

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS PATO BRANCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGE**

**ALINE CRISTIANE KUMPFER NASCIMENTO**

**AVALIAÇÃO DO USO DA CINZA DE CASCA DE ARROZ RESIDUAL NO  
TRATAMENTO DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO**

**DISSERTAÇÃO**

**PATO BRANCO**

**2023**

ALINE CRISTIANE KUMPFER NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO DO USO DA CINZA DE CASCA DE ARROZ RESIDUAL NO  
TRATAMENTO DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO**

**Evaluation of the use of residual rice husk ash in the treatment of recycled  
concrete aggregate**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Materiais e Componentes da Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Ilo Pereira Filho

PATO BRANCO

2023



[4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



ALINE CRISTIANE KUMPFER NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO DO USO DA CINZA DE CASCA DE ARROZ RESIDUAL NO TRATAMENTO DO AGREGADO REICLADO DE CONCRETO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Materiais E Engenharia De Estruturas.

Data de aprovação: 18 de Maio de 2023

Dr. Jose Ilo Pereira Filho, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Caroline Angulski Da Luz, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Eduardo Roberto Batiston, Doutorado - Universidade Comunitária da Região de Chapecó (Unochapecó)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 18/05/2023.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus pelas oportunidades e obstáculos que me permitiram evoluir e entender a importância e grandeza de estar inserida na ciência.

À minha família: pai Valdemar, mãe Marlei e irmãos Adriele, Alisson e Marlon, por todo apoio, dedicação e privações que enfrentamos juntos durante toda nossa caminhada. À vocês todas as minhas conquistas, vitórias, amor e agradecimentos todos os dias. Também minha família, mas meu melhor amigo, Pietro, por toda doçura, momentos felizes e de desafio que me fizeram amadurecer e buscar crescer como ser humano e profissional.

Ao meu companheiro Fernando, por todo apoio diário, dividindo os pontos altos e baixos desse desafio, me dando força e ajuda sempre que necessárias, com paciência e entusiasmo. Obrigada por caminhar junto comigo de mãos dadas.

Ao meu professor orientador José Ilo Pereira Filho, que me orientou com paciência e dedicação desde a graduação até o fim deste mestrado. Muito obrigada por facilitar minha caminhada, permitindo que eu criasse, experimentasse e crescesse dentro da pesquisa.

À minha branca, professora Caroline Angulski da Luz e professor Eduardo Batiston pelas contribuições e orientações técnicas de grande valia para desenvolvimento deste trabalho. À professora Caroline, agradeço também por todos os ensinamentos e inspiração durante todos esses anos como aluna na UTFPR.

Aos colegas do laboratório de materiais da UTFPR – Pato Branco, pela troca de conhecimento e amizade, em especial à Katia Eloiza Rocha por toda ajuda na realização dos ensaios, mas principalmente pelo apoio e encorajamento para conclusão desta etapa.

À Central de Análises da UTFPR- Campus Pato Branco, à Central Analítica Multiusuário da UTFPR – Campus Medianeira, em especial ao professor Paulo Bittencourt, ao Laboratório de Geotecnia da UTFPR – Campus Curitiba, em especial ao Felipe Perreto, e ao Laboratório H005 da Engenharia Mecânica da UTFPR- Pato Branco, em especial à Professora Maria Nalu, pelas contribuições aos ensaios deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001, pelo auxílio financeiro durante esta especialização.



“Nada o impedia. Exceto ele próprio”  
O Alquimista – Paulo Coelho

## RESUMO

O uso de agregados reciclados de concreto (ARC) na produção de novas estruturas, vem sendo investigado a fim de minimizar a disposição incorreta dos resíduos de construção e demolição e também como forma de reduzir a exploração de agregados de jazidas naturais. Entretanto, as propriedades dos ARC são inferiores daquelas encontradas nos agregados naturais devido à argamassa residual porosa e enfraquecida que integra este material. Essa condição afeta de forma negativa as propriedades dos concretos produzidos com agregados reciclados. Neste contexto, técnicas de remoção e/ou fortalecimento da argamassa residual vêm sendo exploradas, visando a melhora da performance dos ARC. Uma dessas técnicas é o tratamento de imersão em misturas pozolânicas em que materiais como sílica ativa, metacaulim e cinzas volantes são utilizados proporcionando uma camada de fortalecimento no agregado e preenchendo vazios da argamassa residual. À vista disso, a presente pesquisa propôs investigar a substituição desses materiais comerciais pela cinza de casca de arroz (CCA) residual. Para isso, a cinza foi tratada através da moagem e requeima, caracterizada fisicamente e através de ensaios de índice de atividade pozolânica (IAP), calorimetria isotérmica, e TG/DTG para analisar o melhor tratamento, tempo ideal de moagem ou temperatura de requeima, sendo que a CCA-30, moída por 30 minutos, a que propiciou o melhor desempenho mecânico no IAP e escolhida para o tratamento do ARC. Posteriormente, os ARC foram tratados em diferentes misturas pozolânica de cimento Portland e CCA, nas proporções 50-50, 70-30, 90-10 e 100% de cimento. Além das amostras tratadas, uma amostra padrão não recebeu tratamento para fins de comparação. Após o tratamento, os agregados foram caracterizados fisicamente e grupos de concreto foram produzidos para quantificar suas propriedades mecânicas e da nova zona interfacial (ITZ). A partir do programa experimental observou-se que o tratamento propiciou melhora nas propriedades dos agregados tratados e respectivas zonas ITZ, mas sem trazer melhora significativa às propriedades mecânicas dos concretos produzidos com os mesmos.

**Palavras-chave:** Cinza de casca de arroz (CCA); Finura; Temperatura de requeima; Agregado reciclado de concreto (ARC); Reação pozolânica.

## ABSTRACT

The use of recycled concrete aggregates (RCA) in the production of new structures has been investigated in order to minimize the incorrect disposal of construction and demolition waste, and also as a way to reduce the exploitation of aggregates from natural resources. However, the properties of the RCA are inferior to those found in natural aggregates due to the porous and weakened residual mortar present in this material. This condition negatively affects the properties of concrete produced with recycled aggregates. In this context, techniques for removing and/or strengthening the residual mortar have been explored to improve the performance of RCA. One of these techniques is the immersion treatment in pozzolanic mixtures in which materials such as silica fume, metakaolin and fly ashes are used providing a strengthening layer around the aggregate and also filling voids in the residual mortar. In view of this, the present research proposed to investigate the replacement of these commercial materials by residual rice husk ash (RHA). For this, the ash was treated through grinding and reburning, and physically characterized and through isothermal calorimetry tests, pozzolanic activity index and XRD and TG/DTG analysis to choose the ideal grinding time or reburning temperature. It was concluded that the CCA-30, milled for 30 minutes, provided the best mechanical performance in the pozzolanic activity index and was chosen for the treatment of RCA. Subsequently, the RCA were treated in different pozzolanic mixtures of Portland cement and RHA, in proportions 50-50, 70-30, 90-10 and 100% of cement. In addition to the treated samples, a standard sample received no treatment for comparison purposes. After the treatment, the aggregates were physically characterized, and concrete groups were produced to quantify their mechanical properties and the quality of the new ITZ. From the experimental program it was observed that the treatment provided improvement in the properties of the treated aggregates and respective ITZ zones, but without bringing significant improvement to the mechanical properties of the concretes produced with them.

**Keywords:** Rice husk ash (RHA); Fineness; Reburning temperature; Recycled concrete aggregate (RCA); pozzolanic reaction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - RCD coletado por ano.....	23
Figura 2 - Composição RCD coletado.....	24
Figura 3 - Estrutura ARC.....	26
Figura 4 - Superfície ARC.....	26
Figura 5 - Partículas com ligação fraca na superfície do ARC.....	27
Figura 6 - Representação ITZ entre agregado e pasta de cimento.....	31
Figura 7 - Zonas de transição do concreto com (a) agregado natural; e (b) ARC.....	32
Figura 8 - Microestrutura ITZ concreto com (a) agregado natural; (b) ARC.....	32
Figura 9 - Microestrutura concreto produzido com ARC.....	33
Figura 10 - Microtomografia de raios X do ARC.....	33
Figura 11 - Microscopia eletrônica de varredura dos agregados miúdos (a) natural; (b) reciclado.....	34
Figura 12 - Microscopia eletrônica de varredura do ARC tratado com ácido clorídrico (a) sem tratamento (b) 0,1 mol (c) 0,5 mol (d) 0,8 mol.....	38
Figura 13 - Esquema de tratamento dos ARC com pozolanas.....	40
Figura 14 - Superfície e ITZ de ARC a)pré e b) pós tratamento com sílica ativa.....	42
Figura 15 - Microtomografia de raios X do ARC após tratamento com mistura de cinza volante e sílica ativa.....	43
Figura 16 - Esquema análise de nano indentação na ITZ de concreto produzido com ARC.....	44
Figura 17 - Análise termogravimétrica de pastas de a) CPV-ARI e b) CPV-ARI+sílica de casca de arroz após 28 dias de cura.....	47
Figura 18 - Teores de água quimicamente combinada como hidratos, portlandita remanescente e calcita formada por carbonatação nas diferentes pastas de cimento com adições minerais, após 28 dias de cura.....	48
Figura 19 - a) CCA antes da moagem contendo b) epiderme interna e externa e c) estrutura interna porosa.....	51
Figura 20 - Análise mineralógica CCA sob diferentes temperaturas de queima.....	52
Figura 21 - DRX CCA residual.....	53
Figura 22 - DRX CCA residual.....	53
Figura 23 - DRX de CCA sob diferentes tempos de moagem.....	55
Figura 24 - Distribuição granulométrica CCA residual moída.....	56

Figura 25 - Distribuição de poros CCA sob diferentes tempos de moagem.....	56
Figura 26 - Plano de trabalho.....	58
Figura 27 - Análise granulométrica agregados.....	60
Figura 28 - Roteiro de ensaios para escolha da CCA.....	61
Figura 29 - Moinho de bolas constituído por a) jarro e ferragens b) bolas de alumina e c) motor e rolos giratórios.....	63
Figura 30 - CCA residual a) CCA-RES; e moída b) CCA-15 c) CCA-30 d) CCA-1H e) CCA-2H.....	64
Figura 31 - CCA requeimada a) CCA-300 b) CCA-400 c) CCA-500 d) CCA-600.....	65
Figura 32 - a) Filtro Büchner e bomba a vácuo acoplada.....	69
Figura 33 - Ensaios de Caracterização ARC.....	71
Figura 34 - Produção e ensaios concretos de ARC.....	73
Figura 35 - Curvas de Abrams.....	75
Figura 36 - Microdurômetro Vickers.....	78
Figura 37 - Teste de micro dureza Vickers a) Plano de corte b) polimento c) amostra polida d) indentação.....	79
Figura 38 - Amostras ensaio microdureza Vickers a) Brita 1, b) ARC, c) C-100, d) C-CCA-90-10, e) C-CCA-70-30.....	80
Figura 39 - DRX CCA.....	82
Figura 40 - Distribuição granulométrica CCA.....	85
Figura 41 - MEV cinzas a) CCA-RES; b) CCA-15; c) CCA-30; d) CCA-1H; e) CCA-2H; f) CCA-300; g) CCA-400; h) CCA-500 e i) CCA-600.....	86
Figura 42 - Resistência à compressão das argamassas contendo CCA tratadas aos 7 dias.....	89
Figura 43 - Resistência à compressão das argamassas contendo CCA tratadas aos 28 dias.....	90
Figura 44 - Resistência à compressão das argamassas contendo CCA tratadas aos 91 dias.....	91
Figura 45 - Curvas de fluxo de calor pastas.....	92
Figura 46 - Curvas calor acumulado pastas.....	94
Figura 47 - Análise termogravimétrica pastas a) REF, b) CCA-RES, c) CCA-15, d) CCA-30, e) CCA-1H e f) CCA-2H.....	96
Figura 48 - Perda de massa referente a a) C-S-H/Aft, b) Portlandita e c) calcita.....	99
Figura 49 - Agregados após a imersão em soluções pozolânicas a) C-100 b) C-CCA-	

90-10 c) C- CCA-70-30 e d) C-CCA-50-50.....	102
Figura 50 - Agregados tratados após o período de cura de 3 dias a) C-100 b) C-CCA-90-10 c) C- CCA-70-30 e d) C-CCA-50-50 .....	103
Figura 51 - Absorção de água, porosidade e Abrasão Los Angeles agregados .....	105
Figura 52 - MEV a) ARC b) C-100 c) C-CCA-90-10 d) C-CCA-70-30 e e) C-CCA-50-50 .....	107
Figura 53 - DRX superfície agregados reciclados .....	109
Figura 54 - Resistência à compressão concretos aos 3, 7 e 28 dias .....	111
Figura 55 - Resistência à tração concretos aos 28 dias.....	113
Figura 56 - Módulo de elasticidade concretos aos 28 dias.....	114
Figura 57 – Microdureza Vickers aos 91 dias.....	115

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de resíduos de construção e demolição .....	21
Tabela 2 - Valores limites para contaminantes.....	25
Tabela 3 - Requisitos Granulométricos ARC.....	28
Tabela 4 - Absorção de água e Densidade de ARC de Concretos de Diferentes Resistências .....	29
Tabela 5 - Trabalhos recentes com uso de ARC em concreto	continua....
.....	36
Tabela 6 - Variações do tratamento com pozolanas .....	41
Tabela 7 - Requisitos químicos e físico-mecânicos para conformidade dos materiais pozolânicos .....	45
Tabela 8 - Composição química CCA residual.....	54
Tabela 9 - Componentes químicos e características físicas cimentos .....	59
Tabela 10 - Granulometria da areia normal IPT .....	60
Tabela 11 - Dosagem argamassas de referência e com CCA .....	67
Tabela 12 - Proporção de materiais para tratamento do ARC .....	70
Tabela 13 - Proporções das misturas para produção de concreto .....	76
Tabela 14 - Composição química CCA .....	83
Tabela 15 - Massa específica e superfície específica CCA .....	84
Tabela 16 - Diâmetro médio CCA moída .....	85
Tabela 17 - Teor de superplastificante e espalhamento.....	88
Tabela 18 - Valores referentes ao período de indução e fluxo de calor máximo das pastas.....	93
Tabela 19 - Calor acumulado pastas.....	95
Tabela 20 - Densidade agregados .....	104
Tabela 21 - Slump test .....	110
Tabela 22 – Resumo propriedades cinzas moídas em comparação à CCA residual .....	116
Tabela 23 – Resumo propriedades cinzas requeimadas em comparação à CCA residual.....	117
Tabela 24 – Resumo propriedades agregados e concretos.....	118
Tabela 25 - Resumo estatístico resistência à compressão argamassas aos 7, 28 e 91 dias.....	131

Tabela 26 - Teste Tukey resistência à compressão aos 7 dias.....	133
Tabela 27 - Teste Tukey resistência à compressão aos 28 dias.....	134
Tabela 28 - Teste Tukey resistência à compressão aos 91 dias.....	135
Tabela 29 - Perdas de massa em porcentagem das pastas .....	136
Tabela 30 - Perdas de massa corrigidas em porcentagem das pastas.....	136
Tabela 31 - Resistência à compressão concretos aos 3, 7 e 28 dias.....	137
Tabela 32 - Teste Tukey resistência à compressão aos 3 dias.....	138
Tabela 33 - Teste Tukey resistência à compressão aos 7 dias.....	138
Tabela 34 - Teste Tukey resistência à compressão aos 28 dias.....	139
Tabela 35 - Resistência à tração por compressão concretos aos 28 dias .....	140
Tabela 36 - Teste Tukey resistência à tração na compressão aos 28 dias.....	140
Tabela 37 - Módulo de elasticidade aos 28 dias .....	141
Tabela 38 - Teste Tukey módulo de elasticidade aos 28 dias.....	141
Tabela 39 - Microdureza Vicker concretos aos 91 dias.....	142
Tabela 40 - Teste Tukey microdureza Vickers aos 91 dias.....	142



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBCS: Conselho Brasileiro de Construção Sustentável

RCD: resíduo de construção e demolição

Abelpre: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ARC: agregado reciclado de concreto

ITZ: zona interfacial agregado-argamassa

CH: hidróxido de cálcio/Portlandita

C-S-H: silicato de cálcio hidratado

CCA: cinza de casca de arroz

SiO<sub>2</sub>: dióxido de silício

NBR: Norma brasileira

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

PNRS: Política Nacional de Resíduos Sólidos

ABRECON: Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

PAIC: Pesquisa Anual da Indústria da Construção

EPA: Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

UEPG: Associação Europeia de Agregados

MEV: Microscopia eletrônica de varredura

a/c: relação água cimento

DIN: Deutsches Institut für Normung

BS: *British Standard*

HCl: ácido clorídrico

CH<sub>3</sub>COOH: ácido acético

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: ácido sulfúrico

H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>: ácido fosfórico

CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono

CaCO<sub>3</sub>: carbonato de cálcio

NTZ: nova zona de transição

C<sub>3</sub>S: alita/silicato tricálcico

C<sub>2</sub>S: belita/silicato bicálcico

C<sub>3</sub>A: aluminato tricálcico

C<sub>4</sub>AF: ferro aluminato de cálcio

Af<sub>t</sub>: etringita

CAH: aluminato de cálcio hidratado

AF<sub>m</sub>: monossulfato de cálcio hidratado

DRX: difração de raios X

TG/DTG: termogravimetria/ termogravimetria diferencial

CPV-ARI: Cimento Portland de alta resistência inicial

FAO: *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

USDA: United States Department of Agriculture

Conab: Companhia Nacional do Abastecimento

IRRI: Instituto Internacional de Pesquisas em Arroz

MIP: *Mercury Intrusion Porosimetry*

CPII-F-32: Cimento Portland com adição de filler carbonático

FRX: Fluorescência de Raios X

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	Objetivos	20
1.1.1	Objetivo Geral	20
1.1.2	Objetivos Específicos	20
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>21</b>
2.1	Resíduos de construção e demolição	21
2.1.1	Geração de resíduos	22
2.1.2	Reciclagem de RCD e Produção de Agregados Reciclados	24
2.2	Agregado reciclados de concreto (ARC): propriedades	25
2.2.1	Argamassa aderida	25
2.2.2	Granulometria	27
2.2.3	Absorção de água, porosidade e densidade	28
2.2.4	Resistência à abrasão	30
2.2.5	Microestrutura do ARC	30
2.3	Propriedades dos concretos produzidos com ARC	34
2.4	Técnicas de melhoramento dos ARC	37
2.4.1	Tratamento do RCD com material pozolânico	40
2.5	Materiais pozolânicos	44
2.5.1	Classificação e nomenclatura	44
2.5.2	Hidratação do cimento e a reação pozolânica	46
2.6	Cinza de casca de arroz	49
2.6.1	Propriedades da CCA	50
2.6.2	Influência dos tratamentos físico e térmico nas propriedades da CCA residual	54
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>58</b>
3.1	Materiais	58
3.1.1	Cimento Portland	58
3.1.2	Agregado graúdo e miúdo	59
3.1.3	Cinza de casca de arroz	60
3.2	Métodos	61
3.2.1	Caracterização e escolha da CCA	61
3.2.1.1	Difração de Raios x – análise mineralógica	62
3.2.1.2	Fluorescência de raios X – análise química	62
3.2.1.3	Moagem	63
3.2.1.4	Requeima	65

3.2.1.5	Massa específica e superfície específica .....	66
3.2.1.6	Difração a laser e microscopia eletrônica de varredura das cinzas .....	66
3.2.1.7	Índice de atividade pozolânica com cimento Portland .....	67
3.2.1.8	Calorimetria isotérmica.....	68
3.2.1.9	Processo de interrupção da hidratação .....	68
3.2.1.10	Análise Termogravimétrica e Termogravimétrica Derivada TG/DTG .....	69
3.2.2	Tratamento do ARC por imersão em solução de CCA e cimento .....	69
3.2.3	Caracterização dos ARC antes e depois do tratamento .....	70
3.2.3.1	Massa específica, absorção de água e porosidade .....	71
3.2.3.2	Abrasão Los Angeles .....	71
3.2.3.3	DRX Superfície ARC .....	72
3.2.3.4	Microscopia Eletrônica de Varredura: Superfície ARC .....	73
3.2.4	Produção do concreto e ensaios em estado fresco e endurecido.....	73
3.2.4.1	Dosagem e produção dos concretos com ARC .....	74
3.2.4.2	Resistência à Compressão Axial.....	76
3.2.4.3	Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	77
3.2.4.4	Módulo de Elasticidade .....	77
3.2.4.5	Microdureza Vickers.....	78
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>81</b>
4.1	Caracterização da cinza de casca de arroz residual.....	81
4.1.1	Difração de Raios X – análise mineralógica .....	81
4.1.2	Fluorescência de raios X- análise química .....	82
4.1.3	Massa específica e superfície específica .....	83
4.1.4	Difração à laser e microscopia eletrônica de varredura .....	84
4.1.5	Índice de atividade pozolânica com cimento Portland .....	88
4.1.6	Calorimetria isotérmica.....	91
4.1.7	Análise termogravimétrica e termogravimétrica derivada TG/DTG .....	95
4.1.8	Escolha da cinza para o tratamento dos ARC .....	101
4.2	Caracterização dos ARC antes e depois do tratamento .....	102
4.2.1	Densidade, absorção de água e abrasão Los Angeles.....	104
4.2.2	MEV superfície dos agregados .....	107
4.2.3	DRX superfície dos agregados.....	108
4.3	Ensaio do concreto: estado fresco e endurecido .....	110
4.3.1	Trabalhabilidade.....	110
4.3.2	Resistência à compressão .....	111
4.3.3	Resistência à tração por compressão diametral .....	112

4.3.4	Módulo de elasticidade.....	113
4.3.5	Microdureza Vickers.....	114
4.4	Análise geral dos Resultados.....	1146
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>119</b>
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	11420
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>121</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>131</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>136</b>
	<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>137</b>
	<b>APÊNDICE D.....</b>	<b>140</b>
	<b>APÊNDICE E.....</b>	<b>141</b>
	<b>APÊNDICE F.....</b>	<b>142</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A maior parcela de agregados utilizados na produção de concretos é de origem natural, escavados de pedreiras ou dragados de leitos de rio, o que leva à perda ecológicas (JOSEPH et al., 2015). O uso desses agregados primários, areia e brita, causa efeitos irreversíveis ao meio ambiente como a destruição de florestas (BOSTANCI et al., 2018)

O consumo de recursos naturais pela indústria da construção civil chega a valores de 75% entre todas as indústrias (CBCS, 2020), o que leva a uma preocupação quanto a depredação e possível escassez de matérias primas, trazendo uma maior relevância para as soluções sustentáveis. A utilização de resíduos de construção e demolição, os RCD, vem sendo discutida e aplicada. Segundo o Panorama Abelpre, no ano de 2020 os serviços de limpeza dos municípios brasileiros fizeram a coleta de mais de 40 milhões de toneladas de RCD.

Em alternativa, a reciclagem dos resíduos é uma oportunidade para a absorção desse material pela própria indústria geradora, o que contribui para diminuição da extração de minerais e necessidade de aterros para disposição final do RCD. O agregado reciclado de concreto (ARC) é um dos materiais produzidos através da reciclagem do RCD e que pode ser utilizado para substituir os agregados naturais na produção de novos produtos cimentados.

Uma das principais dificuldades de se trabalhar com os ARC é a sua natureza heterogênea, diferente dos agregados naturais que geralmente têm a mesma origem, os ARC são produzidos de concretos de múltiplas origens e qualidades, o que leva à variação das propriedades entre os lotes. Comparado aos agregados naturais, o ARC possui características físicas de absorção, densidade e resistência ao desgaste inferiores devido a grande quantidade de argamassa residual presente em sua superfície, podendo variar de 25 a 70% dependendo do métodos de moagem e origem do concreto (BARBUDO et al., 2012). Essa argamassa antiga é altamente porosa e apresenta microfissuras devido ao processo de moagem, o que confere porosidade e absorção elevadas dos ARC (BOSTANCI et al., 2018).

As características físicas dos agregados reciclados, como a alta absorção de água e resistência ao desgaste, inferior à dos agregados naturais, também conferem aos concretos com ARC propriedades mecânicas inferiores (ETXEBERRIA, 2020).

A alta absorção de água da argamassa residual limita a água de hidratação

da matriz, conferindo ao novo concreto uma zona de transição agregado-argamassa (ITZ) enfraquecida devido à reduzida formação de hidratos nesta região. A nova ITZ entre o ARC (argamassa residual) e a pasta de cimento apresenta baixa densificação de compostos hidratados, sendo formada principalmente por hidróxido de cálcio (CH), de baixa área superficial, e agulhas de etringita, tendo baixa presença de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), composto de alta área superficial específica e que confere resistência mecânica às matrizes de cimento (HU et al., 2021).

Desta forma, estando menos densificada e com menor dureza, a ITZ se torna a ligação fraca entre o ARC e a pasta de cimento prejudicando a performance do novo concreto (TAM et al., 2021).

Neste contexto, a fim de promover uma melhor aceitação e utilização desse material através do melhoramento, e possível padronização do mesmo, uma vez que as normas limitam sua utilização em torno de 30% de substituição do agregado natural, técnicas de melhoramento do ARC vêm sendo investigadas. Essas técnicas buscam a diminuição da absorção de água através do preenchimento de poros e fissuras, e também da remoção de micro partículas fracamente ligadas, e podem ser divididas entre tratamentos de remoção parcial/total e/ou fortalecimento da argamassa residual (BAI et al., 2020).

Os tratamentos de remoção parcial ou total, promovem uma limpeza do ARC, removendo partículas fracamente ligadas e porções de alta porosidade e baixa resistência da argamassa residual. Entre essas técnicas podem ser citados o uso de ácidos (WANG et al., 2017) e de rebitagem (BHASYA; BHARATKUMAR; 2018), entretanto são técnicas de baixa viabilidade devido à questões de segurança e de gasto energético.

De outra forma, os tratamentos de fortalecimento da argamassa antiga podem ser feitos por técnicas como a carbonatação (ZHAN et al., 2014), biomineralização (SALMAN RAIS; KHAN; 2021), coatings com materiais mineralizantes (WANG et al., 2022), cimentantes, como o cimento sulfoaluminoso (ZHANG et al., 2021) e as misturas pozolânicas (SHABAN et al., 2019), objeto de estudo da presente pesquisa.

O método de pré-imersão em misturas pozolânicas é uma das soluções que modificam a superfície do agregado, melhorando a sua qualidade. A técnica consiste na preparação de uma pasta de cimento e pozolana, ou apenas pozolana e água, de baixa viscosidade onde o ARC é imerso por tempo determinado e posteriormente retirado para secagem e cura sob condições e tempos definidos (SASANIPOUR;

ASLANI, 2020).

Os ARC são imersos em pastas de cimento contendo materiais pozolânicos como cinzas volantes, sílica ativa, metacaulim, zeólita, nano sílica e escória de alto forno (SHABAN et al., 2019; SASANIPOUR; ASLANI; 2020; HU; HE; FAN; et al., 2021) que trabalham como micro filler, preenchendo os poros e fissuras da superfície dos ARC, e por serem materiais pozolânicos, consomem os cristais de hidróxido de cálcio, formando silicato de cálcio hidratado (SHI et al., 2016), que preenchem os vazios da argamassa antiga do agregado diminuindo a porosidade e aumentando a resistência da superfície do agregado (BUI et al., 2018).

Deste modo a nova ITZ, entre ARC tratado e nova matriz, se torna mais densificada e com maior dureza. Condições que conferem melhores propriedades mecânicas aos concretos, comparado àqueles produzidos com ARC não tratado (SHI et al., 2018).

A cinza de casca de arroz (CCA), um material pozolânico, apresenta resultados positivos quando utilizada como substituição/adição na produção de argamassas e concretos. A combustão da casca de arroz para secagem e parboilização deste cereal ao ar livre produz uma CCA residual contendo entre 85% e 98% de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) (SHI et al., 2018).

À vista disso, a CCA residual apresenta grande potencial de aplicação como material pozolânico devido a esse alto teor de sílica. Ademais, as sílicas produzidas através da queima para beneficiamento do grão, à temperaturas entre 600 e 800°C, apresentam alta reatividade devido às consideráveis quantidades de sílica amorfa e alta área superficial específica, esta última propiciada pela alta porosidade da casca (XU et al., 2012).

Além do caráter amorfo da CCA residual, a sua moagem é capaz de diminuir a porosidade interna através da quebra dos grãos em partículas finas, propiciando além de uma multiplicação dos pontos de nucleação da pasta, uma redução na demanda de água de amassamento (XU et al., 2015). Sem alterar o amorfismo da CCA residual, o tratamento térmico através da requeima também se mostrou uma forma de beneficiamento para que este material residual tenha uma maior absorção, uma vez que propicia uma diminuição dos teores de carbono residual (POUEY, 2006)

A partir desta premissa, visando uma maior utilização da CCA residual, material abundantemente produzido durante o beneficiamento do grão, o presente trabalho objetiva utilizar a CCA residual em substituição aos materiais pozolânicos



comerciais no tratamento da superfície dos agregados reciclados de concreto no método de imersão em misturas pozolânicas. Foram comparados os tratamentos físico, através de diferentes tempos de moagem, e térmico, através de diferentes temperaturas de requeima, da CCA residual. Após a escolha do beneficiamento ideal, a CCA residual foi utilizada no tratamento pozolânico do ARC, sendo a influência do mesmo nas características físicas dos agregados e nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com ARC tratados investigada.

## **1.1 Objetivos**

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o uso da CCA residual no tratamento por mistura pozolânica na melhoria do agregado reciclado de concreto.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral deste trabalho seja atingido, os seguintes objetivos específicos são definidos:

1. Caracterizar a CCA residual avaliando tempos de moagem e temperaturas de requeima para se obter sua melhor capacidade pozolânica.
2. Analisar as propriedades físicas e químicas dos agregados reciclados antes e depois do tratamento com a CCA escolhida;
3. Avaliar e comparar as propriedades mecânicas e de microestrutura dos concretos produzidos com os ARC tratados e não tratados;

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Resíduos de construção e demolição

A resolução nº 307 do CONAMA, define como resíduos da construção civil, os RCC, aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha. Geralmente compostos por materiais pesados e volumosos.

O CONAMA classifica os resíduos de construção e demolição, RCD (nomenclatura mais encontrada na literatura e adotada para nomear os resíduos da construção civil no presente trabalho), em quatro classes: A, B, C e D. A Tabela 1 apresenta as classes e os resíduos que as compõem.

**Tabela 1 - Classes de resíduos de construção e demolição**

<b>Classe</b>	<b>Composição</b>
Classe A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;
Classe B	Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;
Classe C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
Classe D	Resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde

**Fonte: Adaptado de Resolução CONAMA nº307**

Os resíduos de Classe A são aqueles que podem ser reutilizados e/ou reciclados como agregados. Como agregado utilizado, o RCD é somente peneirado, não sendo submetido a nenhum tipo de tratamento: processo de cominuição, lavagem, ou outro método. Por outro lado, quando reciclado, o resíduo de construção

é beneficiado por processos de moagem, lavagem e peneiramento. Esses processos de beneficiamento permitem a transformação do RCD em matéria-prima/produto que pode ser reintroduzida na indústria de construção.

A resolução nº 307 do CONAMA estabelece ainda diretrizes sobre os projetos de gerenciamento de resíduos. Os geradores devem priorizar a não produção e/ou diminuição do volume produzido de resíduos. Outra diretriz de relevância, é a proibição da disposição do RCD em aterros de resíduos domiciliares, bota foras e áreas não licenciadas.

Realizada de acordo com a natureza física, composição química, riscos potenciais ao meio ambiente, bem como a origem dos resíduos, a classificação, segundo a NBR 10004 (ABNT 2004), dos RCC em sua maioria é enquadrada na classe IIB dos resíduos inertes, sendo considerados não perigosos.

A lei 12305 PNRS - 2010 de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos categoriza como responsáveis do RCD não somente os geradores, mas também os compradores finais de imóveis. A mesma lei ainda prevê a implantação de programas de logística reversa e de coleta seletiva dos resíduos, fiscalização e incentivo às cooperativas de reciclagem.

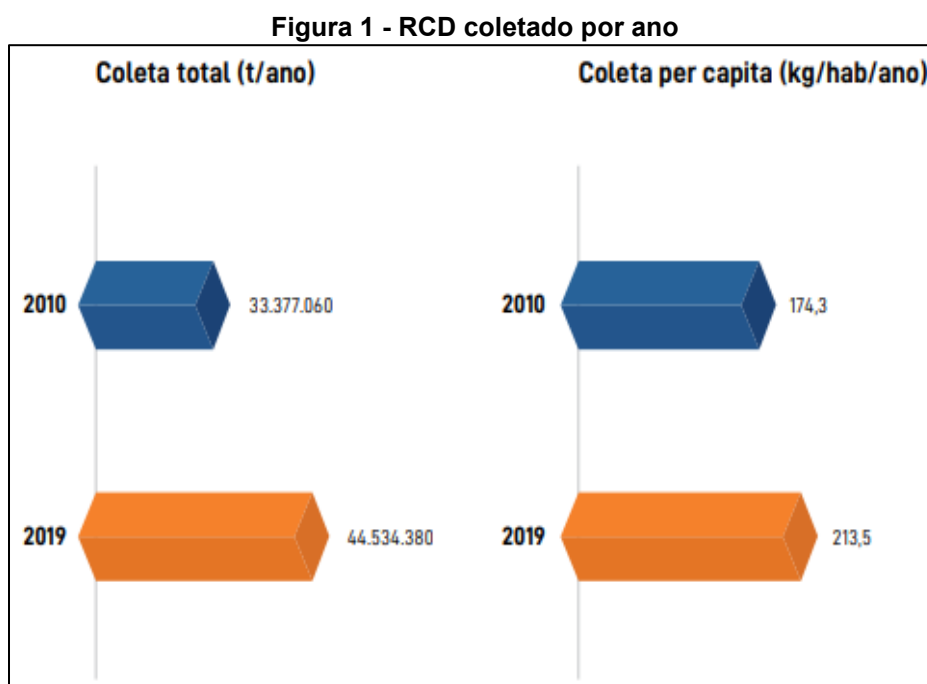
O número de usinas soma atualmente, segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição – ABRECON, mais de 300 empreendimentos cadastrados do setor: aterros de inertes e usinas de reciclagem de RCD com ATT(área de transbordo de triagem) e aterros.

### 2.1.1 Geração de resíduos

O desenvolvimento das cidades e o constante processo de urbanização são fatores que alimentam a produção da construção civil. Segundo a Pesquisa Anual da Indústria da Construção – PAIC, ao final do ano de 2019 no Brasil existiam aproximadamente 125 mil empresas construtoras ativas, ocupando 1,9 milhões de empregos, com um consumo de 56 milhões de reais em materiais de construção. É pertinente afirmar que a economia está intimamente ligada à produção de materiais e o consumo dos mesmos na construção civil. Segundo o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável – CBCS, a construção civil é a indústria que mais consome recursos naturais, chegando ao valor de 75% desse consumo.

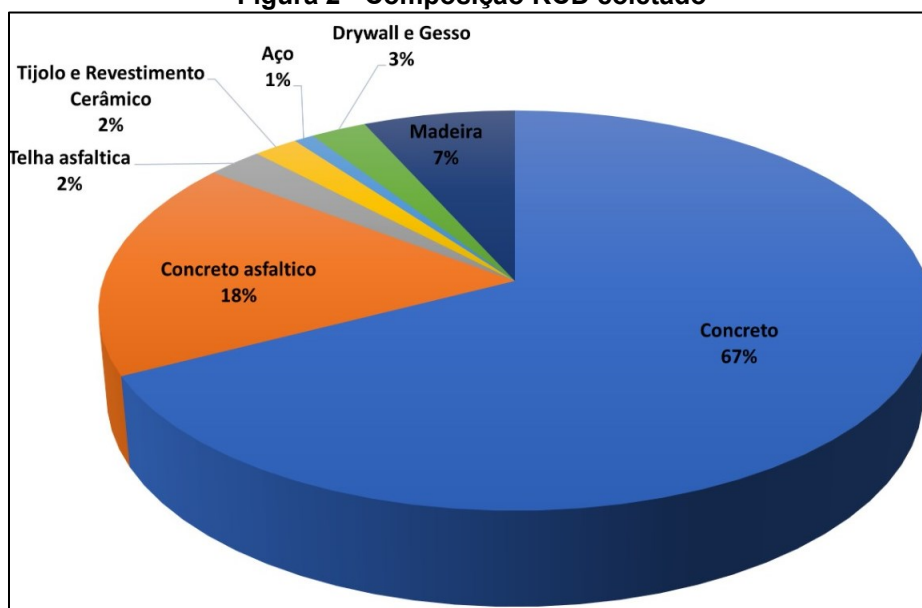
Em paralelo, como em outros setores industriais, a geração de resíduos

acompanha a magnitude da produção. Com o crescimento das construções há também o crescimento da produção de resíduos. Segundo o Panorama Abrelpe 2020, no ano de 2019 foram coletados pelos serviços de limpeza dos municípios mais de 44 milhões de toneladas de RCD. É possível verificar na Figura 1, que a quantidade coletada per capita cresceu 22,5%, e a geração total de RCD 33,4% entre os anos de 2010 e 2019. Importante destacar que esse valor é aquele contabilizado de forma regulamentada, sem considerar os resíduos dispostos de forma irregular.



Fonte: Abrelpe (2020)

Nos EUA, no ano de 2018 foram produzidas 600 milhões de toneladas de RCD, de acordo com o relatório da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – EPA. A composição desse material é apresentada na Figura 2, sendo em sua maioria formado por resíduos de concreto, totalizando 67,5%.

**Figura 2 - Composição RCD coletado**

Fonte: EPA (2018)

### 2.1.2 Reciclagem de RCD e Produção de Agregados Reciclados

A possível escassez de matérias primas, a constante geração de resíduos e emissão de poluentes têm trazido uma maior relevância para o estudo e criação de soluções mais sustentáveis. A utilização de resíduos de construção e demolição, os RCD, vem sendo discutida e aplicada.

Para que o RCD seja absorvido pela indústria ele é submetido a um novo ciclo de produção, onde é coletado, transportado, separado, triturado, peneirado, armazenado e por fim reutilizado.

Segundo a NBR 15116:2021, os agregados reciclados são aqueles oriundos do beneficiamento de resíduos de Classe A e que precisam apresentar características específicas para aplicação em obras de engenharia. A norma ainda define como agregados reciclados de concreto, ARC, aqueles obtidos pelo beneficiamento do resíduo predominantemente de concreto.

O ARC pode ter origem da produção de concretos ou de estruturas antigas de concreto, e vem recebendo uma atenção crescente de pesquisadores e até mesmo já sendo utilizados em grande escala em alguns países devido ao seu potencial de aplicação em novas estruturas.

De acordo com Associação Europeia de Agregados (UEPG, 2021), a produção de agregados secundários, como são definidos pelo órgão os agregados reutilizados e reciclados, representaram 9,3% da produção total no ano de 2019 nos

países da União Europeia. Em países como França, Reino Unido, Holanda e Bélgica, os agregados reciclados já representam 18, 24, 25 e 29% respectivamente, da produção total de agregados.

Para ser utilizado como agregado na produção de concretos e argamassas, a NBR 15116:2021 determina que o ARC não deve apresentar substâncias contaminantes, que venham a interferir no comportamento do concreto durante a hidratação dos produtos cimentícios, nem afetar a durabilidade da estrutura. São levantados como contaminantes pela mesma norma: materiais indesejáveis de natureza orgânica (madeiras, plásticos, betumes) e inorgânica (metais, vidros, cerâmica branca esmaltada e gesso), torrões de argila, bem como sulfatos e cloretos. Valores limites desses materiais são descritos na Tabela 2.

**Tabela 2 - Valores limites para contaminantes**

Contaminantes		Limite (%)
Materiais Indesejáveis	Teor	<1
Argila em torrões	Teor	<3
Sulfatos	Teor	<0,1
Cloretos	Teor para concreto simples	<0,2
	Teor para concreto armado	<0,1
	Teor para concreto protendido	<0,01

**Fonte: Adaptado de Tabela 3 NBR 15116:2021**

Respeitando os valores estabelecidos, o RCD pode substituir parcialmente ou totalmente os agregados naturais na produção de novos concretos. Além disso, é uma alternativa amigável ao meio ambiente, pois gera uma conseqüente diminuição da exploração de agregados naturais.

## **2.2 Agregado reciclados de concreto (ARC): propriedades**

### **2.2.1 Argamassa aderida**

Por ser formado a partir de resíduo de concreto reciclado, o ARC possui em sua constituição uma camada de argamassa antiga aderida ao agregado virgem. Na Figura 3 é possível verificar a estrutura de um agregado reciclado de concreto, o qual é composto de agregado natural, miúdo e/ou graúdo, utilizados na produção do concreto de origem, parcialmente cobertos com a argamassa de cimento residual,

também do concreto de origem (BAI et al., 2020).

**Figura 3 - Estrutura ARC**

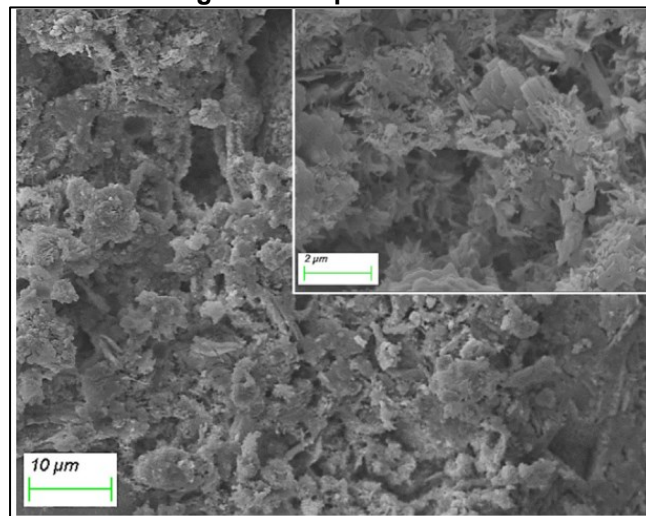


Fonte: Bai et al. (2020)

Diferentes estudos vêm sendo desenvolvidos visando a aplicação dos ARC em concretos com fins estruturais. Entretanto, o uso desse material ainda é restrito à obras de pavimentação como sub-base e em concretos não-estruturais (XUAN et al., 2016).

Esse comprometimento de performance é associado à quantidade de argamassa residual aderida ao agregado natural, que pode variar de 25 a 70% dependendo do método de cominuição e origem do concreto (BARBUDO et al., 2012). Em adição, essa argamassa é porosa e possui microfissuras, originadas durante o processo de moagem (WANG et al., 2017). Na Figura 4, é apresentada uma imagem de MEV da superfície do ARC, onde é possível verificar a natureza porosa da argamassa aderida após a moagem.

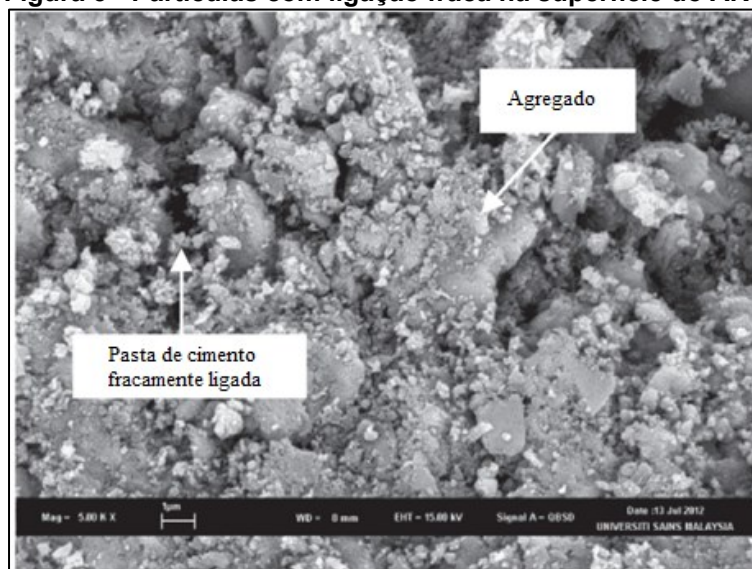
**Figura 4 - Superfície ARC**



Fonte: Wang et al., (2019)

Ismail e Ramli (2013) verificaram que além da superfície do ARC ser altamente porosa, há também a presença de partículas fracamente ligadas, devido ao processo de moagem. O processo de cominuição gera a quebra da argamassa aderida, enfraquecendo a ligação de pequenos fragmentos, além da geração de material pulverulento que recobre o agregado. É possível visualizar essa morfologia da superfície do ARC através da Figura 5.

**Figura 5 - Partículas com ligação fraca na superfície do ARC**



**Fonte: Ismail; Ramli, (2013)**

Poucos trabalhos apresentam o teor de argamassa aderida, mas se atentam a outras propriedades ligadas a esse material residual. De Juan e Gutiérrez (2009), concluíram através de uma revisão bibliográfica, que existe uma relação entre a quantidade de argamassa aderida e propriedades essenciais dos agregados reciclados. Entre elas pode-se citar:

- Quanto menor o tamanho do agregado, maior o teor de argamassa aderida, com valores entre 33–55% para agregados miúdos e 23–44% para agregados graúdos.

- Quando maior o teor de argamassa aderida, menor é a densidade do material, e conseqüente maior a absorção de água, devido à porosidade da argamassa ser maior que do agregado natural;

### 2.2.2 Granulometria

A granulometria dos materiais utilizados na produção de concretos tem



influência direta sobre a trabalhabilidade. Quanto maior o teor de finos, maior a coesão e menor a fluidez do material. A NBR 15116:2021, determina os intervalos de distribuição granulométrica recomendados para aplicação do ARC em matrizes cimentícias, conforme intervalos apresentados na Tabela 3. A norma também limita o teor de finos (partículas <0,75mm) em 10 e 12% para concretos submetidos e protegidos de desgaste superficial, respectivamente.

**Tabela 3 - Requisitos Granulométricos ARC**

<b>Agregado</b>	<b>Granulometria</b>	<b>Requisito</b>	<b>Método de Ensaio</b>
Graúdo	4,75/12,5mm	Tabela 4 NBR 7211	ABNT NBR NM 248
	9,5/25mm		
	19/31,5mm		
	37,5/75mm		
	25/50mm		
Miúdo	Zona utilizável	Tabela 2 e 4 NBR 7211	ABNT NBR NM 248
	Zona ótima		

**Fonte: Adaptado da Tabela 4 NBR 15116:2021**

### 2.2.3 Absorção de água, porosidade e densidade

Ao que se refere à absorção de água, os ARC apresentam valores superiores aos apresentados por agregados naturais onde a absorção é em torno 0,5-1% (RAO et al., 2007). Os valores encontrados na literatura apresentam grande variação, entre 1,65-8% (FAN et al., 2013; ISMAIL; RAMLI, 2013; ZHAN et al., 2013; JOSEPH et al., 2015; XUAN et al., 2016; KURAD et al., 2017; BUI et al., 2018; BOSTANCI et al., 2018; WANG et al., 2019) para os agregados reciclados, dependendo da quantidade de argamassa aderida, processo de cominuição e tipo do concreto utilizado para produção.

Essa tendência de valores superiores de absorção são associados ao alto teor de argamassa aderida e a alta porosidade deste material. Fator que geralmente leva à produção de concretos com resistências, durabilidade e propriedades de deformação e retração inferiores (Tam et al., 2021), sendo fator determinante na qualidade do agregado. Posto isso, a NBR 15116:2021 limita os valores de absorção dos agregados reciclados de concreto a 7%, quando utilizados na produção de argamassa e concretos.

Na Tabela 4 são apresentados valores de absorção de água e densidade (saturado superfície seca), para agregados reciclados de 10 e 20mm, de concretos de origem de diferentes resistências à compressão. Os agregados reciclados de maior dimensão (20 mm) apresentaram para todas as resistências, valores de absorção entre 22 e 37% inferiores, e valores de densidade entre 2 e 5 % maiores, quando comparados aos agregados reciclados de menor dimensão (10 mm). É possível verificar que o tamanho de partícula dos agregados influencia diretamente os valores de densidade e absorção de água.

**Tabela 4 - Absorção de água e Densidade de ARC de Concretos de Diferentes Resistências**

Tipo de Agregado	Resistência à Compressão 28 dias (MPa)	Absorção de Água (%)		Densidade (Saturada Superfície Seca) (kg/m <sup>3</sup> )	
		10mm	20mm	10mm	20mm
Natural	-	1,1	1,1	2,62	2,62
30MPa	35,8	8,63	5,48	2,31	2,44
45MPa	51,1	6,97	4,86	2,40	2,48
30Mpa	61,8	6,88	5,29	2,38	2,43
80Mpa	87,9	6,70	4,97	2,39	2,49
100Mpa	101,7	7,74	6,04	2,36	2,44

Fonte: Adaptado de Kou; Poon, (2011)

Como os agregados reciclados de concreto absorvem quantidades consideráveis de água devido o caráter poroso, impactam negativamente a relação água/cimento (a/c) da mistura (JOSEPH et al., 2015). A água efetiva para o processo de hidratação é absorvida pelo ARC nas primeiras horas, prejudicando a água de hidratação dos compostos de todo o conjunto e principalmente na região entre agregado e argamassa. Criando uma ITZ fraca e pouco densificada (ISMAIL; RAMLI, 2013).

Por esse motivo, a NBR 15116:2021 recomenda a pré-molhagem dos agregados (miúdo e graúdo) ou compensação de água, a fim de ajustar propriedades reológicas como trabalhabilidade, consistência, perda de abatimento e hidratação do concreto. Sob essas condições os ARC podem ser utilizados em condição saturada superfície seca (SSS), ou compensando a água absorvida pelo agregado sem contabilizar esse acréscimo no cálculo da relação a/c.

#### 2.2.4 Resistência à abrasão

A resistência ao desgaste do ARC, ao que se refere ao manuseio, empilhamento e mistura, é obtido através do ensaio de resistência à abrasão Los Angeles descrito pela NBR 16974:2021. Os valores recomendados para desgaste de agregados graúdos para uso em concretos não devem ultrapassar o limite de 50% em massa do material segundo a NBR 7211:2022.

O nível de desgaste que o agregado sofre no ensaio de abrasão Los Angeles varia de acordo com a composição e natureza do material, sendo esperada uma grande correlação entre as propriedades físicas e a perda por abrasão dos agregados (TUNC; ALYAMAC 2019).

Usualmente, agregados de origem natural apresentam valores de abrasão Los Angeles inferiores àqueles apresentados por agregados reciclados, como os de concreto. Saravanakumar et al., (2016) compararam a resistência ao desgaste entre agregados naturais graníticos e agregados reciclados de concretos produzidos com agregados graníticos, sendo que o agregado natural apresentou metade do desgaste apresentado pelo agregado reciclado: 25% e 49% respectivamente. Também comparando valores de abrasão Los Angeles entre agregados naturais e reciclados, Alqarni et al., (2021) obteve resultados significativamente superiores para os ARC: 22% e 38% respectivamente. Os autores também mencionam uma leve diminuição no tamanho de partículas dos agregados naturais ao todo, enquanto os agregados reciclados são altamente desgastados.

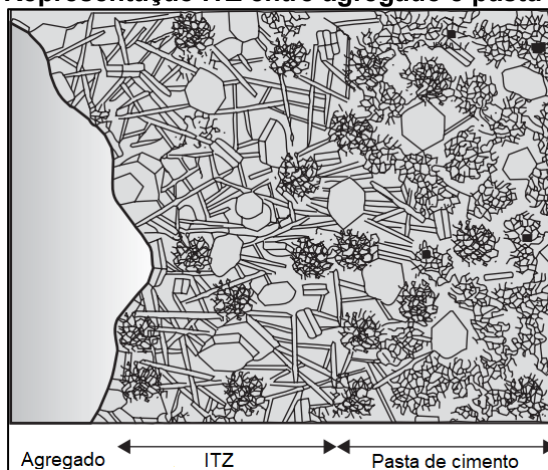
#### 2.2.5 Microestrutura do ARC

O concreto é geralmente considerado um material composto por duas fases: os agregados e a matriz cimentícia (pasta de cimento). Entretanto, uma terceira fase deve ser considerada: a zona de transição agregado/pasta – ITZ. Esta é considerada uma das zonas mais importantes e de maior influência na resistência mecânica do concreto, uma vez que quanto melhor densificação e coesão dessa ligação, maior a resistência do concreto (SAHRAEI MOGHADAM et al., 2021).

Mesmo nos concretos com agregado natural, a ITZ formada entre agregado e pasta de cimento é caracterizada pela presença de cristais de hidróxido de cálcio (CH) e agulhas de etringita. Há também uma reduzida presença de C-S-H próximo do

agregado. Essa concentração de silicato de cálcio hidratado se densifica com o aumento da profundidade dentro da pasta (MEHTA; MONTEIRO 2006). A representação da morfologia da ITZ é ilustrada na Figura 6, onde o CH tem formato de placas hexagonais, a etringita de agulhas e o C-S-H de arbustos.

**Figura 6 - Representação ITZ entre agregado e pasta de cimento**

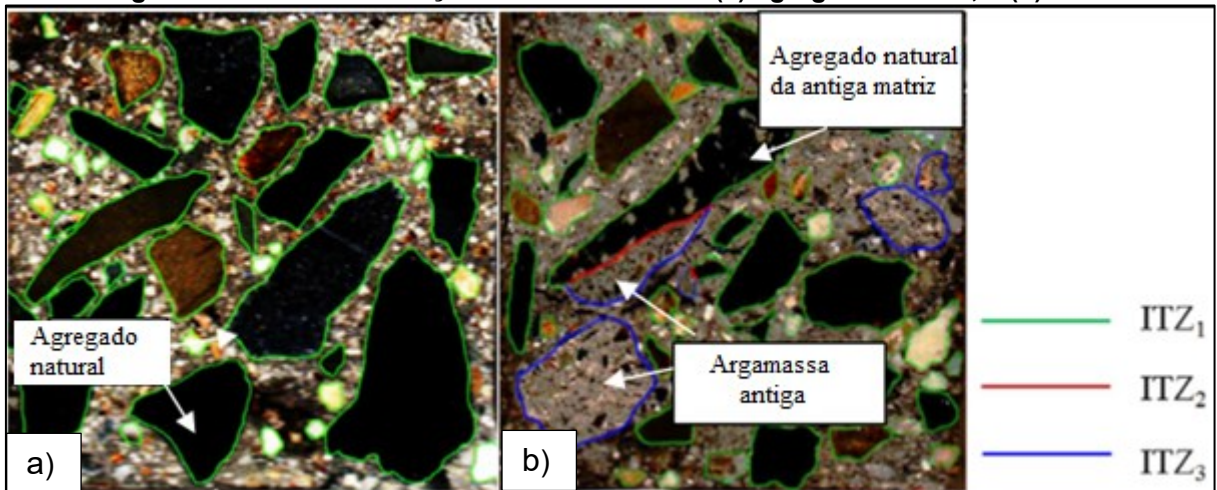


**Fonte: Mehta; Monteiro (2006)**

Essas fases presentes na ITZ e na pasta de cimento são produzidas durante a hidratação do cimento Portland. O C-S-H é a fase protagonista na resistência mecânica da matriz, uma vez que sua área superficial é muito superior comparada às outras fases (MEHTA; MONTEIRO 2006). Devido à presença do C-S-H ser diminuída na ITZ, a zona de transição agregado/pasta se torna o elo mais fraco da estrutura do concreto.

Nos concretos produzidos com ARC são identificadas diferentes tipos de zonas de transição (ZHANG et al., 2021), apresentadas na Figura 7. A ITZ1 é aquela localizada entre os agregados naturais e a argamassa, sendo ela encontrada tanto no concreto original (Figura 7a) como no concreto de agregado reciclado. A ITZ2 é a zona de transição remanescente entre agregado natural e concreto antigo, e é encontrada no novo concreto com ARC (Figura 7B). Já a ITZ3 é o limite entre a argamassa antiga porosa do ARC e a nova argamassa.

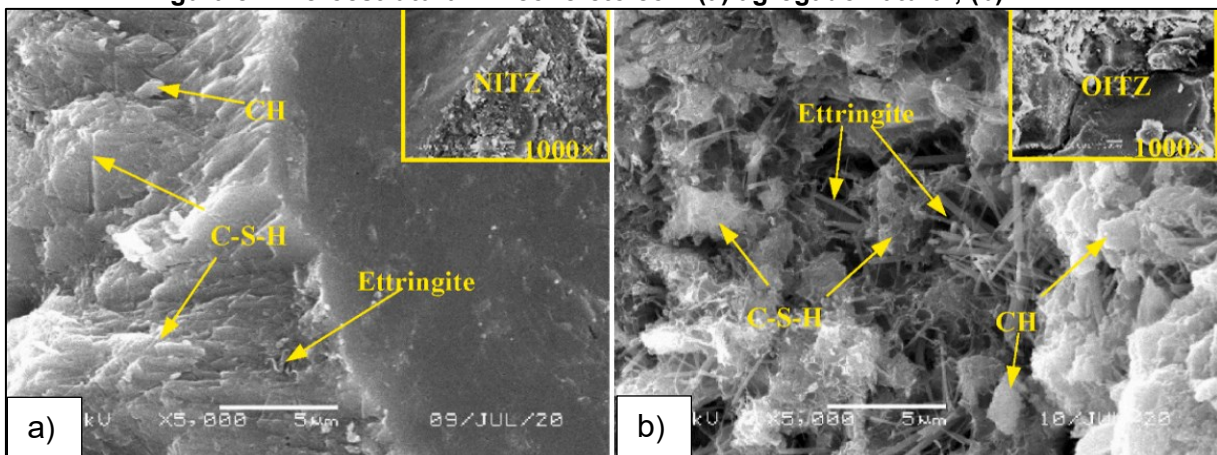
Figura 7 - Zonas de transição do concreto com (a) agregado natural; e (b) ARC



Fonte: Zhang et al., (2021)

Quando comparadas, as ITZ de concretos produzidos com agregado natural (Figura 8-a) e ARC (Figura 8-b) se mostram microscopicamente distintas. A zona de transição entre pasta e agregado de origem natural é densa, com a presença de C-S-H, com pouca presença de CH e etringita. Em contrapartida, a ITZ formada pelo ARC, especialmente a parte composta por argamassa residual, é pouco densificada, com presença majoritária de agulhas de etringita que entrelaçam algumas placas de CH e reduzida presença de C-S-H (HU et al., 2021).

Figura 8 - Microestrutura ITZ concreto com (a) agregado natural; (b) ARC

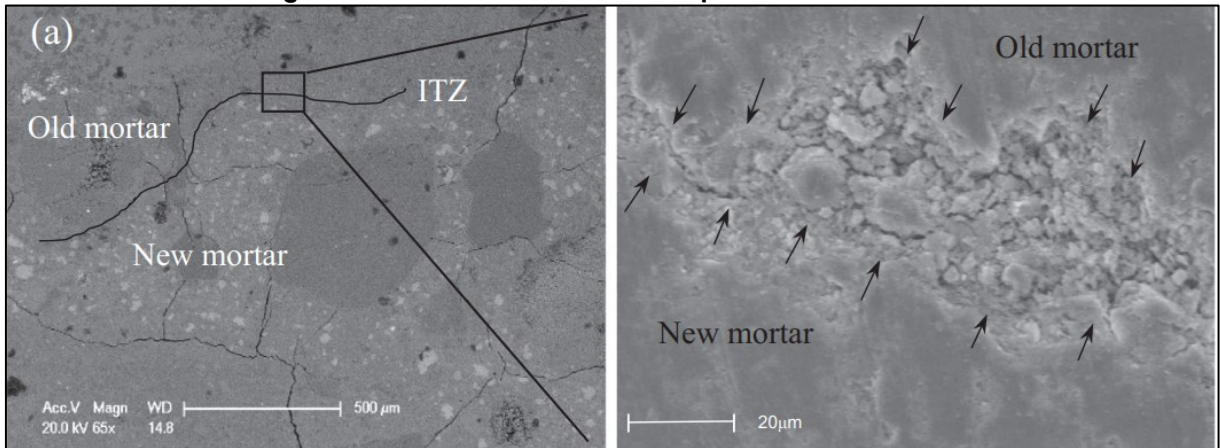


Fonte: Hu et al., (2021)

A ITZ formada entre a argamassa residual e a do novo concreto, é bastante porosa e pouco densificada (WANG et al., 2019). Na Figura 9, a imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da ITZ, representa esse caráter enfraquecido e de densidade baixa da região.



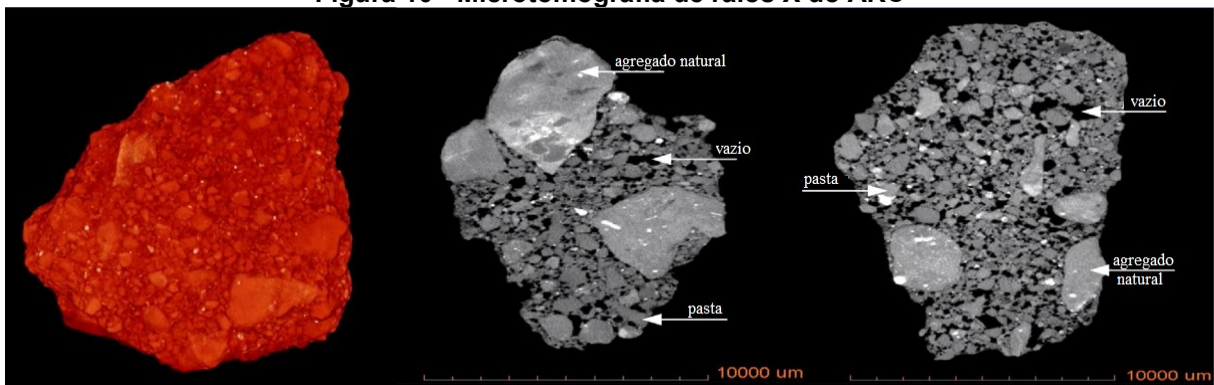
**Figura 9 - Microestrutura concreto produzido com ARC**



Fonte: Wang et al., (2019)

As propriedades da ITZ dos concretos com ARC diferem daquelas encontrada em concretos com agregados naturais devido à própria natureza porosa da argamassa residual que compõe o agregado reciclado. Através da técnica de microtomografia de raios X exposta na Figura 10, Shaban et al., (2021) identificou que a microestrutura do ARC é altamente porosa, e que os poros não apresentam tamanho e forma padrão.

**Figura 10 - Microtomografia de raios X do ARC**

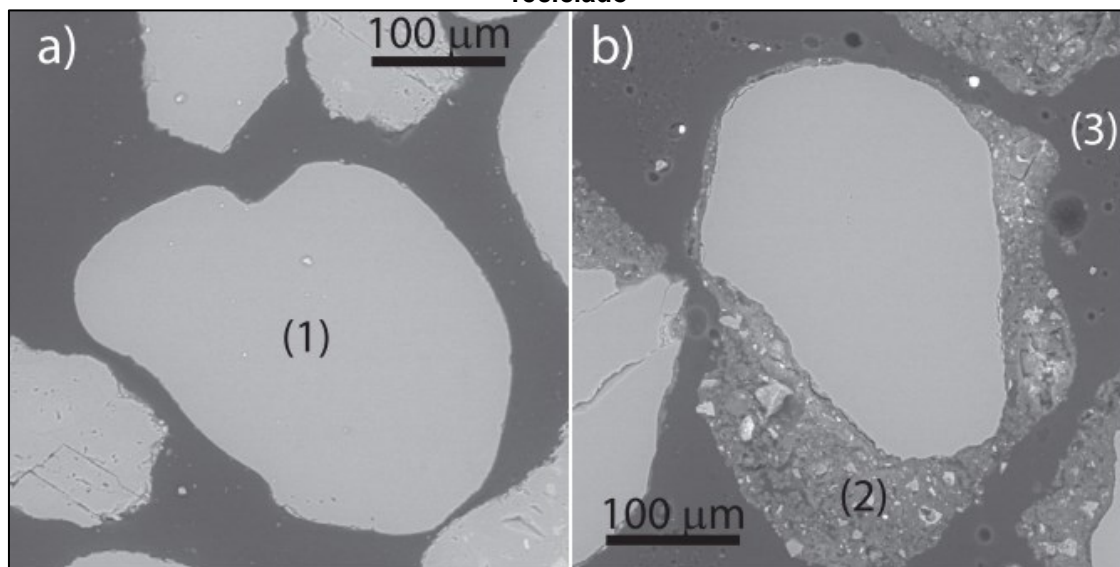


Fonte: Shaban et al., (2021)

Similarmente, comparando os agregados miúdos naturais dos reciclados, pode-se citar diferenças notáveis na estrutura. Enquanto os agregados naturais, como por exemplo a areia de rio, apresentam forma mais arredondada, superfície mais lisa e uniforme, os ARC miúdos apresentam formato mais irregular, superfície rugosa e porosa, e a ITZ antiga, entre a argamassa antiga e agregado natural, porosa e com a presença de microfissuras e partículas de agregados menores (AKONO et al., 2021).

Na Figura 11 são apresentadas imagens de MEV da areia natural e do agregado miúdo reciclado dispersos na presença de resina epóxi.

**Figura 11 - Microscopia eletrônica de varredura dos agregados miúdos (a) natural; (b) reciclado**



Fonte: Akono et al. (2021)

### 2.3 Propriedades dos concretos produzidos com ARC

A utilização do ARC na produção de novos concretos é restringida, na maioria das vezes, a obras de pavimentação e concreto de baixa solicitação mecânica. A regulamentação de diferentes países limita a substituição dos agregados naturais pelos reciclados, pelo fato deste material possuir características inferiores quando comparado aos agregados naturais.

No Brasil, a NBR 15116:2021 limita a substituição pelo ARC a 20% em massa na produção de concretos e argamassas com fins estruturais, considerando as classes I e II de agressividade ambiental segundo a NBR 6118:2014. Na Alemanha, a norma DIN 4226:100 de 2002 limita o uso de 20-35% em massa para concretos com classe de resistência de CA 30/37 e CA 20/30 respectivamente. Na Inglaterra, a porcentagem de substituição permitida é de 30% conforme a norma BS 8500-2:2015.

As propriedades distintas dos ARC se tornam um empecilho na aplicação deste material, uma vez que a argamassa residual que compõe esse agregado é porosa e possui pequenas fissuras criadas durante sua moagem, conferindo qualidade e resistência inferior quando utilizado na produção de novos concretos (WANG et al., 2017).

Essa argamassa residual tem característica porosa, não homogênea e forma, nos concretos produzidos com incorporação desse material, uma ITZ fraca e pouco densificada. Devido aos poros e microfissuras da argamassa aumentarem a absorção de água, a água necessária para hidratação na ITZ se torna limitada causando uma reduzida formação de compostos hidratados, formando uma ligação fraca entre o ARC e a pasta de cimento (TAM et al., 2021).

Outra interferência na qualidade deste material, é o processo de cominuição do resíduo de concreto. Durante a britagem, seja ela por britadores de impacto, de mandíbula ou moinho de martelos, a argamassa aderida sofre um microfissuramento e desprendimento de fragmentos que enfraquece a superfície do agregado. Além do mais, o uso do ARC na produção de concreto não é tão simples pois a qualidade dos agregados flutua consideravelmente quando o resíduo é coletado de diferentes fontes (ISMAILI; RAMLI, 2013).

A resistência mecânica dos concretos com ARC se torna insatisfatória quando uma alta porcentagem de substituição ao agregado natural é utilizada. Além disso, poucas tentativas de utilização deste tipo de agregado foram feitas na produção de concretos de alta performance devido às limitações impostas pelos defeitos dos ARC (ETXEBERRIA, 2020).

Contudo, a resistência à compressão do concreto é um dos parâmetros mais efetivos para determinar a quantidade de ARC que pode ser aplicada a concretos estruturais e proporciona uma ideia sobre as outras características deste concreto (KURAD et al., 2017).

À vista disso, se faz necessária uma limitação de variáveis para a análise da influência do ARC sobre as propriedades mecânicas do concreto. A Tabela 5 apresenta trabalhos atuais nos quais o agregado graúdo natural é substituído em sua totalidade pelo ARC. Os resultados encontrados pelos autores vão de encontro à literatura: redução gradativa da resistência mecânica dos concretos com o aumento da incorporação dos ARC.



**Tabela 5 - Trabalhos recentes com uso de ARC em concreto** **continua....**

<b>Autor</b>	<b>Metodologia do estudo</b>	<b>Influência na resistência</b>
Chakradhara Rao et al. (2011)	Quatro misturas de concreto com substituição de: 0, 25, 50 e 100% de ARC	Redução nas resistências à compressão e tração e módulo de elasticidade. Para 25% de ARC pouca perda de resistência (5%)
Safiuddin et al. (2011)	Substituição por 0, 30, 50,70 e 100% de ARC em concreto de alta trabalhabilidade.	Redução máxima de 12 e 17% na resistência à compressão e módulo de elasticidade para 100% de substituição. Sem mudança significativa na resistência à tração.
Arezoumandi et al. (2015)	Produção de dois traços em usina com resistência de projeto de 35MPa: um convencional com agregados naturais e um com substituição de 100% de ARC Obs: ARC produzido com o mesmo concreto do primeiro traço.	Redução na resistência à compressão, à tração e no módulo de elasticidade em 14, 21 e 22% respectivamente;
Arora; Singh (2016)	Concreto de agregado natural e com substituição de 100% de ARC de resíduo de concretos do laboratório. Mesma a/c e quantidades de materiais para os dois concretos. 30% de cinza volante em substituição do cimento.	Redução nas resistências a compressão e tração na ordem de 24 e 11% respectivamente. Performance à fadiga 8% inferior ao concreto de agregado natural.
Zheng et al. (2018)	Duas resistências de projeto 25 e 50Mpa, com substituições de 0, 25, 50, 75 e 100% de ARC, e	Para 25 MPa: redução de 2%, 4,4%, 5,6% e 7,2% na resistência à compressão para as diferentes % de substituição. Para 50Mpa: redução de 2,6%, 5,9%, 8,0% e 9,6% na resistência à compressão para as diferentes % de substituição.
Saini; Singh (2020)	Concretos auto adensáveis com AN e 100% de ARC. Uso de cinza volante,	Perda de resistência à compressão e tração de 28 e 16% respectivamente.

---

superplastificante e agente  
modificador de viscosidade.

---

Fonte: Autora (2023)

## 2.4 Técnicas de melhoramento dos ARC

Em virtude da menor qualidade dos ARC em comparação aos agregados naturais, bem como à performance inferior dos concretos com agregado reciclado, técnicas de melhoramento do ARC têm recebido atenção de pesquisadores nas últimas décadas. Essas técnicas têm o intuito de facilitar o gerenciamento dos resíduos de concreto, aumentando a sua absorção pela própria indústria de construção.

Desta forma, os tratamentos pesquisados para melhoramento dos agregados reciclados que visam diminuir a porosidade, absorção e partículas fracamente ligadas e preencher poros e fissuras, são divididos em dois tipos: remoção parcial/total e/ou fortalecimento da argamassa residual (BAI et al., 2020).

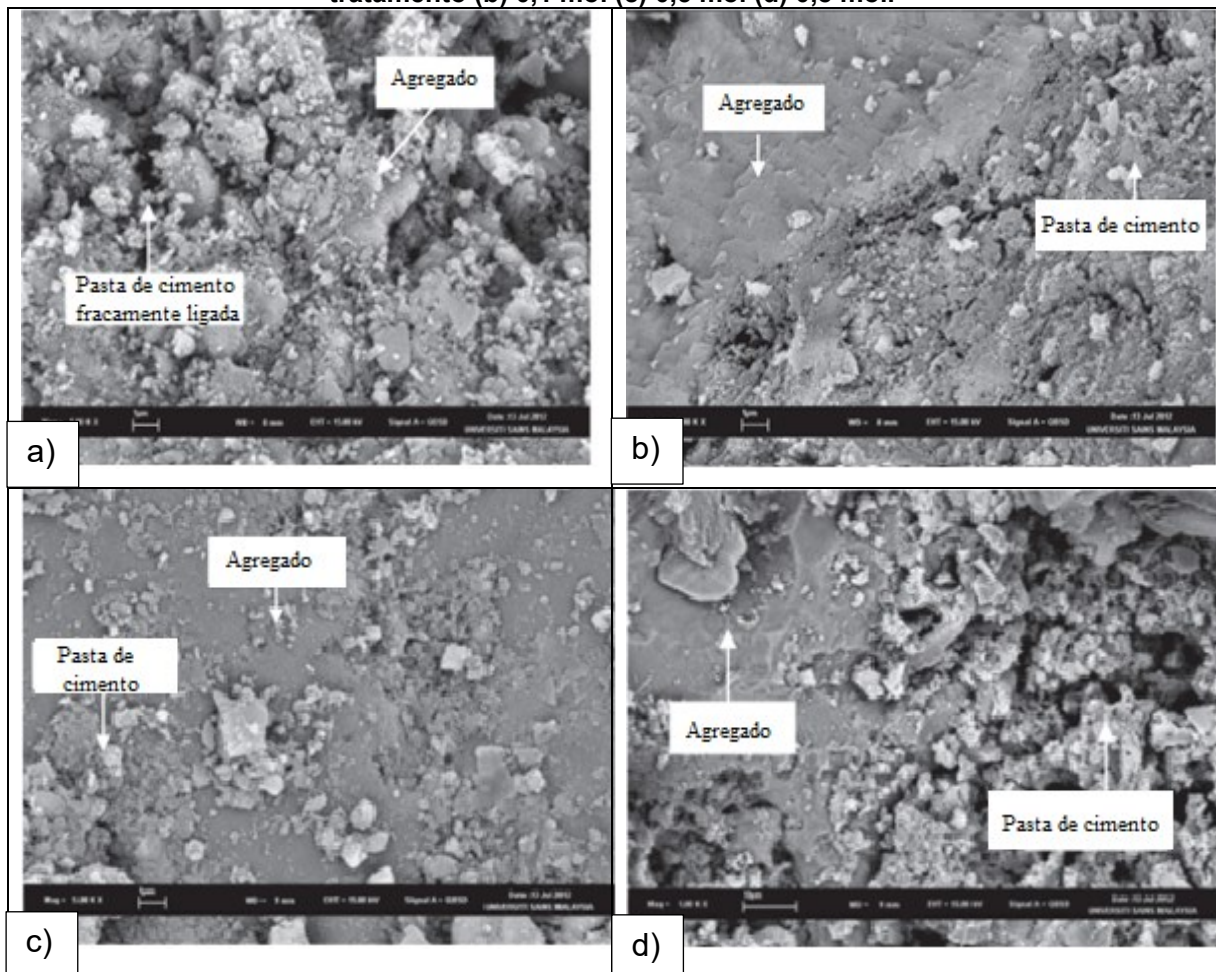
Entre as técnicas de remoção da argamassa antiga do ARC pode-se citar o método de imersão em soluções ácidas, primeiramente proposto por Tam e Le (2007). Por possuir natureza alcalina, os materiais cimentícios são corroídos pelos ácidos, sem a necessidade de equipamentos sofisticados, apenas variando o tempo e a concentração de ácidos é possível remover diferentes porcentagens da argamassa residual (AKBARNEZHADK et al., 2013).

Utilizando diferentes molaridades de ácido clorídrico (HCl) (0,1, 0,5 e 0,8) e tempos de imersão de 1, 3 e 7 dias, Ismail e Ramli (2013) obtiveram resultados positivos em relação a argamassa residual com redução entre 1 e 5%, e conseqüente redução de até 28% na absorção de água dos ARC. Como variação da técnica, Wang et al., (2017) fizeram o uso de ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), um ácido mais fraco e de menor custo, em concentrações de 1, 3 e 5% atingindo redução de até 19% na absorção e melhora da resistência à compressão em 25% comparado aos agregados reciclados não tratados. Outros ácidos como o sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) e o fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) também já foram investigados trazendo igualmente redução da argamassa antiga e absorção (TAM et al., 2007).

Na Figura 12 é possível visualizar o efeito do tratamento com ácidos na superfície do ARC. As imagens são referentes ao estudo realizado por Ismail e Ramli (2013). Na Figura 12-a é apresentado o ARC sem tratamento com superfície

consideravelmente mais porosa e contém partículas de pasta de cimento, e até poeira, fracamente ligadas. Diferentemente, as Figuras 12-b e 12-c mostram um agregado com superfície mais uniforme e limpa. Estas duas imagens se referem ao tratamento realizado utilizando molaridades de 0,1 e 0,5 de ácido clorídrico, que foram capazes de realizar uma limpeza das partículas fracas. Em contrapartida, na Figura 12-d, referente ao ARC tratado em solução de molaridade de 0,8, o tratamento se demonstrou deletério uma vez que além de dissolver as partículas soltas, também provocou a erosão da argamassa mais resistente, tornando-a mais porosa e enfraquecida.

**Figura 12 - Microscopia eletrônica de varredura do ARC tratado com ácido clorídrico (a) sem tratamento (b) 0,1 mol (c) 0,5 mol (d) 0,8 mol.**



Fonte: Ismail e Ramli (2013)

Outra forma de diminuir a quantidade de argamassa residual do ARC é através de rebrita mecânica e/ou termomecânica. No primeiro formato, os agregados reciclados passam por múltiplas britagens que reduzem a argamassa

aderida e geram maiores quantidades de finos. Já na rebitagem termomecânica, o ARC também é aquecido à altas temperaturas (250°C) por horas e resfriado rapidamente por imersão em água, o que causa tensões por estresse térmico no material que enfraquecido, é posteriormente rebitado desprendendo maiores quantidades de argamassa (BHASYA; BHARATKUMAR, 2018).

A remoção da argamassa residual através das técnicas citadas é efetiva, diminuindo a absorção de água e aumentando a resistência à compressão dos novos concretos. Entretanto, podem ser citadas desvantagens nos dois métodos: o manuseio de ácidos é pouco seguro e introduz íons nocivos ao novo concreto (WANG et al., (2019) e o alto gasto energético necessário para o emprego de rebitagens e aquecimento dos ARC.

Em contrapartida, as técnicas de fortalecimento da superfície do agregado vêm sendo estudadas como alternativa. Através desses métodos é visado o preenchimento dos poros e fissuras presentes na argamassa residual.

Uma das técnicas de fortalecimento é a carbonatação acelerada dos ARC. A carbonatação do concreto ocorre naturalmente quando o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente na atmosfera reage com o cálcio presente nas fases hidratadas da pasta de cimento, principalmente com o hidróxido de cálcio, formando carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (WINTER, 2009). Em estruturas de concreto armado, a carbonatação reduz a alcalinidade da matriz cimentícia, o que favorece a corrosão do aço, limitando a vida útil do elemento (ZHAN et al., 2014).

Entretanto, como o material precipitado durante a carbonatação tem volume maior que os materiais consumidos, ocorre um preenchimento de poros e conseqüente aumento de resistência da matriz cimentícia devido à densificação da mesma (POSSAN, 2017). Desta maneira, utilizando de câmaras de carbonatação é possível aplicar aos ARC este melhoramento na argamassa residual. Através do uso desta técnica, Zhan et al., (2014) obteve resultados favoráveis quanto a diminuição da absorção de água e da porosidade, ambas em torno de 20%. Foi identificado também que quanto maior a absorção de água do ARC maior foi a porcentagem de ganho de massa e carbonatação devido à maior quantidade de poros interligados que facilitam a permeabilidade do  $\text{CO}_2$  na argamassa.

Outras formas de preenchimento desses poros e fissuras da argamassa residual incluem as técnicas de biomineralização (SALMAN RAIS; KHAN, 2021) através da precipitação de  $\text{CaCO}_3$  por bactérias, uso de produtos cristalizantes e

mineralizantes como selantes a base de silicato de sódio (WANG et al., 2022) e fosfatos (WANG et al., 2019); e até mesmo cimentos especiais como o sulfoaluminoso (ZHANG et al., 2021).

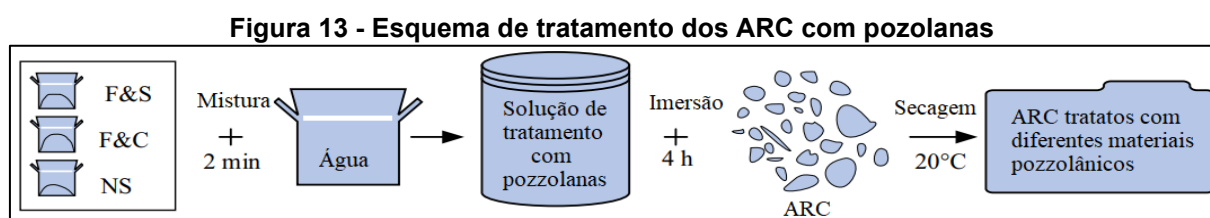
Além das alternativas listadas, a aplicação de pozolanas, objeto de estudo do presente trabalho, vêm sendo estudada para tratamento de fortalecimento dos ARC.

#### 2.4.1 Tratamento do RCD com material pozzolânico

O uso da técnica de imersão em soluções de pozolana com o objetivo de melhorar a superfície dos agregados reciclados vem sendo estudada (BUI et al., 2018; YANG et al., 2020) à procura de um método ambientalmente amigável para maior absorção desse resíduo pela indústria.

A utilização de pozolanas como método de tratamento para os ARC é uma das soluções que modificam a superfície do agregado, melhorando a sua qualidade. O método de melhoramento da superfície dos agregados reciclados por meio de *coating*/impregnação de materiais pozzolânicos consiste em na preparação de uma pasta de baixa viscosidade de cimento mais uma pozolana, ou apenas pozolanas, onde os ARC são incorporados e posteriormente retirados (SASANIPOUR; ASLANI, 2020).

Este processo de imersão dos ARC pode ser visualizado no esquema de tratamento apresentado na Figura 13, onde os materiais pozzolânicos são misturados em água por tempo determinado, produzindo uma solução onde os agregados são imersos durante período também pré determinado. Após a imersão, os ARC passam por processo de secagem, que pode ser à temperatura ambiente ou em estufa.



Fonte: Shaban et al., (2021).

Diferentes autores seguem o mesmo esquema de tratamento, tendo como variáveis os materiais pozzolânicos, a relação água/aglomerantes e tempo de mistura da solução, de imersão e secagem. A Tabela 6 apresenta trabalhos em que variações deste tipo de tratamento dos ARC foram empregadas.

**Tabela 6 - Variações do tratamento com pozolanas**

<b>Autor</b>	<b>Solução de tratamento (em água)</b>	<b>Mistura da solução</b>	<b>Imersão</b>	<b>Secagem</b>
Saravanakumar et al. (2016)	Ácido clorídrico e sílica ativa	-	24hrs ácido + 24hrs sílica ativa	24hrs à 20°C
Shi et al., (2018)	sílica ativa cinza volante nano sílica	-	30min de mistura + 60 de imersão	2hrs à 100°C
Shaban et al., (2019)	cinza volante + sílica ativa cinza volante + cimento nano sílica	2min	1, 2 e 4hrs	3 dias à 20°C
Sasanipour; Aslani; (2020)	sílica ativa	-	60min	3 dias à 45°C
Hu; He; Fan; et al., (2021)	CP + zeólita	90s	120s	28 dias câmara úmida à 20°C
Alqarni et al., (2021)	CP + sílica ativa	-	30min	24hrs cura seca + 7 dias cura úmida

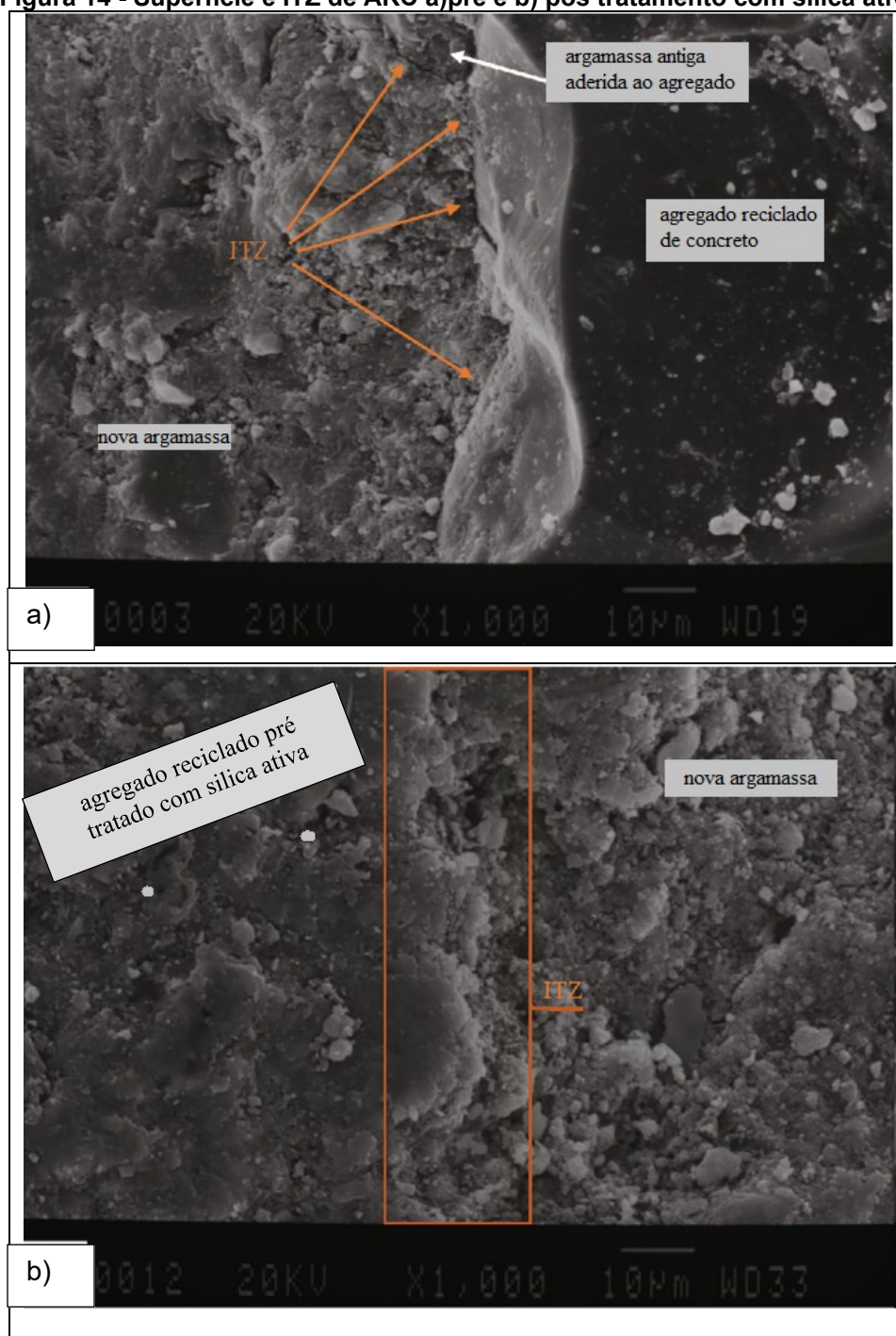
**Fonte: Autora (2023)**

Materiais como cinzas volantes, sílica ativa, metacaulim e escória de alto forno trabalham como micro filer, preenchendo os poros e fissuras da superfície dos ARC. Ao serem imersos ou recobertos com misturas contendo esses materiais os agregados reciclados são fortificados devido à argamassa residual ter seus poros e fissuras preenchidas pelos finos. E também, as partículas de CH presentes nessa região reagirem com a sílica disponível das pozolanas, formando gel de C-S-H, material mais resistente que o hidróxido de cálcio (SHI et al., 2016). Por serem materiais pozolânicos, consomem os cristais de hidróxido de cálcio, formando silicato de cálcio hidratado, que preenchem os vazios da argamassa antiga do agregado.

Devido ao *micro-filling* proporcionado pelas partículas pequenas da pozolana e a reação de produção de C-S-H, diminuindo a porosidade da superfície do agregado reciclado, é proporcionada uma melhora na zona ITZ com diminuição da absorção de água e aumento da densidade utilizando este tratamento (BUI et al., 2018).

Na Figura 14 a superfície do ARC e a zona ITZ, antes e após o tratamento com sílica ativa, são apresentadas. Mesmo com uma fina camada do material pozolânico a microscopia já mostra uma superfície de agregado mais densificada, e com poros preenchidos. Quanto a zona ITZ, a mesma deixa de apresentar característica de fissura contínua, se mostrando também mais densa (SASANIPOUR; ASLANI, 2020).



**Figura 14 - Superfície e ITZ de ARC a)pré e b) pós tratamento com sílica ativa**

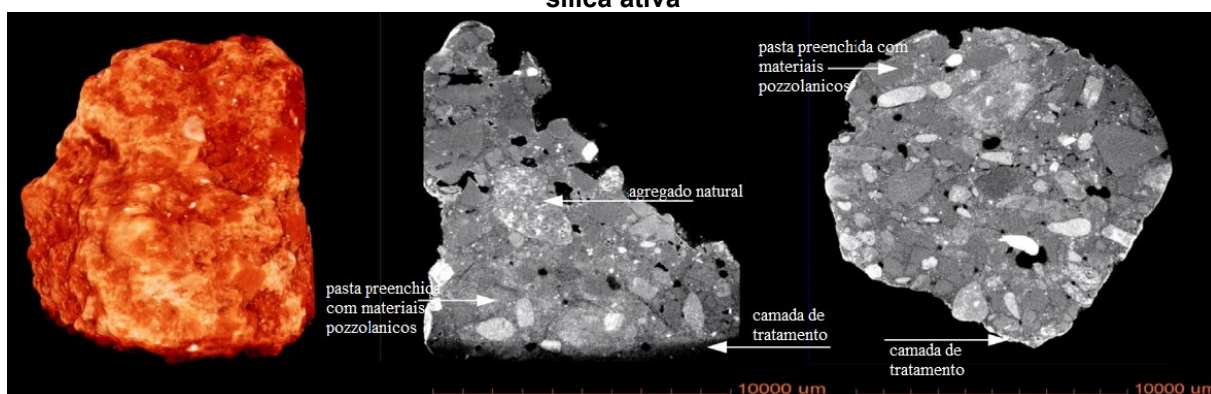
Fonte: Adaptado de Sasanipour e Aslani (2020)

Além das características microestruturais serem modificadas, o tratamento de imersão em soluções com pozolanas traz mudanças às propriedades físicas dos agregados. Ao que se refere à porosidade e absorção dos ARC, consideravelmente altas em relação aos agregados naturais, após o tratamento em questão foram reduzidas devido ao preenchimento de poros e fissuras na argamassa residual. Valores encontrados na literatura variam de 19,7-22% até valores expressivos de

55,78-66% de diminuição na absorção de água dos agregados reciclados (BUI et al., 2018; SHABAN et al., 2021; HU et al., 2021; ALQARNI et al., 2021).

A resistência ao desgaste do ARC, após o tratamento de imersão, também apresenta resultados positivos. Devido ao preenchimento dos poros e fissuras com produtos de hidratação, densificando a microestrutura da argamassa residual e formando uma película sobre o agregado (SHABAN et al., 2021) foram atingidos valores entre 17-35% de redução no ensaio de abrasão Los Angeles (ALQARNI et al., 2021, HU et al., 2021; SHABAN et al., 2021). Na Figura 15, uma microtomografia do ARC após o tratamento com cinza volante e sílica ativa, é possível verificar o preenchimento dos poros internos e superficiais da argamassa residual o que traz fortalecimento e consequente melhora na resistência do agregado.

**Figura 15 - Microtomografia de raios X do ARC após tratamento com mistura de cinza volante e sílica ativa**



Fonte: Shaban et al., (2021)

Outro benefício deste preenchimento e densificação da argamassa residual com produtos de hidratação e material pozolânico fino é o aumento da resistência da superfície do agregado, o que produz uma nova ITZ também mais densa e com maior dureza. Através de ensaio de nanoindentação, com esquema apresentado na Figura 16, Hu et al., (2021) constatou um aumento de 22% no módulo de elasticidade da nova ITZ (NTZ) de concretos produzidos com o ARC tratado com mistura de zeólita e cimento em relação ao agregado reciclado não tratado. Também utilizando o ensaio de nanoindentação, Li et al., (2021) atingiram o valor de 76,4% de aumento da dureza da nova ITZ utilizando nano sílica no tratamento do ARC.



**Figura 16 - Esquema análise de nano indentação na ITZ de concreto produzido com ARC**



Fonte: Hu et al., (2021)

A melhoria atingida pelo aumento de resistência do agregado e da microdureza da nova ITZ confere aos concretos produzidos com o ARC tratado consequente aumento nas resistências à compressão e tração (SHI et al., 2018). Utilizando diferentes misturas de tratamento: cinza volante e sílica ativa; cinza volante e cimento; cinza volante, cimento e nano sílica; Shaban et al., (2021) constataram aumento na resistência à compressão, de 25 à 45%, e à tração, de 22 à 30%, dos concreto produzidos com ARC tratados em relação aos concretos de agregados reciclados não tratados. Hu et al., (2021) obtiveram aumento de até 20% na resistência à compressão do concreto produzido com ARC tratado com solução de zeólita e cimento (5 e 95% respectivamente). Alqarni et al., (2021) produziram concretos com aumento de resistência de 32 a 66% na compressão e 58,4 na tração utilizando misturas de cimento e sílica ativa no tratamento dos agregados reciclados.

## 2.5 Materiais pozolânicos

### 2.5.1 Classificação e nomenclatura

Segundo a NBR 12653:2015, pozolanas são materiais silicosos ou silicoaluminosos que quando em contato com água reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades aglomerantes. Essa reação torna os materiais pozolânicos um potencial material suplementar em substituição parcial do clínquer, e por ser um material residual de outras indústrias, sua utilização pela indústria cimentícia é ambientalmente vantajosa, uma vez que a produção de clínquer, principal constituinte na fabricação do cimento, é responsável pela maior parcela dos impactos ambientais da indústria cimenteira devido às altas temperaturas e energia despendidas na sua produção, além da alta liberação de CO<sub>2</sub> provinda da

decomposição do carbonato de cálcio (ABRÃO, 2019).

De acordo com McCarthy e Dyer (2019), o termo pozolana é atribuído aos materiais de origem natural da região de Pozzuoli, enquanto o materiais pozolânicos se refere àqueles inorgânicos de origem natural ou artificial, ambos sendo endurecidos em contato com água e hidróxido de cálcio. Geralmente deficientes em cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), então a adição para formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (WINTER, 2012).

A NBR 12653:2015 define os dois tipos de materiais como pozolanas naturais, aquelas de origem vulcânica ou sedimentar, e pozolanas artificiais, materiais provenientes de tratamentos térmicos ou subprodutos industriais. Ambos materiais silicosos ou silicoaluminosos com pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas com atividade pozolânica, ou seja, capazes de reagir, na presença de água, com hidróxido de cálcio, formando compostos cimentícios.

Quanto a classificação dos materiais pozolânicos, a NBR 12653:2015 faz uma divisão em três classes: classe N, C e E:

Classe N: pozolanas naturais ou artificiais como materiais vulcanicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomácias e argilas calcinadas.

Classe C: cinzas volantes produzidas pela queima do carvão mineral em usinas termoelétricas;

Classe E: quaisquer outros materiais pozolânicos não contemplados nas classes N e C. (ABNT NBR 12653, 2015).

Para se enquadrarem nas três classes, os materiais ainda devem obedecer aos requisitos químicos e físico-mecânicos estabelecidos pela NBR 12653:2015 e apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7 - Requisitos químicos e físico-mecânicos para conformidade dos materiais pozolânicos**

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq 70$	$\geq 70$	$\geq 50$	ABNT NBR NM 22
$\text{SO}_3$	$\leq 4$	$\leq 5$	$\leq 5$	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	$\leq 3$	$\leq 3$	$\leq 3$	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	$\leq 10$	$\leq 6$	$\leq 6$	ABNT NBR NM 18
Álcalis disponíveis em $\text{Na}_2\text{O}$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	ABNT NBR NM 25
Material retido peneira $45\mu\text{m}$	$\leq 20\%$	$\leq 20\%$	$\leq 20\%$	ABNT NBR 15894-3
IAP com cimento aos 28 dias, em relação ao controle	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$	ABNT NBR 5752
IAP com cal aos 7 dias	$\geq 6\text{Mpa}$	$\geq 6\text{MPa}$	$\geq 6\text{MPa}$	ABNT NBR 5751

**Fonte: Adaptado de NBR 12653:2015**

## 2.5.2 Hidratação do cimento e a reação pozolânica

As principais fases anidras, formadas durante a queima das matérias primas para produção do clínquer, são alita (C3S), belita (C2S), aluminato tricálcico (C3A) e ferrita (C4AF). Durante o processo de hidratação do cimento Portland, a dissolução dessas fases é responsável pela formação de compostos hidratados específicos. Segundo Winter (2012), alita hidrata produzindo C-S-H e altas quantidades de CH, belita hidrata produzindo C-S-H e pouco CH, aluminato tricálcico na presença de sulfatos em quantidades suficientes produz etringita (AFt) e outras fases (aluminatos de cálcio hidratado (CAH), monossulfato de cálcio hidratado (AFm)), ferrita também produz etringita e outras fases.

Uma vez que o cimento Portland é composto de vários compostos, o processo de hidratação consiste em diversas reações simultâneas dos compostos anidros com a água. Entretanto, essas reações ocorrem com velocidades distintas: os aluminatos hidratam rapidamente tendo protagonismo no endurecimento da pasta de cimento, os silicatos têm uma hidratação mais lenta, mas desempenham papel importante no desenvolvimento de resistência da matriz (MEHTA; MONTEIRO 2006).

O silicato de cálcio hidratado é um gel endurecido, considerado amorfo ou fracamente cristalino produzido pela reação do C3S ou C2S com a água, sendo o material responsável principal pela resistência mecânica das matrizes de cimento Portland (WINTER, 2012). De acordo com o modelo de Powers-Brunauer, o C-S-H tem estrutura em layers organizados de forma irregular e aleatória e com alta área superficial, e com a resistência conferida ao material sendo explicada pelas forças de van der Waals (MEHTA; MONTEIRO 2006).

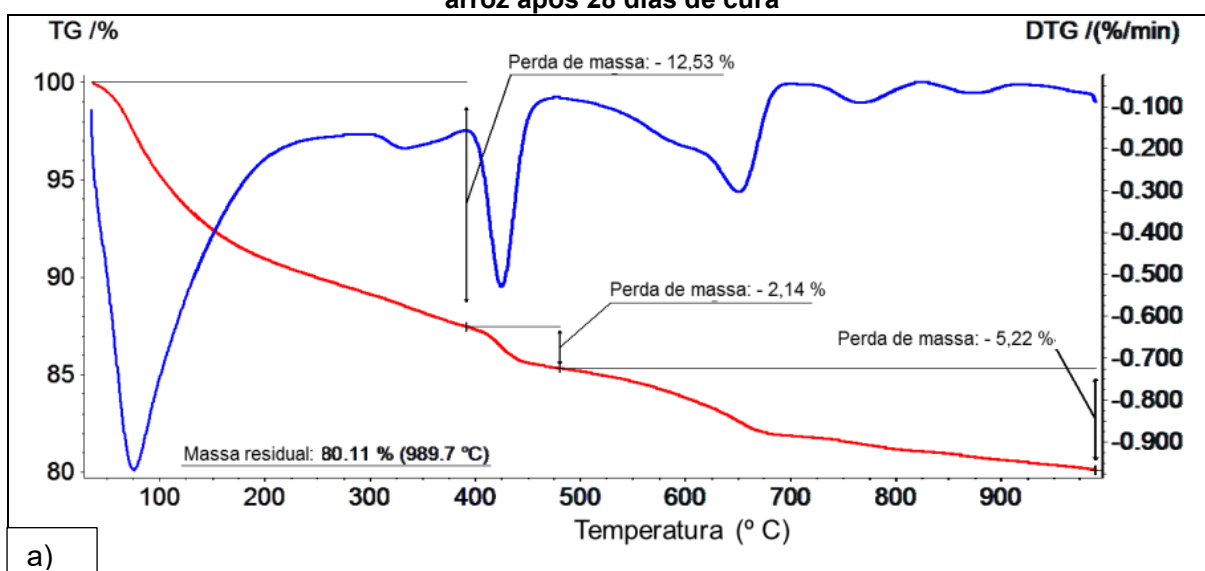
Entretanto, durante a hidratação dos silicatos o óxido de cálcio excedente da produção de C-S-H acaba reagindo com a água e formando hidróxido de cálcio, também conhecido como Portlandita, composto com estrutura de placa hexagonal. O CH também pode ser formado a partir de cal livre presente no cimento (WINTER, 2012).

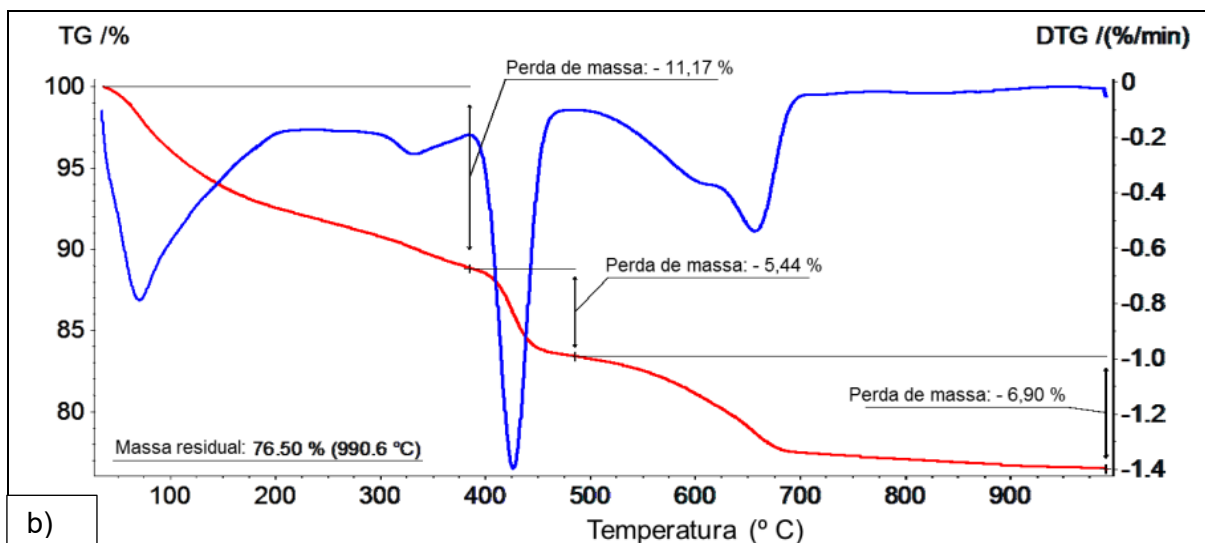
O uso de adições pozolânicas juntamente com o cimento é capaz de converter a Portlandita em C-S-H conferindo maiores resistências às pastas. A reação entre as pozolanas e o hidróxido de cálcio formado durante a hidratação produz os mesmos compostos produzidos pela hidratação do próprio cimento Portland: C-S-H e aluminatos (MCCARTHY; DYER, 2019).

Por ocorrer tardiamente, a reação pozolânica também tem efeito físico na pasta pois causa refinamento dos poros devido a precipitação de C-S-H com partículas menores e que possuem maior área específica que as placas de CH consumidas, o que proporciona maior densidade e menor permeabilidade na matriz, trazendo também, além do aumento da resistência mecânica, uma melhor durabilidade (MEHTA; MONTEIRO 2006).

A reação pozolânica, caracterizada pelo consumo de hidróxido de cálcio, pode ser acessada quantitativamente através de ensaios microestruturais, como DRX e TG/DTG. Na Figura 17a, a termogravimetria de pasta de cimento CPV-ARI, e na Figura 17b, a termogravimetria de pasta de cimento CPV-ARI+sílica de casca de arroz, dos autores Hoppe Filho et al., (2017), apresentam uma quantificação do teor de compostos hidratados formados, o teor de portlandita remanescente na matriz hidratada. A reação pozolânica entre a sílica amorfa e o hidróxido de cálcio é quantificada através da diminuição no pico de portlandita ocorrida entre 385 a 485 °C e o aumento no teor de água quimicamente combinada, relacionada à formação de compostos hidratados (C-S-H e das fases aluminato hidratadas) é representado pela perda de massa ocorrida entre 35 e 385 °C.

**Figura 17 - Análise termogravimétrica de pastas de a) CPV-ARI e b) CPV-ARI+sílica de casca de arroz após 28 dias de cura**

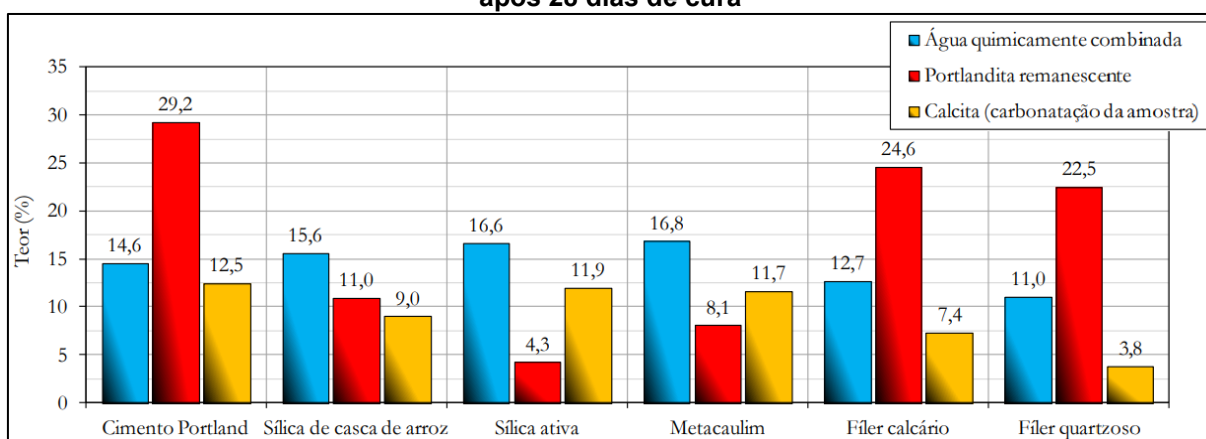




Fonte: Hoppe Filho et al., (2017)

Através do gráfico da Figura 18, Hoppe Filho et al., (2017) ainda quantificam os teores de Portlandita, água quimicamente ligada aos hidratos e de calcita (provinda da carbonatação), de diferentes pastas de cimento contendo diferentes tipos de adições minerais como substituição de 35% do cimento, determinados através da TG/DTG das pastas aos 28 dias. A redução do teor de portlandita e aumento na formação de compostos hidratados, produto da reação pozolânica, é evidenciada em todas as adições, porém muito maior nas de maior reatividade (sílica de casca de arroz, sílica ativa e metacaulim).

**Figura 18 - Teores de água quimicamente combinada como hidratos, portlandita remanescente e calcita formada por carbonatação nas diferentes pastas de cimento com adições minerais, após 28 dias de cura**



Fonte: Hoppe Filho et al. (2017)

É importante ressaltar que o teor de CH de uma pasta endurecida depende da atividade pozolânica da adição, do teor de Portlandita produzida na hidratação do clínquer e também da relação adição/cimento. Uma vez que a adição do material

pozolânico modifica as reações de hidratação da pasta de cimento, se faz necessária uma caracterização detalhada da mistura para avaliar e se obter uma melhor performance técnica (MCCARTHY; DYER, 2019).

## **2.6 Cinza de casca de arroz**

A produção mundial de arroz com casca alcançou a marca de 513,7 milhões de toneladas entre os anos de 2020/2021, apresentando um crescimento de aproximadamente 6% nos últimos oito anos e de 2,1% se comparado ao ano de 2019 (FAO, 2021). China, Índia e os outros países produtores da Ásia, são responsáveis por quase 90% desse valor total de produção mundial, sendo estes também os maiores consumidores desse alimento (USDA, 2021).

No Brasil, maior produtor de arroz fora da Ásia, a safra de 2020/2021 produziu 11,74 milhões de toneladas, 5% a mais que na safra anterior (Conab, 2021), sendo o consumo do alimento no país em torno de 11 milhões de ton/ano, segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. O Sul do país é responsável por 75% dessa produção nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, com a participação de mais de 25 mil produtores em 200 municípios, segundo a Associação Brasileira da Indústria do Arroz.

Uma das etapas mais importantes do beneficiamento do arroz é a moagem para separação da casca, farelo e grão. De acordo com Instituto Internacional de Pesquisas em Arroz - IRRI, durante essa fase são produzidos para cada kg de arroz, 0,28 kg de casca. O grão beneficiado representa em torno de 68-72% em massa do cereal. Considerando a produção mundial de arroz, são produzidas em torno de 130 milhões de toneladas de casca por ano.

Constituindo em torno de 20% do peso do arroz, a composição da casca é dividida em: 50% de celulose, de 25 a 30% de lignina, 15 a 20% de sílica e 10 a 5% de umidade. Após a queima controlada, a maior parte da matéria orgânica da casca é volatilizada e a cinza é predominantemente constituída de sílica amorfa com uma estrutura celular microporosa (SINGH, 2018).

A combustão da casca de arroz para secagem e parboilização deste cereal sem controle de temperatura produz CCA contendo 85%-98% de sílica (NASKAR et al., 2012). Utilizada como combustível para os fornos, a casca de arroz produz uma cinza com tonalidade cinza escura/preta devida ao carbono residual devido à queima

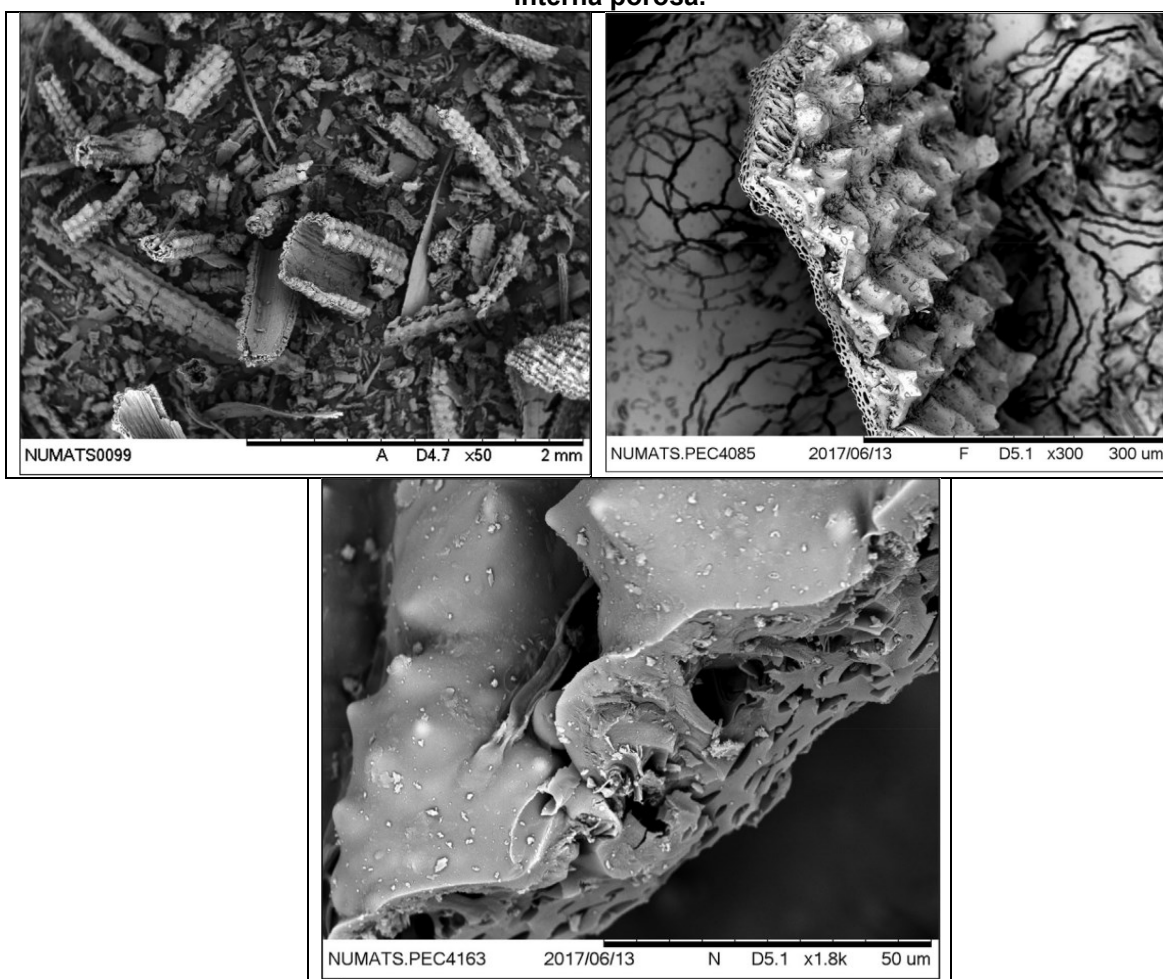
entre 550-800°C, temperaturas que possibilitam a formação de sílica amorfa, uma vez que acima desta temperatura uma sílica mais cristalina é formada (SIDDIQUE et al., 2020). A CCA residual é produzida em fornos sem controle no processo de queima, e posteriormente descartada, geralmente, em áreas impróprias próximas à indústria (RÊGO et al., 2015).

### 2.6.1 Propriedades da CCA

As aplicações da CCA incluem o seu uso como filler, aditivo, agente abrasivo, adsorvente e agente de suspensão para revestimentos cerâmicos. Na construção civil, é utilizada como material pozolânico na produção de matrizes cimentícias.

A CCA, antes da moagem, apresenta uma estrutura irregular e pontiaguda, e com presença de poros em toda sua superfície celular (ALENGARAM, 2022). Apresentada na Figura 19, em geral, a cinza de casca de arroz (Figura 19a) é composta de epiderme interna e externa (Figura 19b), sendo a primeira mais lisa e a segunda mais rugosa, e entre as duas há uma estrutura porosa (Figura 19c) semelhante a uma colmeia. Esta estrutura porosa é responsável por uma alta área superficial específica (VIEIRA et al., 2020).

Figura 19 - a) CCA antes da moagem contendo b) epiderme interna e externa e c) estrutura interna porosa.



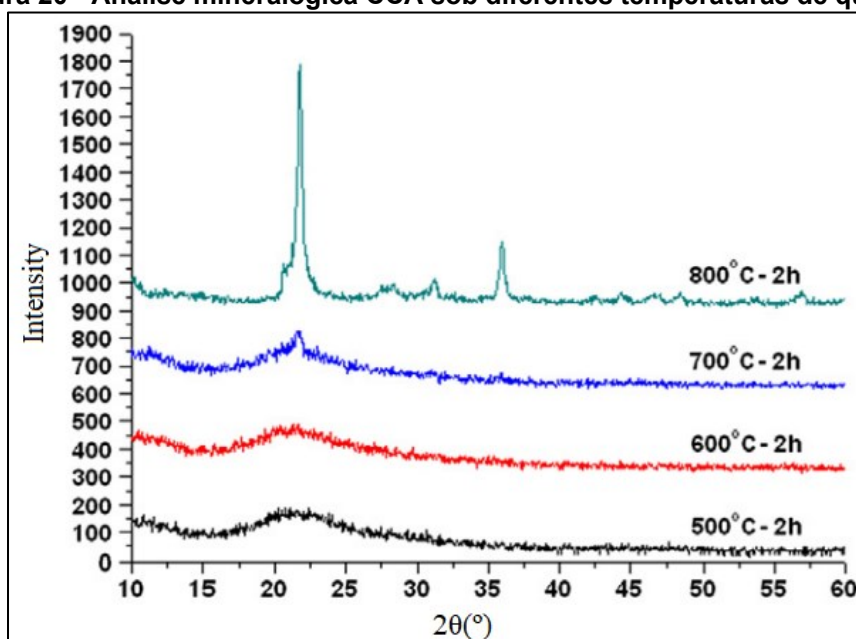
Fonte: ALENGARAM (2022)

Quanto à composição da CCA, além da sílica amorfa, fases de sílica cristalina, como quartzo e cristobalita podem estar presentes em altas quantidades, dependendo da condição de queima da casca de arroz, especialmente sob altas temperaturas (MCCARTHY; DYER, 2019). O quartzo é a primeira fase formada durante a queima da casca, e dependendo da temperatura atingida ele é transformado em cristobalita, a fim de atingir uma fase mais estável e cristalina.

Utilizando da análise de DRX, sendo possível analisar o amorfismo do material, Xu et al., (2012) ensaiou amostras de CCA obtidas através de queima controlada à temperaturas de 500, 600, 700 e 800°C por duas horas. Na Figura 20 é apresentado o difratograma das 4 cinzas, onde é observado halos amorfos com quase nenhuma reflexão cristalina para as temperaturas de 500 e 600°C. Já para a CCA produzida à 700°C, é evidenciado um pico correspondente de cristobalita aos 22°. O mesmo pico é encontrado para a amostra de 800°C, entretanto bem mais acentuado, acompanhado de outros picos característicos do mesmo material à 28, 32 e 36°.



**Figura 20 - Análise mineralógica CCA sob diferentes temperaturas de queima**



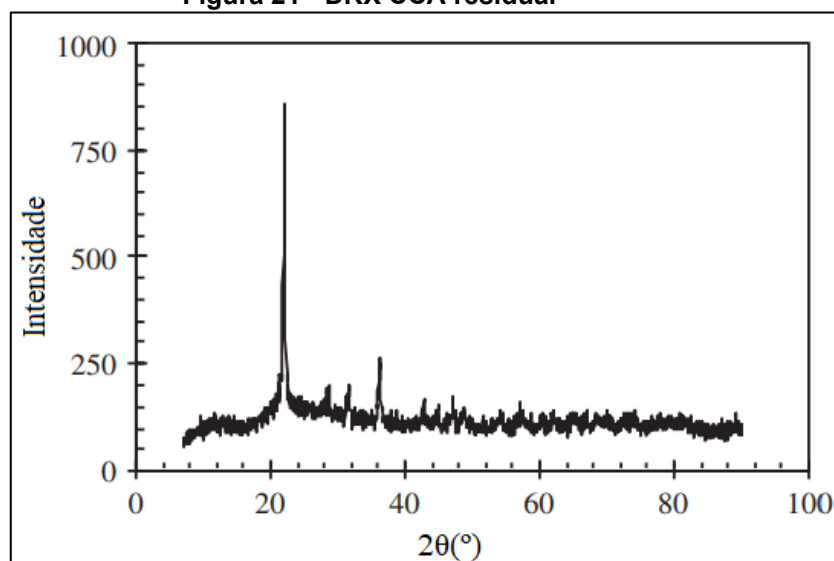
Fonte: Xu et al., (2012)

Análise similar foi realizada por Olivo (2020), para a casca de arroz utilizada como matéria prima para a produção da CCA residual utilizada neste trabalho. Amostras de CCA queimadas à temperaturas de 300, 400, 500, 550, 600, 650, 700 e a residual foram analisadas por DRX. Até a temperatura de 600°C, os difratogramas apresentam halos amorfos, com pouco indício de cristalinidade do material. Após os 650°C é presenciado um pico característico de cristobalita para todas as cinzas, sendo este bastante acentuado para a CCA residual.

Em estudo realizado por Rêgo et al., (2015), dez amostras de CCA residuais, originadas a partir da queima como combustível para diferentes indústrias, foram analisadas quanto à sua composição química e mineralógica. Seis das amostras constituíam material residual da própria indústria do arroz, utilizado no beneficiamento do grão, sem controle de queima. Essas cinzas apresentaram teores de  $\text{SiO}_2$  entre 80 e 90% com picos significativos de sílica cristalina.

Na indústria, a CCA residual é produzida sob temperaturas variadas a depender da necessidade energética dos fornos, onde é utilizada como combustível, variando entre 650 e 800°C. Em amostra analisada por Cordeiro et al., (2011), através de análise de DRX (Figura 21) e aplicação do método Rietveld, os resultados apontaram teores de 66% de sílica amorfa e 34% de sílica cristalina para uma CCA residual com teor de 82% de  $\text{SiO}_2$ , proveniente de agroindústria do estado de Santa Catarina.

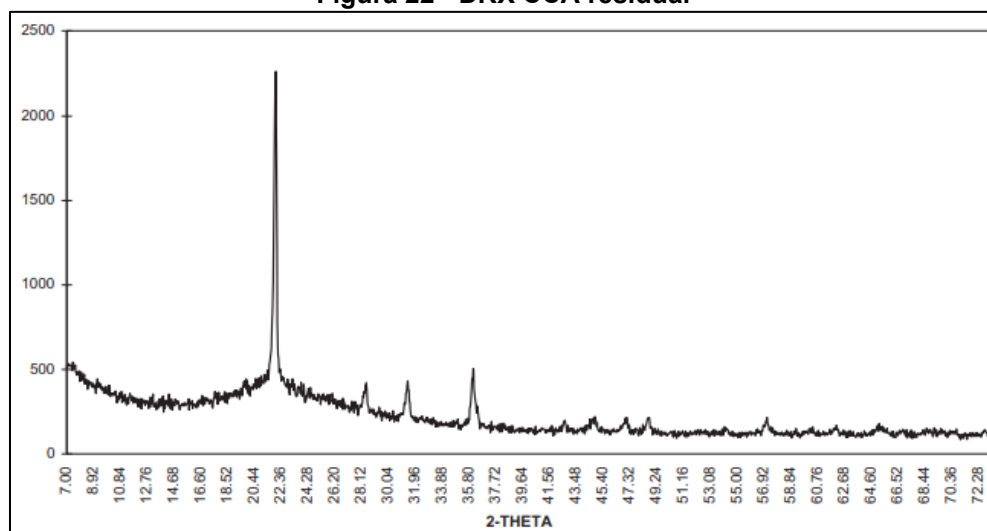
**Figura 21 - DRX CCA residual**



Fonte: Cordeiro; et al., (2011)

Rodríguez de Sensale (2010) analisaram uma CCA residual, com teor de 87% de  $\text{SiO}_2$ , proveniente do beneficiamento do grão, utilizando a técnica analítica para determinação de material amorfo de Payá et al., (2001), encontrando teor de 40% de material amorfo para a CCA do difratograma da Figura 22.

**Figura 22 - DRX CCA residual**



Fonte: Sensale (2010)

Comparando as análises das CCA residuais feitas por Cordeiro et al., (2011) e Sensale (2010), há a necessidade de uma análise quantitativa além do DRX (análise qualitativa) para se poder quantificar o amorfismo da CCA.

Segundo Singh (2018), além das fases de  $\text{SiO}_2$  com teor entre 90 e 95%, a CCA, queimada a temperaturas de 600-700°C por 2hrs, ainda seria composta por  $\text{K}_2\text{O}$

(1-3%) e carbono residual (5%). Na Tabela 8, são apresentadas as composições químicas de diferentes CCA residuais.

**Tabela 8 - Composição química CCA residual**

Material	Autor				
	Cordeiro et al., (2011)	Hwang; Huynh (2015)	Sensale; Viacava (2018)	Subashi De Silva et al. (2021)	Liu et al. (2022)
SiO <sub>2</sub>	82,6	95,6	83	84,14	92,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4	-	2	4,08	0,11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5	0,24	0,096	1,15	0,05
CaO	0,8	0,7	0,3	0,97	0,78
Na <sub>2</sub> O	0,1	-	-	1,69	-
K <sub>2</sub> O	1,8	2,66	0,7	1,34	3,5
MnO	0,3	-	0,12	-	0,26
TiO <sub>2</sub>	-	0,02	-	-	-
MgO	0,7	-	0,1	0,44	0,49
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,8	0,52	0,62	-	1,35
LOI*:	11,9	2,67	13,15	6,13	1,83

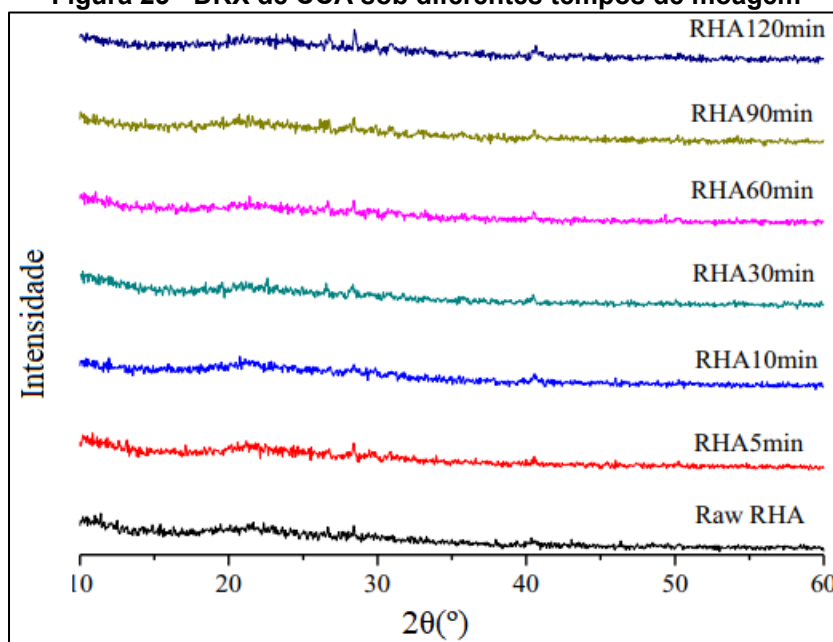
LOI\*: *Loss on ignition* (perda ao fogo)

Fonte: Autora (2023)

### 2.6.2 Influência dos tratamentos físico e térmico nas propriedades da CCA residual

A pozolanicidade da CCA é derivada da sua alta área superficial interna. Sendo um material fino, com partículas geralmente menores que 45 µm e tamanho médio entre 6 e 10 µm, a cinza residual tem sua área superficial multiplicada devido à alta porosidade e vazios internos de sua estrutura. Entretanto, devido à sua microestrutura naturalmente porosa, sua utilização requer alta demanda de água, o que afeta diretamente as propriedades no estado fresco, e posteriormente no estado endurecido devido à alta a/c necessária para o amassamento (SINGH, 2018).

A moagem da CCA em partículas finas não altera a sua composição química e mineralógica (XU et al., 2015). Como pode ser visualizado na Figura 23, as cinzas moídas por diferentes períodos, não apresentam alteração no difratograma. Também não houve mudança significativa na composição química acessada pela análise de FRX.

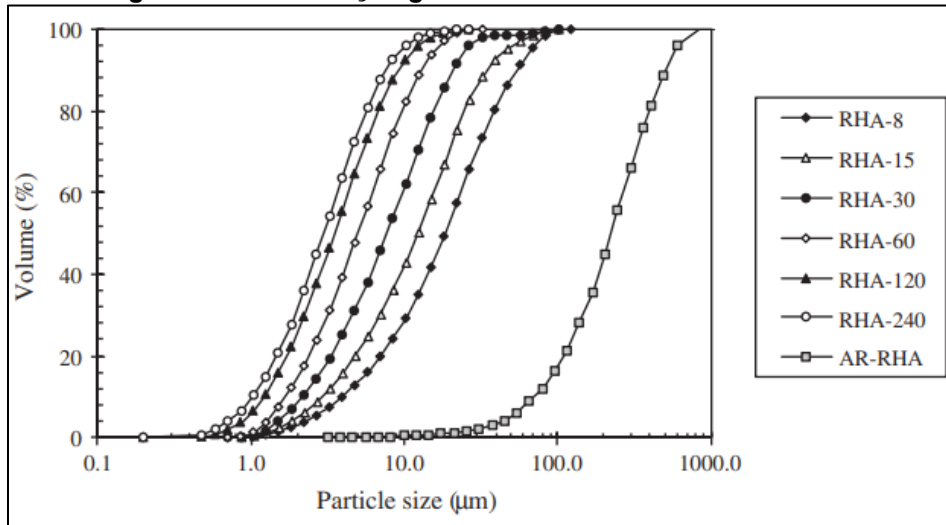
**Figura 23 - DRX de CCA sob diferentes tempos de moagem**

Fonte: Xu et al. (2015)

Segundo Xu et al. (2015), independente do método de avaliação utilizado, há uma relação linear positiva entre o tempo de moagem e a finura da CCA: quanto maior a duração do processo de moagem, maior a finura e portanto maior a atividade pozolânica da cinza. Essas partículas finas produzem um grande número de pontos de nucleação, onde se inicia a precipitação de produtos de hidratação, através da sua dispersão nas pastas de cimento.

O processo de cominuição da CCA é variado na literatura, com a utilização de moinhos de diferentes modelos e tamanhos. Cordeiro et al., (2011) investigou a atividade pozolânica da CCA residual moída nos tempos de 0, 8, 15, 30, 60, 120 e 240 min. A distribuição granulométrica, realizada a partir de difração a laser, de todos os tempos de moagem é apresentada na Figura 24. As curvas das CCA moídas apresentam formato similar indicando uniformidade de moagem para todas as partículas. O diâmetro médio para as cinzas moídas variam entre 3,6  $\mu\text{m}$  e 22,5  $\mu\text{m}$ , enquanto a CCA original apresentou valor de 224  $\mu\text{m}$ .

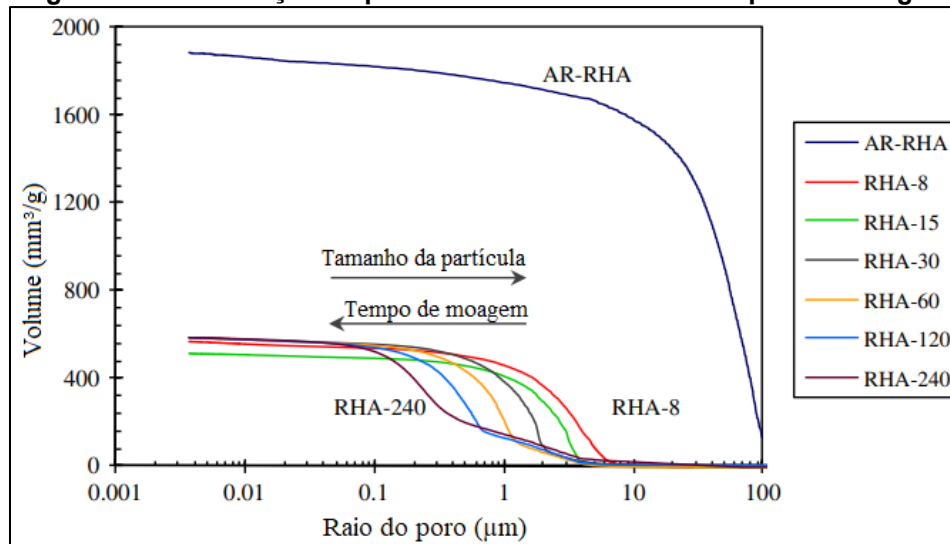
**Figura 24 - Distribuição granulométrica CCA residual moída**



Fonte: Cordeiro et al., (2011)

A redução no tamanho das partículas é refletida na porosidade da CCA. Através do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP), com resultados apresentados na Figura 25, é verificado uma alta quantidade de poros internos, com volume total de  $1890 \text{ mm}^3/\text{g}$ , com o tamanho dos poros variando de 10 a  $100 \mu\text{m}$ . Após a moagem o tamanho dos poros, para todos os tempos, varia de 0,1 à  $10 \mu\text{m}$ , resultado da fragmentação dos macro poros durante a formação de partículas finas.

**Figura 25 - Distribuição de poros CCA sob diferentes tempos de moagem**



Fonte: Cordeiro et al. (2011)

A alta porosidade apresentada pela CCA antes da moagem afeta negativamente as propriedades do estado fresco de matrizes cimentícias. Embora a moagem não melhore a reatividade da, ela altera a estrutura porosa da CCA o que não só auxilia no processo de nucleação, mas também reduz a absorção de água

pelos grãos, e portanto uma menor a/c é necessária (SINGH, 2018).

O aumento do tempo da moagem nem sempre produz um material com maior finura, pois partículas muito finas tendem a formar aglomerados, além de necessitarem maiores quantidades de água. Portanto, moagens excessivamente longas devem ser evitadas (XU et al., 2015). Desta forma, deve ser realizada uma moagem em tempo ideal, capaz de reduzir os poros da CCA residual, mas sem produzir um material muito fino, que necessita de alta a/c ou uso de plastificantes.

O tratamento térmico da CCA residual, através da requeima do material, sob temperaturas controladas de 400, 500, 600 e 700°C, foi investigado por Dalla (2001) que concluiu não haver diferenças significativas no amorfismo/cristalinidade do material após o processo. O principal fator levantado no trabalho é a diminuição do teor de carbono residual da CCA, tornando o material mais agradável visualmente para utilização em matrizes cimentícias. A autora realizou em suas análises uma combinação dos dois processos, requeima e moagem.

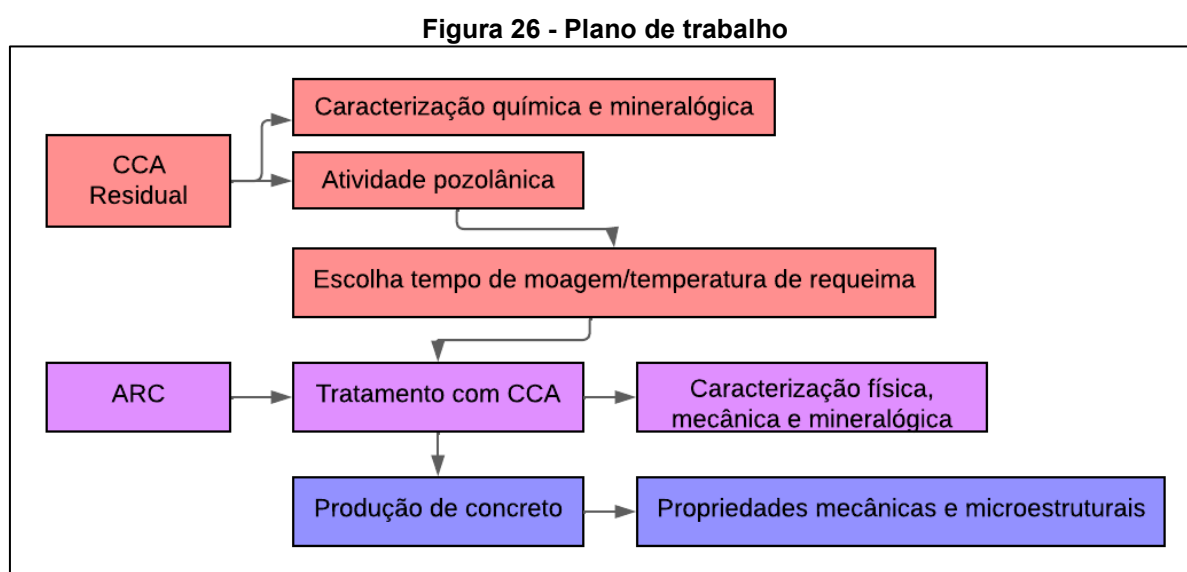
Pouey (2006), elaborou uma extensa investigação com temperaturas de 400, 600 e 1100°C, variando tempos de requeima e choque térmico nas amostras. Para os tratamentos com temperaturas 400 e 600°, não houve mudança nas características mineralógicas das amostras, não aumentando a cristalinidade do material, e também com o efeito positivo do clareamento da CCA residual. Por outro lado, à temperatura de 1100°C, com maior ganho na coloração, propiciando um clareamento superior, entretanto tornando as amostras predominantemente cristalinas, diminuindo a sua reatividade.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo de caráter experimental, o potencial da cinza de casca de arroz residual como material pozolânico para uso no tratamento do agregado reciclado de concreto foi investigado. Para isso, a influência do tempo de moagem da CCA residual na sua reatividade através do aumento da área específica, bem como a mudança no perfil mineralógico e composição química, através de diferentes temperaturas de requeima, foram investigadas.

Após sua caracterização, a cinza com melhor otimização entre tempo de moagem e capacidade pozolânica, e que atenda os requisitos de norma, foi empregada na produção de misturas pozolânicas com cimento CP V-ARI, seguindo como base o trabalho de Shaban et al., (2019) em que pozolanas comerciais foram aplicadas, mas utilizando a CCA residual.

O fluxograma da Figura 26 sumariza o plano de trabalho da presente pesquisa.



Fonte: Autora (2023)

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Cimento Portland

Para desenvolvimento do estudo, o cimento Portland tipo CPV ARI – de alta resistência inicial foi escolhido para produção das misturas pozolânicas de tratamento e confecção dos concretos. A escolha se baseou nos limites de composição segundo

a NBR 16697:2018, em que este tipo de cimento não possui adições pozolânicas, permitindo a análise das propriedades pozolânicas da CCA. O CPV ARI também é o cimento com as menores adições em massa de material carbonático, tendo os valores limitados entre 0 e 10%.

Para o ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento Portland descrito pelo item 3.2.1.6, foi utilizado o cimento CII-F-32 seguindo a NBR 5752:2014.

Na Tabela 9 são apresentadas composições químicas e características físicas dos cimentos CP V-ARI e CP II- F-32 utilizados no presente trabalho.

**Tabela 9 - Componentes químicos e características físicas cimentos**

Cimento	Componentes químicos (%)							Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Superfície específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O		
CPV-ARI	62,90	19,31	4,64	2,48	2,75	2,52	-	3,09	4,27
CII-F-32	75,45	12,20	1,91	-	0,32	8,33	1,80	3,10	3,36

**Fonte: Autora (2023)**

### 3.1.2 Agregado graúdo e miúdo

Foram utilizados dois tipos de agregados graúdos no presente trabalho: um agregado natural e o agregado reciclado de concreto. Ambos foram aplicados na produção de traços de concreto.

Os ARC foram produzidos em laboratório utilizando moinho de mandíbula. O resíduo de concreto utilizado no processo de cominuição tem como origem obras de demolição e construção de estruturas de concreto da cidade de Pato Branco e passaram pela etapa de separação de armaduras e outros componentes na empresa Entulhos Patinho. A granulometria escolhida do material foi a de brita 1, para tanto, após a moagem, os agregados foram separados por peneiramento, sendo utilizados aqueles com granulometria inferior à 19 mm e superiores à 4,75 mm.

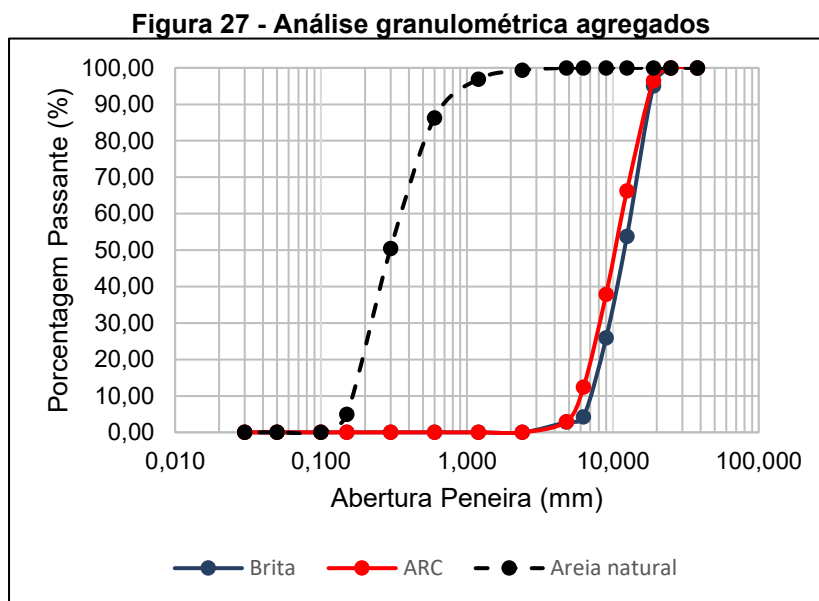
O agregado natural, utilizado para produção do traço de concreto para comparação com o concreto de ARC, é de origem de usina de britagem.

Para produção dos concretos, também foi utilizada a areia natural proveniente da extração nos leitos de rio no estado do Paraná, e que é comercializada na região. A propriedade física de densidade foi ensaiada através do estabelecido pela NBR 16916:2021 e apresentou valor de 2,709 g/cm<sup>3</sup>.

A análise granulométrica dos agregados foi performada seguindo



procedimento descrito pela NBR 17054:2022 e é representada na Figura 27.



Além da areia natural empregada na produção dos concretos, a areia IPT segundo a NBR 7214:2015, foi utilizada para a produção das argamassas do Índice de atividade pozzolânica. O teor de sílica do material é de 97,4%, umidade de 0,00% e matéria orgânica <100ppm. A distribuição das frações granulométricas do material é apresentada na Tabela 10.

**Tabela 10 - Granulometria da areia normal IPT**

Fração	Material retido entre as peneiras de abertura nominal	Porcentagem em massa (%)	
		Resultados	Requisito
16	2,4 mm e 2,0 mm	6	≤ 10
	2,0 mm e 1,2 mm	91	≥ 90
30	1,2 mm e 0,6 mm	99	≥ 95
50	0,6 mm e 0,3 mm	99	≥ 95
100	0,3 mm e 0,15 mm	98	≥ 95

Fonte: Fabricante (2019)

### 3.1.3 Cinza de casca de arroz

A CCA utilizada no tratamento proposto no presente estudo é a cinza residual sem controle de temperatura de queima e sem pré beneficiamento. O material empregado foi obtido da Empresa Cooperativa Agroindustrial Alegrete Ltda.,

localizada na cidade de Alegrete-RS. A sua caracterização bem como a preparação para ser utilizada nas misturas pozolânicas de tratamento são discutidas em item específico dos métodos.

### 3.2 Métodos

Os procedimentos experimentais do estudo foram divididos nas seguintes etapas:

Etapa 1: Moagem, caracterização e escolha da cinza de casca de arroz;

Etapa 2: Tratamento por imersão em solução de CCA e cimento;

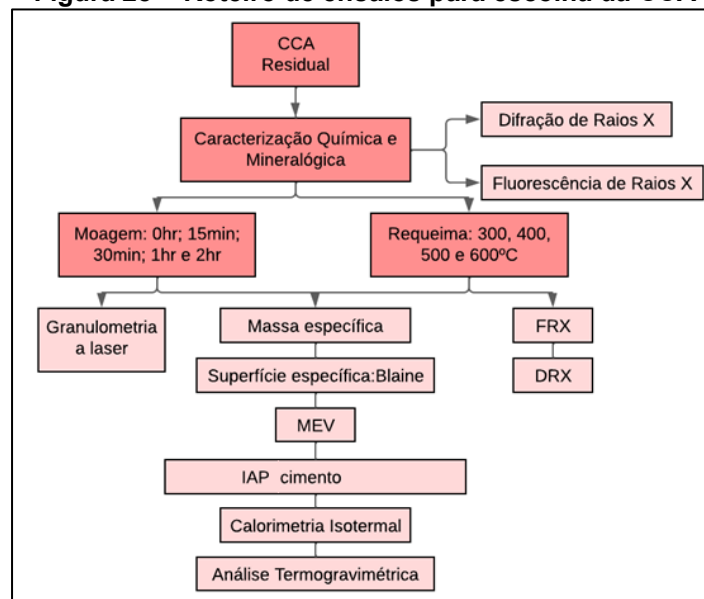
Etapa 3: Caracterização dos ARC pré e pós tratamento;

Etapa 4: Produção do concreto e ensaios em estado fresco e endurecido.

#### 3.2.1 Caracterização e escolha da CCA

Escolhida para utilização no tratamento proposto, a CCA residual foi analisada quanto à composição química e mineralógica, bem como seu comportamento reativo após a moagem e requeima. O plano de trabalho de caracterização e escolha da cinza após diferentes tempos no moinho e temperatura de requeima, é apresentado na Figura 28.

**Figura 28 - Roteiro de ensaios para escolha da CCA**



Fonte: Autora (2023)

### 3.2.1.1 Difração de Raios x – análise mineralógica

Para determinação da composição mineralógica, bem como o grau de amorficidade do material pré e pós requeima, uma amostra de CCA residual mais uma amostra de cada temperatura de requeima foi submetida ao ensaio de Difração de Raios X – DRX. Esse ensaio, permite identificar de forma qualitativa as fases cristalinas presentes na amostra.

Foi utilizado o equipamento modelo Rigaku Mini Flex 600 com tubo de cobre e voltagem da corrente de 40 kV, disponível na Central de Análises da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco. Os parâmetros utilizados para este ensaio são: comprimento de onda de 1,54 Å; intervalo de 5°-70° (2θ); passo de 0,02° e com intensidades registradas por 0,4 s em cada passo.

A preparação da amostra consistiu na moagem do material em almofariz, onde todo o material deve ser completamente triturado até passar por peneira de 150µm e secagem por 24 horas em estufa a 40°C.

### 3.2.1.2 Fluorescência de raios X – análise química

A composição química de forma semiquantitativa da CCA residual pré e pós requeima também foi analisada através do ensaio de espectrometria de Fluorescência de Raios X – FRX utilizando o espectrômetro Modelo EDX720/800HS da marca SHIMADZU do Laboratório de Geotecnia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Curitiba

A técnica consiste na detecção da emissão de fluorescências características da amostra, o feixe secundário, quando a mesma é bombardeada por um feixe primário de Raios X. Os dados são captados e formam um gráfico de comprimento de onda por intensidade, com o qual é possível identificar os elementos presentes e as suas concentrações (NASCIMENTO-DIAS et al., 2017).

Através dos dados coletados nas análises de DRX e FRX os requisitos químicos para materiais pozolânicos estabelecidos pela NBR 12653:2014 puderam ser avaliados.

### 3.2.1.3 Moagem

Para a moagem da CCA, foi utilizado um processo mecânico à seco com o equipamento moinho de bolas da marca Chiarotti disponível no Laboratório de Engenharia Civil da UTFPR – Campus Pato Branco. O conjunto é composto por um jarro cilíndrico de medidas 20x30cm, bolas de alumina de diâmetro 20 mm e massa aproximada de 10 g cada, totalizando uma massa de 6,6 kg, que equivale em sua totalidade à 55% da capacidade do moinho, ferragens que são a armação de ferro para fixar a tampa e servir de apoio para o giro, e equipamento com rolos giratórios e motor. A Figura 29 é uma imagem do moinho utilizado.

**Figura 29 - Moinho de bolas constituído por a) jarro e ferragens b) bolas de alumina e c) motor e rolos giratórios.**



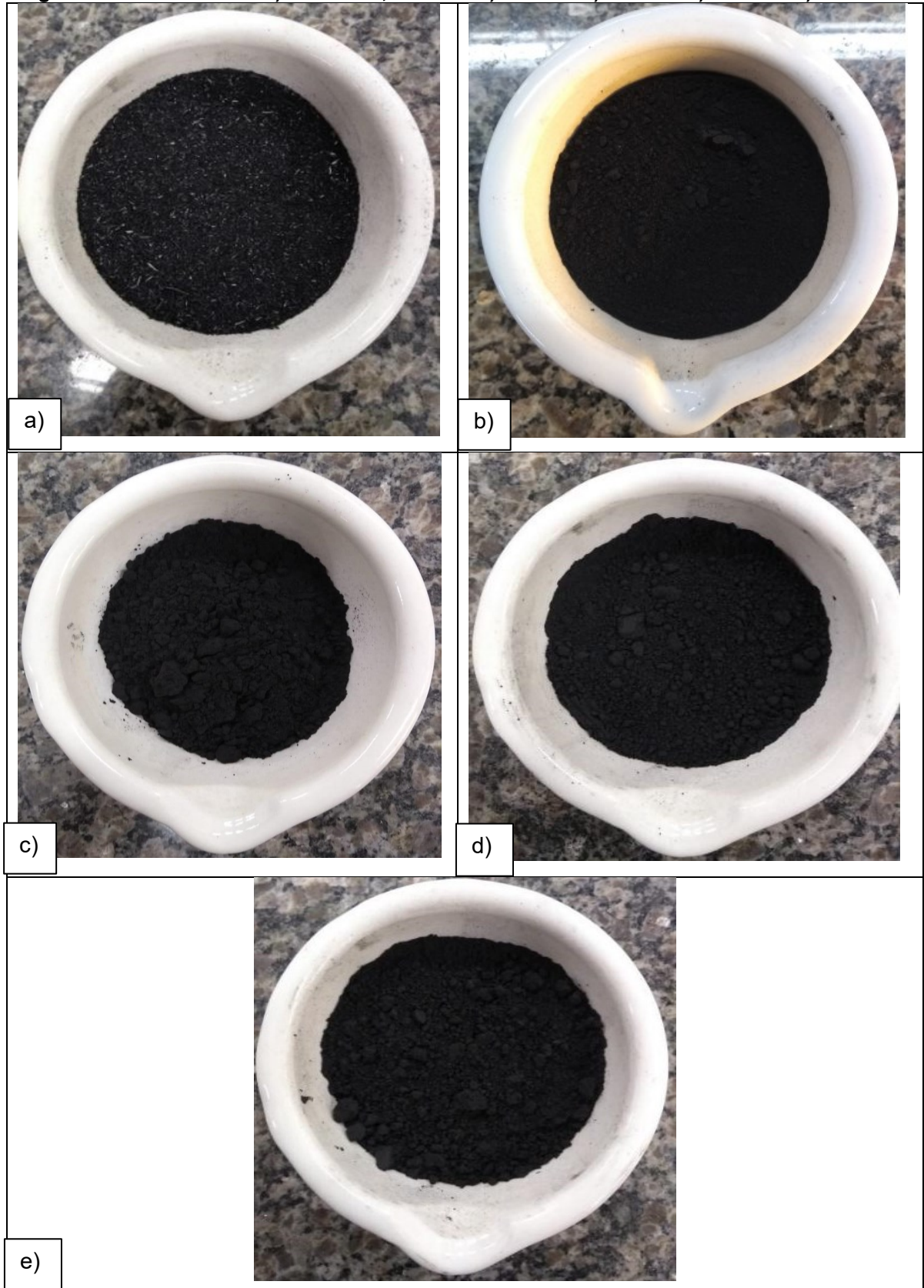
Fonte: Autora (2023)

Os tempos de moagem foram escolhidos a fim de se obter uma finura ideal para a CCA, sem que haja um gasto elevado de energia, e que seja possível obter uma cinza com melhor reatividade. Foram adotados quatro tempos de moagem: 0h (CCA-RES), 15 min (CCA-15), 30 min (CCA-30), 1 hora (CCA-1H) e 2 horas (CCA-2H). A fim de padronização, para todos os tempos foi fixado uma massa de 1kg de cinza residual a ser moída.

A escolha desses tempos teve por objetivo explorar tempos de moagem menores que aqueles utilizados por Zaparte (2021), onde foram escolhidos períodos de 2 e 3 horas de moagem para a mesma cinza, e apresentando melhores resultados de atividade pozolânica para a cinza submetida à 2 horas de moagem. Após a moagem, sob diferentes tempos, as cinzas foram submetidas à caracterização física e de índice de atividade pozolânica. Na Figura 30 é possível visualizar as amostras de

cinza moídas sob diferentes tempos de moagem.

**Figura 30 - CCA residual a) CCA-RES; e moída b) CCA-15 c) CCA-30 d) CCA-1H e) CCA-2H**



Fonte: Autora (2023)



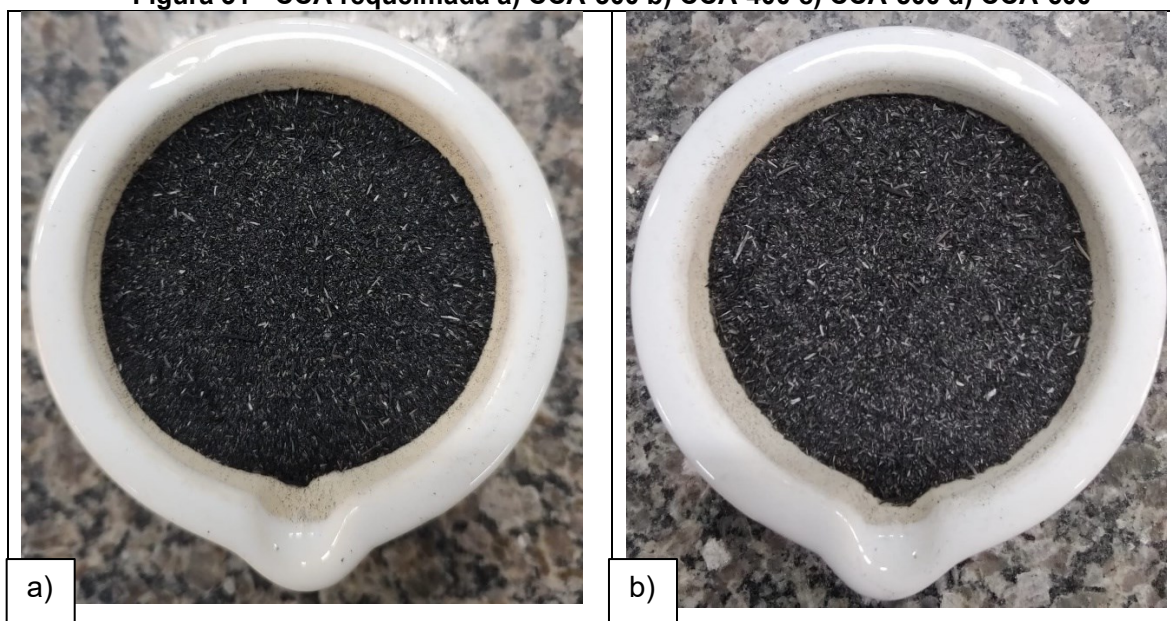
### 3.2.1.4 Requeima

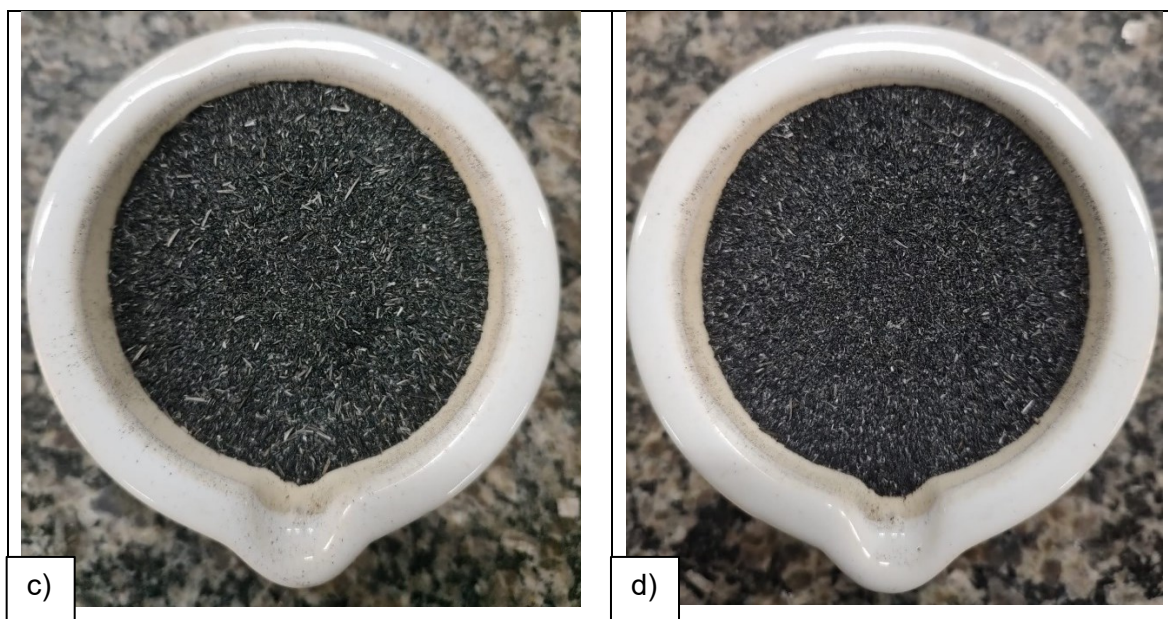
A requeima da CCA residual foi realizada em mufla modelo SSFM-16L da marca Lucadema. Foram exploradas quatro temperaturas, sendo elas de 300, 400, 500 e 600 °C com tempo de 90 min de calcinação e taxa de aquecimento de 10°C/min e o resfriamento lento.

A escolha dessas temperaturas teve como objetivo explorar temperaturas de requeima inferiores à 700°C, faixa de queima em que a CCA começa a apresentar fases cristalinas na queima (Xu et al., 2012). A requeima visa analisar a influência deste processo no potencial pozolânico da CCA residual, seja ela na mudança do amorfismo/cristalinidade ou na composição química do material.

Na Figura 31 são apresentadas as cinzas CCA-300, CCA-400, CCA-500 e CCA-600 após a requeima sob diferentes temperaturas.

**Figura 31 - CCA requeimada a) CCA-300 b) CCA-400 c) CCA-500 d) CCA-600**





Fonte: Autora (2023)

#### 3.2.1.5 Massa específica e superfície específica

As massas específicas das cinzas moídas sob diferentes tempos e requeimadas sob diferentes temperaturas utilizadas neste trabalho, foram determinadas utilizando o frasco volumétrico de *Le Chatelier* e o método especificado pela NBR 16605:2017, o qual método determina a massa específica do material considerando um volume pré estabelecido de líquido (querosene), e a diferença do mesmo após a introdução da amostra no frasco.

A determinação da finura/superfície específica (superfície referida à massa) das cinzas foi realizada pelo método de permeabilidade ao ar, Método de *Blaine*, descrito pela NBR 16372:2015. Neste ensaio a superfície específica é quantificada através do tempo necessário para que uma determinada quantidade de ar flua através de uma camada de pó compactada.

#### 3.2.1.6 Difração a laser e microscopia eletrônica de varredura das cinzas

A fim de analisar a granulometria das cinzas de casca de arroz antes e após os diferentes tempos de moagem, a técnica de difração a laser foi empregada. A difração a laser mede as distribuições de tamanho das partículas (na faixa de nanômetros à milímetros) pela medição da variação angular na intensidade da luz difundida à medida que um feixe de laser interage com as partículas dispersas da

amostra (Malvern Pananalytical, 2021). O equipamento utilizado foi o granulômetro a laser BETTERSIZE/S3 PLUS. O ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Curitiba.

As amostras de cinza com diferentes tempos de moagem também foram analisadas no MEV para verificar a estrutura das partículas de CCA após o processo de cominuição. O equipamento utilizado é o microscópio eletrônico de varredura Modelo TM3000, Hitachi.

### 3.2.1.7 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland

Com o intuito de avaliar a influência da finura nas propriedades ligantes, o índice de atividade pozolânica da CCA foi avaliado através do índice de desempenho com Cimento Portland descrito pela NBR 5752:2014. Foram produzidas dez argamassas com dosagens estipuladas pela NBR 5752:2014, sendo uma argamassa referência contendo cimento Portland tipo CP II-F-32, areia normal e água. Nas outras nove dosagens, o aglomerante foi substituído em 25% da massa total pelo material pozolânico em análise: CCA moída e requeimada. A dosagem em massa para produção de argamassa suficiente para moldagem de seis corpos de prova de 50x100mm é apresentada na Tabela 11.

<b>Tabela 11 - Dosagem argamassas de referência e com CCA</b>		
Material	Massa (g)	
	Argamassa referência	Argamassas com 25% de CCA
Cimento CP II-F-32	624±0,4	468±0,4
CCA	-	156±0,2
Areia Normal	1872,0	1872,0
Água	300±0,2	300±0,2
Aditivo	-	Suficiente para manter a consistência da referência igual ± 10mm ou maior

**Fonte: Adaptado de NBR 5752:2014**

Para as argamassas que obtiveram um índice de consistência inferior em mais de 10mm em relação à argamassa referência, foi necessário o uso de aditivo superplastificante.

Quatro corpos de prova cilíndricos de 50 x 100 mm foram moldados para cada dosagem e idade, e a resistência à compressão foi ensaiada aos 7, 28 e 91 dias conforme procedimento prescrito pela NBR 7215:2019.



Segundo a NBR 12653:2015, o índice de desempenho da argamassa com CCA é expresso em porcentagem da resistência obtida pela argamassa produzida somente com cimento aos 28 dias. Esse valor deve ser igual ou superior a 90%.

#### 3.2.1.8 Calorimetria isotérmica

Através do ensaio de calorimetria isotérmica é possível quantificar o fluxo de calor e o calor acumulado de pastas cimentícias durante o processo de hidratação.

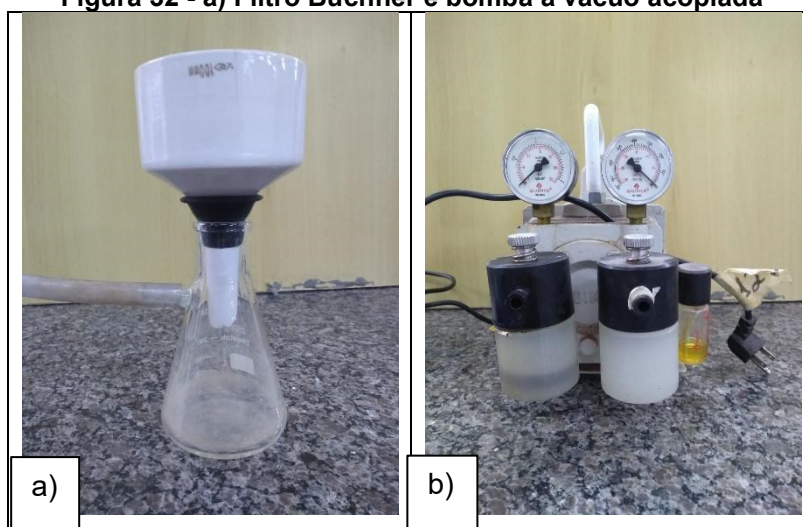
Utilizando-se do calorímetro de modelo I-Cal 2000 HPC, da marca Calmetrix, foram monitoradas por 7 dias à temperatura de 23°C, pastas de cimento e CCA na mesma proporção de 25% de CCA sob os diferentes tempos de moagem utilizados no ensaio de atividade pozolânica com cimento Portland. A massa total de cimento e CCA foi de 20 gramas e a relação a/c de 0,4, a mesma para todas as amostras.

Desta forma, foi analisada a influência da finura e da requeima da CCA no processo de hidratação das pastas.

#### 3.2.1.9 Processo de interrupção da hidratação

Para serem submetidas às análises de microestrutura que compreendem, no presente trabalho, os ensaios de DRX, TG/DTG e MEV, todas as amostras de pastas e argamassas passaram pelo processo de interrupção de hidratação nas idades de interesse dos ensaios.

Esse processo consiste na troca de solvente, ou seja, da água da amostra por acetona ou álcool isopropanol, conforme método descrito por Gruskovnjak et al., (2008). Os fragmentos da amostra foram imersos no solvente por 2 horas e posteriormente o líquido foi extraído através do bombeamento a vácuo utilizando o filtro de Büchner com bomba acoplada, como mostra a Figura 32. Ao final, os fragmentos foram levados à secagem finalizadora em estufa entre  $40\pm 2^\circ\text{C}$  por 24 horas. O material deve ser armazenado em embalagem lacrada e analisado, preferencialmente, logo após a preparação.

**Figura 32 - a) Filtro Büchner e bomba a vácuo acoplada**

Fonte: Autora (2023)

### 3.2.1.10 Análise Termogravimétrica e Termogravimétrica Derivada TG/DTG

Com a aplicação das análises termogravimétrica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG), é possível identificar compostos hidratados formados durante a hidratação das pastas através de picos de perda de massa sofridos pelo material com a aplicação de calor.

Para este ensaio, o analisador termogravimétrico da marca PerkinElmer modelo STA 600, disponível na Central Analítica Multiusuário de Medianeira, foi utilizado. Neste ensaio uma amostra de 10 mg passante na peneira 150  $\mu\text{m}$  foi analisada após interrupção da hidratação por imersão em solvente, com taxa de aquecimento de  $10^\circ/\text{min}$  e um intervalo de temperatura de 50 a  $850^\circ\text{C}$ .

Amostras de pastas foram ensaiadas aos 7, 28 e 91 dias, sendo uma referência apenas com cimento e uma para cada tempo de moagem e temperatura de requieima da CCA, utilizando a dosagem de 75% de cimento Portland tipo CP II-F-32, 25% de CCA e relação a/c de 0,7, seguindo a quantidade de água adotada por Hoppe Filho et al., (2017), necessária para que a pasta contendo cinza residual sem moagem pudesse ser misturada adequadamente.

### 3.2.2 Tratamento do ARC por imersão em solução de CCA e cimento

Após a escolha da CCA com melhor potencial pozolânico a mesma foi empregada no tratamento de pré-imersão em mistura pozolânica dos ARC, seguindo

tempo de imersão e cura empregados por Shaban; et al., (2019).

Foram formados cinco grupos de ARC, sendo um deles referência que não recebeu tratamento, e outros quatro que foram tratados sob diferentes porcentagens de CCA e cimento. A proporção de aglomerantes para agregados foi de 20% do peso, ou seja, para cada quilograma de ARC foram utilizados 200 gramas da mistura cimento-CCA.

Os aglomerantes, CCA residual e cimento, foram misturados com água na betoneira, na proporção finos/água de 1:2,5 em peso. Essa quantidade de água foi suficiente para que os agregados ficassem em solução aquosa sem formar torrões após a secagem.

A Tabela 12 apresenta as proporções de materiais propostas para produção da solução de tratamento para cada tonelada de ARC para cada grupo.

**Tabela 12 - Proporção de materiais para tratamento do ARC**

Grupo	Aglomerante (kg)		ARC (kg)	Água (kg)	Relação finos/água
	Cimento	CCA			
ARC (referência)	-	-	1000	-	-
C-CCA90-10	180	20	1000	500	1:2,5
C-CCA70-30	140	60	1000	500	1:2,5
C-CCA50-50	100	100	1000	500	1:2,5
C-100	200	-	1000	500	1:2,5

Fonte: Autora (2023)

Para a produção das soluções de tratamento, os aglomerantes e a água foram misturados por dois minutos em betoneira. Em seguida, os agregados adicionados e misturados por outros dois minutos.

Os agregados permaneceram em imersão na solução por quatro horas e posteriormente retirados e secados à temperatura ambiente por três dias.

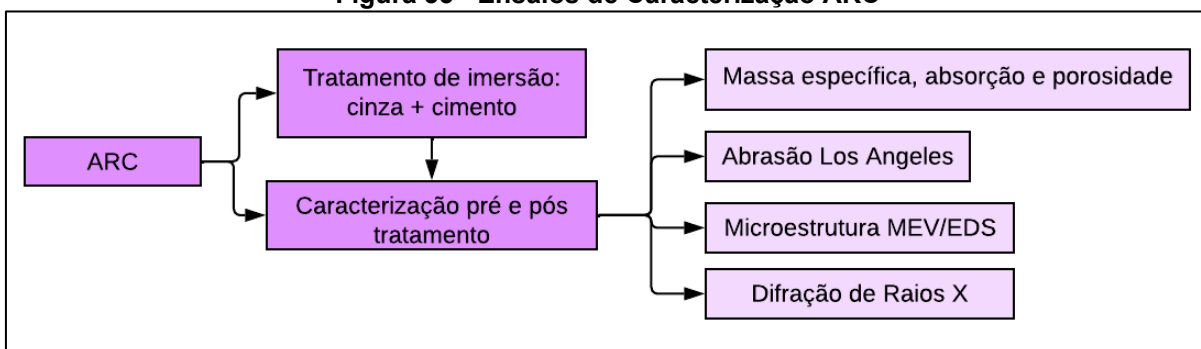
Com o processo de tratamento finalizado, os ARC foram analisados quanto às suas propriedades físicas e de microestrutura. A fim de comparar e quantificar a performance do tratamento, as análises foram estendidas ao grupo de agregados de referência.

### 3.2.3 Caracterização dos ARC antes e depois do tratamento

Com o objetivo de investigar as propriedades físicas e de microestrutura dos ARC antes e após o tratamento em imersão em soluções de CCA, uma série de testes

foram conduzidos. Os testes descritos nesta seção são apresentados na Figura 33.

**Figura 33 - Ensaios de Caracterização ARC**



Fonte: Autora (2023)

### 3.2.3.1 Massa específica, absorção de água e porosidade

Os cinco grupos de ARC foram ensaiados quanto à densidade do agregado na condição seca, densidade do agregado na condição saturada superfície seca e absorção de água dos agregados graúdos seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 16917:2021.

A porosidade  $\eta$  dos agregados foi obtida assumindo os agregados saturados e utilizando a Equação 1 conforme adotado por ABBAS et al., (2009).

$$\eta = \left[ \left( 1 - \frac{m_A}{m_B} \right) \times \rho_{SSS} \right] \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

$\eta$  a porosidade;

$m_A$  a massa da amostra seca em estufa à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  (g);

$m_B$  a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

$\rho_{SSS}$  a densidade do agregado na condição saturado superfície seca ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

### 3.2.3.2 Abrasão Los Angeles

Para avaliar as mudanças em relação à resistência ao desgaste dos ARC submetidos às diferentes condições de tratamento, o ensaio de Abrasão Los Angeles descrito pela NBR 16974:2021 foi realizado.

O procedimento consistiu em quantificar a perda de massa em porcentagem de 5,0 kg de agregados graúdos, sendo destes 2,5 kg passantes na peneira 19 mm e

retidos na peneira 12 mm, e 2,5 kg passantes na peneira 12 mm e retidos na peneira 9 mm, quando rotacionados 500 vezes à velocidade entre 30 e 33 rpm em tambor contendo 11 esferas de fundição com diâmetro de 48 mm e massa total de 4572,4 g. A massa da amostra, a quantidade de carga abrasiva e o número de rotações foram determinados a partir da graduação do agregado estabelecida na Tabela 3 da NBR 16974:2021.

Após ser retirado do tambor, o material foi passado na peneira de abertura 1,7 mm, lavado e seco em estufa por 24 hrs até a massa constante. A porcentagem de perda de massa por abrasão é calculada através da Equação 2.

$$P = \frac{m - m_1}{m} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo:

P a perda de massa em porcentagem;

m a massa seca inicial

m<sub>1</sub> a massa seca retida na peneira 1,7 mm.

### 3.2.3.3 DRX Superfície ARC

O ensaio de difração de raios X foi realizado com material da superfície dos cinco grupos de ARC e também do agregado natural. Uma amostra de 2 kg de cada agregado foi submetida ao ensaio de abrasão a fim de moer e assim constituir uma amostra padronizada. Após a moagem, o material foi passado em peneira 75µm. Desta forma, uma porção pequena de areia ainda fará parte da constituição das amostras de agregados reciclados, mas de forma igual ou proporcional em todos os grupos. As amostras de ARC também passaram por processo de interrupção de hidratação conforme prescrito no item 3.2.1.10 deste trabalho.

Através do ensaio de difração de raios X foi possível identificar fases de compostos hidratados formados durante o tratamento do agregados,

O equipamento e condições do ensaio são os mesmos descritos no item 3.2.1.9 do presente trabalho. As amostras foram coletadas aos 3 dias após o tratamento dos agregados.

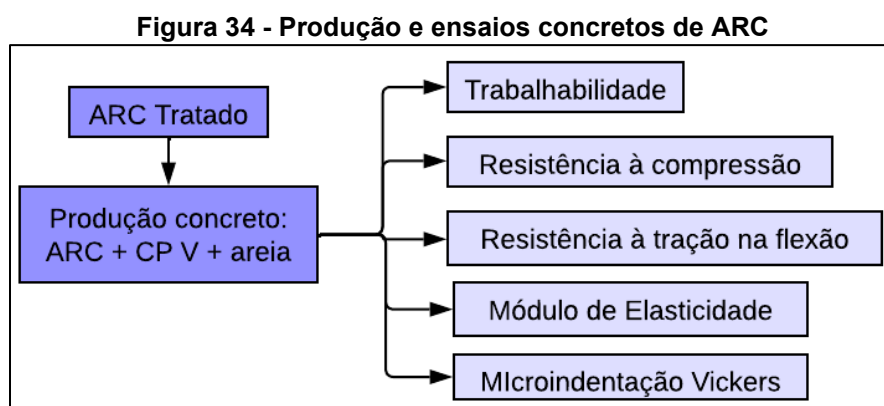
### 3.2.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura: Superfície ARC

Em termos de análise morfológica tanto da superfície como dos poros do ARC foi utilizada a técnica de MEV. Foi possível identificar com o uso de microscopia eletrônica as mudanças nos poros e microfissuras da superfície da argamassa residual através do preenchimento proposto pelo tratamento.

Foram coletados fragmentos da superfície dos cinco grupos de ARC de dimensões de aproximadamente 5mm, após os três dias de cura do tratamento. As amostras foram submetidas ao processo de interrupção de hidratação, secas à vácuo e em estufa a 40°C por 24hrs.

### 3.2.4 Produção do concreto e ensaios em estado fresco e endurecido

Com a finalidade de avaliar a influência do tratamento de imersão em solução pozolânica de CCA, nas propriedades dos concretos produzidos com os agregados tratados, foram produzidos cinco grupos de concreto com substituição total (100%) do agregado graúdo natural pelo ARC tratado e não tratado, bem como um traço com brita natural com o intuito de comparação. O método de dosagem, produção, e cura, bem como os ensaios referentes às propriedades mecânicas de compressão, tração na flexão, módulo de elasticidade, microscopia e microindentação da zona ITZ são descritos nesta seção. Estes dados foram obtidos através de procedimentos a serem realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UTFPR Campus Pato Branco. A Figura 34 sumariza os procedimentos para produção e ensaios dos concretos.



Fonte: Autora (2023)

### 3.2.4.1 Dosagem e produção dos concretos com ARC

O método de dosagem escolhido para produção dos concretos nesta pesquisa é o da Associação Brasileira de Cimento Portland, conhecido como ABCP (1995) uma adaptação do método proposto pelo American Concrete Institute – ACI, para as condições de uso brasileiras. Para tanto os agregados devem atender às especificações determinadas pela NBR 7211:2019.

Seguindo o método ABCP, o primeiro passo foi a determinação da consistência do concreto a ser produzido. A classe S50 ( $50 \leq A < 100$  mm) de abatimento foi adotada, sendo esta a recomendada pelo método para aplicação em elementos estruturais como vigas e colunas.

Posteriormente, foi realizada a determinação do diâmetro máximo do agregado graúdo, 19mm, e foi aferido pelo ensaio de granulometria dos agregados disponíveis, tanto o agregado natural como o ARC.

A escolha da relação água/cimento ( $a/c$ ) foi realizada considerando o requisito de durabilidade disposto pela NBR 12655:2022 para a classe II de agressividade ambiental utilizada para ambientes urbanos com pequeno risco de deterioração, sendo considerada uma agressividade moderada. Para essa classe a relação  $a/c$  deve ser inferior à 0,60 considerando estruturas de concreto armado. Para a mesma situação a norma ainda determina a produção de um concreto com classe de resistência  $\geq C25$  e consumo de cimento  $\geq 280$  kg/m<sup>3</sup>.

Além de considerar os requisitos de durabilidade, a relação  $a/c$  foi escolhida em função da curva de evolução de resistência do cimento, curva de Abrams, e utilizando a Equação 3 da NBR 12655:2022.

$$f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65 \times S_d \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$f_{cmj}$  é a resistência média do concreto à compressão prevista para a idade de j dias (Mpa);

$f_{ckj}$  é a resistência característica do concreto à compressão aos j dias (Mpa)

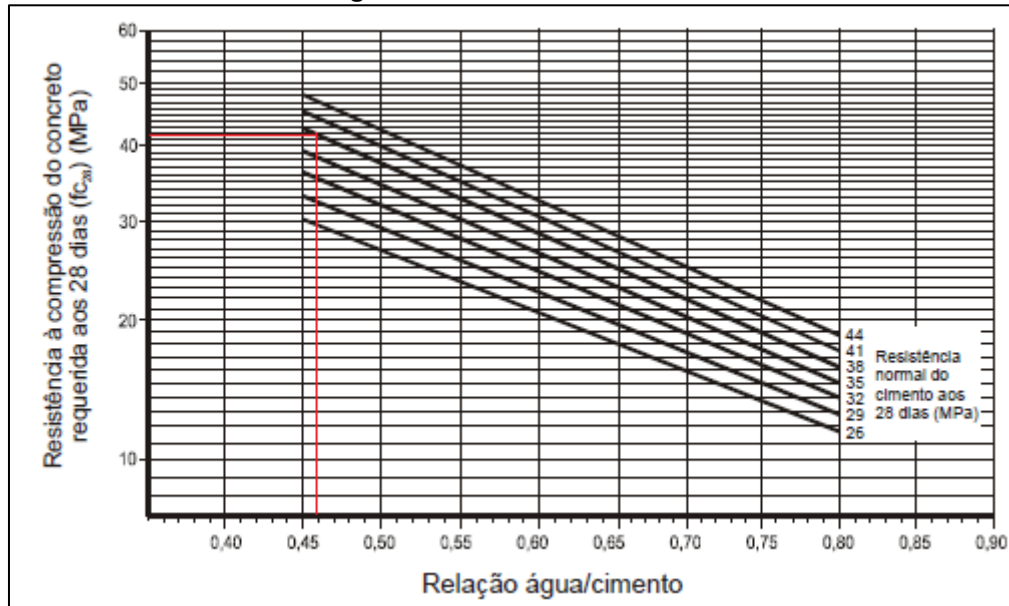
$S_d$  é o desvio padrão da dosagem (Mpa)

O desvio padrão adotado foi  $S_d = 4$  Mpa, pois o cimento, agregados e água foram medidos em massa, e a água foi corrigida em função da umidade dos

agregados. O  $f_{ck28\text{dias}}$  adotado foi de 35 Mpa, desta forma o  $f_{cm28\text{dias}}$  calculado foi de 41,6 Mpa.

Utilizando as Curvas de Abrams na Figura 35 para esse  $f_{cm28\text{dias}} = 41,6$  Mpa, foi obtida uma relação a/c de 0,46, uma vez que o cimento utilizado apresentou uma resistência normal de 38 Mpa aos 28 dias.

Figura 35 - Curvas de Abrams



Fonte: Rodrigues (2000)

O consumo de água ( $C_a$ ) foi determinado como  $205 \text{ l/m}^3$  considerando o abatimento desejado e a dimensão máxima do agregado graúdo. Como a relação a/c foi fixada para todos os traços, contendo tanto brita natural como agregados reciclados tratados e não tratados, o mesmo  $C_a$  foi adotado para todas as misturas a fim de comparar a influência do agregado graúdo nas propriedades dos concretos. Seguindo ainda a relação a/c o consumo de cimento ( $C_c$ ) foi fixado em  $455,65 \text{ kg/m}^3$ .

As proporções de agregado graúdo e agregado miúdo para cada traço contendo os diferentes tipos de agregados graúdos seguiu o descrito pelo método ABCP, considerando os diferentes módulos de finura e  $d_{\text{máx}}$  do agregado graúdo e as massas específicas dos materiais.

As proporções para produção de todos os traços de concreto produzidos neste trabalho são apresentadas na Tabela 13.



**Tabela 13 - Proporções das misturas para produção de concreto**

Mistura	Água (l/m <sup>3</sup> )	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado Graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado miúdo (kg/m <sup>3</sup> )
Brita 1	205,00	445,65	1323,58	530,32
ARC	205,00	445,65	989,34	543,69
C-100	205,00	445,65	1029,45	499,13
C-CCA-90-10	205,00	445,65	1016,08	521,41
C-CCA-70-30	205,00	445,65	1025,00	508,04
C-CCA-50-50	205,00	445,65	1033,91	494,67

Fonte: Autora (2023)

O volume de concreto produzido foi suficiente para produção dos corpos de prova para os ensaios das propriedades mecânicas e físicas do material.

A fim de avaliar a trabalhabilidade desenvolvida por cada grupo de concreto utilizando os diferentes ARC tratados foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone, conhecido como *Slump Test*, com procedimento descrito pela NBR 16889:2020.

### 3.2.4.2 Resistência à Compressão Axial

Seguindo as diretrizes da NBR 5738:2015 acerca do procedimento de moldagem e cura de corpos de prova, foram produzidos nove corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 x 20cm, para cada dosagem, para realização do ensaio de resistência à compressão axial.

Foi necessária a aplicação de lubrificante nas formas metálicas antes da concretagem para facilitar a desmoldagem. O concreto foi disposto em duas camadas, recebendo 12 golpes em cada camada com haste metálica para adensamento. Após as primeiras vinte e quatro horas de cura, os corpos de prova foram identificados e armazenados imersos em solução saturada de hidróxido de cálcio a uma temperatura de  $23 \pm 2$  °C até as idades a serem ensaiados.

Aos 3, 7, 28 dias de idade, a contar de sua moldagem, os corpos de prova tiveram suas bases planificadas em retífica, e foram submetidos ao ensaio de compressão axial descrito pela NBR 5739:2018.

A resistência à compressão dos concretos foi calculada através da Equação 4.

$$f_c = \frac{4F}{\pi * D^2} \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo:

$f_c$  a resistência à compressão em megapascals (MPa);

F a força máxima alcançada no ensaio em newtons (N);

D o diâmetro do corpo de prova em milímetros (mm).

#### 3.2.4.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Utilizando o mesmo procedimento para confecção e cura descrito no item 3.2.4.2, foram produzidos três corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm para cada grupo de concreto para realização do ensaio de tração por compressão diametral descrito pela NBR 7222:2011. O ensaio foi performedo na idade de 28 dias através da aplicação de carga no eixo formado pelo diâmetro do corpo de prova deitado. A resistência à tração foi obtida através da Equação 5.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo:

$f_{ct,sp}$  a resistência por compressão diametral medida em megapascals(MPa);

F a força máxima atingida no ensaio expressa em newtons (N)

d diâmetro do corpo de provas em milímetros (mm);

ℓ o comprimento do corpo de prova em milímetros (mm).

#### 3.2.4.4 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidades dos concretos produzidos com os cinco grupos de ARC foi obtido através do procedimento prescrito pela NBR 8522-1:2021. Foram produzidos três corpos de prova com dimensões 10 x 20 cm para cada dosagem de concreto produzido no item 3.2.4.1 deste trabalho seguindo as especificações da NBR NBR 5738:2015. O ensaio para obtenção do módulo de elasticidade foi realizado aos 28 dias.

A resistência à compressão utilizada para cálculo do módulo de elasticidade, é a mesma obtida pelos concretos aos 28 dias no item 3.2.4.2 deste trabalho, sendo que o concreto deve ser da mesma betonada para ambos os testes.

### 3.2.4.5 Microdureza Vickers

A fim de investigar as mudanças na dureza da zona ITZ provocada pelos diferentes tratamentos de superfície do ARC, a técnica de microdureza Vickers foi empregada, utilizando o microdurômetro da marca Beijing TIME High Technology modelo TH710, apresentado na Figura 36.

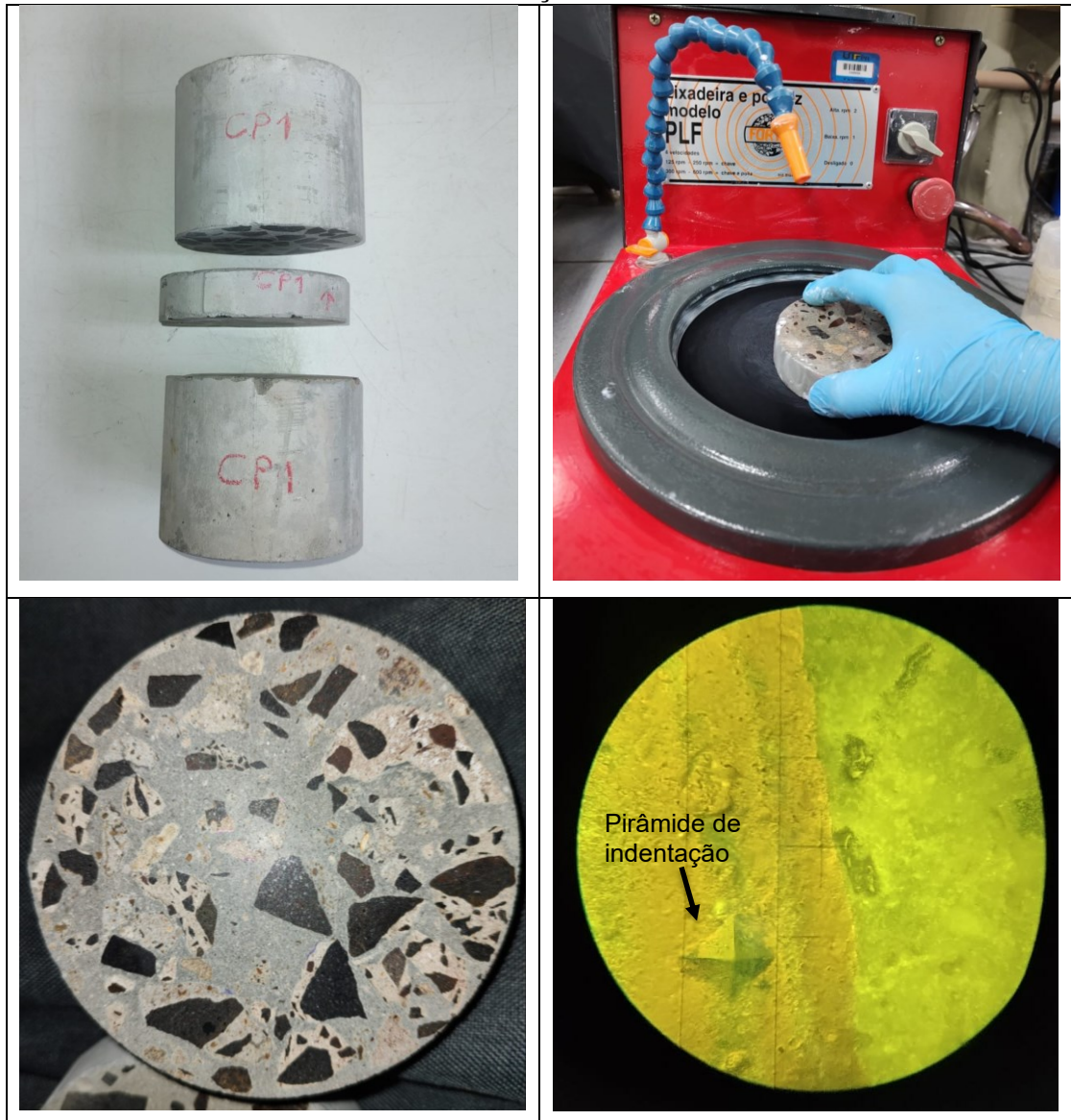
**Figura 36 - Microdurômetro Vickers**



Fonte: Autora (2023)

Uma amostra de concreto foi cortada de um corpo de prova cilíndrico de 10x20cm para cada mistura, de forma que as faces sejam planas e paralelas. Na Figura 37-a é apresentada a direção de corte das amostras. Após o corte as amostras foram lixadas em lixadeira e politriz modelo PLF da marca FORTEL apresentada na Figura 37-b utilizando lixas número 600, 1200 e pano com alumina número 4, por 3 minutos cada. Com esse processo as amostras apresentaram nivelamento superficial (Figura 37-c) suficiente para a realização do ensaio, formando uma pirâmide de indentação nítida conforme Figura 37-d.

**Figura 37 - Teste de micro dureza Vickers a) Plano de corte b) polimento c) amostra polida d) indentação**



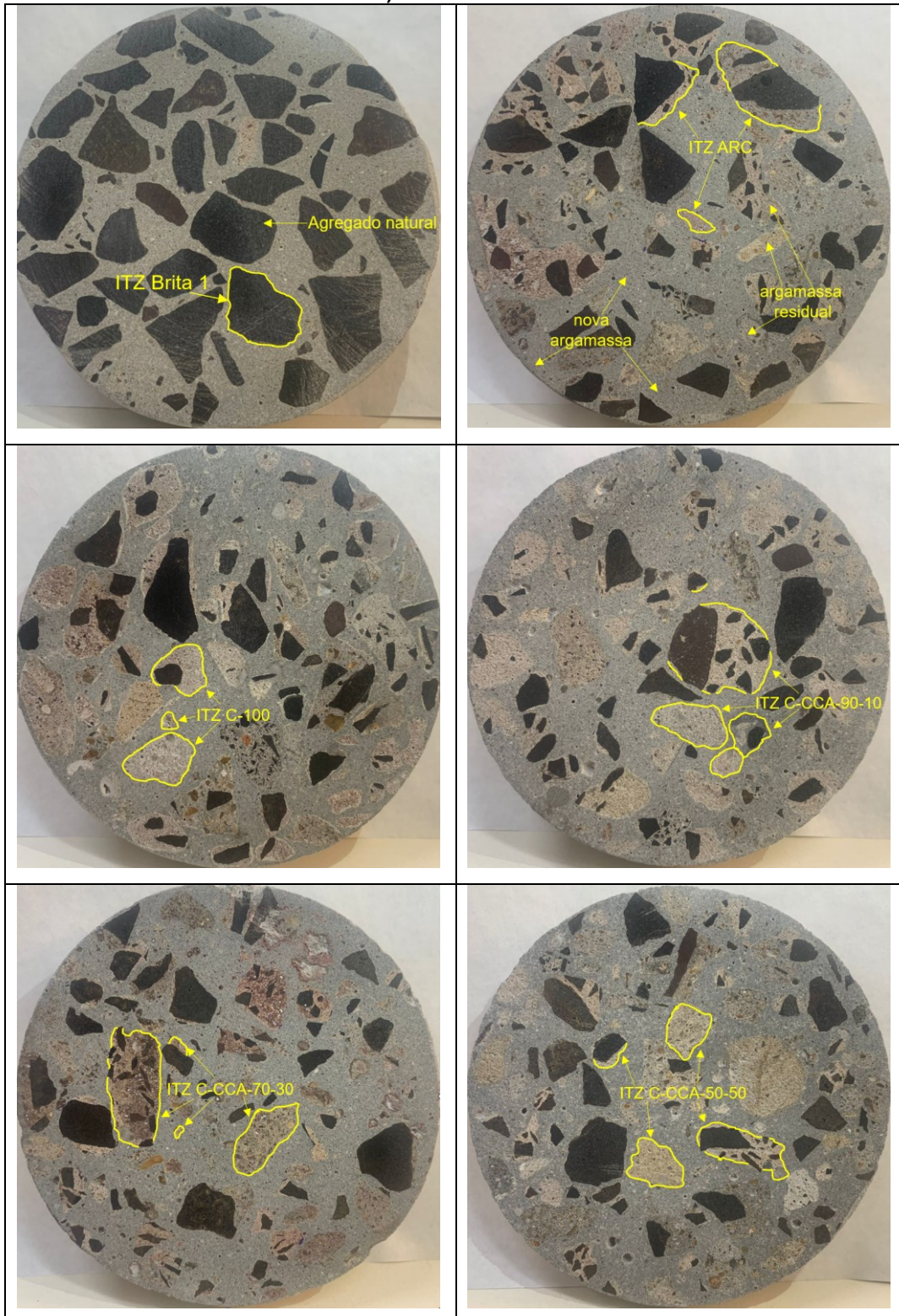
Fonte: Autora (2023)

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado de acordo com o prescrito pela norma ASTM E384-17 e os parâmetros de carga e tempo de contato foram de 0,9807 N e 15 segundos, respectivamente, seguindo o utilizado por Chu et al. (2021) para concreto.

As regiões ensaiadas para cada concreto produzido são apresentadas na Figura 38, sendo estas: agregado natural (na amostra produzida com Brita 1) apresentada na Figura 38-a; nova argamassa (amostra produzida com ARC não tratado) e argamassa residual do agregado reciclado (amostra produzida com ARC não tratado) Figura 38-b, e as 6 zonas ITZ, uma para cada tipo de concreto produzido. Para cada região foram feitas 3 indentações, totalizando 27 indentações.



Figura 38 - Amostras ensaio microdureza Vickers a) Brita 1, b) ARC, c) C-100, d) C-CCA-90-10, e) C-CCA-70-30



Fonte: Autora (2023)

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Caracterização da cinza de casca de arroz residual

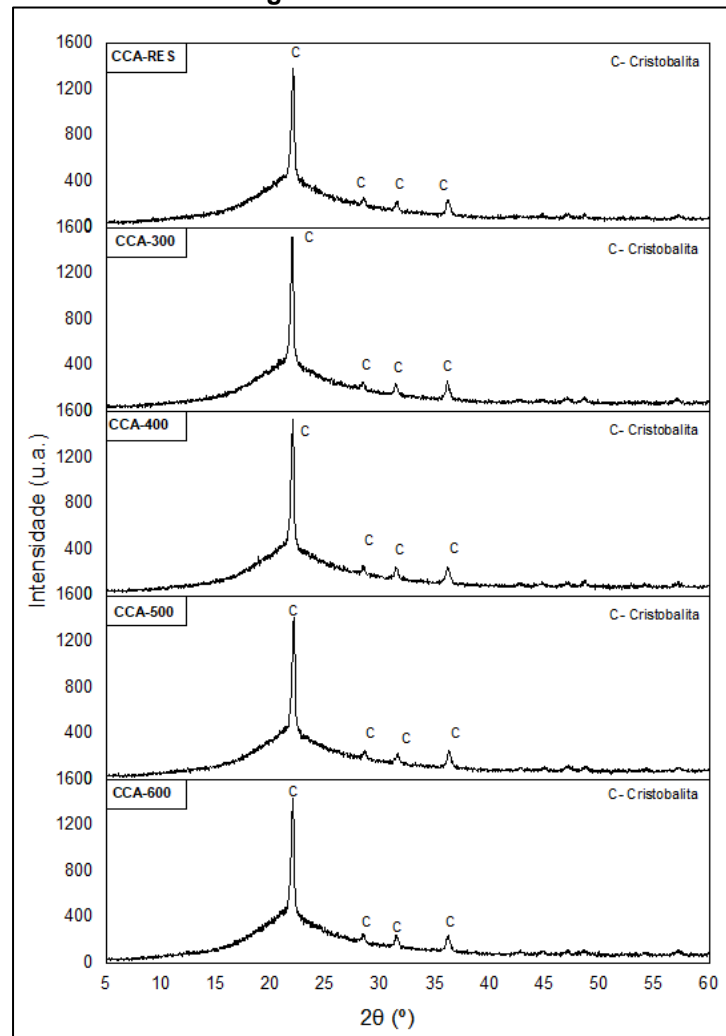
A caracterização da CCA residual teve como objetivo encontrar um tempo de moagem inferior ao encontrado por Zaparte (2020), de duas horas, em que a cinza apresenta comportamento pozolânico aceitável pela NBR 12653:2015, e também avaliar a influência da requeima nas características da CCA residual.

#### 4.1.1 Difração de Raios X – análise mineralógica

A caracterização mineralógica para identificação das fases presentes na CCA residual foi realizada através do ensaio de DRX, e é apresentado pelo primeiro gráfico da Figura 33. O halo amorfo na parte inferior do gráfico representa a parte reativa da CCA, enquanto os picos característicos do polimorfo de sílica, a cristobalita, representam as fases cristalinas produzidas pela queima a temperaturas acima de 700°C na agroindústria.

Na Figura 39 são apresentados ainda os difratogramas para as cinzas que passaram pelo tratamento térmico à 300, 400, 500 e 600°C respectivamente. Ao serem sobrepostos os 4 gráficos não apresentam variações para o halo amorfo e para a fase cristalina de cristobalita. A única alteração visível entre os difratogramas é uma diminuição na intensidade do pico de cristobalita aos 23° para as amostras tratadas a 500 e 600°C. Entretanto, não há alteração no espaçamento do pico indicando uma alteração não significativa na mineralogia do material. Desta forma, pode-se concluir que o tratamento térmico de requeima na faixa de 300 a 600°C não é capaz de mudar a composição mineralógica da CCA residual.

Figura 39 - DRX CCA



Fonte: Autora (2023)

#### 4.1.2 Fluorescência de raios X- análise química

As composições químicas da CCA residual das quatro CCA obtidas através do tratamento térmico obtidas através do ensaio de FRX e perda ao fogo, obtida pelo descrito pela NBR NM 18: 2012, são apresentadas na Tabela 14.

**Tabela 14 - Composição química CCA**

<b>Composição Química (%)</b>	<b>CCA-RES</b>	<b>CCA-300</b>	<b>CCA-400</b>	<b>CCA-500</b>	<b>CCA-600</b>
Sílica (SiO <sub>2</sub> )	91,02	91,00	91,75	90,72	91,97
Óxido Sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	3,53	4,01	3,78	3,30	2,67
Óxido de Potássio (K <sub>2</sub> O)	3,62	3,46	3,32	3,79	3,56
Óxido de Cálcio (CaO)	1,69	1,45	1,09	2,06	1,7
Óxido de Manganês (MgO)	0,12	0,09	0,06	0,09	0,09
Óxido de Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,03	-	-	0,04	0,02
Perda ao fogo	8,96	5,24	1,14	1,56	1,46
Teor de umidade	2,20	2,10	3,00	1,10	0,80

**Fonte: Autora (2023)**

A amostra de CCA residual apresentou teor de sílica em torno de 91%. As amostras de CCA requeimadas apresentaram teores de sílica próximos ao apresentado pela amostra sem tratamento, com variação inferior a 1% para todos os casos. Quanto aos requisitos químicos especificados pela NBR 12653:2015, para as pozolanas tipo N (naturais ou artificiais), todas as amostras apresentaram: soma dos óxidos SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≥ 70%; teor de óxido sulfúrico ≤ 5,0%; sem identificação de álcalis disponíveis em Na<sub>2</sub>O; Todas as amostras, apresentaram valores dentro dos requisitos de perda ao fogo, inferior à 10%, e teor de umidade, inferior à 3%.

Os resultados da análise de FRX são capazes de indicar a adequação da CCA residual (amostras moídas e in natura) e das amostras tratadas termicamente para utilização como materiais pozolânicos em matrizes cimentícias quando consideradas suas características químicas.

#### 4.1.3 Massa específica e superfície específica

Após a moagem da CCA residual por 15 min, 30 min, 1h e 2h e da requeima da CCA residual sob temperaturas de 300, 400, 500 e 600°C foram performados os ensaios de caracterização física das amostras: massa específica, conforme a NBR 16605:2017, e superfície específica Blaine, conforme a NBR 16372:2015. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 15.



**Tabela 15 - Massa específica e superfície específica CCA**

<b>Cinza de casca de arroz</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Superfície específica Blaine (cm<sup>2</sup>/g)</b>
CCA-RES	2,16	1740,19
CCA-15	2,17	3738,25
CCA-30	2,13	5266,84
CCA-1H	2,11	7236,21
CCA-2H	2,14	9740,03
CCA-300	2,08	1829,58
CCA-400	2,09	2126,09
CCA-500	2,01	2548,71
CCA-600	2,05	2381,88

**Fonte: Autora (2023)**

As amostras de CCA residual que passaram por tratamento físico de moagem, apresentaram valores de massa específica de aproximadamente 0,1 g/cm<sup>3</sup> superior aos valores apresentados pelas amostras de CCA residual que receberam o tratamento térmico de requeima.

Quanto à superfície específica Blaine, com apenas 15 minutos de moagem já houve um aumento superior ao dobro da superfície específica apresentada pela CCA residual sem tratamento físico. As amostras de CCA residual moídas apresentaram valores com acréscimos gradativos conforme o aumento no tempo de moagem, sendo estes resultados expressivos ao representarem, para a CCA-2H, até 5 vezes o valor da superfície específica da cinza sem moagem.

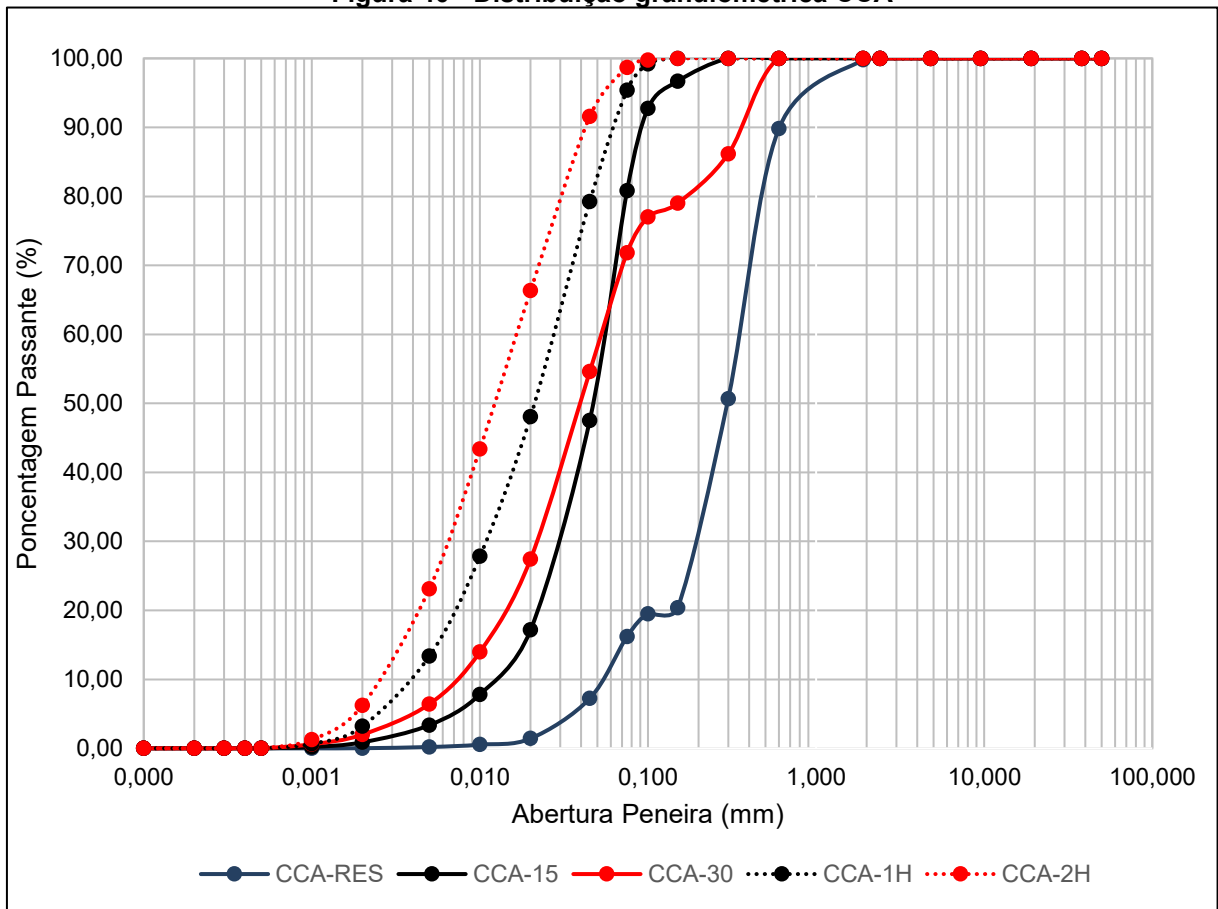
Para as amostras de CCA residual requeimadas, houve também um aumento nos valores de superfície específica, mas estes sendo menos expressivos que os obtidos através da moagem.

#### 4.1.4 Difração à laser e microscopia eletrônica de varredura

A influência do processo de moagem no tamanho das partículas da CCA residual foi acessada através do ensaio de granulometria a laser e a distribuição granulométrica das cinzas moídas é apresentada na Figura 40.

É possível observar no gráfico uma significativa redução do tamanho dos grãos da CCA residual sem moagem, já com 15 minutos (CCA-15) de tratamento físico.

Figura 40 - Distribuição granulométrica CCA



Fonte: Autora (2023)

Conforme o aumento do tempo de moagem, é evidenciada um aumento progressivo na finura do material, confirmado através da diminuição do  $D_{\text{médio}}$  (tamanho médio das partículas) apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Diâmetro médio CCA moída

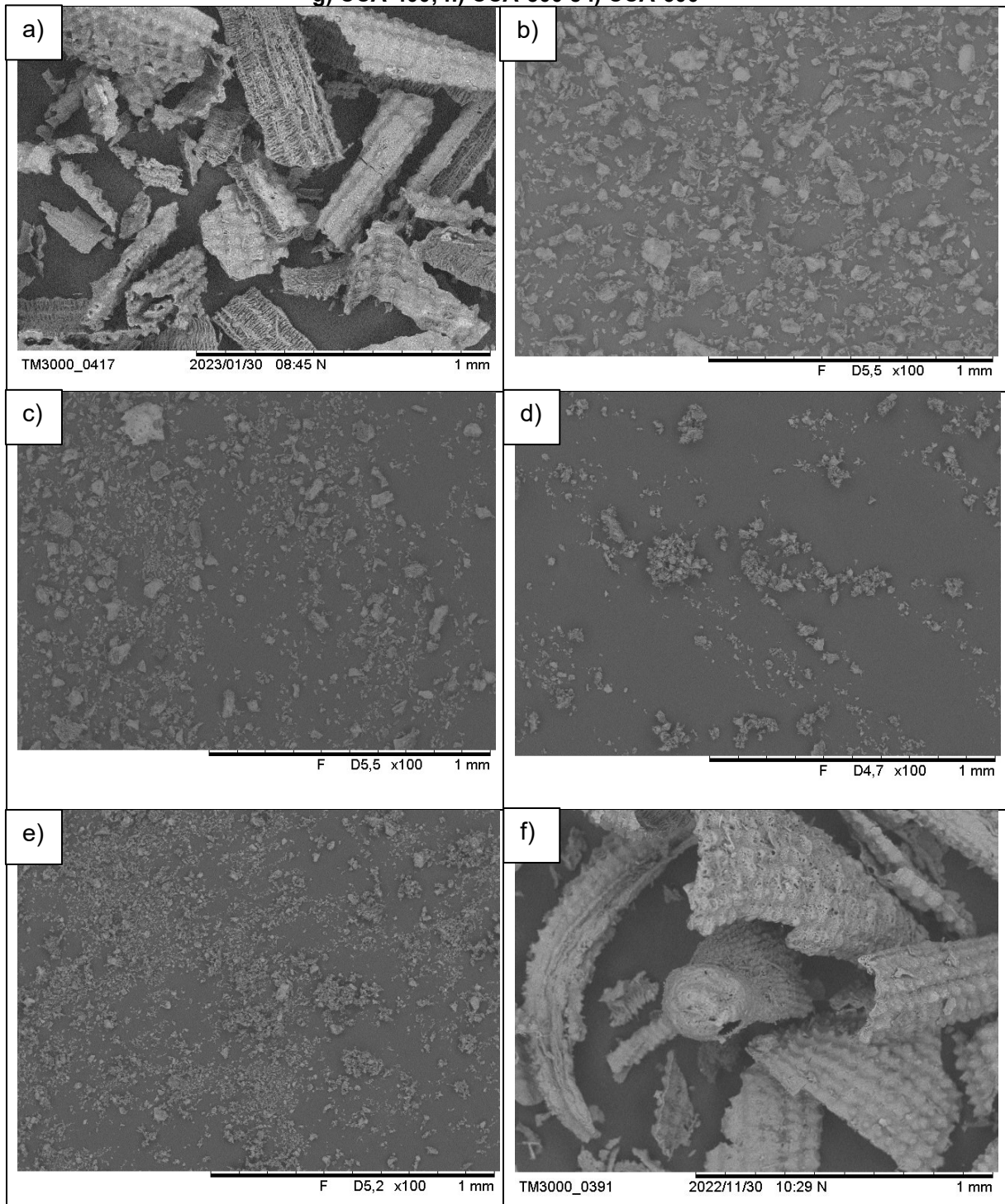
Cinza de casca de arroz	$D_{\text{médio}}$ ( $\mu\text{m}$ )	Diminuição (%)
CCA-RES	53,54	-
CCA-15	45,70	14,64
CCA-30	30,05	43,87
CCA-1H	21,08	60,62
CCA-2H	12,41	76,82

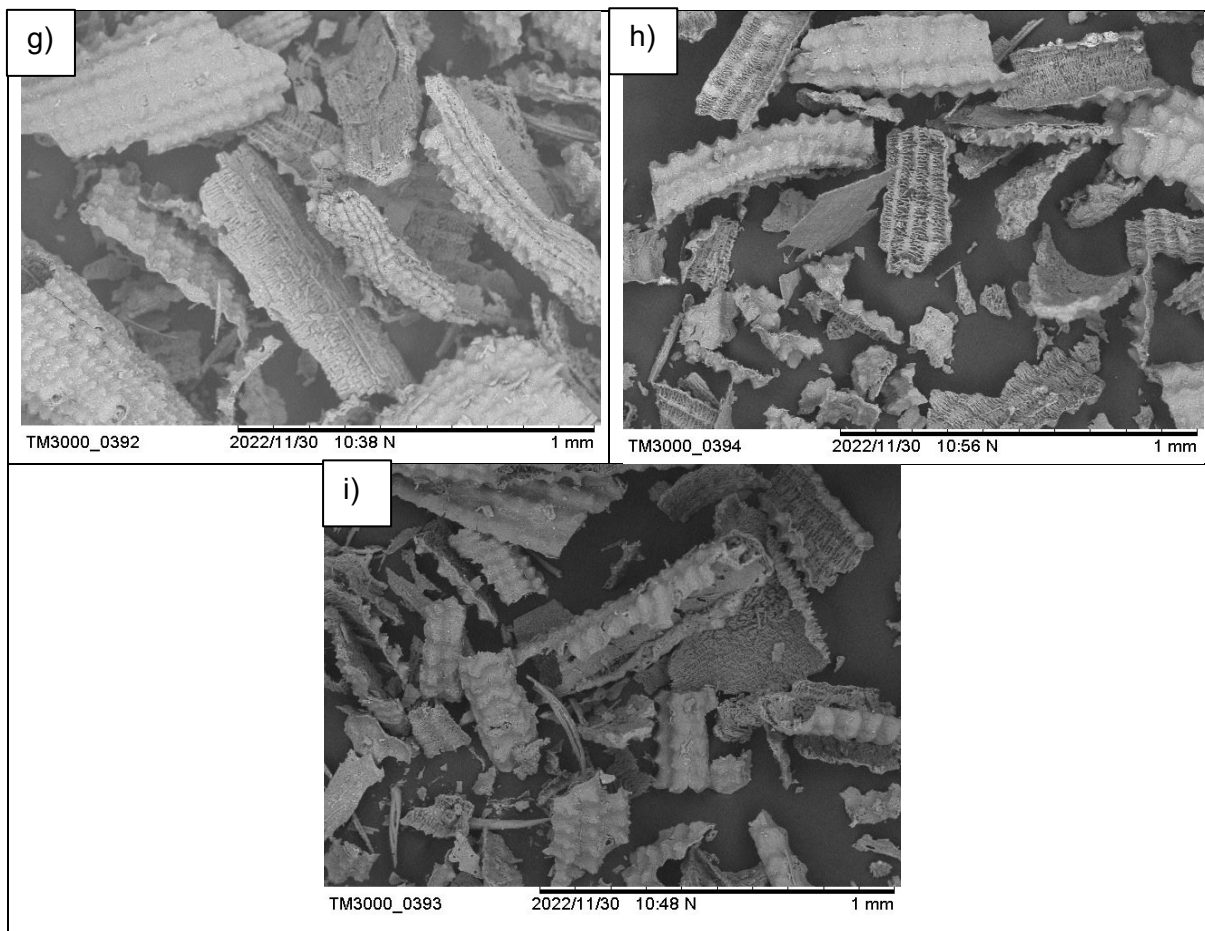
Fonte: Autora (2023)

Essa diminuição gradativa do  $D_{\text{médio}}$  vai de encontro com os valores da superfície específica Blaine das cinzas moídas, confirmando a relação entre a diminuição do tamanho das partículas seguida do aumento da superfície específica do material.

A influência do processo de moagem sobre as partículas de CCA residual também foi acessada através do ensaio de MEV, com aproximação de 100X, apresentado pela Figura 41. Na imagem da Figura 41-a é apresentada a CCA-RES onde é possível observar a presença das epidermes interna e externa, bem como a estrutura interior porosa da casca queimada semelhante a uma colmeia.

**Figura 41 - MEV cinzas a) CCA-RES; b) CCA-15; c) CCA-30; d) CCA-1H; e) CCA-2H; f) CCA-300; g) CCA-400; h) CCA-500 e i) CCA-600**





Fonte: Autora (2023)

Na Figura 41-b é apresentada a CCA-15 onde já é visível uma grande fragmentação das partículas de origem. Ainda é possível visualizar alguns poucos poros das partículas maiores, mas não sendo mais possível identificar presença de fragmentos preservados de epidermes interna e externa. Para a amostra de CCA-30 da Figura 41-c, alguns fragmentos maiores ainda apresentam pouca porosidade, mas em sua maioria, as partículas indicam quebra total da estrutura celular da CCA residual. Para as Figuras 41-d e 41-e, referentes às cinzas CCA-1H e CCA-2H, já não é evidenciada a presença de poros, as partículas para as duas cinzas são visualmente mais finas comparadas com outros dois tempos de moagem. Entretanto, essa finura superior é responsável pelo início da formação de aglomerados de partículas.

Para as cinzas CCA-300, CCA-400, CCA-500 e CCA-600, representadas pelas Figuras 41-f, 41-g, 41-h e 41-i respectivamente, não é possível indicar alterações estruturais quando comparadas à CCA-RES. Ao receberem o tratamento térmico, as quatro cinzas mantiveram as três estruturas principais da casca de arroz preservadas, tanto as epidermes quanto a estrutura interna se mantiveram íntegras e sem

fragmentação ou decomposição devido à requeima.

#### 4.1.5 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland

As nove cinzas foram empregadas na produção de argamassas seguindo a prescrição da NBR 5752:2014. A norma prevê a utilização de aditivo superplastificante suficiente para manter o espalhamento das amostras com cinza igual  $\pm 10$  mm do obtido pela referência. Na Tabela 17 são apresentados os teores de superplastificante utilizado bem como o espalhamento atingido para cada argamassa em relação ao atingido pela argamassa REF.

<b>Tabela 17 - Teor de superplastificante e espalhamento</b>		
<b>Argamassa</b>	<b>Superplastificante</b>	<b>Espalhamento</b>
	<b>(%)</b>	<b>(mm)</b>
REF	-	20,00
CCA-RES	3,1	19,05
CCA-15	0,3	19,30
CCA-30	0,3	21,00
CCA-1H	0,3	20,90
CCA-2H	0,2	19,00
CCA-300	2,5	20,85
CCA-400	2,5	20,90
CCA-500	2,25	20,50
CCA-600	2,25	20,70

**Fonte: Autora (2023)**

A argamassa produzida com CCA-RES apresentou uma necessidade de aproximadamente dez vezes mais plastificante que as argamassas contendo CCA-15, CCA-30 e CCA-1H, e quinze vezes mais aditivo que a argamassa com CCA-2H. Para as argamassas produzidas com as cinzas provenientes da requeima comparadas com as de CCA-RES, houve uma redução da necessidade de superplastificante de aproximadamente 20%, para as cinzas CCA-300 e CCA-400, e 29% para as amostras CCA-500 e CCA-600.

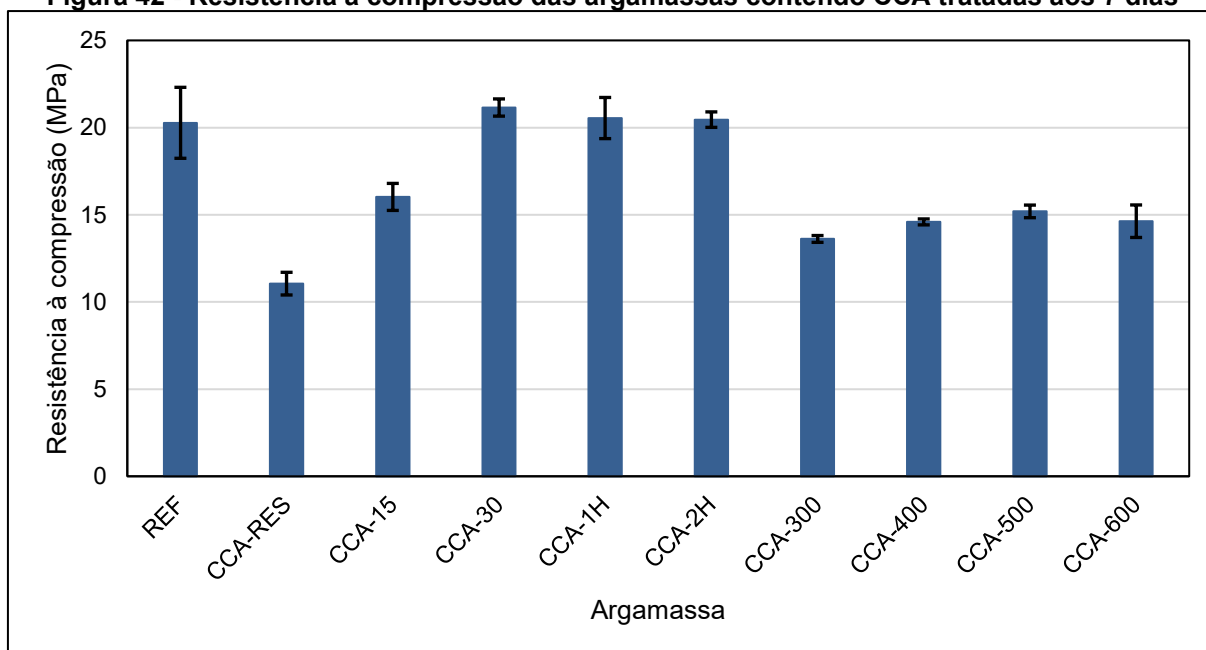
É notória uma maior influência positiva na trabalhabilidade das argamassas contendo cinzas moídas quando comparadas às argamassas com cinzas tratadas termicamente. Também é verificada uma evolução na trabalhabilidade proporcional ao aumento dos tempos de moagem, para as cinzas tratadas fisicamente, e do

aumento da temperatura de requeima, para as cinzas tratadas termicamente, comparadas à CCA-RES.

O desempenho mecânico das argamassas com 25% de substituição do cimento Portland pela CCA tratada foi acessado através do ensaio de resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias. A fim de analisar o potencial pozzolânico de todas as cinzas na composição da resistência mecânica das argamassas, a evolução da resistência das através dessas idades é apresentada nas Figuras 42, 43 e 44.

Aos 7 dias, Figura 41, as argamassas contendo 25% de substituição de CCA-30, CCA-1H e CCA-2H não apresentaram diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) resistências à compressão compatíveis com a argamassa de referência REF contendo 100% de cimento Portland. Por outro lado, todas as outras argamassas com substituições apresentaram redução estatisticamente significativa ( $p < 0,001$ ) da resistência à compressão comparadas à REF, sendo a argamassa CCA-RES, sem tratamento, a que apresentou a menor redução.

**Figura 42 - Resistência à compressão das argamassas contendo CCA tratadas aos 7 dias**



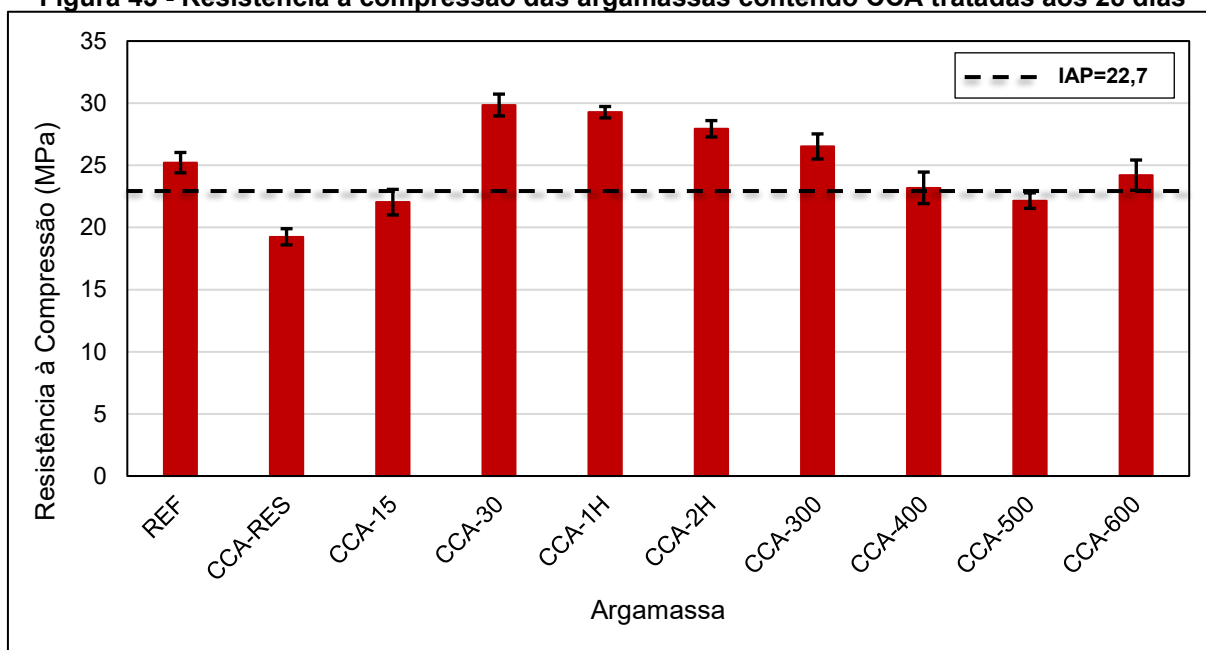
Fonte: Autora (2023)

Ao comparar todas as misturas contendo cinzas tratadas com a CCA-RES, há um aumento significativo para todos os casos, o que demonstra um efeito positivo para os dois tratamentos, físico e térmico, da CCA residual. Ainda, os melhores desempenhos entre todos os casos foram das amostras CCA-30, CCA-1H e CCA-2H com as maiores resistências entre as argamassas com cinza, e que não apresentaram

diferenças estatísticas significativas entre si ( $p>0,05$ ), mas com diferenças estatísticas significativas entre todas as outras amostras ( $p<0,005$ ).

O Índice de Atividade Pozolânica foi acessado através das resistências à compressão aos 28 dias, apresentadas na Figura 43. Para atingirem o IAP mínimo para a substituição ser considerada um material pozolânico, as argamassas precisaram desenvolver uma resistência de 90% ou mais da resistência da argamassa REF, sendo este de 22,7 MPa (90% de 25,22 MPa), segundo a NBR 5752:2014.

**Figura 43 - Resistência à compressão das argamassas contendo CCA tratadas aos 28 dias**



Fonte: Autora (2023)

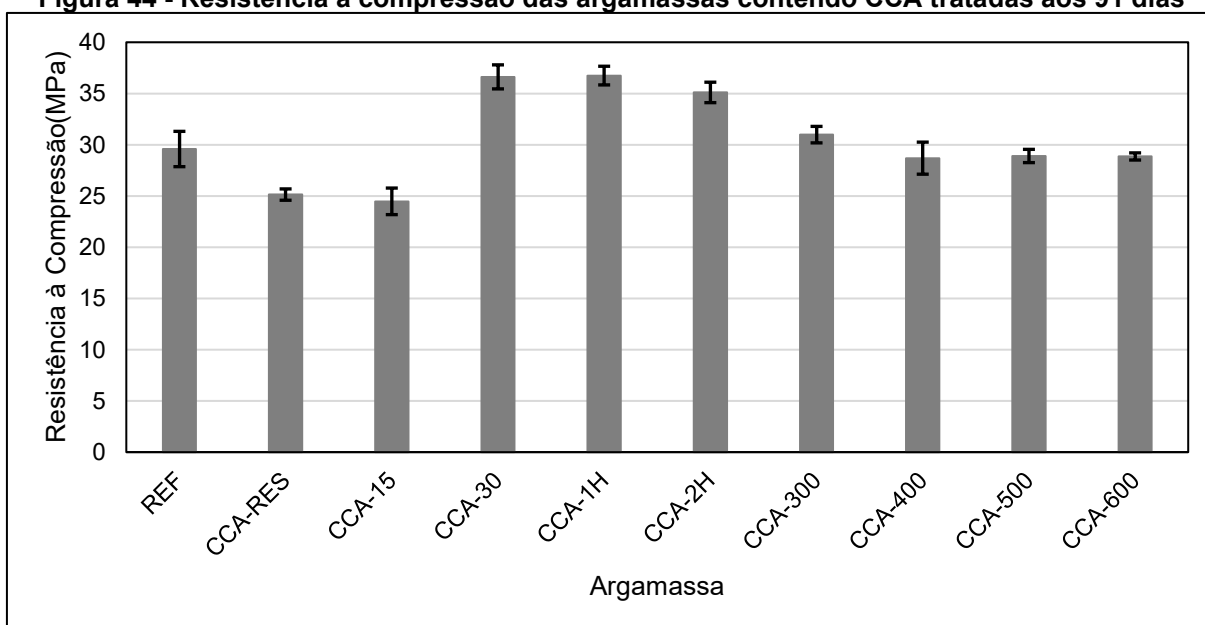
Todas as argamassas, exceto CCA-RES, atingiram os 90% mínimos da argamassa REF, portanto, podendo elas serem consideradas materiais pozolânicos para utilização em matrizes cimentícias. As argamassas CCA-15, CCA-400, CCA-500 e CCA-600 apresentaram IAP mínimo sem diferença estatística significativa ( $p>0,05$ ) à 90% da resistência REF. Por outro lado, as argamassas CCA-30, CCA-1H, CCA-2H e CCA-300 desenvolveram IAP superior ao mínimo, apresentando resistências à compressão com diferença estatística significativa ( $p<0,001$ ) à 90% REF. Ainda aos 28 dias, as argamassas CCA-30, CCA-1H e CCA-2H, apresentaram resistências à compressão superiores à REF, com diferença estatística significativa ( $p<0,05$ ), com aumentos de 18, 16 e 11% respectivamente.

Comparando os resultados do IAP com aqueles obtidos por Zaparte (2020), onde o tempo ideal de moagem obtido foi de 2 hr, é possível verificar que a redução do tempo de moagem para 30 min e para 1 hr não foi maléfica no desenvolvimento da

resistência à compressão. Além disso, quando comparados os valores da CCA-15 e CCA-30 há uma evolução acentuada do IAP com apenas 15 min de moagem adicionais. Já entre as cinzas CCA-30, CCA-1H e CCA-2H, essa diferença é menos acentuada.

Para a última idade em que a resistência à compressão foi acessada, 91 dias, apresentada na Figura 44, as argamassas CCA-30, CCA-1H, e CCA-2H continuaram desenvolvendo resistências à compressão maiores que REF ( $p < 0,001$ ), com aumentos ainda mais expressivos que aos 28 dias: 24, 24 e 19%.

**Figura 44 - Resistência à compressão das argamassas contendo CCA tratadas aos 91 dias**



Fonte: Autora (2023)

As argamassas contendo cinzas provenientes da requeima desenvolveram resistências sem diferenças estatísticas significativas ( $p > 0,05$ ) à argamassa REF. Isso indica que para esses casos não ocorreu perda ou acréscimo na propriedade mecânica com a substituição de 25% de cimento pelas cinzas tratadas termicamente. Por outro lado, para as cinzas CCA-RES e CCA-15 há uma diminuição significativa de 15 e 17%, respectivamente, nesta propriedade mecânica com a substituição.

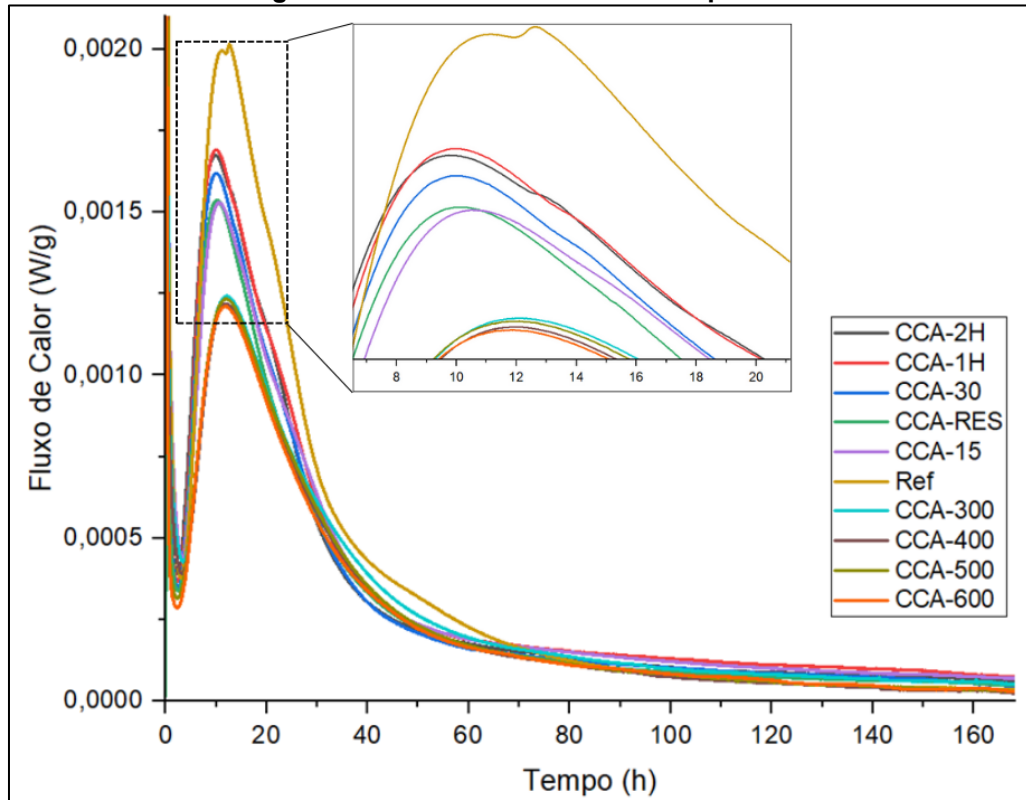
#### 4.1.6 Calorimetria isotérmica

A Figura 45 representa as curvas de fluxo de calor das pastas cimentícias produzidas com CCA residual moída e requeimada em comparação com a pasta



referência contendo apenas cimento Portland.

**Figura 45 - Curvas de fluxo de calor pastas**



Fonte: Autora (2023)

Ao serem comparadas, é possível verificar uma diferença de comportamento entre a pasta sem substituição, e as pastas contendo o material pozolânicos, sendo que a pasta REF apresenta visualmente um pico de fluxo de calor máximo superior a todas as outras pastas.

Analisando os dados apresentados na Tabela 18, houve também um encurtamento acentuado no período de indução/dormência, comparado com a pasta REF, das pastas CCA-RES, CCA-30, CCA-1H, CCA-2H, CCA-500 e CCA-600. Para as outras pastas, houve também um encurtamento deste período, mas de forma menos acentuada.

**Tabela 18 - Valores referentes ao período de indução e fluxo de calor máximo das pastas**

Pasta	Período de Indução			Variação em relação a referência (%)	Fluxo de calor Máximo (W/g)	Variação em relação a referência (%)
	Início	Fim	Duração			
REF	00:55	04:12	03:17	-	0,0020	-
CCA-RES	00:49	03:26	02:37	-20,30	0,001536	-23,20
CCA-15	00:54	03:54	03:00	-8,62	0,001529	-23,55
CCA-30	00:41	03:23	02:42	-17,77	0,001619	-19,05
CCA-1H	00:44	03:12	02:28	-24,87	0,001691	-15,45
CCA-2H	00:44	03:01	02:17	-30,46	0,001674	-16,30
CCA-300	00:54	04:02	03:08	-4,57	0,001242	-37,90
CCA-400	00:44	03:48	03:04	-6,60	0,001233	-38,35
CCA-500	00:32	02:59	02:27	-25,38	0,001234	-38,30
CCA-600	00:34	03:10	02:36	-20,81	0,001211	-39,45

Fonte: Autora (2023)

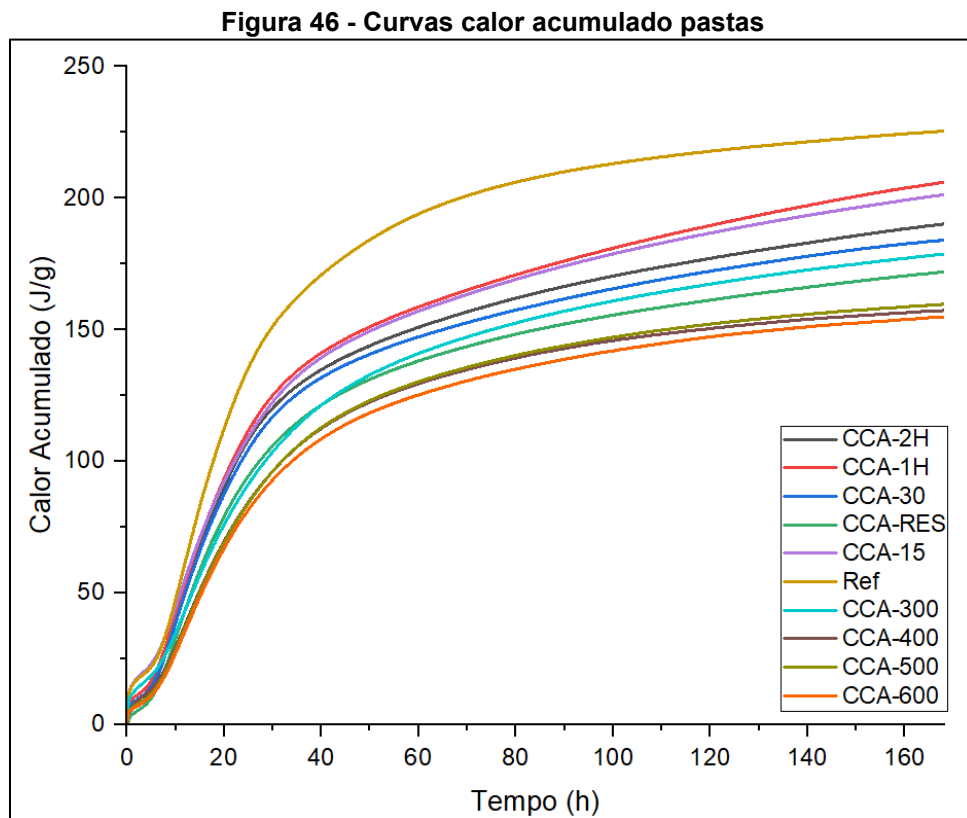
Ainda conforme dados coletados das curvas de fluxo de calor e apresentados na Tabela 18, é verificado uma divisão no comportamento das pastas produzidas com os dois grupos de tratamento da CCA residual quanto ao fluxo de calor máximo. Em comparação com a pasta REF, todas as pastas apresentaram decréscimo no valor de fluxo de calor máximo. Esse pico maior, apresentado pela amostra REF pode ser explicado pela constituição do próprio cimento CII-F-32, com adição de calcário inerte finamente moído que confere ao sistema o efeito *filler*. Ao substituir os grãos de clínquer, as partículas finas proporcionam mais espaço disponível para precipitação e também atuam como locais para precipitação e crescimento de compostos hidratados (Scrivener et al., 2015).

As cinzas tratadas fisicamente apresentaram uma diminuição entre 16,30 e 23,55% para o fluxo de calor máximo, enquanto as cinzas tratadas termicamente atingiram uma diminuição superior entre 37,90 e 39,45%. A CCA-RES, sem tratamento, atingiu um fluxo de calor máximo mais próximo do grupo em que a CCA foi moída. Essa diminuição menos acentuada, apresentada pelo primeiro grupo em relação à REF, é também explicada pelo efeito *filler*, já que estes materiais são mais finos que os tratados termicamente, gerando uma maior precipitação de compostos hidratados, principalmente C-S-H e Portlandita, e consequente aumento no fluxo de calor, entretanto, não tão intenso quanto o provocado pelo *filler* calcário e do próprio clínquer finamente moído do CII-F-32.

Após as primeiras 28 horas, as curvas de fluxo de calor do grupo de cinzas tratadas termicamente apresentaram um pequeno aumento em relação as cinzas

moídas, e todas as curvas das pastas contendo CCA se apresentaram superiores à da pasta REF após as 70 horas. Isso é explicado pela reação pozolânica, presente em todos os grupos com CCA, e que apresentaram fluxo de calor superior ao fluxo referente ao efeito *filler* em idades avançadas (Scrivener et al., 2015).

Ao observar a Figura 46 que apresenta as curvas de calor acumulado pelo sistema durante as 168 horas, bem como os dados da Tabela 19, é verificado que as pastas produzidas com as cinzas moídas apresentaram valores inferiores daquele atingido pela pasta REF. Entretanto, as cinzas moídas obtiveram valores de calor acumulado superiores aos demonstrados pelas pastas contendo cinzas tratadas termicamente, com exceção da amostra CCA-300 que teve calor acumulado mais próximo das amostras moídas do que das requemidas.



Fonte: Autora (2023)

**Tabela 19 - Calor acumulado pastas**

Pasta	Calor acumulado em 72 horas (J/g)	Varição em relação à referência (%)
REF	225,44	-
CCA-RES	171,94	-23,73
CCA-15	201,31	-10,70
CCA-30	184,05	-18,36
CCA-1H	206,03	-8,61
CCA-2H	190,18	-15,64
CCA-300	178,75	-20,71
CCA-400	157,32	-30,21
CCA-500	159,67	-29,17
CCA-600	154,89	-31,29

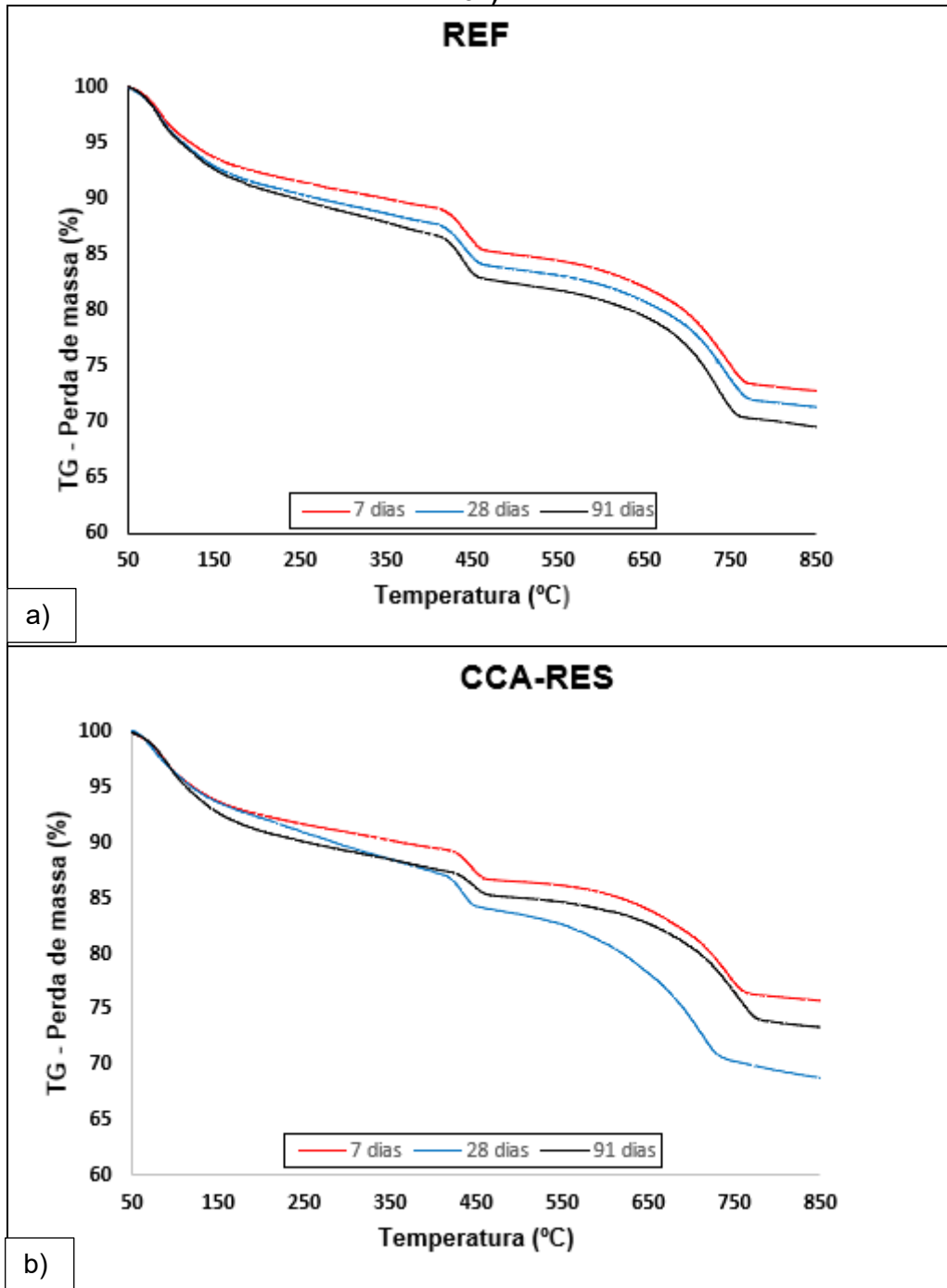
**Fonte: Autora (2023)**

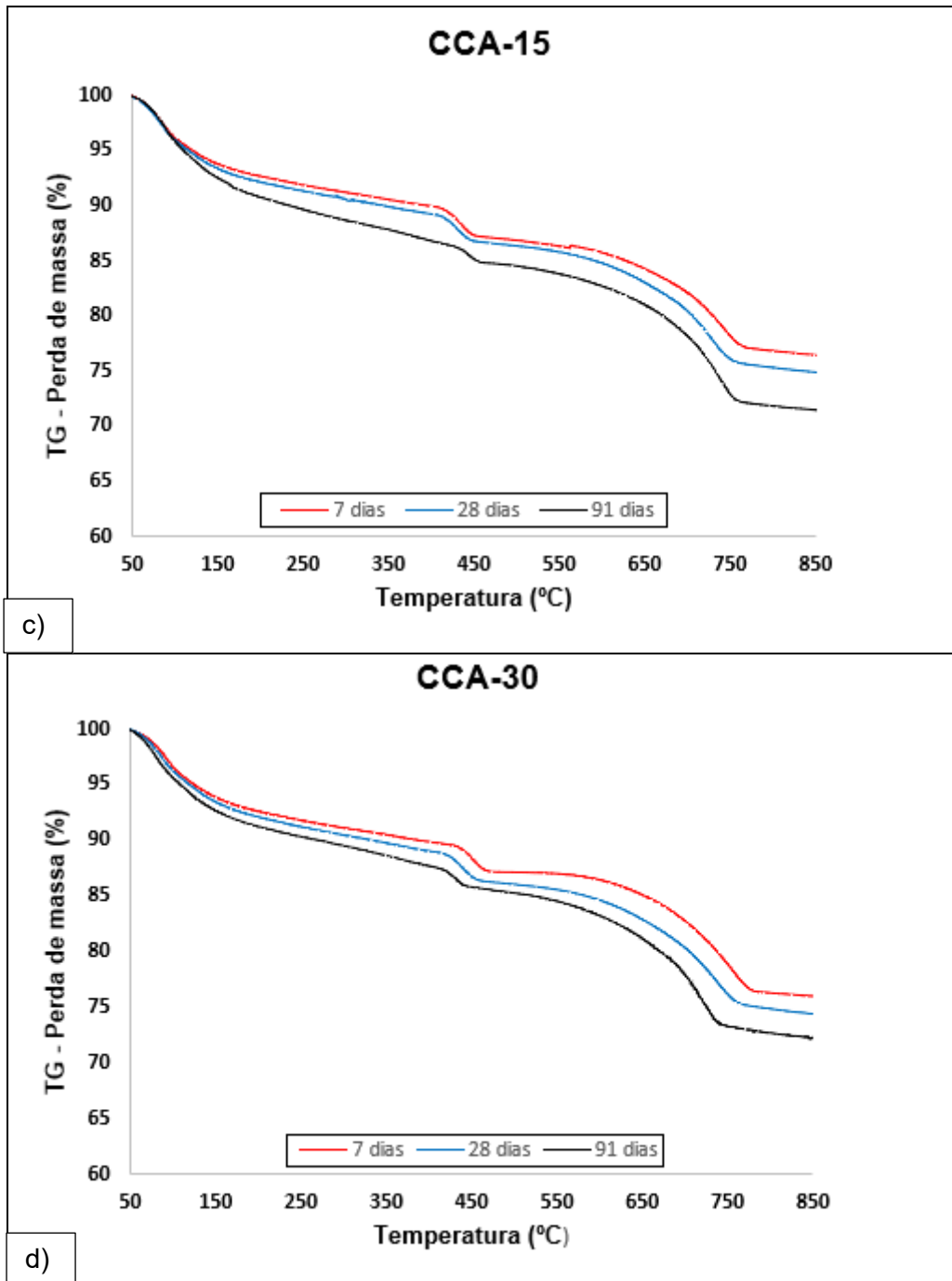
Para os casos contendo CCA moída e conseqüentemente maiores valores de calor acumulado, esse aumento do calor gerado na hidratação ocorreu devida à área superficial superior obtida através do tratamento físico, que potencializou a reatividade das cinzas, acentuando o efeito de nucleação e as reações pozolânicas (Scrivener et al., 2015).

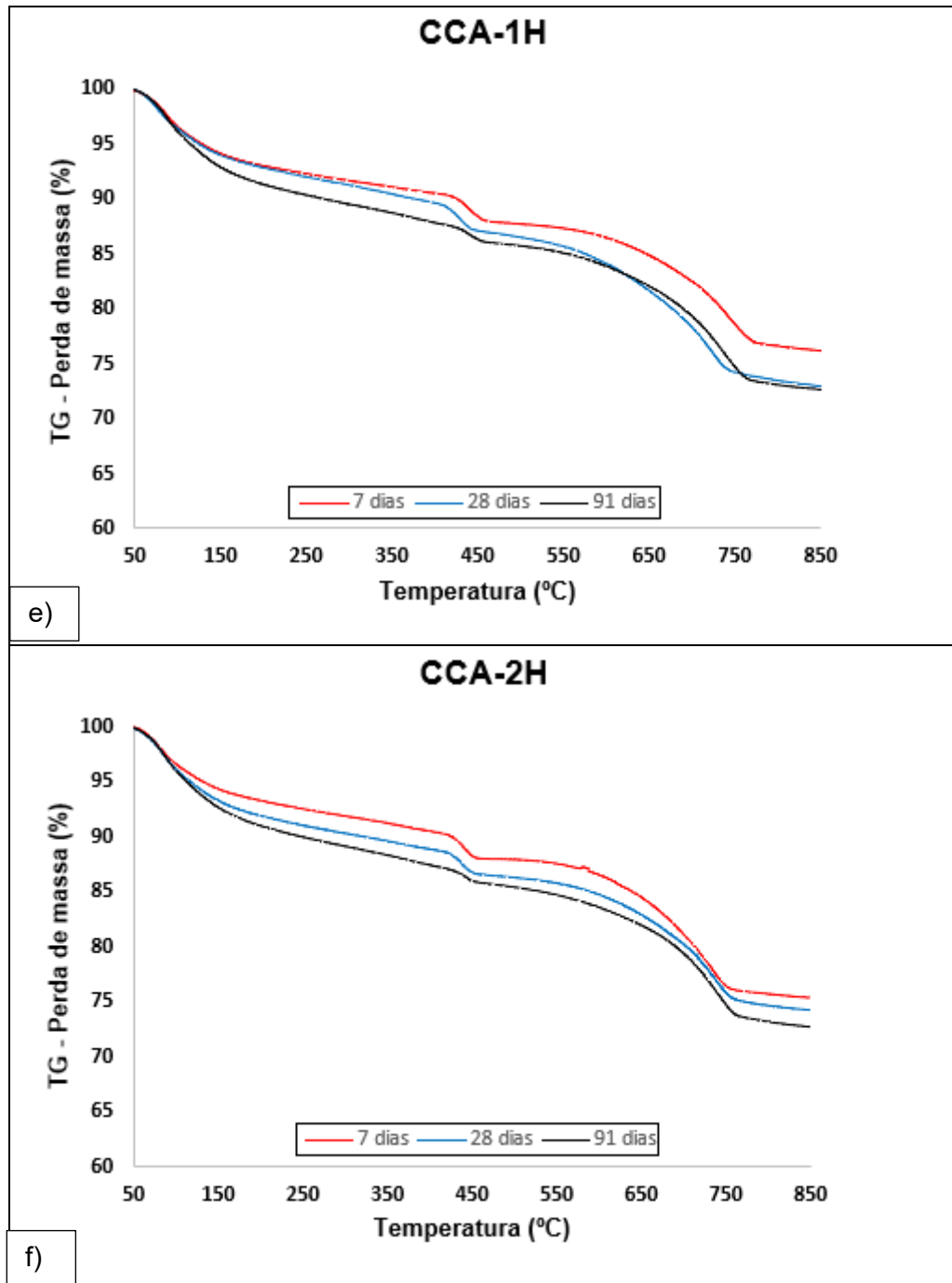
#### 4.1.7 Análise termogravimétrica e termogravimétrica derivada TG/DTG

As pastas contendo substituição do cimento por 25% de CCA moídas e a pasta REF foram analisadas através da análise termogravimétrica. Na Figura 47 são apresentados os gráficos com curvas de perda de massa para cada pasta. As pastas com substituição de cinza apresentam perfis de variação de massa semelhantes ao identificado para a pasta produzida sem o material pozolânico. Isso indica que não há mudança nos tipos de compostos hidratados, apenas nas proporções dos mesmos (McCarthy; Dyer., 2019).

Figura 47 - Análise termogravimétrica pastas a) REF, b) CCA-RES, c) CCA-15, d) CCA-30, e) CCA-1H e f) CCA-2H







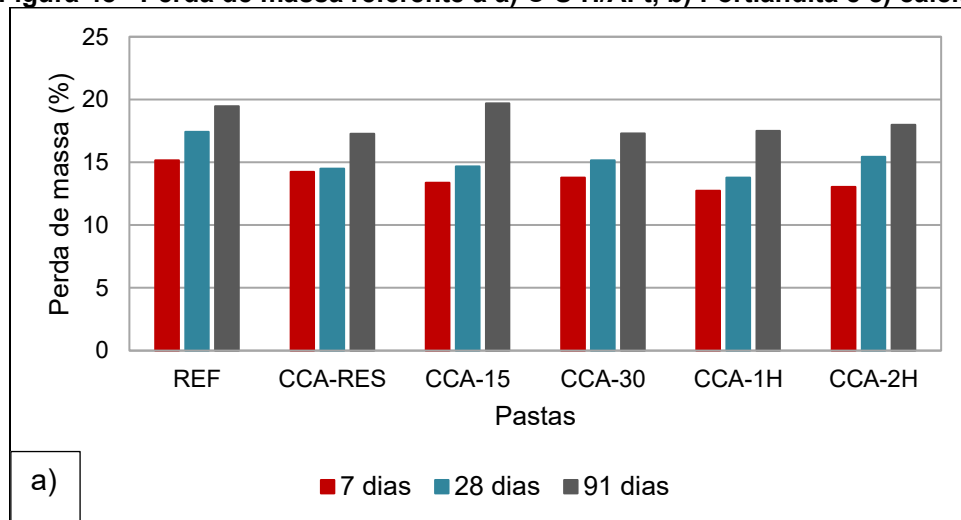
Fonte: Autora (2023)

As pastas apresentaram basicamente três faixas de perda de massa de caráter endotérmico: a primeira no intervalo entre 50-385°C que constitui a perda de água quimicamente combinada da desidratação parcial do C-S-H e desidratação parcial das fases de aluminatos hidratados, sendo que os teores são decorrentes da hidratação do cimento, do efeito físico das adições minerais sobre a cinética de hidratação do próprio cimento e da atividade pozolânica; a segunda perda no intervalo entre 385-485°C é referente à água quimicamente ligada da desidratação da

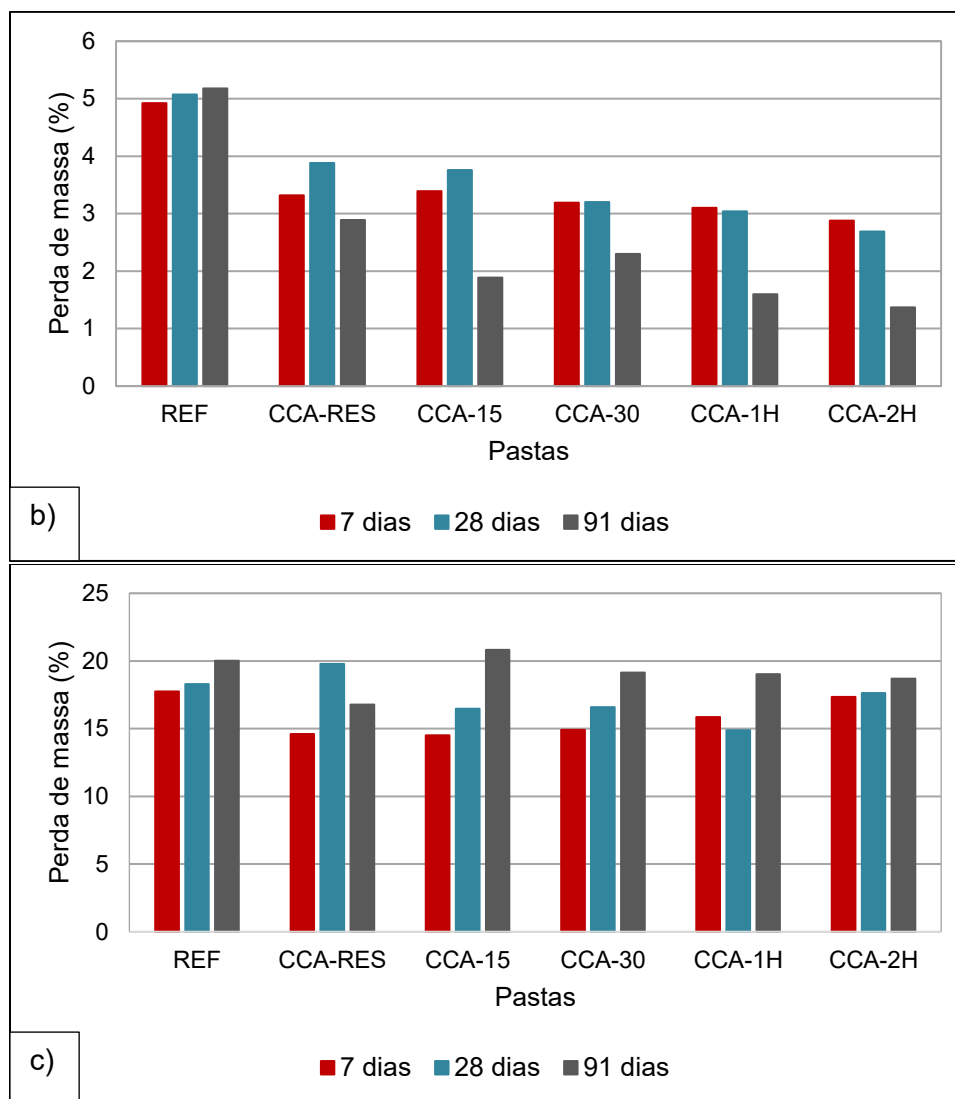
Portlandita; e a terceira entre as temperaturas de 485-850°C é equivalente à decomposição do carbonato de cálcio, oriundo da parcela de filler calcário que compõe o cimento CII-F-32, e parte da carbonatação das amostras (Hoppe Filho et al., 2017).

A porcentagem de perda de massa quantificada referente à cada idade (7, 28 e 91 dias) para as pastas contendo cada tipo de CCA é apresentada na Tabela 37 do Apêndice B. Segundo Taylor (1997), a comparação das perdas entre todas as pastas não deve ser realizada de forma direta, uma vez que as massas residuais ao fim do ensaio são diferentes para cada pasta. Assim, é necessário fazer a correção normalizando o valor residual como 100% e assim corrigir as perdas conforme o realizado por Hoppe Filho et al. (2017). Na Tabela 38, Apêndice B, são apresentados os valores das perdas de massa para as três idades corrigidas. Na Figura 48, são apresentados os valores corrigidos para perda de massa para C-S-H/Aft (Figura 48-a), Portlandita (Figura 48-b) e calcita (Figura 48-c) das pastas.

**Figura 48 - Perda de massa referente a a) C-S-H/Aft, b) Portlandita e c) calcita**







Fonte: Autora (2023)

Para todas as pastas é verificado um aumento na quantidade de compostos hidratados referentes à C-S-H/AfT ao decorrer das idades. Na Figura 48-a, as pastas REF, CCA-30 e CCA-2H formaram maiores quantidades de compostos hidratados referentes à C-S-H e AfT aos 28 dias. Para os 91 dias, as pastas REF, CCA-30, CCA-1H e CCA-2H apresentaram teores próximos entre si e ligeiramente inferiores às pastas REF e CCA-15 nas perdas de massa de C-S-H/AfT.

Ao que se refere à segunda faixa de perda de massa, correspondente à Portlandita, a pasta REF, apresentou um teor próximo de 5% para todas as idades. Enquanto isso, as pastas com adições de CCA tiveram variações nos teores de hidróxido de cálcio para todas as idades. Aos 7 dias, todas as pastas contendo a substituição, apresentaram perdas de massa inferiores à apresentada pela pasta REF, sendo a pasta CCA-2H a com menor perda de 2,88%. Com o aumento da idade para

28 dias, as pastas CCA-RES e CCA-15 mostraram um aumento na perda de massa referente à Portlandita, enquanto as pastas CCA-30, CCA-1H e CCA-2H tiveram uma ligeira diminuição na perda de massa. Aos 91 dias, todas as pastas com CCA apresentaram diminuições consideráveis em relação à perda de massa de hidróxido de cálcio obtida aos 7 e 28 dias, sendo importante ressaltar que as amostras moídas apresentaram menores perdas em relação à CCA-RES.

Na Figura 48-c, ao que se refere aos teores de carbonato de cálcio, a amostra REF apresentou para todas as idades os maiores teores, indo de encontro ao esperado devido ao teor desse composto proveniente do *filler* calcário presente na composição do cimento utilizado, contando também com o percentual proveniente da carbonatação da amostra. Entretanto, as amostras CCA-RES e CCA-15 apresentaram teores de calcita superiores à REF para as idades de 28 e 91 dias, respectivamente. Para essas duas amostras, as maiores perdas referentes à calcita indicam uma maior reação de carbonatação da pasta ao decorrer do tempo.

As pastas com a substituição de CCA residual desenvolveram uma maior relação entre os compostos hidratados referentes à C-S-H/Aft e o hidróxido de cálcio. Isso indica que há uma menor quantidade de Portlandita da matriz, e uma maior quantidade de C-S-H e Aft. Mesmo considerando o consumo de hidróxido de cálcio referente à carbonatação das pastas, é visível o aumento de C-S-H-Aft na Figura 48-a acompanhado da diminuição de Portlandita na Figura 48-b devido à reação pozolânica proporcionada pela substituição.

#### 4.1.8 Escolha da cinza para o tratamento dos ARC

O caráter pozolânico de todas as cinzas, tratadas fisicamente e termicamente, bem como da CCA-RES sem tratamento, é confirmado através da calorimetria isotérmica após as 70 horas, uma vez que as curvas de fluxo de calor contendo a substituição se apresentaram superiores à pasta REF, indicando a sobreposição da liberação de calor da reação pozolânica em relação ao efeito filler. Entretanto, as cinzas moídas foram o grupo que mais acentuou o efeito de nucleação e as reações pozolânicas, como indicado pelas curvas de calor acumulado comparado à CCA-RES.

Ainda quanto à reação pozolânica, a análise termogravimétrica das pastas contendo as CCA moídas, constatou um aumento do consumo de hidróxido de cálcio e aumento da precipitação de C-S-H em relação à CCA-RES, mas principalmente

comparadas à REF, indicando o potencial pozolânico da CCA residual moída.

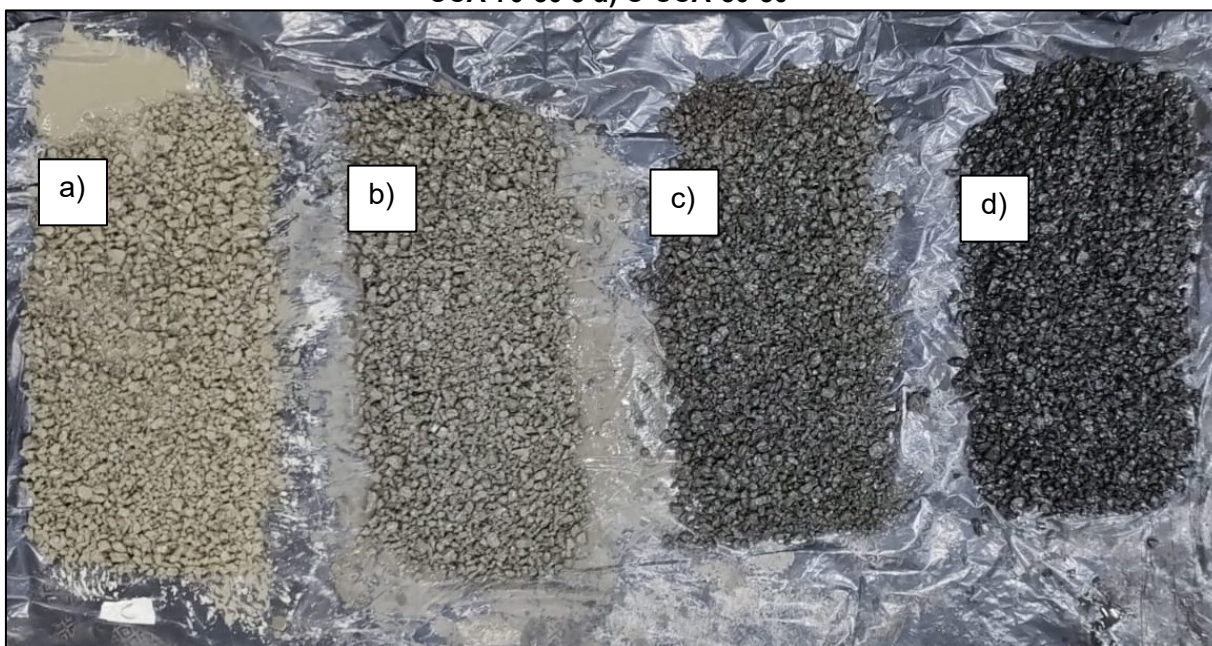
Segundo o disposto pela NBR 12653:2015 quanto a adequação das cinzas quanto materiais pozolânicos, todas as amostras moídas, sendo elas CCA-15, CCA-30, CCA-1H e CCA-2H apresentaram os requisitos químicos e físicos necessários para usos como materiais pozolânicos.

Por ter apresentado melhor desempenho mecânico no ensaio de resistência à compressão para as idades de 7, 28 e 91 dias, e por ser um menor tempo de moagem, comparada a CCA-1H e CCA-2H, a CCA-30 foi escolhida para utilização como material pozolânico no tratamento dos ARC.

#### 4.2 Caracterização dos ARC antes e depois do tratamento

Após serem submetidos ao tratamento de imersão em soluções pozolânicas, os agregados reciclados foram dispostos sobre lona para passarem pelo processo de cura à temperatura ambiente por 3 dias. Na Figura 49 são apresentados os agregados ainda úmidos do tratamento. É verificada a diferença na coloração do *coating* pozolânicos devido aos incrementos de CCA residual utilizada para cada mistura de tratamento, sendo a mistura C-CCA-50-50 a mais escura devido a maior substituição de cimento por CCA-30.

Figura 49 - Agregados após a imersão em soluções pozolânicas a) C-100 b) C-CCA-90-10 c) C-CCA-70-30 e d) C-CCA-50-50



Fonte: Autora (2023)



Durante o processo de cura, os agregados foram revirados às 24 horas a fim de impedir a formação de torrões. Na Figura 50, são apresentados os agregados tratados após o período de cura. Quando secos, visualmente, há pouca diferença na discrepância na coloração e textura entre todas as misturas. Todos os tratamentos conferiram um recobrimento de toda a superfície dos agregados reciclados, tanto da argamassa residual como do agregado natural do concreto de origem, formando um agregado tratado com aparência homogênea, recoberta por uma fina camada de pasta de material cimentício.

**Figura 50 - Agregados tratados após o período de cura de 3 dias a) C-100 b) C-CCA-90-10 c) C-CCA-70-30 e d) C-CCA-50-50**



Fonte: Autora (2023)

Terminado o período de cura, os agregados foram mantidos em ambiente coberto à temperatura ambiente e preparados para os ensaios das propriedades físicas e mineralógicas.

#### 4.2.1 Densidade, absorção de água e abrasão Los Angeles

Os resultados referentes à densidade dos agregados nas condições seca e saturado superfície seca, segundo a NBR NBR 16917:2021, são apresentados na Tabela 20.

**Tabela 20 - Densidade agregados**

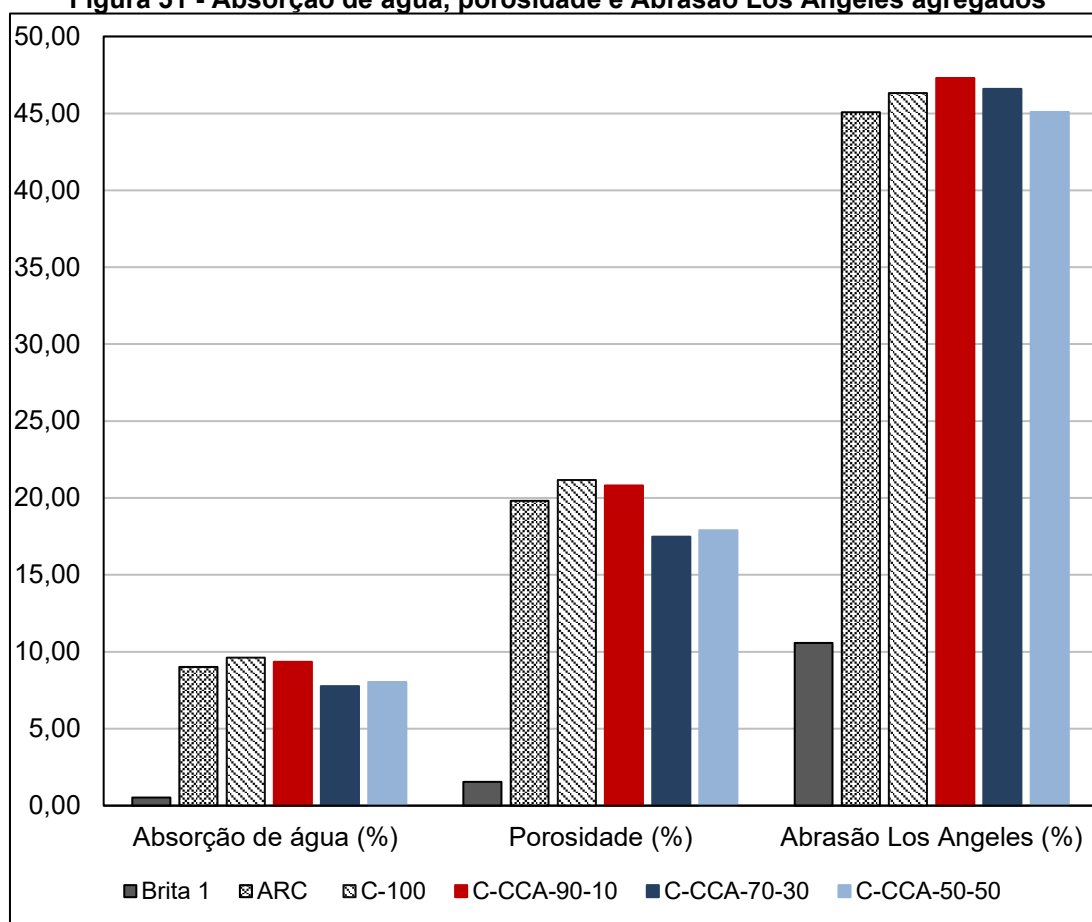
<b>Agregado</b>	<b>Densidade seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade saturado superfície seca (SSS) (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Brita 1	2,91	2,93
ARC	2,20	2,40
C-100	2,20	2,41
C-CCA-90-10	2,22	2,43
C-CCA-70-30	2,25	2,42
C-CCA-50-50	2,23	2,41

**Fonte: Autora (2023)**

Comparado ao agregado natural, o ARC apresentou valores inferiores para as duas densidades devido à sua natureza heterogênea constituída do agregado natural e argamassa residual do concreto de origem. Essa argamassa residual, por ter característica porosa, quando comparada à um agregado natural, é a principal responsável pela diminuição da densidade do ARC.

Para os agregados tratados, confrontando a densidade seca com a do ARC não tratado, há uma pequena variação para os três tratamentos com a CCA residual, sendo o agregado C-CCA-70-30 o melhor caso com aumento de 2,3%. Quanto à densidade saturada superfície seca, há também um pequeno aumento dos valores para todos os agregados tratados em comparação ao ARC, sendo o agregado C-CCA-90-10 o melhor caso com aumento de apenas 1,25% nesta densidade.

Na Figura 51 são apresentados os resultados referentes à absorção de água, porosidade e Abrasão Los Angeles da Brita 1 natural, do ARC não tratado e dos quatro agregados reciclados tratados.

**Figura 51 - Absorção de água, porosidade e Abrasão Los Angeles agregados**

Fonte: Autora (2023)

O ARC apresentou uma absorção de água de 9,01% enquanto a Brita 1 tem uma absorção de 0,53%. Essa diferença vai de encontro aos valores de densidade obtidos para os dois agregados, uma vez que há uma relação inversamente proporcional entre a densidade e a absorção de água desses materiais, devido à presença da argamassa residual porosa, responsável por uma absorção de água muito superior à encontrada nos agregados naturais.

Em comparação com o ARC não tratado, os agregados C-100 e C-CCA-90-10 apresentaram um aumento nos valores de absorção de água, sendo que o agregado tratado com mistura contendo apenas cimento apresentou a maior variação no valor de 6,7%. Esse aumento na absorção de água pode ser ligado ao acréscimo de pasta, propiciado pelo tratamento, à argamassa residual. Considerando esse aumento, é possível que o tratamento não tenha sido capaz de preencher a poros e ainda aumentou a quantidade de material poroso aderido ao agregado reciclado.

De forma contrária aos dois primeiros tratamentos, os agregados C-CCA-70-

30 e C-CCA-50-50 manifestaram menores valores de absorção de água, com diminuições de 13,8 e 10,8%, comparados ao ARC. Essa diminuição pode ser explicada pela maior quantidade de material pozolânico utilizado nas misturas de tratamento. A maior incorporação de CCA residual nesses dois casos, foi capaz de fornecer um maior preenchimento dos poros devido à densificação da matriz através da reação pozolânica.

Esse maior preenchimento é refletido nos valores de porosidade dos agregados. Para os tratamentos C-100 e C-CCA-90-10, houve um aumento de 6,7 e 5% na porosidade comparados ao agregado reciclado sem tratamento. Diferentemente, os tratamentos com maiores substituições de cimento por CCA, C-CCA-70-30 e C-CCA-50-50, apresentaram diminuição de 11,8 e 9,6% na porosidade.

Referente ao ensaio de Abrasão Los Angeles, todos os agregados podem ser considerados aptos para utilização em concretos e argamassas segundo a NBR 7211:2022 uma vez que todos apresentaram valores de desgaste inferiores a 50%. Entretanto, nenhum dos tratamentos foi capaz de propiciar um fortalecimento da argamassa residual suficiente para diminuir o desgaste do agregado reciclado. Por outro lado, os tratamentos C-100, C-CCA-90-10 e C-CCA-70-30 foram maléficos para essa propriedade, uma vez que aumentaram a quantidade de material fino desgastado durante o ensaio de abrasão.

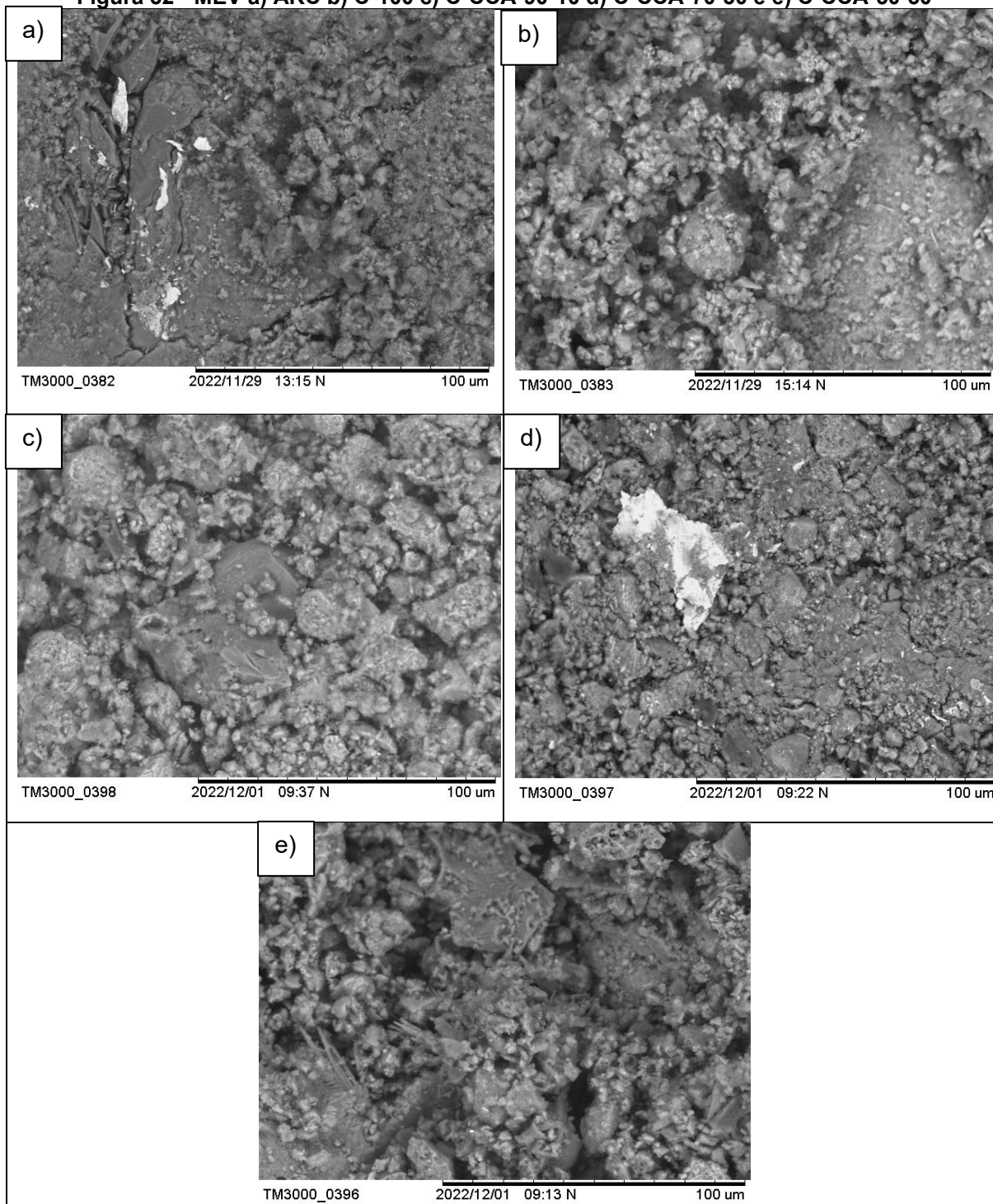
O ensaio de Abrasão Los Angeles é um procedimento bastante severo, onde os agregados sofrem impactos constantes por bolas metálicas. O agregado reciclado por possuir uma porosidade muito superior ao agregado natural, é também menos resistente ao impacto proporcionado pelo ensaio. A camada de pasta adicionada ao agregado reciclado durante o tratamento de imersão é uma pasta pouco fortalecida devido à alta relação água/aglomerantes. Essa pasta, responsável pela diminuição da absorção de água e porosidade dos agregados tratados, não é capaz de proporcionar um aumento da resistência ao desgaste dos agregados a nível suficiente para resistir aos impactos da Abrasão Los Angeles, e foi responsável pelo aumento do material desgastado durante este ensaio, uma vez que aumentou o teor de argamassa residual dos agregados.



#### 4.2.2 MEV superfície dos agregados

A fim de examinar a textura, morfologia e possível preenchimento da superfície dos agregados reciclados em comparação ao ARC sem tratamento, o ensaio de MEV foi realizado com aproximação de 1000X. As imagens obtidas são apresentadas na Figura 52.

**Figura 52 - MEV a) ARC b) C-100 c) C-CCA-90-10 d) C-CCA-70-30 e) C-CCA-50-50**



Fonte: Autora (2023)



Na Figura 52-a, o ARC apresenta uma superfície heterogênea, com a presença de grande quantidade de fissuras e vazios. As fissuras apresentadas são devidas aos impactos durante a moagem do concreto para produção dos agregados, e os vazios presentes na argamassa residual porosa que integra o ARC.

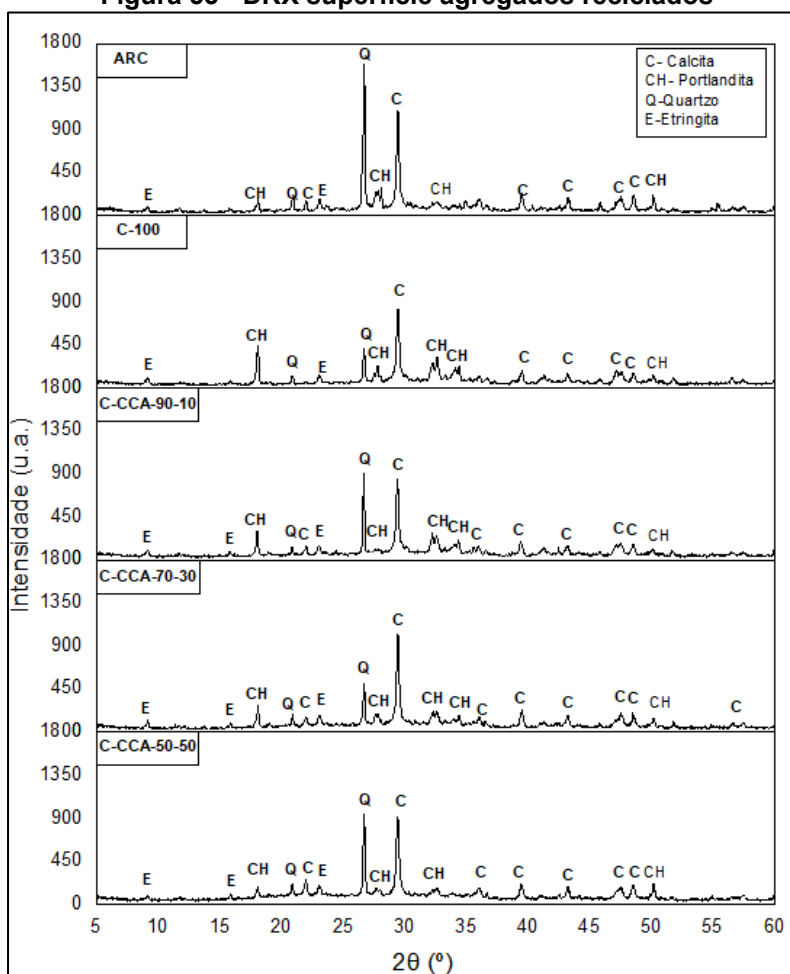
O agregado C-100, Figura 52-b tratado com mistura de cimento e água, apresenta uma maior quantidade de pasta aderida à superfície. Essa camada de pasta tem uma morfologia pouco densificada, até menos que a superfície do ARC sem tratamento. Essa porosidade foi responsável pelo aumento na absorção de água e porosidade deste agregado em comparação ao agregado sem tratamento. Esta camada, mesmo que porosa, é capaz de cobrir o agregado reciclado, não sendo possível visualizar fissuras provenientes do processo de britagem do concreto.

Para os três agregados tratados com misturas contendo CCA residual, Figuras 52-c, 52-d e 52-d, é verificada uma maior densificação nas pastas que recobrem os agregados, quando comparadas à pasta da superfície do agregado C-100, sem pozolana na mistura de tratamento. No entanto, ainda é possível visualizar fissuras presentes na superfície do agregado C-CCA-70-30 da Figura 52-d e uma quantidade expressiva de vazios no agregado C-CCA-50-50 da Figura 52-e, porém, este último apresenta uma superfície com aparência mais densa que a visualizada nos agregados ARC e C-100.

#### 4.2.3 DRX superfície dos agregados

A técnica de difração de raios X foi utilizada neste estudo para identificar as fases presentes na composição dos agregados reciclados antes e após os quatro tratamentos utilizados. Na Figura 53, são apresentados os difratogramas produzidos utilizando o software X'pert Highscore, compatível com o equipamento de DRX, para identificação das fases. O software equipara os picos presentes no gráfico com as fichas cristalográficas do ICDD - International Centre for Diffraction Data.

**Figura 53 - DRX superfície agregados reciclados**



Fonte: Autora (2023)

A amostra de ARC sem tratamento apresentou picos cristalinos característicos para calcita, quartzo, Portlandita e etringita, sendo os dois primeiros materiais presentes com maior intensidade. Além dos compostos com fase cristalina, é possível verificar a presença de material amorfo na parte inferior do gráfico.

A calcita presente na amostra é provavelmente proveniente do processo de carbonatação da argamassa residual dos agregados reciclados. A carbonatação, processo natural e gradativo da conversão dos compostos hidratados em  $\text{CaCO}_3$  (Winter, 2009), pode ter agido tanto no concreto de origem como no próprio agregado reciclado exposto ao meio contendo  $\text{CO}_2$ . Por sua vez, a fase de quartzo cristalina, indica que mesmo com o peneiramento utilizando malha  $75\mu\text{m}$  uma porção de areia ainda se faz presente na amostra.

As amostras tratadas apresentaram variações de intensidade para as mesmas fases presentes no ARC. Para todos os tratamentos houve redução dos picos principais para calcita e quartzo, sendo que o tratamento C-100 foi o que mais

acentuou essa redução. Já para os picos de hidróxido de cálcio, houve um aumento da intensidade para todos os casos comparados ao ARC sem tratamento, exceto para o tratamento C-CCA-50-50 que apresentou leve redução dos picos de CH, enquanto apresentou a menor mudança em relação à diminuição de calcita e quartzo.

Os principais compostos encontrados na superfície dos agregados através da análise de DRX foram calcita, Portlandita, quartzo e etringita. Nas amostras tratadas é evidenciada uma diminuição da quantidade de calcita e quartzo, devido à precipitação de novos compostos hidratados na superfície do agregado pelo tratamento. No ARC sem tratamento há uma quantidade reduzida de hidróxido de cálcio e alta de calcita, indicando uma carbonatação avançada do material, enquanto é evidenciada uma redução na quantidade de CH com o aumento da quantidade de CCA na mistura de tratamento, o que pode indicar um aumento da reação pozolânica na camada de *coating* ou uma diminuição da precipitação total de CH na pasta devido ao efeito de diluição pela diminuição da porcentagem total de cimento devido a substituição pela CCA residual.

### 4.3 Ensaios do concreto: estado fresco e endurecido

#### 4.3.1 Trabalhabilidade

Ao ser realizada a mistura dos componentes do concreto contendo a Brita 1 (referência), foi atingida uma trabalhabilidade referente ao *slump test* de 120mm. A fim de padronizar a trabalhabilidade de todos os traços, sem modificação no valor de a/c, o que afetaria as propriedades mecânicas dos concretos, foi utilizado um aditivo superplastificante, para que as misturas contendo agregado reciclado atingissem valores de *slump* de 120mm. Na Tabela 21 são apresentadas as adições de superplastificante em % da massa dos aglomerantes para todos os traços, e os valores de abatimento para todas as misturas.

<b>Traço</b>	<b>Superplastificante (%)</b>	<b>Slump (mm)</b>
Brita 1	-	120
ARC	0,20	120
C-100	0,20	120
C-CCA-90-10	0,20	120
C-CCA-70-30	0,20	120
C-CCA-50-50	0,15	120

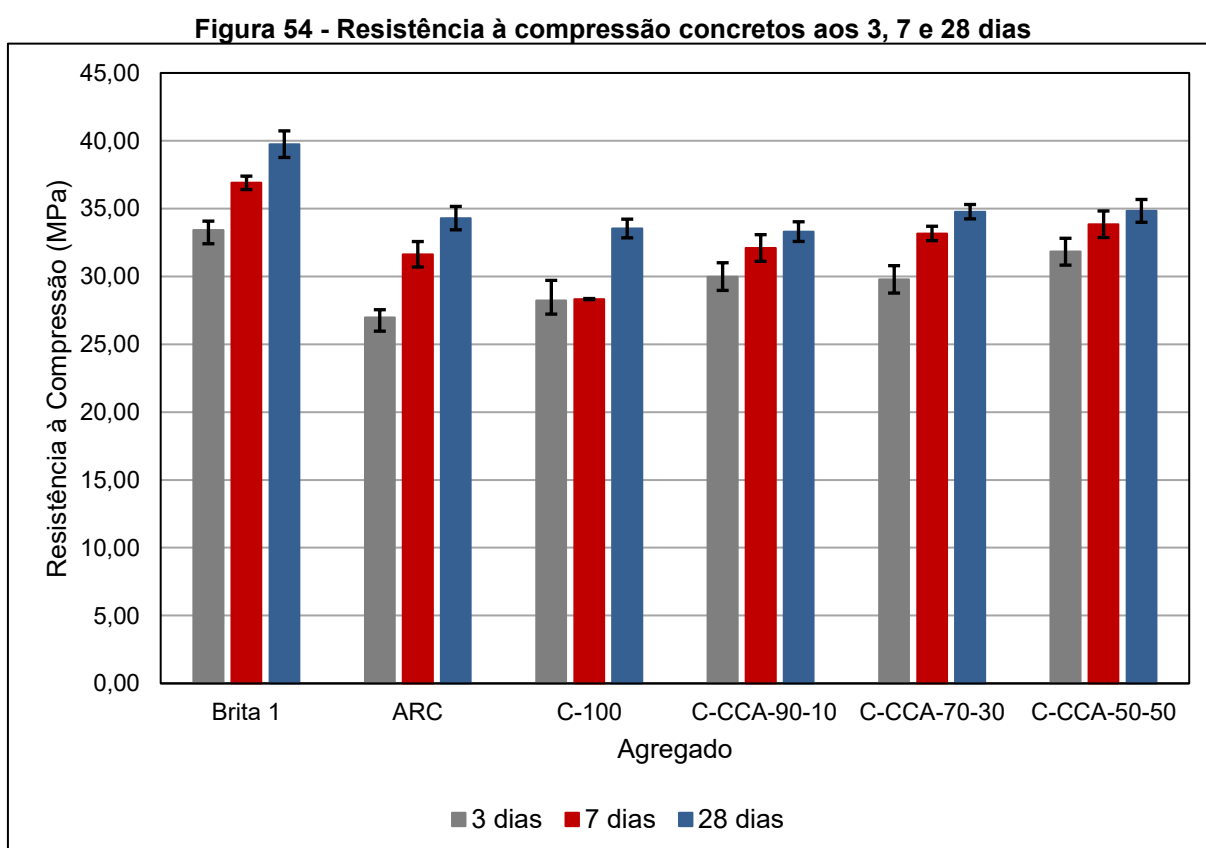
**Fonte: Autora (2023)**

O traço contendo o agregado C-CCA-50-50, foi a única mistura que necessitou menos superplastificante, 0,15%, para atingir o mesmo abatimento que o traço Brita 1. Todos os outros traços precisaram de uma adição de 0,05% de aditivo a mais para atingir os 120 mm de *slump*.

Essa diferença na trabalhabilidade entre os concretos de agregado natural (Brita 1) e de agregados reciclados é influenciada pela absorção de água superior apresentada pelos agregados reciclados, portanto, uma maior necessidade de superplastificante para se atingir o mesmo abatimento.

#### 4.3.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado para avaliar a influência do tratamento de imersão em solução pozolânica contendo CCA, nas propriedades dos concretos produzidos com os agregados tratados. Os valores atingidos no ensaio, aos 3, 7 e 28 dias, pelos cinco grupos de concreto com substituição total (100%) do agregado gráudo natural pelo ARC tratado e não tratado, bem como um traço com brita natural é apresentado na Figura 54.



Fonte: Autora (2023)

Aos 3 dias, os concretos produzidos com agregados reciclados tratados e não tratados apresentaram resistências inferiores ao concreto produzido com Brita 1, exceto o grupo CCA-50-50 que atingiu resistência à compressão sem diferença estatística significativa ( $p>0,05$ ) entre o concreto de agregado natural. Ainda nessa idade, em comparação com o concreto produzido com ARC o único grupo tratado que apresentou aumento de resistência à compressão significativa ( $p<0,05$ ) foi o C-CCA-50-50, com aumento de 18% em relação ao grupo não tratado. Entretanto, é importante citar, que entre os grupos tratados não há diferença estatística significativa, exceto entre C-100, inferior a todos os outros tratamentos.

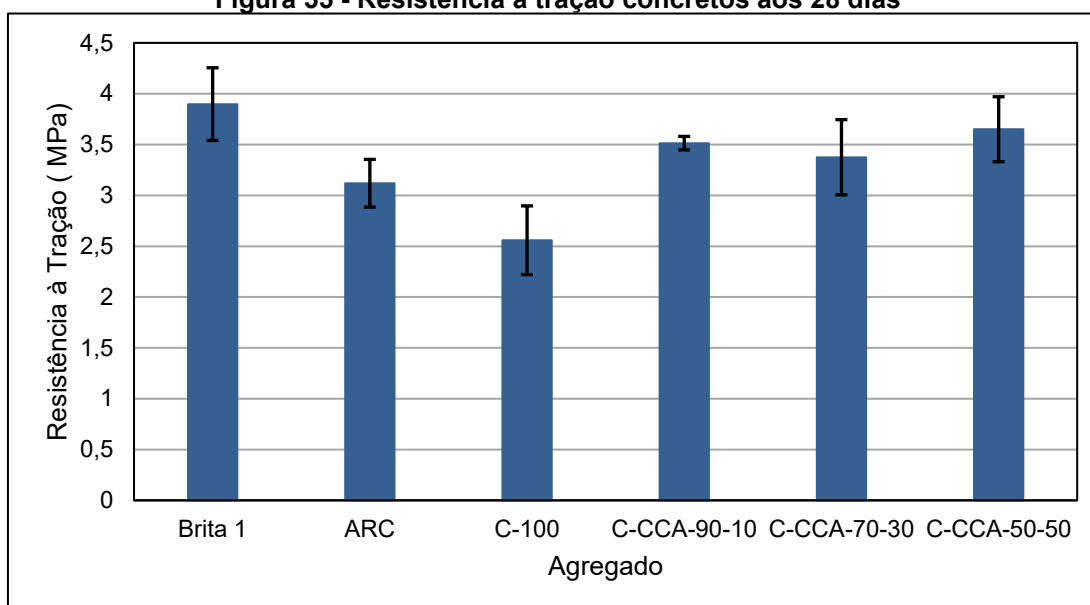
Para a evolução da resistência à compressão aos 7 dias, o grupo Brita 1 desenvolveu valores superiores a todos os outros grupos. Enquanto isso, entre os grupos de agregados reciclados, nenhum grupo tratado apresentou resistência à compressão superior ao grupo ARC, não havendo diferença estatística significativa entre os mesmo ( $p>0,05$ ) e os grupos tratados com misturas pozolânicas., inclusive sendo importante mencionar o grupo C-100 atingiu valor inferior à todos os grupos.

Aos 28 dias, é verificado que o grupo Brita 1 continua desenvolvendo resistências superiores aos grupos de agregados reciclados. Também é constatada nenhuma diferença estatística significativa ( $p>0,05$ ) na resistência à compressão entre todos os grupos de agregados reciclados tratados e não tratados.

#### 4.3.3 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração dos concretos produzidos no presente trabalho foi acessada através do ensaio de tração por compressão diametral, e os resultados obtidos aos 28 dias são apresentados na Figura 55.

**Figura 55 - Resistência à tração concretos aos 28 dias**



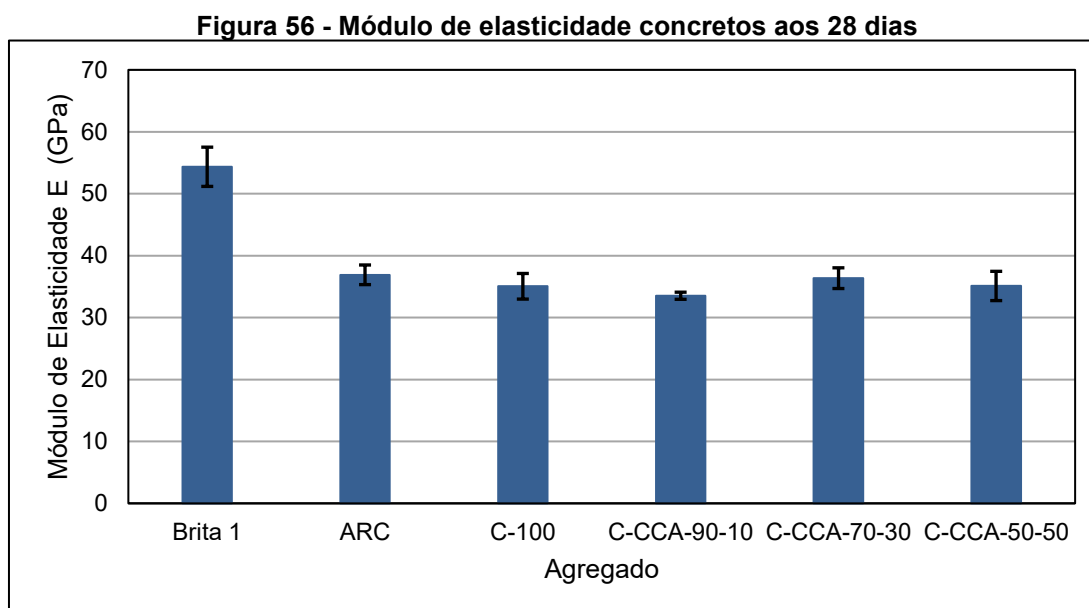
Fonte: Autora (2023)

Entre as resistências à tração alcançadas por todos os grupos tratados e o grupo ARC não foi desenvolvida diferença estatística significativa ( $p > 0,05$ ). Entretanto, os grupos tratados C-CCA-90-10, C-CCA-70-30 e C-CCA-50-50 atingiram resistência à tração semelhante ao grupo Brita 1 ( $p > 0,05$ ), indicando que para essa propriedade, o tratamento por imersão dos agregado com CCA foi capaz de equiparar o agregado reciclado tratado com pozolana ao agregado natural. Essa evolução não foi obtida pelos grupos ARC e C-100, que se mostraram inferiores em relação ao agregado natural para essa propriedade.

Enquanto isso, o grupo C-100 apresentou uma redução significativa ( $p < 0,05$ ) na resistência à tração, comparado aos outros grupos tratados em mistura contendo CCA.

#### 4.3.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade dos grupos Brita 1 e todos os outros grupos de concreto produzidos com agregados reciclados foi testado aos 28 dias conforme a NBR 8522-1:2021, e os valores são apresentados na Figura 56.



Fonte: Autora (2023)

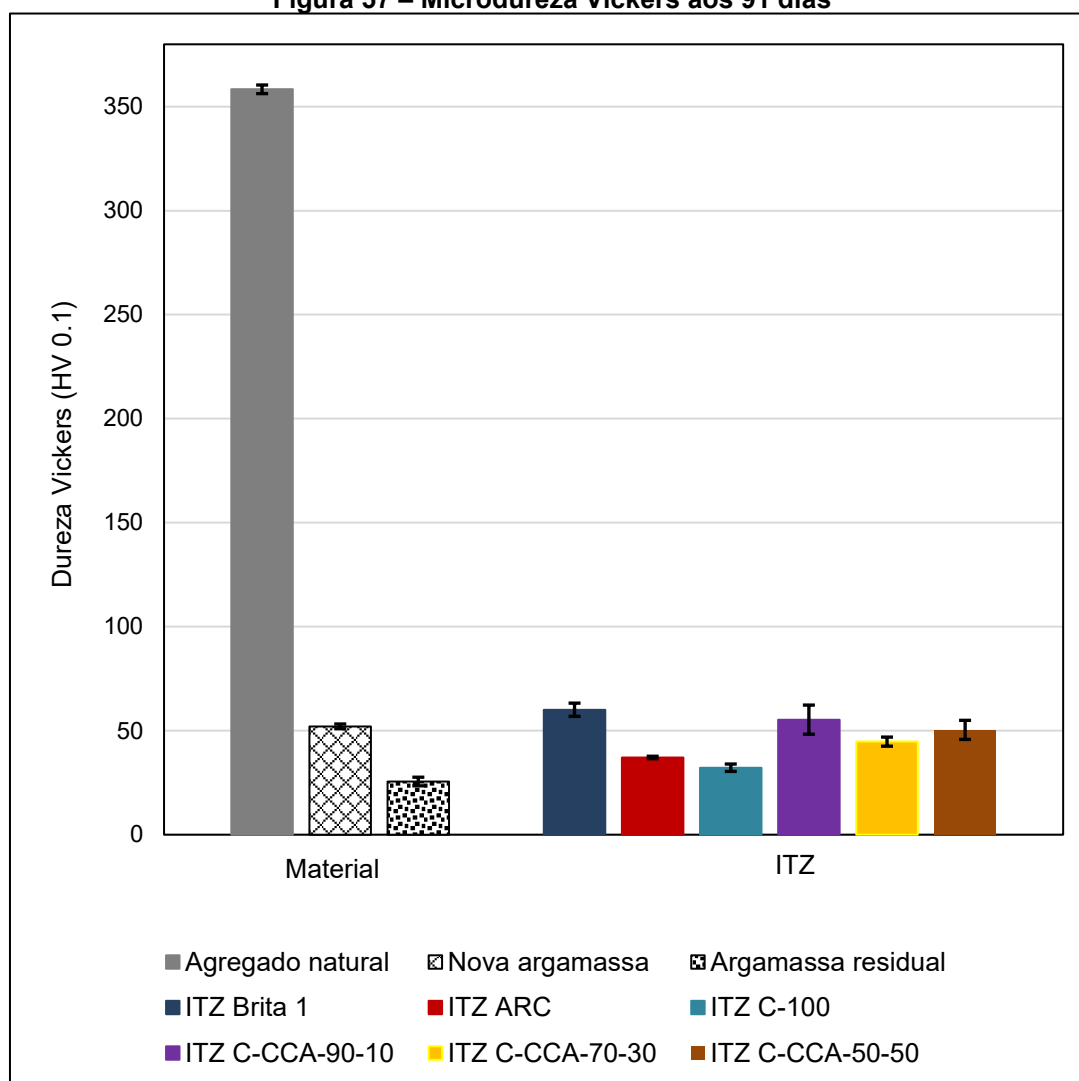
O concreto produzido com Brita 1 natural apresentou um módulo de elasticidade de aproximadamente 20 GPa superior que o demonstrado pelos grupos produzidos com agregados reciclados, indicando uma significativa ( $p < 0,001$ ) influência da composição do agregado, no caso do agregado reciclado, na redução desta propriedade.

Entre todos os grupos contendo ARC e os agregados tratados não houve uma diferença estatística significativa ( $p > 0,05$ ) entre os módulos de elasticidade desenvolvidos. Essa semelhança entre os resultados indica que o tratamento de imersão em soluções com cimento e cimento e CCA não foi capaz de influenciar positiva ou negativamente nesta propriedade.

#### 4.3.5 Microdureza Vickers

Na Figura 57, são apresentados os resultados do ensaio de microdureza Vickers realizado aos 91 dias, em diferentes regiões das 6 amostras de concreto produzidas com agregado natural e agregados reciclados com e sem tratamento.

Figura 57 – Microdureza Vickers aos 91 dias



Fonte: Autora (2023)

O material testado que apresentou a maior dureza foi o agregado natural, Brita 1, com valor de 358,35 na escala Vickers. Comparado este ao agregado reciclado sem tratamento há uma alta diferença, representando a microdureza do material reciclado apenas 7% do material natural. Em relação à nova argamassa que integra o novo concreto de ARC, a argamassa residual deste agregado reciclado apresentou uma dureza aproximadamente 50% inferior.

Considerando as zonas de transição das seis amostras de concretos produzidas, os melhores resultados foram obtidos pelas amostras contendo Brita 1 e C-CCA-90-10, que não apresentaram diferença estatística significativa ( $p > 0,05$ ) entre seus resultados microdureza. Por outro lado, comparando a ITZ Brita 1 com todas as outras amostras, há uma redução significativa ( $p < 0,05$ ) na microdureza para todos os casos, sendo as amostras ITZ ARC e ITZ C-100 as que apresentaram as menores



durezas: 37,12 e 32,19, respectivamente.

Entre os tratamentos, todos os concretos produzidos com agregados tratados em misturas contendo CCA apresentaram melhora significativa ( $p < 0,05$ ) na microdureza da zona de transição quando comparados à amostra sem tratamento. Dos três grupos contendo o material pozolânico no tratamento, as maiores durezas foram apresentadas pelos grupos ITZ C-CCA-90-10 e ITZ C-CCA-50-50 com HV de 55,3 e 50,38 respectivamente. Também é importante citar que a amostra ITZ C-CCA-90-10 atingiu dureza compatível com a apresentada pela ITZ Brita 1. O único caso, entre os tratamentos, que não apresentou aumento/diminuição significativa em relação ao grupo não tratado foi a amostras ITZ C-100.

#### 4.4 Análise geral dos resultados

Na Tabela 22 são apresentadas as propriedades das cinzas moídas em relação à CCA-R residual sem tratamento.

<b>Tabela 22 – Resumo propriedades cinzas moídas em comparação à CCA residual</b>					
<b>Propriedade</b>	<b>Cinza</b>				
	<b>CCA-R</b>	<b>CCA-15</b>	<b>CCA-30</b>	<b>CCA-1H</b>	<b>CCA-2H</b>
<b>Massa específica</b>	-	Alteração inferior à 0,1	Alteração inferior à 0,1	Alteração inferior à 0,1	Alteração inferior à 0,1
<b>Superfície específica</b>	-	Aumento de 2 vezes	Aumento de 3 vezes	Aumento de 4 vezes	Aumento de 5,5 vezes
<b>Granulometria</b>	$D_{\text{médio}}$ 53,54 $\mu\text{m}$	Diminuição em 14%	Diminuição em 44%	Diminuição em 60%	Diminuição em 77%
<b>Microestrutura</b>	Epidermes externa e interna e poros preservados	Apenas poucos poros preservados	Fragmentação quase total das estruturas	Fragmentação total e início de formação de aglomerados	Fragmentação total e formação de aglomerados
<b>Índice de Atividade Pozolânica</b>	Inferior à REF sem substituição	Superior à CCA-RES aos 7 e 28 dias, e compatível aos 91 dias	Superior à CCA-RES e CCA-15 para todas as idades	Compatível à CCA-30 para todas as idades	Compatível à CCA-30 para todas as idades
<b>Calorimetria isotérmica</b>	-	Fluxo de calor compatível com CCA-RES	Pico máximo de fluxo de calor superior à CCA-RES	Pico máximo de fluxo de calor superior à CCA-RES	Pico máximo de fluxo de calor superior à CCA-RES
<b>Termogravimetria</b>	Redução superior no teor de CH em relação à REF para todas as idades	Redução superior no teor de CH em relação à CCA-RES para todas as idades	Redução superior no teor de CH em relação à CCA-RES para todas as idades	Redução superior no teor de CH em relação à CCA-RES para todas as idades	Maior redução no teor de CH em relação à CCA-RES para todas as idades

Fonte: Autora (2023)

Ao cruzar os resultados de IAP com a granulometria a laser das CCA moídas, é possível verificar que a diminuição gradativa do  $D_{\text{médio}}$  teve influência direta sobre o ganho da propriedade mecânica das argamassas. Entretanto, é notável que a partir de 43,87% de diminuição, atingida com 30 minutos de moagem, até 76,82% de diminuição, obtida com 2 horas de moagem, não houve mudança significativa entre as resistências mecânicas das argamassas contendo as diferentes substituições. Cruzando ainda esses dados com o MEV dos grãos de CCA residual moída por diferentes períodos de tempo, é constatado que a partir de 30 minutos de moagem há uma quebra total da estrutura celular, tornando o material finamente dividido, o que influencia positivamente na nucleação da precipitação de compostos hidratados da matriz.

Na Tabela 23 são apresentadas as propriedades das cinzas requeimadas em relação à CCA-R residual sem tratamento.

**Tabela 23 – Resumo propriedades cinzas requeimadas em comparação à CCA residual**

Propriedade	Cinza				
	CCA-R	CCA-15	CCA-30	CCA-1H	CCA-2H
<b>Massa específica</b>	-	Alteração inferior à 0,01	Alteração inferior à 0,01	Alteração inferior à 0,01	Alteração inferior à 0,01
<b>Superfície específica</b>	-	Aumento de 5%	Aumento de 22%	Aumento de 46%	Aumento de 36%
<b>Composição mineralógica</b>	Picos de cristobalita e halo amorfo de sílica	Sem alteração	Sem alteração	Sem alteração	Sem alteração
<b>Composição química</b>	Teor de sílica de 91%	Alteração inferior à 1%	Alteração inferior à 1%	Alteração inferior à 1%	Alteração inferior à 1%
<b>Microestrutura</b>	Epidermes externa e interna e poros preservados	Sem alteração	Sem alteração	Sem alteração	Sem alteração
<b>Índice de Atividade Pozolânica</b>	Inferior à REF sem substituição	Superior à CCA-Res em todas as idades	Superior à CCA-Res em todas as idades	Superior à CCA-Res em todas as idades	Superior à CCA-Res em todas as idades
<b>Calorimetria isotérmica</b>	-	Pico máximo de fluxo de calor inferior à CCA-RES	Pico máximo de fluxo de calor inferior à CCA-RES	Pico máximo de fluxo de calor inferior à CCA-RES	Pico máximo de fluxo de calor inferior à CCA-RES

**Fonte: Autora (2023)**

A pozolanicidade de todas as cinzas moídas e requeimadas, bem como a CCA-RES sem tratamento, foi confirmado através da calorimetria isotérmica e da análise termogravimétrica das pastas contendo as CCA moídas que confirmou um

aumento do consumo de hidróxido de cálcio e aumento da precipitação de C-S-H em relação à pasta REF sem substituição, indicando o potencial pozolânicos da CCA.

Um resumo das propriedades dos agregados reciclados tratado e não tratados, bem como dos concretos produzidos com cada agregado, é apresentado na Tabela 24.

**Tabela 24 – Resumo propriedades agregados e concretos**

Propriedade	Agregado				
	ARC	C-100	C-CCA-90-10	C-CCA-70-30	C-CCA-50-50
<b>Densidade</b>	Inferior ao agregado natural	Pequeno aumento em relação à ARC	Pequeno aumento em relação à ARC	Pequeno aumento em relação à ARC	Pequeno aumento em relação à ARC
<b>Absorção de água</b>	Superior ao agregado natural	Aumento em relação à ARC	Aumento em relação à ARC	Diminuição em relação à ARC	Diminuição em relação à ARC
<b>Porosidade</b>	Superior ao agregado natural	Aumento em relação à ARC	Aumento em relação à ARC	Diminuição em relação à ARC	Diminuição em relação à ARC
<b>Abrasão Los Angeles</b>	Desgaste muito superior ao agregado natural	Aumento em relação à ARC	Aumento em relação à ARC	Aumento em relação à ARC	Igual ao agregado sem tratamento
<b>Superfície (MEV e DRX)</b>	Heterogênea com fissuras e vazios	Pasta menos densificada que ARC	Maior densificação comparado à C-100	Maior densificação comparado à C-100	Maior densificação comparado à todos os outros
<b>Resistência à compressão</b>	Inferior à Brita 1 para todas as idades	Não há diferença estatística significativa com ARC	Não há diferença estatística significativa com ARC	Não há diferença estatística significativa com ARC	Não há diferença estatística significativa com ARC. Único aumento aos 3 dias
<b>Resistência à tração</b>	Inferior à Brita 1	Não há diferença estatística significativa com ARC	Não há diferença estatística significativa com ARC, mas compatível à Brita 1	Não há diferença estatística significativa com ARC, mas compatível à Brita 1	Não há diferença estatística significativa com ARC, mas compatível à Brita 1
<b>Módulo de elasticidade</b>	Inferior à Brita 1	Não há diferença estatística significativa com ARC	Não há diferença estatística significativa com ARC	Não há diferença estatística significativa com ARC	Não há diferença estatística significativa com ARC
<b>Dureza Vickers zona ITZ</b>	Representa apenas 7% da micro dureza da Brita 1	Redução em comparação com ARC	Aumento em relação à ARC e compatível com Brita 1	Aumento em relação à ARC	Aumento em relação à ARC

Fonte: Autora (2023)

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar os tratamentos físico e térmico da CCA residual, através de diferentes tempos de moagem e temperaturas de requeima desse material a fim de utilizá-lo como material pozolânico no tratamento superficial dos agregados reciclados de concreto pelo método de imersão em misturas pozolânicas. Para tal foram realizados ensaios de caracterização da CCA residual moída por 15 min, 30 min, 1 e duas horas, bem como da CCA residual requeimada à 300, 400, 500 e 600°C.

O tratamento físico da CCA residual através da moagem se apresentou benéfico para o desenvolvimento da resistência à compressão das argamassas do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica. O tratamento físico através da moagem superior a 30 minutos se apresentou mais benéfico para o desenvolvimento da resistência à compressão das argamassas comparada à cinza residual sem moagem e a cinza moída por 15 minutos. Por outro lado, a moagem em excesso, a partir de 1 e 2 horas trouxe uma limitação a essa finura e nucleação ao propiciar a formação de aglomerados de partículas.

Entre as CCA requeimadas, houve uma melhora significativa em relação à CCA-RES sem tratamento para todas as idades. Todavia, essa melhora não pode ser ligada à uma mudança da composição mineralógica e química pelo tratamento térmico, uma vez que para todas as temperaturas não houve mudanças significativas nos difratogramas e na análise de FRX das cinzas.

Em relação ao tratamento com mistura pozolânica produzido com a CCA-30, por ter uma natureza heterogênea e porosa, todos os agregados reciclados tratados e não tratados apresentaram valores de densidade inferiores e absorção de água, porosidade e desgaste superiores ao agregado natural. Os agregados tratados em misturas com maiores teores de CCA manifestaram melhores valores para absorção de água e porosidade, o que pode ser explicado por um maior preenchimento de poros devido à reação pozolânica.

Ao que se refere às propriedades mecânicas dos concretos contendo ARC tratados e não tratados, analisando a evolução aos 3, 7 e 28 dias para o ensaio de resistência à compressão, é válido concluir que a partir dos 7 dias nenhum tratamento de imersão dos agregados reciclados foi capaz de influenciar positivamente. O único aumento constatado foi aos 3 dias pelo grupo C-CCA-50-50 em relação aos demais.

Para a resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade aos 28 dias, não houve melhora significativa em relação ao grupo não tratado para todas as proporções, entretanto, os agregados tratados com CCA propiciaram uma resistência à tração compatível ao concreto com Brita 1. Para a investigação da micro dureza Vickers, houve melhora significativa na dureza das ITZ dos agregados tratados em soluções pozolânicas em relação ao ARC e o grupo tratado com solução contendo apenas cimento Portland.

O tratamento dos agregados em mistura pozolânica contendo CCA residual foi capaz de propiciar melhora nas propriedades físicas (absorção de água e porosidade) dos agregados e na performance mecânica da zona de transição dos concretos produzidos. Entretanto, essa melhora trazida pelo tratamento ao agregado não foi capaz de influenciar significativamente no ganho de resistência mecânica dos concretos com agregado reciclado tratado em comparação ao não tratado. Isso indica que para o agregado reciclado utilizado neste trabalho, a melhora na zona de transição não definiu a resistência final do concreto. Por ter se apresentado a região de menor dureza no ensaio de microdureza, a região central da argamassa residual pode ter sido o ponto crítico de ruptura.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

- a) Analisar a influência da combinação dos processos de requeima e moagem para a mesma amostra;
- b) Realizar análise granulométrica das cinzas requeimadas para identificar possível mudança na finura do material uma vez que houve aumento da superfície Blaine com o processo.
- c) Utilizar o ensaio de MEV em pastas produzidas com as cinzas tratadas para identificar mudanças de microestrutura nas mesmas.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais: **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2020.

AKBARNESHAD, A., ONG, K. C. G., ZHANG, M. H., TAM, C. T., “Acid Treatment Technique for Determining the Mortar Content of Recycled Concrete Aggregates,” **Journal of Testing and Evaluation**, Vol. 41, No. 3, pp. 1–10, 2013.

AKONO, A.-T.; CHEN, J.; ZHAN, M.; SHAH, S. P. Basic creep and fracture response of fine recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 266, p. 121107, 2021.

ALENGARAM, U. J. 2 - Valorization of industrial byproducts and wastes as sustainable construction materials. In: F. Colangelo; R. Cioffi; I. B. T.-H. of S. C. and I. W. M. Farina (Orgs.); **Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering**. p.23–43, 2022. Woodhead Publishing.

ALQARNI, A. S.; ABBAS, H.; AL-SHWIKH, K. M.; AL-SALLOUM, Y. A. Treatment of recycled concrete aggregate to enhance concrete performance. **Construction and Building Materials**, v. 307, p. 124960, 2021.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Recommended practice for selecting proportions for normal and heavyweight concrete**; ACI 211,1. In: Manual of concrete practice. Detroit, 1981. V.1, p. 211. 1-20.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard Test Method for Micro indentation Hardness of Materials**. ASTM E384-17. West Conshohocken, PA, USA, 2017.

AREZOUMANDI, M.; SMITH, A.; VOLZ, J. S.; KHAYAT, K. H. An experimental study on flexural strength of reinforced concrete beams with 100% recycled concrete aggregate. **Engineering Structures**, v. 88, p. 154–162, 2015.

ARORA, S.; SINGH, S. P. Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% Coarse Recycled Concrete Aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 782–791, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO ARROZ. **Perfil da Produção**. Disponível em: <<http://brazilianrice.com.br/br/sobre-o-brasil/>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Parametros de dosagem racional do concreto**. 1995. Disponível em: < [https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2016/01/Parametros-dosagem\\_34aRTIC1983.pdf](https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2016/01/Parametros-dosagem_34aRTIC1983.pdf)>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento portland – Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697 – Cimento Portland: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó- Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Blaine).** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16732: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2020.

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 16974: Agregado graúdo – Ensaio de Abrasão Los Angeles .** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova .** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751: Materiais Pozolânicos – Determinação da atividade ozolânica com cal aos 7 dias.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento .** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2019.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e Argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Parte 1: Módulos estáticos à compressão**. Rio de Janeiro, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917: Agregado graúdo – Determinação da densidade e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. **Relatório Pesquisa Setorial**. 2018. Disponível em: < <https://abrecon.org.br/download/pesquisa-setorial-abrecon-pdf/>>

BAI, G.; ZHU, C.; LIU, C.; LIU, B. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 240, p. 117978, 2020.

BAI, G.; ZHU, C.; LIU, C.; LIU, B. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 240, p. 117978, 2020.

BHASYA, V.; BHARATKUMAR, B. H. Mechanical and Durability Properties of Concrete Produced with Treated Recycled Concrete Aggregate. **ACI Materials Journal**, v. 115, n. 2, p. 209–217, 2018. American Concrete Institute.

BARBUDO, A.; AGRELA, F.; AYUSO, J.; JIMÉNEZ, J. R.; POON, C. S. Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 129–138, 2012.

BRASIL. LEI Nº 12,305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: < [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 8500-2: Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206**. British Standards Institution, 2015.

BUI, N. K.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H.; Enhancement of Recycled Aggregate



Concrete. **International Journal of GEOMATE**, v. 14, n. 41, p. 68–76, 2018.

BUI, N. K.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 496–507, 2018.

CHAKRADHARA RAO, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V. Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 1, p. 69–80, 2011.

CHU, H.; WANG, T.; HAN, L.; et al. Vickers hardness distribution and prediction model of cement pastes corroded by sulfate under the coexistence of electric field and chloride. **Construction and Building Materials**, v. 309, p. 125119, 2021.

COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira 2020/2021: Grãos**. Disponível em: <<http://abiarroz.com.br/uploads/estatisticas/6a9aeddffc689c1d0e3b9ccc3ab651bc5.pdf>>.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. Disponível em: <<http://www.cbcs.org.br/website/noticia/show.asp?npgCode=DBC0153A-072A-4A43-BB0C-2BA2E88BEBAE>>. Acesso em 09/07/2020.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Gestão dos resíduos da construção civil. Resolução CONAMA nº. 307**. Brasília, 2002.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. D. M. R.; HEMPEL, S. Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 5, p. 529–534, 2011. Elsevier Ltd.

DASS, A. POZZOLANIC BEHAVIOUR OF RICE HUSK-ASH. **Batiment International, Building Research and Practice**, v. 12, n. 5, p. 307–311, 1984.

DE JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 872–877, 2009. Elsevier Ltd.

ETXEBERRIA, M. 13 - The suitability of concrete using recycled aggregates (RAs) for high-performance concrete. In: F. Pacheco-Torgal; Y. Ding; F. Colangelo; R. Tuladhar; A. B. T.-A. in C. and D. W. R. Koutamanis (Orgs.); **Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering**. p.253–284, 2020.

EUROPEAN AGGREGATES ASSOCIATION. **Annual Review 2020-2021**. 2021. Disponível em: <[https://uepg.eu/mediatheque/media/Final\\_-\\_UEPG-AR2020\\_2021-V05\\_spreads72dpiLowQReduced.pdf](https://uepg.eu/mediatheque/media/Final_-_UEPG-AR2020_2021-V05_spreads72dpiLowQReduced.pdf)>

FAN, Y.; XIAO, J.; TAM, V. W. Y. Effect of old attached mortar on the creep of recycled aggregate concrete. **Structural Concrete**, v. 15, n. 2, p. 169–178, 2014.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **World Food Situation 2022/23**. Disponível em: <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/>.

GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION. **DIN 4226-100**: Aggregates for concrete and mortar – Part 100: Recycled aggregates. Berlin, 2002.

GRUSKOVNJAK, A.; LOTHENBACH, B.; WINNEFELD, F.; FIGI, R.; KO, S.C.; ADLER, M.; MADER, U. Hydration mechanisms of super sulphated slag cement. **Cement and Concrete Research**, N.38, pp.983-992, 2008.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; TANAKA, R. S.; MEDEIROS, M. H. F. DE. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte II): Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DtG). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 3, 2017.

HU, H.; HE, Z.; SHI, J.; et al. Mechanical properties, drying shrinkage, and nano-scale characteristics of concrete prepared with zeolite powder pre-coated recycled aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 319, p. 128710, 2021.

HWANG, C.-L.; HUYNH, T.-P. Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 1–9, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Anual da Indústria da Construção**. 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9018-pesquisa-anual-da-industria-da-construcao.html?=&t=destaques>>

INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE (IRRI). **Rice knowledge bank: rice husk**. Disponível em: <<http://www.knowledgebank.irri.org/step-by-step-production/postharvest/rice-by-products/rice-husk>>.

ISMAIL, S.; RAMLI, M. Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 464–476, 2013.

JOSEPH, M.; BOEHME, L.; SIERENS, Z.; VANDEWALLE, L. Water absorption variability of recycled concrete aggregates. **Magazine of Concrete Research**, v. 67, n. 11, p. 592–597, 2015.

JOSEPH, M.; BOEHME, L.; SIERENS, Z.; VANDEWALLE, L. Water absorption variability of recycled concrete aggregates. **Magazine of Concrete Research**, v. 67, n. 11, p. 592–597, 2015.

KEUN-HYEOK YANG AND ASHRAF F. ASHOUR, H.-S. C. Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 3.

KOU, S.; POON, C. Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete Prepared

with Old Concrete with Different Strength Grades. **International RILEM Conference on Advances in Construction Materials Through Science and Engineering**, , n. v, p. 720–729, 2011.

KOU, S.-C.; POON, C.-S.; WAN, H.-W. Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 881–889, 2012.

KURAD, R.; SILVESTRE, J. D.; DE BRITO, J.; AHMED, H. Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 485–502, 2017.

LI, J.; XIAO, H.; ZHOU, Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1287–1291, 2009.

LI, L.; XUAN, D.; SOJOBI, A. O.; LIU, S.; POON, C. S. Efficiencies of carbonation and nano silica treatment methods in enhancing the performance of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 308, p. 125080, 2021.

LIMA, J.A.R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de duas aplicações em argamassas e concretos**. 1999.222 f. Dissertação (mestrado) Universidade de São Paulo.

LIU, C.; ZHANG, W.; LIU, H.; LIN, X.; ZHANG, R. A compressive strength prediction model based on the hydration reaction of cement paste by rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 340, p. 127841, 2022.

MCCARTHY, M. J.; DYER, T. D. Pozzolanas and Pozzolanic Materials. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. p.363–467, 2019. Elsevier.

MCNEIL, K.; KANG, T. H.-K. Recycled Concrete Aggregates: A Review. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 7, n. 1, p. 61–69, 2013.

MINDESS, S; YOUNG, JF; DARWIN, D. Concrete. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall; 2003.

NASKAR, M. K.; KUNDU, D.; CHATTERJEE, M. **A Facile Hydrothermal Conversion of Rice Husk Ash to ZSM-5 Zeolite Powders**. Journal of the American Ceramic Society, v. 95, n. 3, p. 925– 930, 2012. John Wiley & Sons, Ltd.

NASCIMENTO-DIAS, Bruno L. do, OLIVEIRA, Davi F. e ANJOS, Marcelino J. dos. A utilização e a relevância multidisciplinar da fluorescência de raios X. **Revista Brasileira de Ensino de Física** [online]. 2017, v. 39, n. 4.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo, P. M. **Concrete – Microstructure, Properties, and Materials** – 3ª Ed. Ed.: MC Graw Hill Education. ISBN.: 0-07-158919-8.

OLIVO, P. . **Estudo da Influência da Temperatura de Queima da Casca de Arroz**

**no Desempenho da Argamassa de Revestimento.** 2020. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pato Branco, PR, 2020.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V; MELLADO, A.; ORDOÑEZ, L. M. Determination of amorphous silica in rice husk ash by a rapid analytical method. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 2, p. 227–231, 2001.

POSSAN, E.; THOMAZ, W. A.; ALEANDRI, G. A.; FELIX, E. F.; SANTOS, A. C. dos. CO<sub>2</sub> uptake potential due to concrete carbonation: A case study. **Case Studies in Construction Materials**, Elsevier, v. 6, p. 147–161, 2017.

POUEY, M. T. F. . **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** 2006. 345 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS, 2006.

QASRAWI, H.; MARIE, I. Towards Better Understanding of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2013, p. 636034, 2013. Hindawi Publishing Corporation.

RAO, Akash; JHAB, Kumar N. MISRAA, Sudhir. **Uso de Agregados Reciclados de Resíduo de Construção e Demolição de Concreto.** Departamento de Engenharia Civil do IIT Kanpur. India, 2007.

RAO, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V. Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 1, p. 69–80, 2011.

RÊGO, J. H. S.; NEPOMUCENO, A. A.; FIGUEIREDO, E. P.; HASPARYK, N. P. Microstructure of cement pastes with residual rice husk ash of low amorphous silica content. **Construction and Building Materials**, v. 80, p. 56–68, 2015.

RODRÍGUEZ DE SENSALE, G. Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 9, p. 718–725, 2010.

RODRIGUES, E. H. V.; ARAÚJO, R. C. L.; FREITAS, E. G. A. **Concreto de Cimento Portland. Materiais de Construções.** Ed.1. Editora Universidade Rural, v.1, 203p, cap. 5. Rio de Janeiro, 2000.

RODRÍGUEZ DE SENSALE, G.; RODRÍGUEZ VIACAVA, I. A study on blended Portland cements containing residual rice husk ash and limestone filler. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 873–888, 2018.

SAFIUDDIN; ALENGARAM, U. J.; SALAM, A.; et al. Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate. **Materials Research**, v. 14, n. 2, p. 248–255, 2011.

SAINI, B. S.; SINGH, S. P. Flexural fatigue life analysis of self compacting concrete containing 100% coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building**

**Materials**, v. 253, p. 119176, 2020.

SAHRAEI MOGHADAM, A.; OMIDINASAB, F.; MOAZAMI GOODARZI, S. Characterization of concrete containing RCA and GGBFS: Mechanical, microstructural and environmental properties. **Construction and Building Materials**, v. 289, p. 123134, 2021.

SALMAN RAIS, M.; AHMAD KHAN, R. Effect of biomineralization technique on the strength and durability characteristics of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 290, p. 123280, 2021.

SANTOS, S . **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. 2001. 288 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, SC, 2001.

SARAVANAKUMAR, P.; ABHIRAM, K.; MANOJ, B. Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 611–617, 2016.

SASANIPOUR, H.; ASLANI, F. Durability assessment of concrete containing surface pretreated coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 264, p. 120203, 2020.

SHABAN, W. M.; ELBAZ, K.; YANG, J.; et al. Effect of pozzolan slurries on recycled aggregate concrete: Mechanical and durability performance. **Construction and Building Materials**, v. 276, p. 121940, 2021.

SHABAN, W. M.; YANG, J.; SU, H.; et al. Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry. **Construction and Building Materials**, v. 216, p. 632–647, 2019.

SHI, C.; LI, Y.; ZHANG, J.; et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 466–472, 2016.

SHI, C.; WU, Z.; CAO, Z.; LING, T. C.; ZHENG, J. Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO<sub>2</sub> and pozzolan slurry. **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 130–138, 2018.

SIDDIQUE, R.; KUNAL; MEHTA, A. 11 - Utilization of industrial by-products and natural ashes in mortar and concrete development of sustainable construction materials. In: K. A. Harries; B. B. T.-N. and V. C. M. (Second E. Sharma (Orgs.); **Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering**. p.247–303, 2020. Woodhead Publishing.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201–217, 2014. Elsevier Ltd.

SINGH, B. Rice husk ash. **Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete**. p.417–460, 2018. Elsevier.

SUBASHI DE SILVA, G. H. M. J.; VISHVALINGAM, S.; ETAMPAWALA, T. Effect of waste rice husk ash from rice husk fuelled brick kilns on strength, durability and thermal performances of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121794, 2021.

TAM, V. W. Y.; LE, K. N. Aggregate testing using 2nd-, 7th- and 10th-order interpolation polynomials. *Resour Conserv Recycl.* 52 (1): 39–57, 2007.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1195–1203, 2005.

TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. Quality improvement of recycled concrete aggregate by removal of residual mortar: A comprehensive review of approaches adopted. **Construction and Building Materials**, v. 288, p. 123066, 2021.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M.; LE, K. N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, n. 1, p. 82–101, 2007.

TAYLOR, H. F. W., **Cement chemistry**. London, Thomas Telford Publishing, 1997.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **World Agricultural Production: May 2022**. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>>.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Advancing Sustainable Materials Management: Fact Sheet. 2018**. Disponível em: <[https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018\\_ff\\_fact\\_sheet\\_dec\\_2020\\_fnl\\_508.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018_ff_fact_sheet_dec_2020_fnl_508.pdf)>

VIEIRA, A. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; CORDEIRO, G. C. Effect of particle size, porous structure and content of rice husk ash on the hydration process and compressive strength evolution of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 236, p. 117553, 2020.

WANG, L.; WANG, J.; QIAN, X.; et al. An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 432–441, 2017.

WANG, L.; WANG, J.; XU, Y.; et al. Consolidating recycled concrete aggregates using phosphate solution. **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 703–712, 2019.

WINTER, N. B. **Understanding Cement: An Introduction to Cement Production, Cement Hydration and Deleterious Processes in Concrete**. Microanalysis Consultants, 2012.

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1187–1194, 2005.

XU, W.; LO, T. Y.; MEMON, S. A. Microstructure and reactivity of rich husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 541–547, 2012.

XU, W.; LO, Y. T.; OUYANG, D.; et al. Effect of rice husk ash fineness on porosity and hydration reaction of blended cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 89, p. 90–101, 2015.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 67–74, 2016. Elsevier Ltd.

YANG, J.; SHABAN, W. M.; ELBAZ, K.; et al. Properties of concrete containing strengthened crushed brick aggregate by pozzolan slurry. **Construction and Building Materials**, v. 247, p. 118612, 2020.

ZAPARTE, T. . **Análise global da influência da finura da cinza de casca de arroz como substituição parcial ao cimento portland nas propriedades da argamassa de revestimento**. 2020. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pato Branco, PR, 2020.

ZHAN, B.; POON, C. S.; LIU, Q.; KOU, S.; SHI, C. Experimental study on CO<sub>2</sub> curing for enhancement of recycled aggregate properties. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 3–7, 2014. Elsevier Ltd.

ZHANG, H.; JI, T.; LIU, H.; SU, S. Improving the sulfate resistance of recycled aggregate concrete (RAC) by using surface-treated aggregate with sulfoaluminate cement (SAC). **Construction and Building Materials**, v. 297, p. 123535, 2021.

ZHENG, C.; LOU, C.; DU, G.; et al. Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate. **Results in Physics**, v. 9, p. 1317–1322, 2018.

## APÊNDICE A

A seguir, na Tabela 22, 23, 24 e 25 são apresentados os valores de resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias das argamassas produzidas com 25% de substituição do cimento pelas cinzas produzidas através do beneficiamento físico e térmico da CCA residual, bem como o tratamento estatístico produzido através da ANOVA e teste de Tukey.

**Tabela 25 - Resumo estatístico resistência à compressão argamassas aos 7, 28 e 91 dias**

Idade (dias)	Agregado	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
7 dias	REF	22,28	20,27	2,04	10,04
		20,33			
		18,21			
	CCA-RES	10,39	11,05	0,65	5,88
		11,07			
		11,69			
	CCA-15	16,8	16,02	0,78	4,84
		16,02			
		15,25			
	CCA-30	21,71	21,15	0,49	2,33
		20,78			
		20,96			
	CCA-1H	19,22	20,55	1,18	5,74
		20,94			
		21,48			
	CCA-2H	20,33	20,46	0,44	2,17
		20,95			
		20,09			
	CCA-300	13,56	13,61	0,20	1,44
		13,83			
		13,45			
	CCA-400	14,75	14,59	0,17	1,17
		14,61			
		14,41			
CCA-500	15,01	15,19	0,36	2,38	
	15,61				
	14,96				
CCA-600	15,65	14,63	0,93	6,37	
	14,42				
	13,82				
REF	24,88	25,21	0,82	3,25	
	26,15				
	24,62				
CCA-RES	19,46	19,25	0,65	3,38	
	19,77				
	18,52				
		22,64			



28 dias	CCA-15	22,62	22,04	1,03	4,66
		20,85			
		29,6			
	CCA-30	29,13	29,85	0,88	2,94
		30,83			
		29,51			
	CCA-1H	29,57	29,28	0,46	1,56
		28,75			
		28,25			
	CCA-2H	28,39	27,94	0,66	2,37
		27,18			
		26,99			
CCA-300	27,21	26,52	1,01	3,81	
	25,36				
	22,24				
CCA-400	24,63	23,19	1,27	5,47	
	22,7				
	21,8				
CCA-500	21,8	22,16	0,62	2,81	
	22,88				
	25,47				
CCA-600	23,04	24,21	1,22	5,03	
	24,12				
	29,71				
REF	27,8	29,58	1,72	5,83	
	31,24				
	25,27				
CCA-RES	25,61	25,14	0,55	2,20	
	24,53				
	23,29				
CCA-15	25,86	24,48	1,30	5,30	
	24,28				
	35,83				
CCA-30	37,97	36,62	1,72	3,20	
	36,07				
	37,78				
CCA-1H	36,42	36,75	0,91	2,48	
	36,05				
	36,06				
CCA-2H	35,19	35,11	1,00	2,84	
	34,07				
	30,07				
CCA-300	31,31	30,99	0,81	2,60	
	31,58				
	27,33				
CCA-400	28,34	28,69	1,56	5,45	
	30,4				
	28,21				
CCA-500	29,49	28,90	0,65	2,24	
	29,01				
	29,23				
CCA-600	28,8	28,86	0,35	1,21	
	28,54				

Fonte: Autora (2023)

**Tabela 26 - Teste Tukey resistência à compressão aos 7 dias**

<b>Comparação</b>	<b>p valor</b>	<b>Significativo</b>	<b>Confiança</b>
REF – CCA-RES	<0,001	Sim	99,99%
REF – CCA-15	<0,001	Sim	99,99%
REF – CCA-30	0,965	Não	-
REF – CCA-1H	1,00	Não	-
REF – CCA-2H	1,00	Não	-
REF – CCA-300	<0,001	Sim	99,99%
REF – CCA-400	<0,001	Sim	99,99%
REF – CCA-500	<0,001	Sim	99,99%
REF – CCA-600	<0,001	Sim	99,99%
CCA-RES - CCA-15	<0,001	Sim	99,99%
CCA-RES - CCA-30	<0,001	Sim	99,99%
CCA-RES - CCA-1H	<0,001	Sim	99,99%
CCA-RES - CCA-2H	<0,001	Sim	99,99%
CCA-RES - CCA-300	0,045	Sim	95%
CCA-RES - CCA-400	0,003	Sim	99%
CCA-RES - CCA-500	<0,001	Sim	99,99%
CCA-RES - CCA-600	0,003	Sim	99%
CCA-15 - CCA-30	<0,001	Sim	99,99%
CCA-15 - CCA-1H	<0,001	Sim	99,99%
CCA-15 - CCA-2H	<0,001	Sim	99,99%
CCA-15 - CCA-300	0,083	Não	-
CCA-15 - CCA-400	0,636	Não	-
CCA-15 - CCA-500	0,975	Não	-
CCA-15 - CCA-600	0,669	Não	-
CCA-30 - CCA-1H	0,997	Não	-
CCA-30 - CCA-2H	0,992	Não	-
CCA-30 - CCA-300	<0,001	Sim	99,99%
CCA-30 - CCA-400	<0,001	Sim	99,99%
CCA-30 - CCA-500	<0,001	Sim	99,99%
CCA-30 - CCA-600	<0,001	Sim	99,99%
CCA-1H - CCA-2H	1,00	Não	-
CCA-1H - CCA-300	<0,001	Sim	99,99%
CCA-1H - CCA-400	<0,001	Sim	99,99%
CCA-1H - CCA-500	<0,001	Sim	99,99%
CCA-1H - CCA-600	<0,001	Sim	99,99%
CCA-2H - CCA-300	<0,001	Sim	99,99%
CCA-2H - CCA-400	<0,001	Sim	99,99%
CCA-2H - CCA-500	<0,001	Sim	99,99%
CCA-2H - CCA-600	<0,001	Sim	99,99%
CCA-300 - CCA-400	0,934	Não	-
CCA-300 - CCA-500	0,514	Não	-
CCA-300 - CCA-600	0,918	Não	-
CCA-400 - CCA-500	0,997	Não	-
CCA-400 - CCA-600	1,00	Não	-
CCA-500 - CCA-600	0,998	Não	-

Fonte: Autora (2023)

Tabela 27 - Teste Tukey resistência à compressão aos 28 dias

Comparação	p valor	Significativo	Confiança
REF – CCA-RES	<0,001	Sim	99,99%
REF – CCA-15	0,013	Sim	99%
REF – CCA-30	<0,001	Sim	99,99%
REF – CCA-1H	<0,001	Sim	99,99%
REF – CCA-2H	0,048	Sim	95%
REF – CCA-300	0,811	Não	-
REF – CCA-400	0,273	Não	-
REF – CCA-500	0,019	Sim	-
REF – CCA-600	0,953	Não	-
REF – 90% REF	0,034	Sim	95%
CCA-RES - CCA-15	0,040	Sim	95%
CCA-RES - CCA-30	<0,001	Sim	99,99%
CCA-RES - CCA-1H	<0,001	Sim	99,99%
CCA-RES - CCA-2H	<0,001	Sim	99,99%
CCA-RES - CCA-300	<0,001	Sim	99,99%
CCA-RES - CCA-400	<0,001	Sim	99,99%
CCA-RES - CCA-500	0,029	Sim	95%
CCA-RES - CCA-600	<0,001	Sim	99,99%
CCA-RES – 90% REF	0,016	Sim	95%
CCA-15 - CCA-30	<0,001	Sim	99,99%
CCA-15 - CCA-1H	<0,001	Sim	99,99%
CCA-15 - CCA-2H	<0,001	Sim	99,99%
CCA-15 - CCA-300	<0,001	Sim	99,99%
CCA-15 - CCA-400	0,897	Não	-
CCA-15 - CCA-500	1,00	Não	-
CCA-15 – CCA-600	0,197	Não	-
CCA-15 – 90% REF	1,00	Não	-
CCA-30 – CCA-1H	0,999	Não	-
CCA-30 – CCA-2H	0,343	Não	-
CCA-30 – CCA-300	0,008	Sim	99%
CCA-30 – CCA-400	<0,001	Sim	99,99%
CCA-30 – CCA-500	<0,001	Sim	99,99%
CCA-30 – CCA-600	<0,001	Sim	99,99%
CCA-30 – 90% REF	<0,001	Sim	99,99%
CCA-1H – CCA-2H	0,788	Não	-
CCA-1H – CCA-300	0,044	Sim	-
CCA-1H – CCA-400	<0,001	Sim	99,99%
CCA-1H – CCA-500	<0,001	Sim	99,99%
CCA-1H – 90% REF	<0,001	Sim	99,99%
CCA-1H – CCA-600	<0,001	Sim	99,99%
CCA-2H – CCA-300	0,727	Não	-
CCA-2H – CCA-400	<0,001	Sim	-
CCA-2H – CCA-500	<0,001	Sim	99,99%
CCA-2H – CCA-600	0,002	Sim	99%
CCA-2H – 90% REF	<0,001	Sim	99,99%
CCA-300 – CCA-400	0,008	Sim	99%
CCA-300 – CCA-500	<0,001	Sim	99,99%
CCA-300 – CCA-600	0,108	Não	-
CCA-300 – 90% RE	<0,001	Sim	99,99%
CCA-400 – CCA-500	0,912	Não	-
CCA-400 – CCA-600	0,916	Não	-
CCA-400 – 90% REF	0,988	Não	-
CCA-500 – CCA-600	0,259	Não	-
CCA-500 – 90 % REF	1,00	Não	-
CCA-600 – 90% REF	0,389	Não	-

Fonte: Autora (2023)

**Tabela 28 - Teste Tukey resistência à compressão aos 91 dias**

<b>Comparação</b>	<b>p valor</b>	<b>Significativo</b>	<b>Confiança</b>
REF – CCA-RES	0,002	Sim	99%
REF – CCA-15	<0,001	Sim	99,99%
REF – CCA-30	<0,001	Sim	99,99%
REF – CCA-1H	<0,001	Sim	99,99%
REF – CCA-2H	<0,001	Não	99,99%
REF – CCA-300	0,841	Não	-
REF – CCA-400	0,988	Não	-
REF – CCA-500	0,998	Não	-
REF – CCA-600	0,997	Não	-
CCA-RES - CCA-15	0,999	Não	-
CCA-RES - CCA-30	<0,001	Sim	99,99%
CCA-RES - CCA-1H	<0,001	Sim	99,99%
CCA-RES - CCA-2H	<0,001	Sim	99,99%
CCA-RES - CCA-300	<0,001	Sim	99,99%
CCA-RES - CCA-400	0,019	Sim	95%
CCA-RES - CCA-500	0,011	Sim	95%
CCA-RES - CCA-600	0,013	Sim	95%
CCA-15 - CCA-30	<0,001	Sim	99,99%
CCA-15 - CCA-1H	<0,001	Sim	99,99%
CCA-15 - CCA-2H	<0,001	Sim	99,99%
CCA-15 - CCA-300	<0,001	Sim	99,99%
CCA-15 - CCA-400	0,004	Sim	99%
CCA-15 - CCA-500	0,002	Sim	99%
CCA-15 - CCA-600	0,002	Sim	99%
CCA-30 - CCA-1H	1,000	Não	-
CCA-30 - CCA-2H	0,778	Não	-
CCA-30 - CCA-300	<0,001	Sim	99,99%
CCA-30 - CCA-400	<0,001	Sim	99,99%
CCA-30 - CCA-500	<0,001	Sim	99,99%
CCA-30 - CCA-600	<0,001	Sim	99,99%
CCA-1H - CCA-2H	0,697	Não	-
CCA-1H - CCA-300	<0,001	Sim	99,99%
CCA-1H - CCA-400	<0,001	Sim	99,99%
CCA-1H - CCA-500	<0,001	Sim	99,99%
CCA-1H - CCA-600	<0,001	Sim	99,99%
CCA-2H - CCA-300	0,005	Sim	99%
CCA-2H - CCA-400	<0,001	Sim	99,99%
CCA-2H - CCA-500	<0,001	Sim	99,99%
CCA-2H - CCA-600	<0,001	Sim	99,99%
CCA-300 - CCA-400	0,283	Não	-
CCA-300 - CCA-500	0,402	Não	-
CCA-300 - CCA-600	0,374	Não	-
CCA-400 - CCA-500	1,00	Não	-
CCA-400 - CCA-600	1,00	Não	-
CCA-500 - CCA-600	1,00	Não	-

Fonte: Autora (2023)

## APÊNDICE B

A seguir são apresentados os valores de perda de massa em porcentagem do ensaio de análise termogravimétrica das pastas.

**Tabela 29 - Perdas de massa em porcentagem das pastas**

Amostra	Perda de massa (%) ao longo do tempo								
	C-S-H/Aft			Ca(OH) <sub>2</sub>			CaCO <sub>3</sub>		
	7 dias	28 dias	91 dias	7 dias	28 dias	91 dias	7 dias	28 dias	91 dias
REF	11,01	12,38	13,45	3,57	3,60	3,58	12,88	13,00	13,85
CCA-RES	10,76	13,01	12,63	2,51	2,73	2,06	11,18	13,92	12,25
CCA-15	10,19	10,88	13,83	2,58	2,79	1,32	11,06	12,21	14,63
CCA-30	10,44	11,23	12,51	2,42	2,37	1,66	11,34	12,29	13,85
CCA-1H	9,67	10,46	12,67	2,36	2,31	1,16	12,04	11,30	13,78
CCA-2H	9,81	11,43	13,04	2,17	1,99	0,99	12,56	12,77	13,54

Fonte: Autora (2023)

**Tabela 30 - Perdas de massa corrigidas em porcentagem das pastas**

Amostra	Perda de massa (%) ao longo do tempo								
	C-S-H/Aft			Ca(OH) <sub>2</sub>			CaCO <sub>3</sub>		
	7 dias	28 dias	91 dias	7 dias	28 dias	91 dias	7 dias	28 dias	91 dias
REF	15,17	17,43	19,46	4,92	5,07	5,18	17,76	18,30	20,03
CCA-RES	14,24	14,50	17,28	3,32	3,88	2,89	14,60	19,79	16,77
CCA-15	13,38	14,68	19,70	3,39	3,76	1,89	14,52	16,47	20,83
CCA-30	13,77	15,15	17,30	3,19	3,20	2,30	14,92	16,58	19,14
CCA-1H	12,74	13,78	17,50	3,10	3,04	1,60	15,85	14,88	19,03
CCA-2H	13,04	15,44	18,00	2,88	2,69	1,37	17,34	17,63	18,69

Fonte: Autora (2023)

## APÊNDICE C

A seguir, nas Tabelas 28, 29, 30 e 31, são apresentados os valores de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias dos concretos produzidos com brita 1 e agregados reciclados tratados, bem como o tratamento estatístico produzido através da ANOVA e teste de Tukey.

**Tabela 31 - Resistência à compressão concretos aos 3, 7 e 28 dias**

Idade (dias)	Agregado	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
3 dias	Brita 1	34,18	33,41	0,67	2,01
		33,02			
		33,03			
	ARC	26,3	26,97	0,58	2,15
		27,25			
		27,35			
	C-100	28,9	28,22	1,49	5,28
		29,25			
		26,52			
	C-CCA-90-10	26,13	29,97	3,99	13,31
		34,1			
		29,68			
C-CCA-70-30	27,16	29,77	3,08	10,34	
	28,99				
	33,17				
C-CCA-50-50	32,1	31,83	0,98	3,08	
	32,65				
	30,75				
7 dias	Brita 1	37,40	36,9	0,49	1,33
		36,89			
		36,41			
	ARC	32,30	31,63	1,11	3,51
		32,25			
		30,35			
	C-100	28,14	28,33	0,21	0,74
		28,30			
		28,55			
	C-CCA-90-10	31,09	32,10	1,38	4,30
		33,67			
		31,53			
C-CCA-70-30	32,57	33,17	0,73	2,20	
	32,96				
	33,98				
C-CCA-50-50	33,23	33,85	0,98	2,90	
	33,33				
	34,98				
28 dias	Brita 1	38,39	39,42	0,98	3,37
		39,51			
		40,35			
	ARC	33,31	34,3	0,86	2,51
		34,88			
		34,71			
		33,61			

28 dias	C-100	31,76	33,53	1,74	5,19
		35,23			
		33,13			
	C-CCA-90-10	34,1	33,03	0,73	2,21
		32,68			
		35,16			
	C-CCA-70-30	34,99	34,77	0,53	1,52
		34,17			
		35,75			
	C-CCA-50-50	34,65	34,83	0,84	2,41
		34,1			

Fonte: Autora (2023)

Tabela 32 - Teste Tukey resistência à compressão aos 3 dias

Comparação	p valor	Significativo	Confiança
B1 - ARC	<0,001	Sim	99,99%
B1 - C-100	<0,001	Sim	99,99%
B1 - C-CCA-90-10	0,003	Sim	99%
B1 - C-CCA-70-30	0,002	Sim	99%
B1 - C-CCA-50-50	0,435	Não	-
ARC - C-100	0,653	Não	-
ARC - C-CCA-90-10	0,116	Não	-
ARC - C-CCA-70-30	0,167	Não	-
ARC - C-CCA-50-50	<0,001	Sim	99,99%
C-100 - C-CCA-90-10	0,772	Não	-
C-100 - C-CCA-70-30	0,878	Não	-
C-100 - C-CCA-50-50	0,009	Sim	95%
C-CCA-90-10 - C-CCA-70-30	1,00	Não	-
C-CCA-90-10 - C-CCA-50-50	0,079	Não	-
C-CCA-70-30 - C-CCA-50-50	0,54	Não	-

Fonte: Autora (2023)

Tabela 33 - Teste Tukey resistência à compressão aos 7 dias

Comparação	p valor	Significativo	Confiança
B1 - ARC	<0,001	Sim	99,99%
B1 - C-100	<0,001	Sim	99,99%
B1 - C-CCA-90-10	<0,001	Sim	99,99%
B1 - C-CCA-70-30	0,0020	Sim	99%
B1 - C-CCA-50-50	0,010	Sim	99%
ARC - C-100	0,005	Sim	99%
ARC - C-CCA-90-10	0,995	Não	-
ARC - C-CCA-70-30	0,388	Não	-
ARC - C-CCA-50-50	0,096	Não	-
C-100 - C-CCA-90-10	0,002	Sim	99%
C-100 - C-CCA-70-30	<0,001	Sim	99,99%
C-100 - C-CCA-50-50	<0,001	Sim	99,99%
C-CCA-90-10 - C-CCA-70-30	0,667	Não	-
C-CCA-90-10 - C-CCA-50-50	0,212	Não	-
C-CCA-70-30 - C-CCA-50-50	0,925	Não	-

Fonte: Autora (2023)

**Tabela 34 - Teste Tukey resistência à compressão aos 28 dias**

<b>Comparação</b>	<b>p valor</b>	<b>Significativo</b>	<b>Confiança</b>
B1 - ARC	<0,001	Sim	99,99%
B1 – C-100	<0,001	Sim	99,99%
B1 – C-CCA-90-10	<0,001	Sim	99,99%
B1 – C-CCA-70-30	<0,001	Sim	99,99%
B1 – C-CCA-50-50	<0,001	Sim	99,99%
ARC – C-100	1,00	Não	-
ARC – C-CCA-90-10	0,639	Não	-
ARC – C-CCA-70-30	0,974	Não	-
ARC – C-CCA-50-50	0,955	Não	-
C-100 – C-CCA-90-10	0,549	Não	-
C-100 – C-CCA-70-30	0,991	Não	-
C-100 – C-CCA-50-50	0,981	Não	-
C-CCA-90-10 – C-CCA-70-30	0,269	Não	-
C-CCA-90-10 – C-CCA-50-50	0,234	Não	-
C-CCA-70-30 – C-CCA-50-50	1,000	Não	-

**Fonte: Autora (2023)**



## APÊNDICE D

A seguir, nas Tabelas 32 e 33, são apresentados os valores de resistência à tração por compressão aos 28 dias dos concretos produzidos com Brita 1 e agregados reciclados tratados, bem como o tratamento estatístico produzido através da ANOVA e teste de Tukey.

**Tabela 35 - Resistência à tração por compressão concretos aos 28 dias**

Idade (dias)	Agregado	Resistência à tração na compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
28 dias	Brita 1	3,71	3,90	0,36	9,23
		3,67			
		4,31			
	ARC	2,98	3,12	0,23	7,37
		3,39			
		2,98			
	C-100	2,79	2,56	0,34	13,28
		2,17			
		2,71			
	C-CCA-90-10	3,45	3,51	0,07	1,99
		3,51			
		3,58			
	C-CCA-70-30	3,66	3,38	0,37	10,95
		2,96			
		3,51			
C-CCA-50-50	3,99	3,65	0,32	8,77	
	3,35				
	3,61				

Fonte: Autora (2023)

**Tabela 36 - Teste Tukey resistência à tração na compressão aos 28 dias**

Comparação	p valor	Significativo	Confiança
B1 - ARC	0,025	Sim	99,99%
B1 - C-100	0,001	Sim	99,99%
B1 - C-CCA-90-10	0,586	Não	-
B1 - C-CCA-70-30	0,288	Não	-
B1 - C-CCA-50-50	0,888	Não	-
ARC - C-100	0,408	Não	-
ARC - C-CCA-90-10	0,339	Não	-
ARC - C-CCA-70-30	0,656	Não	-
ARC - C-CCA-50-50	0,145	Não	-
C-100 - C-CCA-90-10	0,014	Sim	99%
C-100 - C-CCA-70-30	0,039	Sim	95%
C-100 - C-CCA-50-50	0,005	Sim	99%
C-CCA-90-10 - C-CCA-70-30	0,990	Não	-
C-CCA-90-10 - C-CCA-50-50	0,990	Não	-
C-CCA-70-30 - C-CCA-50-50	0,838	Não	-

Fonte: Autora (2023)

## APÊNDICE E

A seguir, nas Tabelas 34 e 35, são apresentados os valores de módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos produzidos com Brita 1 e agregados reciclados tratados, bem como o tratamento estatístico produzido através da ANOVA e teste de Tukey.

**Tabela 37 - Módulo de elasticidade aos 28 dias**

Idade (dias)	Agregado	Módulo de Elasticidade (GPa)	Média (Mpa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
28 dias	Brita 1	55,84	54,35	3,17	5,83
		50,71			
		56,5			
	ARC	37,06	36,91	1,58	4,28
		35,25			
		38,41			
	C-100	37,21	35,05	2,07	5,91
		33,08			
		34,87			
	C-CCA-90-10	34,18	33,52	0,58	1,73
		33,28			
		33,11			
	C-CCA-70-30	36,05	36,36	1,67	4,59
		34,87			
38,17					
C-CCA-50-50	32,68	35,11	2,36	6,72	
	35,24				
	37,4				

Fonte: Autora (2023)

**Tabela 38 - Teste Tukey módulo de elasticidade aos 28 dias**

Comparação	p valor	Significativo	Confiança
B1 - ARC	<0,001	Sim	99,99%
B1 - C-100	<0,001	Sim	99,99%
B1 - C-CCA-90-10	<0,001	Sim	99,99%
B1 - C-CCA-70-30	<0,001	Sim	99,99%
B1 - C-CCA-50-50	<0,001	Não	-
ARC - C-100	0,872	Não	-
ARC - C-CCA-90-10	0,392	Não	-
ARC - C-CCA-70-30	0,999	Não	-
ARC - C-CCA-50-50	0,885	Não	-
C-100 - C-CCA-90-10	0,937	Não	-
C-100 - C-CCA-70-30	0,966	Não	-
C-100 - C-CCA-50-50	1,000	Não	-
C-CCA-90-10 - C-CCA-70-30	0,565	Não	-
C-CCA-90-10 - C-CCA-50-50	0,928	Não	-
C-CCA-70-30 - C-CCA-50-50	0,972	Não	-

Fonte: Autora (2023)

## APÊNDICE F

A seguir, nas Tabelas 36 e 37, são apresentados os valores de micro dureza Vickers de diferentes regiões dos concretos produzidos com Brita 1 e agregados reciclados tratados aos 91 dias, bem como o tratamento estatístico produzido através da ANOVA e teste de Tukey.

**Tabela 39 - Microdureza Vicker concretos aos 91 dias**

Material	Dureza (HV)	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Argamassa	51,95	52,07	1,15	2,21
	53,28			
	50,98			
Agregado natural	354,4	358,35	3,95	1,10
	362,3			
	358,35			
Agregado reciclado	25,01	25,56	2,07	8,10
	23,81			
	27,85			
ITZ Brita 1	63,30	60,06	3,18	5,29
	56,95			
	59,94			
ITZ ARC	36,53	37,12	0,59	1,59
	37,71			
	37,12			
ITZ C-100	30,15	32,19	1,78	5,53
	33,42			
	32,99			
ITZ C-CCA-90-10	54,66	55,3	7,01	12,68
	54,64			
	56,60			
ITZ C-CCA-70-30	45,23	44,73	2,19	4,10
	42,33			
	46,63			
ITZ C-CCA50-50	55,60	50,38	4,59	9,11
	47,00			
	48,54			

Fonte: Autora (2023)

**Tabela 40 - Teste Tukey microdureza Vickers aos 91 dias**

Comparação	p valor	Significativo	Confiança
Argamassa – Agregado natural	<0,001	Sim	99,99%
Argamassa – Agregado recicla	<0,001	Sim	99,99%
Agregado natural – Agregado reciclado	<0,001	Sim	99,99%
ITZ B1 – ITZ ARC	<0,001	Sim	99,99%
ITZ B1 – ITZ C-100	<0,001	Sim	99,99%
ITZ B1 – ITZ C-CCA-90-10	0,432	Não	
ITZ B1 – ITZ C-CCA-70-30	<0,001	Sim	99,99%
ITZ B1 – ITZ C-CCA-50-50	0,006	Sim	99%
ITZ ARC – ITZ C-100	0,389	Não	-
ITZ ARC – ITZ C-CCA-90-10	<0,001	Sim	99,99%
ITZ ARC – ITZ C-CCA-70-30	0,045	Sim	95%
ITZ ARC – ITZ C-CCA-50-50	<0,001	Sim	99,99%
ITZ C-100 – ITZ C-CCA-90-10	<0,001	Sim	99,99%

ITZ C-100 – ITZ C-CCA-70-30	<0,001	Sim	99,99%
ITZ C-100 – ITZ C-CCA-50-50	<0,001	Sim	99,99%
ITZ C-CCA-90-10 – ITZ C-CCA-70-30	0,003	Sim	99%
ITZ C-CCA-90-10 – ITZ C-CCA-50-50	0,392	Não	-
ITZ C-CCA-70-30 – ITZ C-CCA-50-50	0,238	Não	-

---

**Fonte: Autora (2023)**