrico. Também foi identificado quartzo, proveniente do desprendimento dos agregados miúdos durante o processo de degradação (Figura 54).

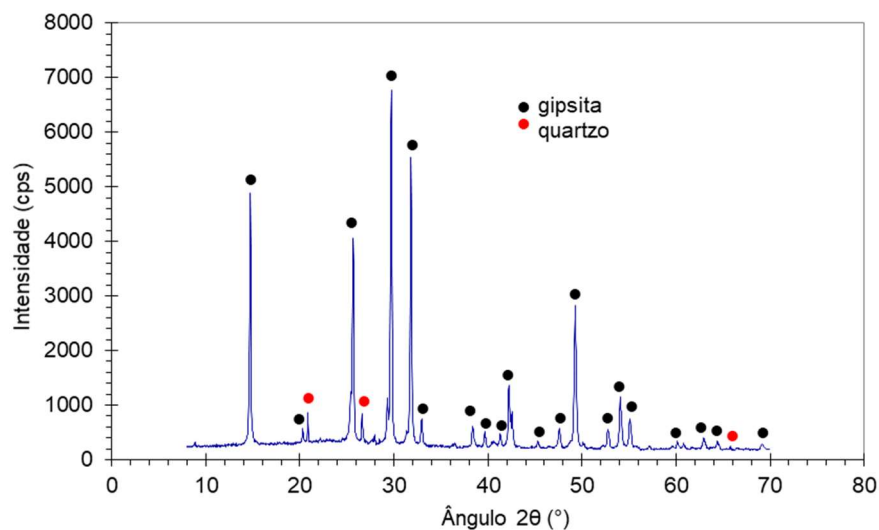


Figura 54: Difratoograma de raios X do material degradado desprendido durante o ataque por ácido sulfúrico.

Os resultados do ensaio de absorção por imersão total estão apresentados na Figura 55. Para possibilitar a comparação posterior, o gráfico contém os resultados das argamassas atacadas e não atacadas. A análise de variância (ANOVA) e o teste de Duncan entre as argamassas submetidas ao ataque ácido não indicaram diferenças significativas entre as formulações, com exceção da argamassa A-A-CBC20 (Anexo 2 - Tabela 46 e Tabela 47). Esta apresentou diferença estatística em

relação às demais, com destaque para a redução de aproximadamente 6,5% na absorção de água em comparação à argamassa de referência atacada.

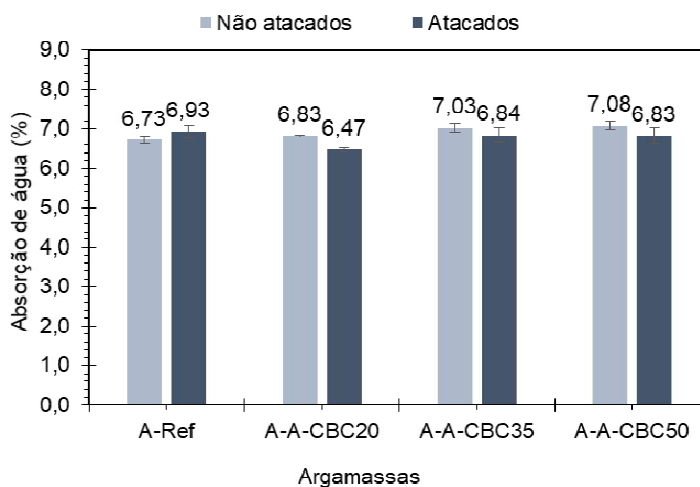


Figura 55: Valores de absorção por imersão total de argamassas não atacadas e atacadas aos 120 dias.

Para verificar o efeito do ataque ácido sobre cada mistura isoladamente, foi aplicada análise estatística por meio do teste t de Student com correção de Welch, realizada apenas entre dois grupos (argamassas com e sem ataque). Os resultados da análise estatística (Anexo 2 - Tabela 48) indicaram que não houve diferenças significativas de absorção de água entre as argamassas atacadas e suas respectivas misturas não atacadas, exceto para a argamassa A-A-CBC20, que apresentou uma redução de 5,27% após o ataque. Esse comportamento pode indicar que a exposição ao ácido alterou a distribuição dos poros abertos nessa formulação, reduzindo sua conectividade e dificultando a penetração da água. De forma geral, ao se comparar os corpos de prova não atacados com os atacados, os resultados sugerem que o ataque ácido não alterou significativamente a capacidade de absorção de água total das argamassas.

Os resultados do índice de vazios estão apresentados na Figura 56, incluindo os respectivos desvios-padrão. A análise de variância (ANOVA) e o teste de Duncan realizados entre as argamassas atacadas revelaram que somente a formulação A-A-CBC20 atacada apresentou diferença significativa no índice de vazios quando comparada às argamassas atacadas A-Ref, A-A-CBC35 e A-A-CBC50 (Anexo 2 – Tabela 49 e Tabela 50). Entretanto, ao comparar as argamassas atacadas com suas

respectivas versões não atacadas por meio do teste t (Anexo 2 –Tabela 51), verificou-se que todas as argamassas atacadas apresentaram diferenças significativas no índice de vazios em relação às não atacadas. As reduções no índice de vazios foram de aproximadamente 13,1%, 21,9%, 19,5% e 19,7% para as argamassas A-Ref, A-A-CBC20, A-A-CBC35 e A-A-CBC50, respectivamente. Esses resultados indicam que o ataque ácido provocou uma diminuição significativa no volume total de poros. Conforme discutido anteriormente, a gipsita, gerada na reação entre o ácido sulfúrico e o hidróxido de cálcio, formou uma fina camada aderida à superfície das argamassas, a qual pode ter reduzido a quantidade de poros acessíveis. Além disso, é possível que o ácido tenha penetrado no interior das amostras, promovendo o preenchimento dos poros com gipsita, o que teria contribuído para a redução observada no volume total de poros. Siqueira, Toledo Filho e Cordeiro (2025) identificaram a presença significativa de gesso não apenas na superfície, mas também nos poros mais profundos da argamassa após o ataque por ácido sulfúrico. Vale ressaltar que, embora a gipsita formada durante o ataque ácido possa preencher os poros e reduzir o índice de vazios, a transformação da portlandita microcristalina em gesso dentro da fase C-S-H pode causar expansão (SCHMIDT *et al.*, 2009) e contribuir para a fragilização da matriz.

A Figura 57 apresenta a massa específica das argamassas não atacadas e atacadas para fins de comparação. A análise de variância (ANOVA) e o teste de Duncan realizados entre as argamassas atacadas revelaram diferenças significativas na massa específica da A-Ref em comparação com as formulações A-A-CBC20, A-A-CBC35 e A-A-CBC50 (Anexo 2 –Tabela 52 e Tabela 53). A A-Ref apresentou massa específica aproximadamente 2,1% menor que as demais misturas. Os resultados estatísticos comparativos entre as argamassas atacadas e não atacadas pelo teste t (Anexo 2 – Tabela 54) revelaram diferenças significativas de massa específica apenas entre as argamassas A-Ref atacada e não atacada. O ataque ácido causou uma redução de aproximadamente 2,5% na massa específica dessa formulação, sem alterar significativamente a massa específica das demais formulações.

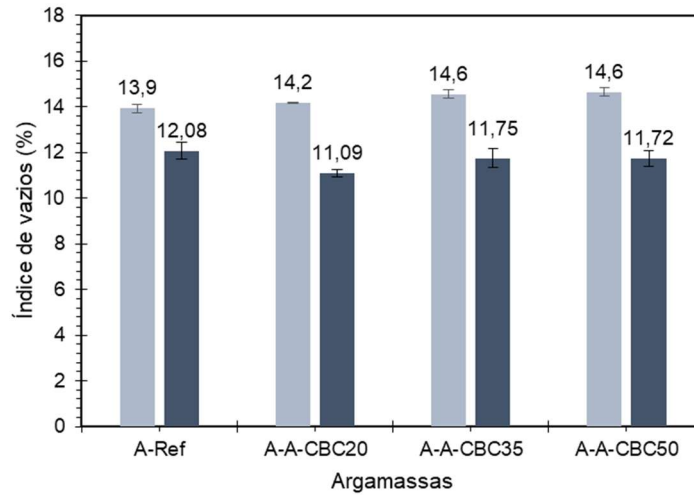


Figura 56: Índice de vazios de argamassas não atacadas e atacadas.

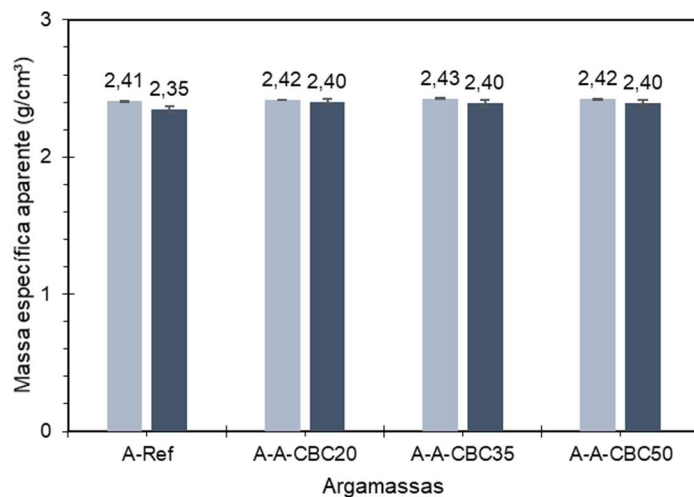


Figura 57: Massa específica de argamassas não atacadas e atacadas.

A absorção por capilaridade das argamassas atacadas pode ser observada na Figura 58. A argamassa A-A-CBC35 apresenta diferenças significativas (ANOVA) na absorção por capilaridade em relação as demais misturas, exceto A-A-CBC50. Houve um aumento de 17,7% na absorção capilar da A-A-CBC35, comparada a formulação de referência atacada. As demais argamassas não apresentam diferenças significativas entre si (Anexo 2 - Tabela 55 e Tabela 56).

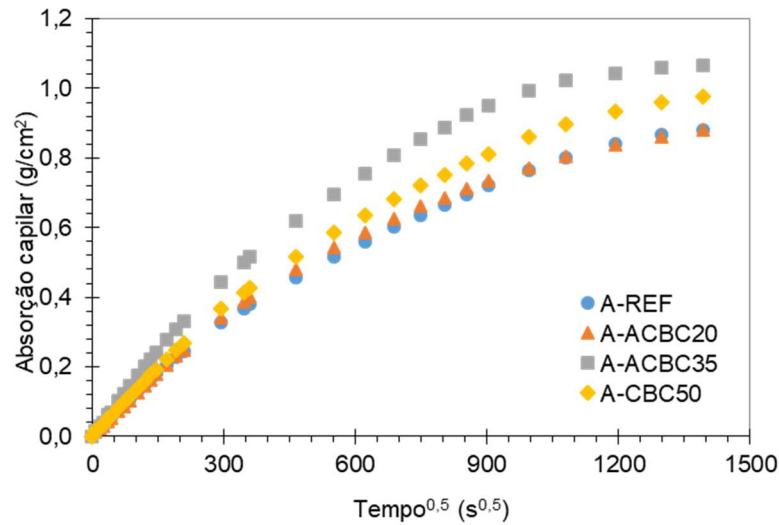


Figura 58: Absorção por capilaridade das argamassas atacadas.

A Tabela 15 apresenta os resultados de absorção capilar das argamassas não atacadas e atacadas. A análise estatística pelo teste t (Anexo 2 – Tabela 57), realizada de forma isolada para cada mistura (formulação atacada com não atacada), indicou que não houve diferenças significativas entre os pares, exceto para a formulação A-A-CBC35, que apresentou aumento significativo na absorção capilar em relação à sua contraparte não atacada. Esse comportamento sugere que o ataque ácido promoveu uma rede de poros capilares mais interligada e acessível para essa formulação, favorecendo a sucção de água. Para as demais formulações, entretanto, os resultados sugerem que a substituição de A-NAT por A-CBC não causam alterações relevantes na conectividade da rede de poros.

Tabela 15: Resultados de absorção capilar finais de argamassas não atacadas e atacadas aos 120 dias.

Misturas	Absorção capilar (g/cm ²)	
	(não atacadas)	(atacadas)
A-Ref	0,86	0,89
A-A-CBC20	0,87	0,88
A-A-CBC35	0,87	1,04
A-A-CBC50	0,85	0,97

A Figura 59 mostra as retas de absorção inicial das argamassas atacadas, e a Tabela 16 mostra os valores de absorção obtidos para as argamassas não atacadas e atacadas. Nesta análise, a formulação A-A-CBC35 também apresentou

valores mais elevados. A análise de variância (ANOVA) e o teste de Duncan indicaram que apenas essa argamassa apresentou absorvidade inicial significativamente diferente em relação às formulações submetidas ao ataque ácido (Anexo 2 - Tabela 58 e Tabela 59), enquanto as demais não apresentaram diferenças estatísticas entre si. Nesse contexto, a A-A-CBC35 atacada apresentou maior velocidade de absorção inicial de água, sugerindo uma rede de poros mais interconectada e acessível à superfície, possivelmente associada a alterações na sua distribuição e tamanho. Aplicou-se o teste t para comparar estatisticamente os resultados de forma isolada. A análise indicou que apenas a formulação A-A-CBC35 atacada apresentou diferenças significativas em relação à sua respectiva formulação não atacada, para a absorvidade inicial (Anexo 2 – Tabela 60).

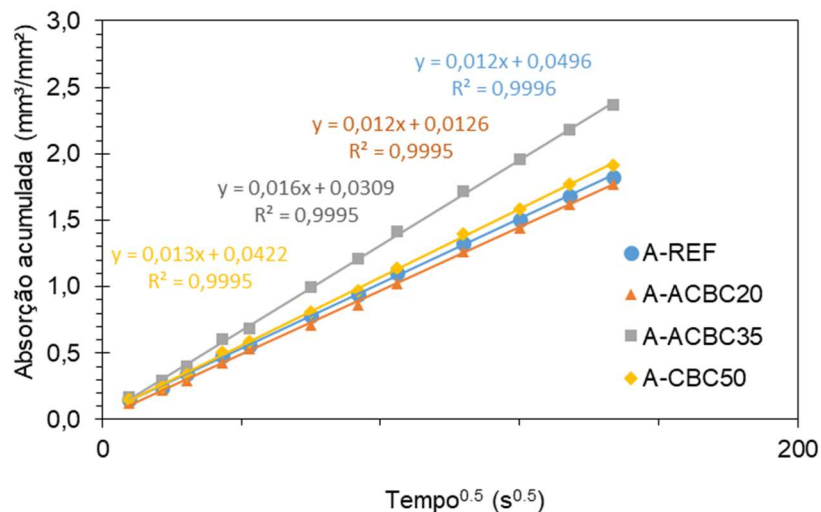


Figura 59: Absorvidade inicial de argamassas atacadas.

Tabela 16: Valores de absorvidade inicial das argamassas não atacadas e atacadas.

Misturas	Absorvidade inicial (mm/s ^{0,5}) (não atacadas)	Absorvidade inicial (mm/s ^{0,5}) (atacadas)
A-Ref	0,012	0,012
A-A-CBC20	0,012	0,012
A-A-CBC35	0,012	0,016
A-A-CBC50	0,011	0,013

A Figura 60 apresenta as retas correspondentes a absorvidade secundária de argamassas atacadas e a Tabela 17 mostra os valores obtidos a partir do coeficiente

angular da reta de cada mistura não atacada e atacada. A análise de variância (ANOVA) e o teste de Duncan indicaram que apenas a A-A-CBC35 atacada apresentou diferenças significativas para os resultados de absorvidade secundária, em relação às demais argamassas atacadas (Anexo 2 - Tabela 61 e Tabela 62), indicando que, mesmo após a fase inicial de absorção rápida, o material continuou absorvendo água a uma taxa considerável ao longo do tempo. As argamassas formuladas com areia da cinza apresentaram bom desempenho antes da exposição ao ataque ácido, possivelmente devido às reações pozolânicas. No entanto, após o ataque por ácido sulfúrico, a formulação com 35% de substituição se mostrou mais suscetível à absorção de água capilar. Esse comportamento pode estar relacionado a uma microestrutura menos refinada, possivelmente decorrente de reações pozolânicas incompletas ou insuficientes, o que teria limitado o preenchimento dos poros capilares. Como consequência, a migração da água pela matriz ocorre com maior facilidade, indicando um maior comprometimento da durabilidade dessa formulação em ambientes agressivos e indicando maior suscetibilidade a degradação a longo prazo. A análise feita pelo teste t indicou que apenas a formulação A-A-CBC35 atacada apresentou diferenças significativas em relação à sua respectiva formulação não atacada, para a absorvidade secundária (Anexo 2 – Tabela 63).

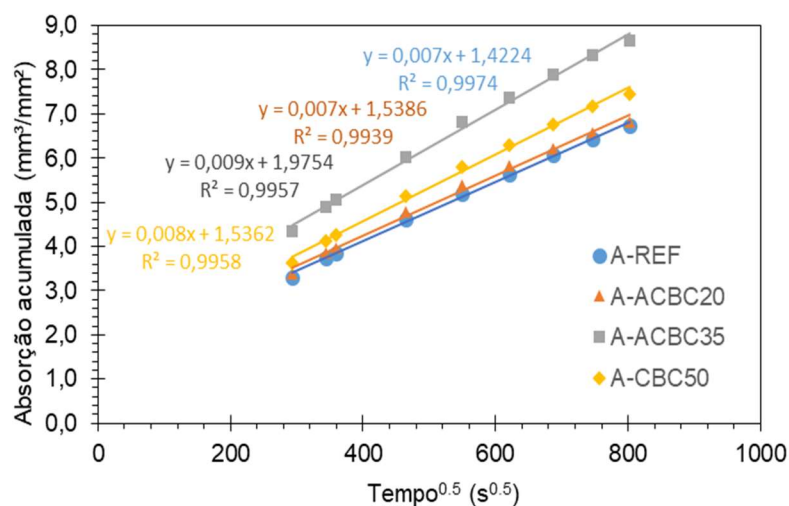


Figura 60: Absorvidade secundária de argamassas atacadas.

Tabela 17: Valores de absorvidade secundária das argamassas não atacadas e atacadas.

Misturas	Absortividade secundária (mm/s^{0,5}) (não atacadas)	Absortividade secundária (mm/s^{0,5}) (atacadas)
A-Ref	0,006	0,007
A-A-CBC20	0,006	0,007
A-A-CBC35	0,007	0,009
A-A-CBC50	0,006	0,008

A Figura 61 mostra a comparação das resistências à compressão de argamassas não atacadas e atacadas aos 120 dias. Os valores individuais de resistência de cada corpo de prova atacado encontram-se disponíveis no Anexo 1 (Tabela 21). A resistência à compressão das argamassas atacadas não apresentou diferenças significativas entre si, conforme indicado pela análise estatística (ANOVA) e o teste de Duncan no Anexo 2 – Tabela 64 e Tabela 65. Entretanto, ao comparar com suas respectivas formulações não submetidas ao ataque, observou-se uma redução na resistência à compressão de todas as argamassas após 92 dias de exposição ao ataque ácido. As reduções foram de aproximadamente 11%, 25%, 28% e 22% entre as argamassas A-Ref, A A-CBC20, A A-CBC35 e A A-CBC50, respectivamente. Observou-se que a formulação A A-CBC35 apresentou maior queda de resistência em relação a sua respectiva formulação não atacada. Essa formulação apresentou maior absorção capilar em comparação às demais misturas, o que sugere uma estrutura mais vulnerável aos efeitos do ataque ácido. Observou-se que o desenvolvimento microestrutural dessa formulação apresentou um comportamento distinto em relação às demais, o que se refletiu de forma mais evidente nos resultados de absorção capilar, bem como nas absorvidades inicial e secundária. O teste t, aplicado para avaliar isoladamente as diferenças de resistência entre as argamassas, indicou que, embora a A-Ref atacada tenha apresentado redução na resistência de 11% em relação à A-Ref não atacada, essa diferença não foi estatisticamente significativa. Por outro lado, as demais argamassas apresentaram reduções de resistência estatisticamente significativas em relação às suas respectivas formulações, conforme Tabela 66 do Anexo 2.

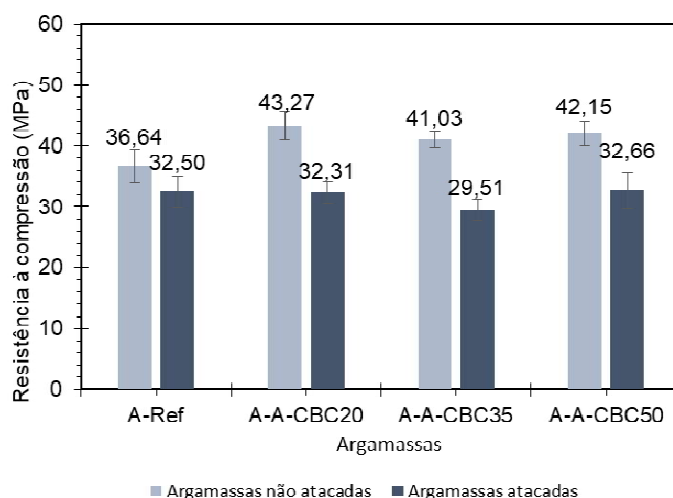


Figura 61: Valores de resistência à compressão média de argamassas não atacadas e atacadas aos 120 dias.

As argamassas contendo A-CBC sofreram quedas expressivas de resistência à compressão quando comparadas às formulações não atacadas. Como mencionado anteriormente, o ganho considerável de resistência observado aos 120 dias nas argamassas não atacadas contendo A-CBC foi atribuído à possível ação pozolânica (lenta) de partículas residuais do bagaço ainda presentes na areia artificial. Dessa forma, ao se iniciar o ataque com 28 dias de cura, é provável que a presença de sílica amorfa não reagida, por apresentar uma textura mais porosa, tenha favorecido a penetração do ácido na matriz, comprometendo a zona de transição entre a pasta cimentícia e os agregados. Esse efeito pode ter contribuído para a formação de regiões frágeis, intensificando a perda de resistência nas argamassas com A-CBC. Em ambientes ácidos, as partículas provenientes do bagaço podem não participar das reações pozolânicas, uma vez que a dissolução dos íons provenientes da pozolana, incluindo Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , bem como as redes de silicatos e alumino-silicatos, ocorre em condições de alta alcalinidade ($\text{pH} > 12$), conforme descrito por Cordeiro (2006).

Embora as argamassas com A-CBC tenham apresentado resistência inicial superior à da referência (43,27 MPa, 41,03 MPa e 42,15 MPa contra 36,64 MPa), todas atingiram valores similares após o ataque por ácido sulfúrico. Isso indica que a formulação com A-CBC sofreu uma redução percentual mais significativa (22% a 28%) do que a referência (11%). Apesar do excelente desempenho inicial, a maior perda de resistência observada após o ataque ácido indica que as argamassas com A-CBC

apresentaram menor estabilidade química frente a ambientes agressivos, sugerindo que a A-CBC, embora benéfica para resistência mecânica, pode tornar a matriz mais suscetível à degradação. Isso não inviabiliza sua aplicação, mas reforça a necessidade de uma avaliação criteriosa em contextos de exposição química severa. Um estudo conduzido por Jagadesh *et al.* (2019) indicou desempenho superior para a mistura com 15% de substituição por SCBA, em comparação ao concreto de referência. O concreto com 15% de cinza do bagaço de cana apresentou menor perda de resistência à compressão após exposição ao ácido sulfúrico. Segundo os autores, a presença de partículas mais finas da cinza contribuiu para o preenchimento dos poros, dificultando a penetração da solução ácida na matriz cimentícia. No entanto, o ensaio foi realizado exclusivamente para a dosagem com 15% de substituição, o que impede a avaliação do comportamento da mistura em teores maiores de SCBA.

Destaca-se a escassez de estudos voltados para esse contexto, especialmente no que diz respeito à influência da areia proveniente da cinza sobre os mecanismos de degradação quando submetida ao ataque ácido, bem como seu impacto no comportamento mecânico das argamassas. Tais aspectos requerem investigação mais aprofundada e devem ser considerados em pesquisas futuras.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

Com base nos resultados obtidos e nas análises desenvolvidas ao longo desta pesquisa, conclui-se que:

- O processo de separação densimétrica foi indispensável para reduzir os efeitos negativos causados pela presença excessiva de partículas originais de CBCA, que causam aumento na absorção de água, redução da massa específica no estado endurecido dos sistemas cimentícios e, conseqüentemente, queda da resistência à compressão em teores elevados de substituição.
- A produção de um agregado artificial com características semelhantes às de uma areia natural e distribuição granulométrica equivalente permitiu uma comparação adequada entre as argamassas, isolando possíveis efeitos decorrentes da diferença no tamanho dos grãos.
- O ensaio de absorção de água das areias permitiu verificar que ambas apresentaram valores menores de 1%, com a A-CBC apresentando uma porcentagem ligeiramente superior (0,96%, em contraste com 0,56% para A-NAT). A proximidade dos resultados foi possível devido a remoção das parcelas de cinza leve, contribuindo para que não houvesse alteração na trabalhabilidade das argamassas. Isso permitiu que todas as argamassas fossem moldadas com uma relação água/cimento fixa e com o mesmo teor de superplastificante, apresentando consistência dentro da faixa de 240 ± 10 mm.
- A análise de forma das partículas demonstrou semelhança nos resultados de esfericidade e arredondamento, o que também contribuiu para a trabalhabilidade semelhante entre as argamassas. A substituição da A-NAT pela A-CBC não resultou em alterações significativas desta característica, mesmo em níveis elevados de substituição, como 80% e 100%. O ensaio de compactação, por sua vez, apresentou resultados muito próximos entre a A-NAT (0,698) e a A-CBC (0,701).
- A composição química das areias demonstrou predominância de sílica, indicando elevada pureza dos agregados. Os baixos valores de perda ao fogo

sugerem que as areias apresentavam baixa contaminação por materiais carbonáceos e/ou matéria orgânica. A verificação da composição mineralógica das areias permitiu identificar picos característicos de quartzo em ambas as areias.

- O ensaio de resistência à compressão realizado aos 7, 28 e 120 dias permitiu avaliar a evolução das argamassas. Aos 7 dias as argamassas com até 80% de substituição não apresentaram diferenças significativas em relação à referência, exceto A-A-CBC100 que apresentou incremento de 11%. Aos 28 dias, as argamassas com até 50% de substituição não apresentaram diferenças significativas entre si. No entanto, aquelas com 65%, 80% e 100% de substituição mostraram incrementos significativos em relação à referência, de 17%, 26% e 22%, respectivamente. Aos 120 dias as três argamassas com maior presença de A-CBC apresentaram diferenças significativas em relação à referência, sendo o maior valor alcançado pela A-A-CBC100 com 51,7 MPa, que correspondeu a um incremento de 41% em comparação com A-Ref (36,6 MPa).
- As formulações com 35% e 50% de A-CBC apresentaram aumentos na absorção total de água de aproximadamente 4,5% e 5,2%, respectivamente, em comparação com a A-Ref. Esse aumento pode ser atribuído à maior absorção de água da A-CBC (0,96%), em relação à A-NAT (0,56%), refletindo-se nas argamassas com maiores teores de substituição. Os resultados de absorção capilar, bem como de absorvidade inicial e secundária, não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as argamassas, indicando que a substituição parcial da areia natural por cinza não comprometeu a estrutura capilar das argamassas.
- O ensaio de durabilidade ao ataque por ácido sulfúrico revelou perda de massa equivalente para as argamassas ao longo de 92 dias de exposição (A-Ref - 34,81%, A-A-CBC20 - 35,21%, A-A-CBC35 - 34,36% e A-A-CBC50 - 34,76), indicando que a matriz cimentícia manteve sua integridade independentemente do teor de substituição adotado, e desempenho estável frente ao meio agressivo. Ao comparar a absorção de água por imersão total das argamassas atacadas, os resultados são equivalentes, exceto para a argamassa com 20%

de substituição que apresentou redução de aproximadamente 6,5% na absorção de água em comparação à argamassa de referência atacada. Quando comparadas de forma isolada, as argamassas atacadas com suas respectivas formulações não atacadas, observou-se que apenas a A-A-CBC20 apresentou diferença estatisticamente significativa. Em relação a absorção capilar e absorvidade inicial e secundária, as argamassas não apresentaram diferenças significativas entre si, exceto a A-A-CBC35 que apresentou valores superiores. Esse comportamento sugere que a rede de poros capilares dessa composição se apresenta mais interligada e acessível, favorecendo a sucção inicial de água. Os resultados de resistência à compressão pós ataque não demonstraram diferenças significativas entre si, entretanto quando comparados com os resultados das argamassas não atacadas, as quedas das resistências foram superiores para as argamassas contendo A-CBC. Isso indica que a formulação com A-CBC sofreu uma redução percentual mais significativa da resistência à compressão (22% a 28%) do que a referência (11%). Tais evidências indicam que argamassas com A-CBC apresentam menor estabilidade química frente a ambientes agressivos, sugerindo que a A-CBC, embora benéfica para resistência mecânica, pode tornar a matriz mais suscetível à degradação.

Com base nas análises realizadas e nos resultados obtidos nesta pesquisa, conclui-se que a substituição parcial da areia natural por areia proveniente da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), até 50%, é viável para a produção de argamassas de alta resistência, desde que a granulometria seja controlada e as partículas fibrosas sejam removidas. Embora as argamassas com substituição acima de 50% até 100% tenham apresentado maiores ganhos de resistência à compressão, sua aplicação necessita de estudos adicionais para avaliar os demais desempenhos. Esse cenário representa uma oportunidade de aproveitamento para cinzas de menor qualidade, podendo contribuir como alternativa viável frente à crescente demanda por materiais de construção. Ressalta-se que o tratamento prévio da cinza é um fator essencial para garantir seu desempenho mecânico adequado. Em condições de

exposição química severa, o uso desse material não deve ser descartado, mas exige uma avaliação criteriosa quanto à durabilidade da matriz.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Neste estudo, foram aplicadas técnicas ainda pouco exploradas nesse contexto, como a separação densimétrica e a produção de um agregado miúdo artificial, com o objetivo de aproveitar todo o potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar — um resíduo de grande relevância gerado em larga escala no Brasil. No entanto, por se tratar de um material ainda pouco estudado, considera-se essencial a continuidade das pesquisas sobre o tema. Nesse sentido, sugerem-se os seguintes tópicos para investigações futuras:

- Aplicar os procedimentos adotados neste estudo a cinzas provenientes de diferentes caldeiras, com o objetivo de avaliar a eficácia do tratamento proposto frente à heterogeneidade do material.
- Realizar quantificação das fases amorfas presentes na cinza após a separação densimétrica, utilizando difração de raios X com padrão interno e refinamento pelo método de Rietveld, com o objetivo de estimar com maior precisão a proporção de material não cristalino ainda presente na fração tratada.
- Realizar análise térmica (TG/DTG) das argamassas com diferentes teores de substituição, com o objetivo de quantificar as fases hidratadas e avaliar possíveis alterações térmicas da matriz após exposição a agentes agressivos.
- Aplicar porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) para investigar a distribuição, volume e diâmetro dos poros, permitindo compreender melhor o impacto da substituição por areia de cinza do bagaço na microestrutura e na conectividade dos poros.
- Investigar a durabilidade das argamassas com CBCA frente a outros agentes agressivos, como cloretos, sulfatos, ciclos de molhagem/secagem e carbonatação.
- Avaliar o ciclo de vida e o impacto ambiental da substituição da areia natural pela CBCA, por meio de análises de sustentabilidade (ACV - Análise do Ciclo de Vida).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCARDE, A. R. Geração de energia elétrica. Embrapa, 23 fev. 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacaotecnologica/cultivos/cana/pos-producao/processamento-da-cana-de-acucar/geracao-de-energia-eletrica>>.

Acesso em: 20/07/2023.

AL-JABRI, K. S., HISADA, M., AL-ORAIMI, S. K., AL-SAIDY, A. H. Copper slag as sand replacement for high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 7, p. 483-488, 2009.

ALMEIDA, F. C. R., SALES A., MORETTI J. P., MENDES P. C. D. Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 31-38, 2015.

ALVARENGA, K. P., CORDEIRO, G. C. Evaluating sugarcane bagasse fly ash as a sustainable cement replacement for enhanced performance. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 20, p. 100751, 2024.

ANDREÃO, P. V., SULEIMAN, A. R., CORDEIRO, G. C., NEHDI, M. L. Sustainable use of sugarcane bagasse ash in cement-based materials. **Green Materials**, v. 7, p. 61-70, 2019.

ANDREÃO, P. V. Hidratação de sistemas cimentícios com cinzas do bagaço da cana-de-açúcar ultrafinas produzidas em queima conjugada e moagem controlada. **Dissertação de Mestrado**, UENF, Rio de Janeiro, p.126, 2018.

ARIF, E., CLARK, M. W., LAKE, N. Sugar cane bagasse ash from a high-efficiency co generation boiler as filler in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 692-703, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: **Determinação da massa específica do cimento**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: **Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: **Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7809: **Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9831: **Cimento Portland para poços petrolíferos - Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM ISSO 3310-1: **Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (ISO 3310-1, IDT)**. Rio de Janeiro, 2010.

ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C109/C109M- 21: **Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50mm] cube specimens)**. USA, 2021.

ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1585-20: **Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes**. PA, 2020.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção - Vol. 1**. Grupo GEN, 2019. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788521636632/>. Acesso em: 08/08/2023.

CABALAR, A. F., HASSAN, D. I., ABDULNAFAA, M. D. Use of waste ceramic tiles for road pavement subgrade. **Road Materials and Pavement Design**, v. 18, n. 4, p. 882-896, 2017.

CAU/AL, Conselho de Arquitetura e Urbanismo. A Importância de usar os agregados reciclados em obras. 21 out. 2020. Disponível em: <<https://www.cau.gov.br/?p=15679>>. Acesso em: 09/08/2023.

CHAVAN, R. R., KULKARNI, D. B. Performance of copper slag on strength properties as partial replace of fine aggregate in concrete mix design. **International Journal of Advanced Engineering and Research Studies**, v. 2, n. 4, p. 95-98, 2013.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. 29 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cana-de-acucar>>. Acesso em: 22/07/2025.

CONAMA. Resíduos da Construção Civil. Resolução 307, 2022. Disponível em: <<https://www.sinduscon-caxias.com.br/uploads/files/legfedresolucao307.pdf>>. Acesso em: 15/08/2023.

CORDEIRO G. C., TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. D. M. R. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 5, p. 410-418, 2008.

CORDEIRO, G. C. Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto. 2006. 445f. **Tese de doutorado** - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G. C., ANDREÃO, P. V., TAVARES, L. M. Pozzolanic properties of ultrafine sugar cane bagasse ash produced by controlled burning. **Heliyon**, v. 5, n. 10, p. e02713, 2019.

CORDEIRO, G. C., KURTIS, K. E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**, v. 97, p. 41-49, 2017.

CORDEIRO, G. C., DE ALVARENGA, L. M. S. C., ROCHA, C. A. A. Rheological and mechanical properties of concrete containing crushed granite fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 766-773, 2016.

CORDEIRO, G. C., TAVARES, L. M., TOLEDO FILHO, R. D. Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 269-275, 2016.

CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 10, p. 3301-3303, 2009.

CORDEIRO, G. C., PAIVA, O. A., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R., TAVARES, L. M. Long-Term Compressive Behavior of Concretes with Sugarcane Bagasse Ash as a Supplementary Cementitious Material. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 46, p. 564–573, 2018.

CORDEIRO, G. C., LINHARES, B. D. F., LEMOS, M. N. Production of a highly pozzolanic sugarcane bagasse ash via densimetric fractionation and ultrafine grinding. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 4, p. 49-58, 2022.

CRIADO, T. C., VIEIRA, G. D. S., LIMA, C. D. S., FERNANDES, J. A., FIGUEIREDO, A. C. C. D. Sustainable use of Sugarcane Bagasse Ash (SBA) in interlocking concrete pavements. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 4, 2024.

DAYO, A. A. Effect of sugarcane bagasse ash as fine aggregates on the flexural strength of concrete. **International Conference on Sustainable Development in Civil Engineering**, Pakistan, 2019.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: A scientific approach**. CRC Press, 1999.

DE SANDE, V. T., SADIQUE, M., PINEDA, P., BRAS, A., ATHERTON, W., RILEY, M. Potential use of sugar cane bagasse ash as sand replacement for durable concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 39, p. 102277, 2021.

DEBIEB, F., KENAI, S. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 886-893, 2008.

DING, Y., SHE, A., YAO, W. Investigation of water absorption behavior of recycled aggregates and its effect on concrete strength. **Materials**, v. 16, n. 13, p. 4505, 2023.

FABRO, F., GAVA, G. P., GRIGOLI, H. B., MENEGHETTI, L. C. Influence of fine aggregates particle shape in the concrete properties. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 4, p. 191-212, 2011.

FUTURE ECO. Como tornar sua obra sustentável utilizando agregados reciclados. 1 nov. 2024. Disponível em: <https://future.eco.br/blog/como-tornar-sua-obra-sustentavel-utilizando-agregados-reciclados?utm_source>. Acesso em: 14/09/2025.

GANIRON JR., T. U. Use of recycled glass bottles as fine aggregates in concrete mixture. **International Journal of Advanced Science and Technology**, v. 61, p. 17-28, 2013.

GOLDONI, A. G., PANDOLFO, L. M., GOMES, A. P., FOLLE, D., MARTINS, M. S., PANDOLFO, A. Avaliação de um método baseado em análise de imagens para obtenção de parâmetros de forma em grãos de areia de britagem. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, p. 577-590, 2015.

GOLLA, S. Y., GUNESAN, S., SAMAD, S. M. Durability properties of ceramic waste based concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 66, p. 2282-2287, 2022.

GUPTA, T., CHAUDHARY, S., SHARMA, R. K. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 562-574, 2014.

HUANG, P., HUANG, B., LI, J., WU, N., XU, Q. Application of sugar cane bagasse ash as filler in ultra-high performance concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 71, p. 106447, 2023.

JAGADESH, P., RAMACHANDRAMURTHY, A., MURUGESAN, R. Evaluation of mechanical properties of Sugar Cane Bagasse Ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 608-617, 2018.

JAGADESH, P., RAMACHANDRAMURTHY, A., MURUGESAN, R., KARTHIK PRABHU, T. Adaptability of sugar cane bagasse ash in mortar. **Journal of Building Materials and Structures**, v. 5, n. 2, p. 123-130, 2019.

KEERTHINARAYANA, S., SRINIVASAN, R. Study on strength and durability of concrete by partial replacement of fine aggregate using crushed spent fire bricks. **Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura**, v. 56, n. 2, p. 51-58, 2010.

KHAWAJA, S. A., JAVED, U., ZAFAR, T., RIAZ, M., ZAFAR, M. S., KHAN, M. K. Eco-friendly incorporation of sugarcane bagasse ash as partial replacement of sand in foam concrete. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 4, p. 100164, 2021.

LISBOA, E. S., ALVES, E. S., MELO, G. H. A. G. Materiais de construção: concreto e argamassa. Porto Alegre, 2017. Disponível em: [<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595020139/>](https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595020139/). Acesso em: 08/08/2023.

LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MINNU, S. N., BAHURUDEEN, A., ATHIRA, G. Comparison of sugarcane bagasse ash with fly ash and slag: An approach towards industrial acceptance of sugar industry waste in cleaner production of cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 285, p. 124836, 2021.

MODANI, P. O., VYAWAHARE, M. R. Utilization of bagasse ash as a partial replacement of fine aggregate in concrete. **Procedia Engineering**, v. 51, p. 25-29, 2013.

MORETTI, J. P., SALES, A., QUARCIONI, V. A., SILVA, D. C., OLIVEIRA, M. C., PINTO, N. S., RAMOS, L. W. Pore size distribution of mortars produced with agroindustrial waste. **Journal of Cleaner Production**, v.187, p. 473-484, 2018.

MORETTI, J. P., ALVES, V. M., SANTOS, R. C., SILVA, C. E. Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 317-323, 2016.

MT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 093/94: **Solos - determinação da densidade real**. 1994.

MUTHADHI, A., BANUPRIYA, S. Production of self-compacting concrete with fly ash using bagasse ash as fine aggregate. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, p. 1-14, 2022.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. 5. ed. Harlow: Pearson Education, 2011.

ONU News. Uso de areia deve ser estratégico para evitar impactos ambientais. 27 abril 2022. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2022/04/1787322>>. Acesso em: 15/07/2023.

PAIVA, O. A. Durabilidade de concretos contendo cinza do bagaço da cana-de açúcar. 2016. 282 f. **Tese de doutorado** - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2016.

PENTEADO, C. S. G., DE CARVALHO, E. V., LINTZ, R. C. C. Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 514-520, 2016.

RAFIEZONOOZ, M., MIRZA, J., SALIM, M. R., HUSSIN, M. W., KHANKHAJE, E. Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. **Construction and Building Materials**, v.116, p. 15-24, 2016.

RAÍZEN. O potencial da cana-de-açúcar na produção de energia limpa. 20 out. 2023. Disponível em: <<https://www.raizen.com.br/blog/potencial-da-cana-de-acucar>>. Acesso em: 22/07/2025.

RAJATHI, R. P., KANTH, J. J. Effect of crushed hardened concrete waste as replacement material for natural sand in concrete. **International Journal of Emerging Technologies and Engineering**, v. 1, n. 2, p. 45-50, 2014.

RAJU, M. M. P., ABOOBACKER, K. A. Strength performance of concrete using bottom ash as fine aggregate. **International Journal of Research in Engineering & Technology**, v. 2, n. 9, p. 111-122, 2014.

RAMAKRISHNAN, K., GANESH, V., VIGNESH, G., VIGNESH, M., SHRIRAM, V., SURYAPRAKASH, R. Mechanical and durability properties of concrete with partial replacement of fine aggregate by sugarcane bagasse ash (SCBA). **Materials Today: Proceedings**, v. 42, p. 1070-1076, 2021.

RENTIER, E. S., CAMMERAAT, L. H. The environmental impacts of river sand mining. **Science of the Total Environment**, v. 838, p. 155877, 2022.

SALES, A., LIMA, S. A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**, v. 30, n. 6, p. 1114-1122, 2010.

SCHMIDT, T., LOTHENBACH, B., ROMER, M., NEUENSCHWANDER, J., SCRIVENER, K. Physical and microstructural aspects of sulfate attack on ordinary and limestone blended Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 12, p. 1111-1121, 2009.

SHANKARAMURTHY, B. M., HASIUK, F., WANG, K., SARGAM, Y., LI, W. Influence of coarse aggregate pore structure on the pore structure and water absorption of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 491, p. 142751, 2025.

SIDDIQUE, R., SINGH, G., BELARBI, R., MOKHTAR, K. A., KUNAL. Comparative investigation on the influence of spent foundry sand as partial replacement of fine aggregates on the properties of two grades of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 83, p. 216-222, 2015.

SILVA, A. S. M. Dosagem de concreto pelos métodos de empacotamento compressível e Aitcin-Faury modificado. **Dissertação de Mestrado**, UFRJ, Rio de Janeiro, p. 152, 2004.

SINDUSCON-BC. Impactos da geração de resíduos de construção civil. 27 mai. 2021. Disponível em: <https://www.sindusconbc.com.br/impactos-da-geracao-de-residuos-de-construcao-civil/?utm_source=>> Acesso em: 14/09/2025.

SINGH, S., TIWARI, A., NAGAR, R., AGRAWAL, V., SOUZA, A. E. Feasibility as a potential substitute for natural sand: a comparative study between granite cutting waste and marble slurry. **Procedia Environmental Sciences**, v. 35, p. 571-582, 2016.

SOUZA, A. E., TEIXEIRA, S. R., SANTOS, G. T. A., COSTA, F. B., LONGO, E. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. **Journal of Environmental Management**, v. 92, p. 2774–2780, 2011.

SIQUEIRA, A. A., TOLEDO FILHO, R. D., CORDEIRO, G. C. Sulfuric acid attack of mortars containing blended cements with sugarcane bagasse ash and limestone filler. **Ambiente Construído**, v. 25, p. e140032, 2025.

SU, H., YANG, J., LING, T. C., GHATAORA, G. S., DIRAR, S. Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. **Journal of Cleaner Production**, v. 91, p. 288-296, 2015.

SUA-IAM, G., MAKUL, N. Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 57, p. 308-319, 2013.

SUBEDI, S., ARCE, G. A., NOORVAND, H., HASSAN, M. M., BARBATO, M., MOHAMMAD, L. N. Properties of engineered cementitious composites with raw sugarcane bagasse ash used as sand replacement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 9, p. 04021231, 2021.

SVERDRUP, H. U., KOCA, D., SCHLYTER, P. A simple system dynamics model for the global production rate of sand, gravel, crushed rock and stone, market prices and long-term supply embedded into the WORLD6 Model. **BioPhysical Economics and Resource Quality**, v. 2, 2017.

TAMMARO, R. Alta demanda pode fazer da areia um recurso escasso. *Jornal da USP*, São Paulo, 07 jul. 2021. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/atualidades/alta-demanda-pode-fazer-da-areia-um-recurso-escasso>>. Acesso em: 15/07/2023.

THOMAS, B. S., DAMARE, A., GUPTA, R. C. Strength and durability characteristics of copper tailing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 894-900, 2013.

UNEP, United Nations Environment Programme. Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources. 2019. Disponível em: <<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/28163>>. Acesso em: 15/08/2023.

UNICA, União Da Indústria de Cana-De-Açúcar e Bioenergia. Fotografia do setor sucroenergético no Brasil e os benefícios econômicos, ambientais e sociais gerados. 2023. Disponível em: <<https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=158>>. Acesso em: 22/07/2025.

WONGSA, A., ZAETANG, Y., SATA, V., CHINDAPRASIRT, P. Properties of lightweight fly ash geopolymer concrete containing bottom ash as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 637-643, 2016.

ZHAO, H., POON, C. S., LING, T. C. Utilizing recycled cathode ray tube funnel glass sand as river sand replacement in the high-density concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 51, p. 184-190, 2013.

ANEXO 1 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A seguir, apresentam-se as tabelas com os valores individuais de resistência à compressão das argamassas não atacadas aos 7, 28 e 120 dias, bem como das argamassas submetidas ao ataque aos 120 dias.

Tabela 18: Valores de resistência à compressão aos 7 dias.

Misturas	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Média (MPa)
A-Ref	24,62	27,36	26,66	26,21
A-A-CBC20	26,81	26,71	24,75	26,09
A-A-CBC35	23,67	24,88	24,64	24,40
A-A-CBC50	26,18	26,81	24,20	25,73
A-A-CBC65	26,56	23,12	26,99	25,56
A-A-CBC80	27,90	28,27	26,54	27,57
A-A-CBC100	29,42	29,26	28,61	29,10

Tabela 19: Valores de resistência à compressão aos 28 dias.

Misturas	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Média (MPa)
A-Ref	32,37	31,49	33,96	32,61
A-A-CBC20	29,82	36,23	36,35	34,13
A-A-CBC35	31,68	33,10	31,76	32,18
A-A-CBC50	33,60	33,66	34,75	34,00
A-A-CBC65	37,89	40,03	37,16	38,36
A-A-CBC80	41,93	37,90	43,76	41,20
A-A-CBC100	39,32	40,99	39,76	40,02

Tabela 20: Valores de resistência à compressão aos 120 dias.

Misturas	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Média (MPa)
A-Ref	34,00	36,44	39,48	36,64
A-A-CBC20	40,62	44,58	44,62	43,27
A-A-CBC35	40,39	40,16	42,54	41,03
A-A-CBC50	40,08	42,30	44,06	42,15
A-A-CBC65	47,04	48,92	44,16	46,71
A-A-CBC80	52,00	47,73	51,00	50,24
A-A-CBC100	51,46	50,61	52,99	51,69

Tabela 21: Valores de resistência à compressão aos 120 dias de argamassas atacadas.

Misturas	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	Média (MPa)
A-Ref	-	-	30,23	34,77	32,50
A-A-CBC20	33,14	30,53	33,87	31,71	32,31
A-A-CBC35	28,57	28,28	31,68	-	29,51
A-A-CBC50	-	35,82	30,07	32,1	32,66

Valores discrepantes foram desconsiderados.

ANEXO 2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA

A seguir, são apresentadas as tabelas referentes às análises estatísticas dos ensaios realizados. Essas tabelas foram organizadas com o objetivo de expor, de maneira clara e objetiva, os principais resultados obtidos a partir das análises conduzidas. Cada tabela contempla informações relevantes com indicadores que permitem avaliar a significância estatística dos resultados. Esses dados foram fundamentais para a interpretação do desempenho dos diferentes ensaios, possibilitando a identificação de tendências, variações e eventuais diferenças entre os grupos analisados.

Tabela 22: ANOVA para resistência à compressão aos 7 dias.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	6	6,97	4,37	2,85
Resíduo	14	1,59	-	
Total	20	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 23: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de resistência à compressão aos 7 dias.

Misturas	Média (MPa)	Grupo
A-Ref	26,21	AC
A-A-CBC20	26,09	AC
A-A-CBC35	24,40	C
A-A-CBC50	25,73	AC
A-A-CBC65	25,56	AC
A-A-CBC80	27,57	AB
A-A-CBC100	29,10	B

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 24: ANOVA para resistência à compressão aos 28 dias.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	6	41,15	10,09	2,85
Resíduo	14	4,08	-	
Total	20	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 25: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de resistência à compressão aos 28 dias.

Misturas	Média (MPa)	Grupo
A-Ref	32,61	B
A-A-CBC20	34,13	B
A-A-CBC35	32,18	B
A-A-CBC50	34,00	B
A-A-CBC65	38,36	A
A-A-CBC80	41,20	A
A-A-CBC100	40,02	A

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 26: ANOVA para resistência à compressão aos 120 dias.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	6	85,18	19,42	2,85
Resíduo	14	4,39	-	
Total	20	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 27: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de resistência à compressão aos 120 dias.

Misturas	Média (MPa)	Grupo
A-Ref	36,64	B
A-A-CBC20	43,27	DEG
A-A-CBC35	41,03	FG
A-A-CBC50	42,15	EF
A-A-CBC65	46,71	CD
A-A-CBC80	50,24	AC
A-A-CBC100	51,69	A

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 28: ANOVA para absorção por imersão total aos 120 dias.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	3	0,084	10,640	4,07
Resíduo	8	0,008	-	
Total	11	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 29: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de absorção por imersão total aos 120 dias.

Misturas	Média (%)	Grupo
A-Ref	7,08	B
A-A-CBC20	7,03	B
A-A-CBC35	6,83	A
A-A-CBC50	6,73	A

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 30: ANOVA para índice de vazios aos 120 dias.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	3	0,343	13,398	4,07
Resíduo	8	0,026	-	
Total	11	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 31: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de índice de vazios aos 120 dias.

Misturas	Média (%)	Grupo
A-Ref	14,6	B
A-A-CBC20	14,6	B
A-A-CBC35	14,2	A
A-A-CBC50	13,9	A

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 32: ANOVA para massa específica aos 120 dias.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	3	0,000	27,388	4,07
Resíduo	8	0,000	-	
Total	11	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 33: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de massa específica aos 120 dias.

Misturas	Média (g/cm³)	Grupo
A-Ref	2,43	C
A-A-CBC20	2,42	B
A-A-CBC35	2,42	A
A-A-CBC50	2,41	AB

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 34: ANOVA para absorção capilar aos 120 dias.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	3	0,032	0,188	4,07
Resíduo	8	0,171	-	
Total	11	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 35: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de absorção capilar aos 120 dias.

Misturas	Média (g/cm²)	Grupo
A-Ref	0,86	A
A-A-CBC20	0,87	A
A-A-CBC35	0,87	A
A-A-CBC50	0,85	A

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 36: ANOVA para absorvidade inicial aos 120 dias.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	3	0,00000075	0,90000000	4,07
Resíduo	8	0,00000085	-	
Total	11	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 37: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de absorvidade inicial aos 120 dias.

Misturas	Média (mm/s^{0,5})	Grupo
A-Ref	0,0012	A
A-A-CBC20	0,0012	A
A-A-CBC35	0,0012	A
A-A-CBC50	0,0011	A

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 38: ANOVA para absorvidade secundária aos 120 dias.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	3	0,00000010	0,68253968	4,07
Resíduo	8	0,00000014	-	
Total	11	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 39: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de absorvidade secundária aos 120 dias.

Misturas	Média (mm/s^{0,5})	Grupo
A-Ref	0,0006	A
A-A-CBC20	0,0006	A
A-A-CBC35	0,0007	A
A-A-CBC50	0,0006	A

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 40: ANOVA para variação de massa aos 28 dias de ataque.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	3	0,76	2,36	3,1
Resíduo	20	0,32	-	
Total	23	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 41: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de variação de massa aos 28 dias de ataque.

Misturas	Média (%)	Grupo
A-Ref	9,5	AC
A-A-CBC20	9,2	C
A-A-CBC35	10,0	B
A-A-CBC50	9,9	ABC

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 42: ANOVA para variação de massa aos 56 dias de ataque.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	3	0,70	0,30	3,1
Resíduo	20	2,35	-	
Total	23	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 43: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de variação de massa aos 56 dias de ataque.

Misturas	Média (%)	Grupo
A-Ref	28,9	A
A-A-CBC20	29,3	A
A-A-CBC35	29,2	A
A-A-CBC50	29,7	A

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 44: ANOVA para variação de massa aos 92 dias de ataque.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	3	0,72	0,41	3,1
Resíduo	20	1,78	-	
Total	23	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 45: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de variação de massa aos 92 dias de ataque.

Misturas	Média (%)	Grupo
A-Ref	34,8	A
A-A-CBC20	35,2	A
A-A-CBC35	34,4	A
A-A-CBC50	34,8	A

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 46: ANOVA para absorção por imersão total após 92 dias de ataque.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	3	0,16	6,22	3,49
Resíduo	12	0,03	-	
Total	15	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 47: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de absorção por imersão total após 92 dias de ataque.

Misturas	Média (%)	Grupo
A-Ref	6,93	A
A-A-CBC20	6,47	B
A-A-CBC35	6,84	A
A-A-CBC50	6,83	A

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 48: Teste t de Student aplicado para comparar a absorção por imersão total entre cada mistura não atacada e sua respectiva mistura atacada.

Argamassa	n	Média	p-valor (bicaudal)	Diferença significativa $\alpha = 0,05$
A-Ref (Não atacada)	3	6,73	0,0875	Não
A-Ref (atacada)	4	6,93		
A-A-CBC20 (Não atacada)	3	6,83	0,0006	Sim
A-A-CBC20 (atacada)	4	6,47		
A-A-CBC35 (Não atacada)	3	7,03	0,1738	Não
A-A-CBC35 (atacada)	4	6,84		
A-A-CBC50 (Não atacada)	3	7,08	0,0901	Não
A-A-CBC50 (atacada)	4	6,83		

n = quantidade de corpos de prova; p-valor = probabilidade de diferença ocorrer ao acaso.

Tabela 49: ANOVA para índice de vazios após 92 dias de ataque.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	3	0,69	6,23	3,49
Resíduo	12	0,11	-	
Total	15	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 50: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de índice de vazios após 92 dias de ataque.

Misturas	Média (%)	Grupo
A-Ref	12,08	A
A-A-CBC20	11,09	B
A-A-CBC35	11,75	A
A-A-CBC50	11,72	A

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 51: Teste t de Student aplicado para comparar o índice de vazios entre cada mistura não atacada e sua respectiva mistura atacada.

Argamassa	n	Média	p-valor (bicaudal)	Diferença significativa $\alpha = 0,05$
A-Ref (Não atacada)	3	13,92	0,00055	Sim
A-Ref (atacada)	4	12,07		
A-A-CBC20 (Não atacada)	3	14,16	0,00002	Sim
A-A-CBC20 (atacada)	4	11,08		
A-A-CBC35 (Não atacada)	3	14,56	0,00012	Sim
A-A-CBC35 (atacada)	4	11,75		
A-A-CBC50 (Não atacada)	3	14,64	0,00005	Sim
A-A-CBC50 (atacada)	4	11,72		

n = quantidade de corpos de prova; p-valor = probabilidade de diferença ocorrer ao acaso.

Tabela 52: ANOVA para massa específica após 92 dias de ataque.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	3	0,003	5,90	3,49
Resíduo	12	0,000	-	
Total	15	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 53: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de massa específica após 92 dias de ataque.

Misturas	Média (g/cm ³)	Grupo
A-Ref	2,35	B
A-A-CBC20	2,40	A
A-A-CBC35	2,40	A
A-A-CBC50	2,40	A

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 54: Teste t de Student aplicado para comparar a massa específica entre cada mistura não atacada e sua respectiva mistura atacada.

Argamassa	n	Média	p-valor (bicaudal)	Diferença significativa $\alpha = 0,05$
A-Ref (Não atacada)	3	2,41	0,013	Sim
A-Ref (atacada)	4	2,35		
A-A-CBC20 (Não atacada)	3	2,42	0,238	Não
A-A-CBC20 (atacada)	4	2,40		
A-A-CBC35 (Não atacada)	3	2,43	0,067	Não
A-A-CBC35 (atacada)	4	2,40		
A-A-CBC50 (Não atacada)	3	2,42	0,106	Não
A-A-CBC50 (atacada)	4	2,40		

n = quantidade de corpos de prova; p-valor = probabilidade de diferença ocorrer ao acaso.

Tabela 55: ANOVA para absorção por capilaridade após 92 dias de ataque.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	3	1,749	7,561	4,07
Resíduo	8	0,231	-	
Total	11	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 56: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de absorção por capilaridade após 92 dias de ataque.

Misturas	Média (g/cm ²)	Grupo
A-Ref	0,89	A
A-A-CBC20	0,88	AB
A-A-CBC35	1,04	B
A-A-CBC50	0,97	B

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 57: Teste t de Student aplicado para comparar a absorção capilar entre cada mistura não atacada e sua respectiva mistura atacada.

Argamassa	n	Média	p-valor (bicaudal)	Diferença significativa $\alpha = 0,05$
A-Ref (Não atacada)	3	0,86	0,2273	Não
A-Ref (atacada)	3	0,89		
A-A-CBC20 (Não atacada)	3	0,87	0,9014	Não
A-A-CBC20 (atacada)	3	0,88		
A-A-CBC35 (Não atacada)	3	0,87	0,0033	Sim
A-A-CBC35 (atacada)	3	1,04		
A-A-CBC50 (Não atacada)	3	0,85	0,0662	Não
A-A-CBC50 (atacada)	3	0,97		

n = quantidade de corpos de prova; p-valor = probabilidade de diferença ocorrer ao acaso.

Tabela 58: ANOVA para absorvidade inicial após 92 dias de ataque.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	3	0,00001364	5,11458333	4,07
Resíduo	8	0,00000267	-	
Total	11	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 59: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de absorvidade inicial após 92 dias de ataque.

Misturas	Média (mm/s ^{0,5})	Grupo
A-Ref	0,012	A
A-A-CBC20	0,012	A
A-A-CBC35	0,016	B
A-A-CBC50	0,013	A

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 60: Teste t de Student aplicado para comparar a absorvidade inicial entre cada mistura não atacada e sua respectiva mistura atacada.

Argamassa	n	Média	p-valor (bicaudal)	Diferença significativa $\alpha = 0,05$
A-Ref (Não atacada)	3	0,012	0,6495	Não
A-Ref (atacada)	3	0,012		
A-A-CBC20 (Não atacada)	3	0,012	1,0000	Não
A-A-CBC20 (atacada)	3	0,012		
A-A-CBC35 (Não atacada)	3	0,012	0,0228	Sim
A-A-CBC35 (atacada)	3	0,016		
A-A-CBC50 (Não atacada)	3	0,011	0,1561	Não
A-A-CBC50 (atacada)	3	0,013		

n = quantidade de corpos de prova; p-valor = probabilidade de diferença ocorrer ao acaso.

Tabela 61: ANOVA para absorvidade secundária após 92 dias de ataque.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	3	0,00000280	7,78395062	4,07
Resíduo	8	0,00000036	-	
Total	11	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 62: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de absorvidade secundária após 92 dias de ataque.

Misturas	Média (mm/s ^{0,5})	Grupo
A-Ref	0,007	A
A-A-CBC20	0,007	A
A-A-CBC35	0,009	B
A-A-CBC50	0,008	A

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 63: Teste t de Student aplicado para comparar a absorvidade secundária entre cada mistura não atacada e sua respectiva mistura atacada.

Argamassa	n	Média	p-valor (bicaudal)	Diferença significativa $\alpha = 0,05$
A-Ref (Não atacada)	3	0,006	0,2108	Não
A-Ref (atacada)	3	0,007		
A-A-CBC20 (Não atacada)	3	0,006	0,4168	Não
A-A-CBC20 (atacada)	3	0,007		
A-A-CBC35 (Não atacada)	3	0,007	0,0129	Sim
A-A-CBC35 (atacada)	3	0,009		
A-A-CBC50 (Não atacada)	3	0,006	0,1111	Não
A-A-CBC50 (atacada)	3	0,008		

n = quantidade de corpos de prova; p-valor = probabilidade de diferença ocorrer ao acaso.

Tabela 64: ANOVA para resistência à compressão após 92 dias de ataque.

Fator	Grau de liberdade	Média quadrada	Fcalc	Ftab (5%)
Tratamento	3	8,97	2,10	3,49
Resíduo	12	4,28	-	
Total	15	-	-	

Tratamento = variáveis testadas; Fcalc = valor de F calculado; Ftab = valor de F tabelado ao nível de significância de 5%.

Tabela 65: Testes de comparações múltiplas de Duncan para os resultados de resistência à compressão após 92 dias de ataque.

Misturas	Média (MPa)	Grupo
A-Ref	32,50	A
A-A-CBC20	32,31	A
A-A-CBC35	29,51	A
A-A-CBC50	32,66	A

Médias seguidas de letras diferentes diferem significativamente pelo teste de Duncan, adotando-se um nível de significância de 5%.

Tabela 66: Teste t de Student aplicado para comparar a resistência à compressão entre cada mistura não atacada e sua respectiva mistura atacada.

Argamassa	n	Média	p-valor (bicaudal)	Diferença significativa $\alpha = 0,05$
A-Ref (Não atacada)	3	36,64	0,1092	Não
A-Ref (atacada)	4	32,50		
A-A-CBC20 (Não atacada)	3	43,27	0,0042	Sim
A-A-CBC20 (atacada)	4	32,31		
A-A-CBC35 (Não atacada)	3	41,03	0,0002	Sim
A-A-CBC35 (atacada)	4	29,51		
A-A-CBC50 (Não atacada)	3	42,15	0,0025	Sim
A-A-CBC50 (atacada)	4	32,66		

n = quantidade de corpos de prova; p-valor = probabilidade de diferença ocorrer ao acaso.