

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Construção Civil

Edinéia Alves Benjamin

**AGLOMERANTE OBTIDO À BASE DE PASTAS DE CIMENTO TRATADAS
TERMOMECHANICAMENTE**

Belo Horizonte

2024

Edinéia Alves Benjamin

**AGLOMERANTE OBTIDO À BASE DE PASTAS DE CIMENTO TRATADAS
TERMOMECHANICAMENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Dayana Cristina Silva Garcia

Coorientadores: Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilar

Prof. Dr. Eduardo Chahud

Belo Horizonte

2024

B468a	<p>Benjamin, Edinéia Alves. Aglomerante obtido à base de pastas de cimento tratadas termomecanicamente [recurso eletrônico] / Edinéia Alves Benjamin. – 2024. 1 recurso online (90 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientadora: Dayana Cristina Silva Garcia. Coorientadores: Maria Teresa Paulino Aguilár, Eduardo Chahud.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 85-90.</p> <p>1. Construção civil – Teses. 2. Construção civil – Resíduos – Teses. 3. Resíduos sólidos – Reaproveitamento – Teses. 4. Cimento Portland – Tratamento térmico – Teses. I. Garcia, Dayana Cristina Silva. II. Aguilár, Maria Teresa Paulino. III. Chahud, Eduardo. IV. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. V. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 691(043)</p>
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE Mestrado em Construção Civil



ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DA ALUNA EDINÉIA ALVES BENJAMIN

Realizou-se, no dia 04 de junho de 2024 às 16:00 horas, via Plataforma online (Microsoft Teams), a defesa de dissertação intitulada AGLOMERANTE OBTIDO À BASE DE RESÍDUOS DE PASTAS DE CIMENTO TRATADOS, apresentada por EDINÉIA ALVES BENJAMIN, número de registro 2021659946, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Construção Civil na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, à seguinte Comissão Examinadora: Profª. Dayana Cristina Silva Garcia (Orientadora), Profª. Maria Teresa Paulino Aguilhar (Coorientadora), Prof. Eduardo Chahud (Coorientador), Prof. Fernando do Couto Rosa Almeida e Profª Edna Possan.

A Comissão considerou a dissertação:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão, no dia 04 de junho de 2024.

Dayana Cristina Silva Garcia:10303489600
Assinado de forma digital por Dayana Cristina Silva Garcia:10303489600
Data: 2024.06.24 18:10:16 -03'00'

Profª. Dayana Cristina Silva Garcia (Orientadora) – UFMG

gov.br
Documento assinado digitalmente
MARIA TERESA PAULINO AGUILHAR
Data: 05/06/2024 09:02:00 -0300
Verifique em: https://validar.ufmg.gov.br

Profª. Maria Teresa Paulino Aguilhar (Coorientadora) – UFMG

Eduardo
Chahud
Assinado de forma digital por Eduardo Chahud
Data: 2024.06.24 08:42:41 -03'00'

Prof. Eduardo Chahud (Coorientador) – UFMG

gov.br
Documento assinado digitalmente
FERNANDO DO COUTO ROSA ALMEIDA
Data: 05/06/2024 09:02:00 -0300
Verifique em: https://validar.ufmg.gov.br

Prof. Fernando do Couto Rosa Almeida – UFMG

gov.br
Documento assinado digitalmente
EDNA POSSAN
Data: 05/06/2024 07:28:27 -0300
Verifique em: https://validar.ufmg.gov.br

Profª. Edna Possan - Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA)

AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha vida e minha saúde.

À minha família por todo incentivo. A minha mãe Joventina por me fazer acreditar nos estudos sempre, ao meu pai Amadeu por toda sua dedicação para que eu chegasse até aqui, ao meu esposo Aguinaldo por todo companheirismo, cuidado e carinho e por sempre me ouvir, a minha filha Olivia por estar comigo em todos os momentos, minha razão de viver, a minha sogra Nilce e meu sogro Sebastião por nunca terem medido esforços para cuidar da minha filha para que eu pudesse trabalhar e estudar, ao meu irmão Edinaldo pelo incentivo.

À professora Dayana Cristina Silva Garcia, pela orientação, dedicação, profissionalismo e por todo ensinamento, muito obrigada.

À professora Maria Teresa Paulino Aguilar, obrigada por transmitir o conhecimento com tanto cuidado e amor, minha gratidão.

Ao professor Eduardo Chahud pelas colaborações e contribuições.

Ao professor Fernando do Couto Rosa Almeida e a professora Edna Possan pela participação e contribuição no trabalho.

A todos os colegas do laboratório de caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica, Adriano, Lucas, Abner, Silvia muito obrigada pelo incentivo, apoio e amizade.

Aos técnicos de laboratório que não mediram esforços em me ajudar Alberto, Ricardo, Dedé, Fernando, Léo muito obrigada por todo auxílio durante os experimentos.

Às minhas amigas do hospital Regional de Betim que sempre me incentivaram a não desistir mesmo em meio à pandemia de COVID- 19, agradeço todas as trocas de plantão e apoio, Ana Carolina César, Andrezza, Ana Grazielle, Juliana, Aguinéria, Danúbia, Diovana, Luciana, Fernanda e Vanessa.

A todos os meus colegas professores que me mostraram esse lindo caminho obrigada pelo incentivo em especial Nilvan, Camila e Érica.

Aos meus amigos de graduação que me incentivaram a fazer o mestrado Fernando e Rafael.

A todos os docentes e alunos de iniciação científica, pela dedicação e apoio nas atividades.

Ao DEMC/UFMG por todo apoio, suporte e atendimento.

À Universidade Federal de Minas Gerais, por apoiar e disponibilizar infraestrutura para a realização desse trabalho.

Aos laboratórios de Materiais de Construção Civil e Mecânica, Laboratório de Tratamento de Minérios, laboratórios de Difractometria de Raios X do Departamento de Engenharia de Minas, Laboratório de Extra Alta Tensão e Laboratório de Materiais Metálicos pelo apoio em toda parte experimental.

A todos aqueles que colaboraram de maneira direta ou indireta, para a realização e concretização desse trabalho.

Meu reconhecimento e agradecimentos!

“Sigamos sendo a concretização dos sonhos dos nossos ancestrais e nunca nos contentemos em sermos os primeiros; sejamos aqueles que abrem portas para que outros também acessem. Nossa vitória é coletiva. O estudo é instrumento de vitória coletiva para nós, e não uma mera emancipação pessoal.” (Pinheiro, 2023. P. 151)

RESUMO

Um dos grandes desafios da indústria da construção civil é reduzir as emissões de gases que provocam o efeito estufa e torná-la mais sustentável. A busca por inovações na produção do cimento e a utilização de materiais cimentícios suplementares (SMCs) são medidas que podem auxiliar no enfrentamento de mudanças climáticas. Trabalhos têm sido desenvolvido sobre os resíduos de construção de demolição (RCDs) e também com pasta de cimento endurecida. O objetivo do presente trabalho é obter um aglomerante alternativo obtido a partir de pastas confeccionadas com cimento Portland CPV, relação água/cimento de 0,5 e hidratadas por 28 dias em câmara úmida. Após a cura, esse material foi submetido a processos de britagem, moagem e tratamento térmico por 2 horas a 500°C, 600°C e 700°C, seguidos de resfriamento rápido e resfriamento lento, obtendo-se o aglomerante alternativo. Os aglomerantes foram caracterizados quanto à composição química, mineralógica e granulométrica e desempenho mecânico. Os resultados indicaram que o tratamento térmico a 700°C por 2 horas, seguido de resfriamento rápido, foi o que obteve o aglomerante com melhor desempenho. Esse aglomerante foi definido como cimento reciclado e foi o escolhido para avaliar as propriedades no estado fresco e endurecido de compostos cimentícios com cura saturada ou com cura em autoclave. Para isso, foram moldadas argamassas com traço 1:0,25:3 (aglomerante: areia moída: areia). O aglomerante foi formado por 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de substituição do cimento CPV pelo cimento reciclado. Como o cimento reciclado demanda mais água, foram utilizados dois fatores água/cimento, um de 0,5 para os teores de substituição mais baixos (0%, 25%, 50%) e outro com 0,7 para os teores de substituição mais altos (50%, 75% e 100%). As argamassas foram submetidas a ensaios de *flow table*, absorção por imersão e porosidade, análise morfológica, resistência à compressão, análise da microestrutura e resistividade elétrica. Os resultados apontaram bom desempenho nas argamassas com substituição de 50% de cimento reciclado (a/c 0,5) quando submetidas à cura saturada. A porosidade e absorção por imersão foram maiores para cura em autoclave, o que indica sua redução no desempenho mecânico para todas as condições estudadas. A resistividade elétrica foi reduzida ao se adicionar maiores teores de cimento reciclado nas argamassas. Os resultados apontam a possibilidade de reidratação do aglomerante alternativo utilizado no estudo e que a cura saturada se mostrou mais positiva que a cura em autoclave.

Palavras-chave: resíduos de construção e demolição; aglomerante alternativo; tratamento térmico; cura em autoclave; cimento reciclado.

ABSTRACT

One of the major challenges facing the construction industry is to reduce greenhouse gas emissions and make it more sustainable. The search for innovations in cement production and the use of supplementary cementitious materials (SCMs) are measures that can help address climate change. Studies have been carried out on construction and demolition waste (CDW) and also on hardened cement paste. The objective of this study is to obtain an alternative binder obtained from pastes made with Portland cement CPV, water/cement ratio of 0.5 and hydrated for 28 days in a humid chamber. After curing, this material was subjected to crushing, grinding and heat treatment processes for 2 hours at 500°C, 600°C and 700°C, followed by rapid cooling and slow cooling, obtaining the alternative binder. The binders were characterized according to their chemical, mineralogical and granulometric composition and mechanical performance. The results indicated that the heat treatment at 700°C for 2 hours, followed by rapid cooling, was the one that obtained the best performing binder. This binder was defined as recycled cement and was chosen to evaluate the properties in the fresh and hardened state of cementitious compounds with saturated cure or with autoclave cure. For this, mortars with a ratio of 1:0.25:3 (binder: ground sand: sand) were molded. The binder was formed by 0%, 25%, 50%, 75% and 100% replacement of CPV cement by recycled cement. Since recycled cement demands more water, two water/cement factors were used, one of 0.5 for the lowest substitution contents (0%, 25%, 50%) and another with 0.7 for the highest substitution contents (50%, 75% and 100%). The mortars were subjected to flow table tests, immersion absorption and porosity, morphological analysis, compressive strength, microstructure analysis and electrical resistivity. The results indicated good performance in the mortars with 50% replacement of recycled cement (w/c 0.5) when subjected to saturated curing. The porosity and immersion absorption were higher for autoclave curing, which indicates a reduction in mechanical performance for all conditions studied. Electrical resistivity was reduced when higher levels of recycled cement were added to the mortars. The results indicate the possibility of rehydration of the alternative binder used in the study and that saturated curing was more positive than autoclave curing.

Keywords: construction and demolition waste; alternative binder; heat treatment; autoclave curing; recycled cement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Diferentes fases de hidratação do cimento medidas por calorimetria isotérmica.....	24
Figura 3.2- TGA/DTG de um cimento Portland hidratado contendo 4% de peso em calcário.....	25
Figura 3.3- Perda de massa da pasta de Cimento Portland comum devido ao aquecimento a uma taxa de temperatura alvo.	26
Figura 3.4 - Taxa de fluxo de calor e calor acumulado ao longo do tempo pastas com PC, RC e NT e a/c 1,0.....	36
Figura 4.1 - Programa experimental.....	38
Figura 4.2 – Britadores de mandíbulas.....	42
Figura 4.3 - a) Material obtido na britagem primária; b) Material obtido na britagem secundária.	42
Figura 4.4 - a) Moinho de bolas horizontal; d) Carga utilizada no processo de moagem; c) Material obtido do processo de moagem.	42
Figura 4.5 – Esquema do tratamento térmico e resfriamento utilizado na pasta.....	43
Figura 4.6 - Forno com atmosfera controlada.	44
Figura 4.7 - Amostras aos 28 dias.	45
Figura 4.8 - Equipamento de autoclave para utilização no ensaio.	48
Figura 4.9- Sistema utilizado para o ensaio de resistividade elétrica.	53
Figura 5.1 – Curva de distribuição granulométrica da pasta inicial e do CPV.....	55
Figura 5.2 – Difratoograma do cimento CPV.....	56
Figura 5.3 - Difratoograma da pasta inicial relação a/c 0,5.....	56
Figura 5.4 - Curva correspondente a TGA, DrTGA e DTA da pasta inicial.	57
Figura 5.5- Material antes de levar ao forno (a) e material após ser submetido a tratamento térmico de.....	59
Figura 5.6 - DRX da pasta de cimento submetida a tratamento térmico de 500° C, 600°C e 700°C e submetida a resfriamento lento (RL) e resfriamento rápido.	60
Figura 5.7 – Resistência média à compressão aos 28 dias de argamassas produzidas com cimento tratado termicamente à diferentes temperaturas.....	62
Figura 5.8- Curva de distribuição granulométrica do CPV e do cimento reciclado.....	64
Figura 5.9 - Difratoograma do pó CPV e do pó de cimento reciclado.....	65
Figura 5.10- Curva correspondente a TG e DTG do cimento reciclado.....	66
Figura 5.11 – Microestrutura do grão de cimento Portland CPV-ARI (a) e (b) e microestrutura do grão de cimento reciclado submetido à tratamento térmico de 700°C (c) e (d).....	67
Figura 5.12 - Resultados dos ensaios obtidos por absorção de água por imersão das argamassas confeccionadas com CPV-ARI e cimento reciclado.....	69
Figura 5.13- Resultados obtidos do ensaio de porosidade das argamassas confeccionadas com CPV-ARI e cimento reciclado.	70
Figura 5.14 – Resistência média à compressão das argamassas aos 7 e 28 dias com a/c 0,5(a) e a/c 0,7(b).	71
Figura 5.15 – Difração da pasta confeccionada com CPV, com 25% de cimento reciclado e com 50% de cimento reciclado e relação água/cimento de 0,5.....	74
Figura 5.16 – Difração da pasta confeccionada com 50% de cimento reciclado, 75% de cimento reciclado e 100% de cimento reciclado com relação água/cimento de 0,7.....	74
Figura 5.17 – Difração da pasta confeccionada com CPV, 25 % de cimento reciclado, 50%de cimento reciclado e com relação a/c de 0,5.	75

Figura 5.18 – Difração da pasta confeccionada com 50% de cimento reciclado, 75% de cimento reciclado e 100% de cimento reciclado, com relação a/c de 0,5.....	76
Figura 5.19 – Microestruturas de argamassa de cimento CPV-ARI (a), argamassa com 25% de cimento reciclado (b), argamassa com 50% de cimento reciclado (c), argamassa com 50% de cimento reciclado (d), argamassa com 75% de cimento reciclado (e) e argamassa com 100% de cimento reciclado(f).....	77
Figura 5.20 - Microestruturas de argamassa com cura em autoclave produzida CPV-ARI (a) com 25% de cimento reciclado(b), 50%de cimento reciclado (c), 50% de cimento reciclado (d), 75% de cimento reciclado (e) e 100% de cimento reciclado (f).	79
Figura 5.21 – Resistividade elétrica volumétrica relativa aos 28 dias.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Principais compostos do Cimento Portland.....	19
Tabela 3.2 - Reações de decomposição que ocorrem na pasta cimentícia submetidas a diferentes temperaturas.	25
Tabela 4.1 - Composição química do cimento CPV-ARI em (%).....	39
Tabela 4.2 - Caracterização física do cimento CPV-ARI.....	39
Tabela 4.3 - Resultados de requisitos físicos e químicos ABNT NBR 7214:2015 da areia normal brasileira	40
Tabela 4.4 – Granulometria da areia normal brasileira.....	40
Tabela 4.5 - Nomenclatura dos aglomerantes utilizados	46
Tabela 4.6 - Composição dos traços utilizados na mistura.....	47
Tabela 4.7 – Quantidade de corpos de prova produzidos	48
Tabela 5.1 - Composição química do CPV-ARI e da pasta inicial.....	54
Tabela 5.2 - Dados granulométricos percentuais do Cimento CPV-ARI e da pasta inicial.	55
Tabela 5.3 – Dados termogravimétricos da pasta inicial	58
Tabela 5.4 - Perda de massas das amostras submetidas a diferentes temperaturas	58
Tabela 5.5 - Composição química do cimento reciclado, CPV e da pastas a ser desidratada	63
Tabela 5.6 - Dados granulométricos percentuais.....	64
Tabela 5.7 – Dados termogravimétricos Cimento reciclado (tratado termicamente à 700° C) e um comparativo com a pasta inicial.....	66
Tabela 5.8 – Índice de consistência das argamassas produzidas com CPV-ARI e cimento reciclado	68
Tabela 5.9 – Valores médios de resistência à compressão	71
Tabela 5.10 - Valores médios de resistência à compressão	71

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

a/c – Relação água/ cimento

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CH – Hidróxido de cálcio

COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais

CP V - ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

DEMC – Departamento de Engenharia de Materiais e Construção

DEMIN – Departamento de Engenharia de Minas

DRX – Difração de raios - X

DTA – Análise Térmica Diferencial

DTG – Termogravimetria derivada

LTM – Laboratório de Tratamento de Minérios

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma Brasileira Registrada

NM – Norma Mercosul

RCC – Resíduos de Construção Civil

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

TGA – Análise termogravimétrica

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

LISTA DE SÍMBOLOS

Å – Angstrom

cm – centímetro

cm² – centímetro quadrado

cm³ - centímetro cúbico

C-S-H - Silicato de Cálcio Hidratado

C₃A - Aluminato tricálcico

C₂S - Silicato bicálcico

C₃S - Silicato tricálcico

C₄AF - Ferroaluminato tetracálcico

g - grama

g/cm² - grama por centímetro quadrado

g/cm³ - grama por centímetro cúbico

min - minuto

mm - milímetro

MPa - megaPascal

µm - micrômetro

N - Newton

s - segundo

° C - graus Celsius

° C/min - graus Celsius por minuto

α - alfa

β - beta

γ - gama

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	Cimento Portland	19
3.1.1	Composição Química do Cimento Portland	19
3.1.2	Hidratação do cimento Portland	21
3.2	Técnicas de caracterização de materiais cimentícios	23
3.2.1	Análise térmica	23
3.2.2	Análise termogravimétrica	24
3.2.3	Análises químicas	26
3.3	Resíduos de construção e demolição	27
3.3.1	Considerações gerais	27
3.3.2	Reaproveitamento dos resíduos de construção	28
3.3.3	Agregados reciclados	28
3.4	Cimento reciclado	30
4	MATERIAS E MÉTODOS	38
4.1	Materiais	39
4.2	Métodos	41
4.2.1	Obtenção do aglomerante	41
4.2.2	Escolha da temperatura alvo	44
4.2.3	Confecção das argamassas com o aglomerante alternativo escolhido	45
4.2.4	Métodos empregados na caracterização	49
5	RESULTADOS	54
5.1	Caracterização da pasta inicial	54
5.1.1	Análise química	54
5.1.2	Análise granulométrica	54

5.1.3	Análise fases presentes por difração de raios-X.....	55
5.1.4	Termogravimetria	56
5.2	Avaliação das condições de tratamento térmico das pastas.....	58
5.2.1	Perda de massa.....	58
5.2.2	Análise das fases cristalinas por difração de raios - X	59
5.2.3	Resistência à compressão.....	61
5.3	Caracterização do cimento reciclado	63
5.3.1	Análise química	63
5.3.2	Análise granulométrica	64
5.3.3	Análise de fases presentes por difração de raios – X (DRX).....	65
5.3.4	Termogravimetria	66
5.3.5	Morfologia	67
5.4	Caracterização das argamassas	68
5.4.1	Flow Table	68
5.4.2	Absorção por imersão e porosidade.....	69
5.4.3	Resistência à compressão.....	71
5.4.4	Análise das fases presentes nas pastas submetidas a cura saturada e cura em autoclave.....	73
5.4.5	Análise da microscopia eletrônica de varredura	76
5.4.6	Resistividade elétrica volumétrica	79
6	CONCLUSÕES.....	81
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um insumo essencial no setor da construção civil, sendo um elemento fundamental para a produção de concretos e argamassas. Contudo, durante seu processo produtivo ocorre liberação de CO₂, e em uma escala global a indústria do cimento é responsável por aproximadamente 7% de dióxido de carbono produzido pela humanidade (SNI, 2019). A crescente urbanização e a modernização de infraestruturas que ocorrem mundialmente acarretam uma maior demanda por concreto. Logo, é fundamental reduzir o impacto ambiental vinculado à produção do concreto no contexto do desenvolvimento sustentável. (AKHTAR; SARMAH, 2018). Por outro lado, em todo o planeta é crescente a produção de resíduos provenientes tanto de construção quanto de demolição (DUAN *et al.*, 2019). A reciclagem desses resíduos é uma contribuição positiva para a sustentabilidade pois pode minimizar os impactos ambientais uma vez que a maior parte dos resíduos de concreto é enterrada como lixo (WANG; MU; LIU, 2018).

A reutilização de resíduos de construção e demolição (RCDs) pode reduzir de maneira expressiva o uso de recursos naturais e contribuir para a redução da emissão de gases de efeito estufa (PAZ *et al.*, 2023). Estudos indicam que a substituição parcial do cimento Portland por pó misto reciclado (RMP) originado de resíduos de construção e demolição pode melhorar o desempenho mecânico de pastas. Essa estratégia seria eficaz para viabilizar uma economia circular e apresenta-se como uma alternativa sustentável na construção civil (OLIVEIRA *et al.*, 2024). Uma solução abrangente para lidar tanto com os (RCDs) quanto com os desafios enfrentados na produção de cimento seria a reutilização de argamassas proveniente dos (RCDs). Estudos apontam que a desidratação de pastas em temperaturas elevadas gera o chamado cimento reciclado (RC) HE *et al.* (2019). Outras pesquisas demonstraram que o (RC) obtido a partir de resíduos apresentou propriedades físicas semelhantes ao obtido do cimento Portland reduzindo a emissão de CO₂ e o consumo de energia (WANG; MU; LIU, 2018). Nessas perspectivas, um método ideal foi proposto com objetivo de aperfeiçoar a produção do (RC), onde é recomendada uma temperatura de ativação térmica ótima na faixa de 650°C a 750°C, com uma taxa de aquecimento de 10° C por minuto e um tempo de permanência de 2 horas, a adição de componente mineral como ganga de carvão e escória de alto-forno pode melhorar o desempenho. Sugere-se um resfriamento rápido e naturalmente, a dimensão máxima ideal as partículas do (RC) é que sejam semelhantes à do cimento Portland, a utilização de agentes redutores de água e retardadores de pega contribuem para os efeitos da demanda de

água promovendo significativamente a redução do impacto ambiental (XU *et al.*, 2022). Também existem pesquisas que indicam que areia presente no RCD poderia ser utilizada como um material cimentício suplementar, pozolana, quando ativada mecanicamente, atingindo granulometria em torno de 5 μm (BENEZET e BENHASSAINE 1999; MENEZES *et al.*, 2018) . Há trabalhos na literatura que apontam a possibilidade de estimular a reatividade do pó de quartzo na granulometria do cimento por meio de cura em ambientes hidrotérmicos (LUKE, 2004; GARCIA *et al.*, 2018)

Neste contexto, este estudo de caráter exploratório tem como objetivo obter e avaliar um aglomerante alternativo por meio de processamento térmico e mecânico, utilizando pastas de cimento Portland CPV-ARI e areia ativada mecanicamente. Tais procedimentos permitiriam a desidratação do cimento e a ativação areia, que funcionaria com um material cimentício suplementar, gerando assim um cimento reciclado de baixo impacto ambiental. Acredita-se, que, assim, se teria melhor compressão dos mecanismos envolvidos no aproveitamento de resíduos de argamassas pela eliminação de interferências inerentes ao estudo envolvendo resíduos.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é a obtenção de um aglomerante alternativo produzido pelo tratamento termomecânico de pastas de cimento.

Para isso os objetivos específicos deverão ser alcançados:

- Identificar as condições adequadas de tratamento térmico;
- Avaliar as propriedades no estado fresco e endurecido de compostos cimentícios produzidos com aglomerante alternativo;
- Estudar a influência da cura em autoclave no comportamento de compostos cimentícios produzidos com aglomerante alternativo;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Serão abordados a seguir a fundamentação teórica que serviu como base para as discussões do presente trabalho. O enfoque será dado ao cimento Portland, resíduos de construção e demolição e cimento reciclado.

3.1 Cimento Portland

O cimento Portland aglomerante fino em pó que, na presença de umidade, tem a capacidade de endurecer e adquirir resistência mecânica. Esse material é produzido a partir de matérias-primas, principalmente calcário e argila, em proporções pré-definidas (METHA E MONTEIRO,2014). Em seguida, ocorre a calcinação em fornos rotativos a uma temperatura de cerca de 1450°. O produto resultante desse processo é conhecido como clínquer. Após o resfriamento do clínquer, adiciona-se sulfato de cálcio, também conhecido como gesso, para controle do tempo de pega. Além disso, outros componentes como cinzas volantes, escórias granuladas de alto forno e filer calcário, também podem ser acrescentados (NEVILLE, 2016; VISEDO & PECCHIO, 2019).

3.1.1 Composição Química do Cimento Portland

A composição química básica do cimento Portland é fundamentalmente constituída por compostos de cálcio e silício. A química do cimento é diferente da química convencional, sendo os seus compostos expressos na forma de óxidos e com abreviação própria. Na Tabela 3.1 são apresentados os principais compostos do cimento Portland (NEVILLE, 2016).

Tabela 3.1 - Principais compostos do Cimento Portland

Nome do Composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminatotetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Fonte: Adaptado Neville, 2016.

O silicato tricálcico (C₃S) e o beta-silicato dicálcico (β-C₂S) são encontrados no cimento Portland Comum com reduzidas quantidades de íons magnésio, alumínio, ferro, potássio, sódio e enxofre. O C₃S como forma impura é conhecido como alita e representa cerca de

50% a 70% de constituição do cimento Portland. Este elemento reage rapidamente com a água e é o principal responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica em idades iniciais. O C_3S geralmente é formado por grãos pequenos, incolores e equidimensionais e em temperaturas abaixo de 1250° ocorre uma decomposição lenta, caso essa redução de temperatura não ocorra de maneira muito lenta em temperatura ambiente ele é relativamente estável (METHA E MONTEIRO, 2014; TAYLOR, 1997; NEVILLE, 2016).

O silicato dicálcico (C_2S), como forma impura a belita, representa em torno de 15-30% do clínquer do cimento Portland. Este composto apresenta reação mais lenta com a água do que o C_3S , contribuindo com o desenvolvimento da resistência mecânica em idades mais avançadas. O C_2S pode apresentar nas seguintes formas α - C_2S encontrado sob altas temperaturas e possui grãos arredondados, converte-se para β - C_2S em temperaturas próximas a $1450^\circ C$ e se transforma em γ - C_2S em temperaturas próximas a $670^\circ C$. (TAYLOR, 1997; NEVILLE, 2016 SCRIVENER, K. L.; NONAT, 2011a).

O Aluminato tricálcico (C_3A), como forma impura conhecida como celita, representa cerca de 5-10% do volume de clínquer, tendo formas de cristais retangulares e em fases vítreas congeladas apresentando-se fase intersticial amorfa. Note que, o C_3A e o C_3S são conhecidas como as fases mais reativas do cimento Portland (TAYLOR, 1997; NEVILLE, 2016).

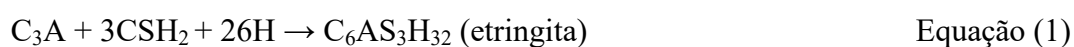
O ferroaluminato de cálcio (C_4AF), como fase impura a ferrita, constitui cerca de 5-15% do volume de clínquer sua contribuição na reação com a água é variável sendo mais reativa inicialmente e mais baixa com o decorrer do tempo. Tanto o C_3A quanto o C_4AF possuem quantidades significativas de magnésio, sódio, potássio e sílica em sua estrutura cristalina (NEVILLE, 2016; METHA E MONTEIRO, 2014).

Além dos elementos principais, são encontrados compostos secundários como MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O e Na_2O , constituindo uma pequena parcela da massa do cimento. Contudo, os óxidos de sódio e potássio (Na_2O e K_2O) os alcális, foi observado que os mesmo reagem com alguns agregados do cimento produzindo uma desagregação do material e que eles podem afetar no ganho de resistência desses materiais (NEVILLE, 2016).

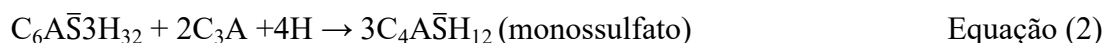
3.1.2 Hidratação do cimento Portland

A hidratação do cimento é um processo químico que acontece quando o cimento Portland é misturado com água. A partir dessas reações químicas, os compostos anidros são transformados em hidratos correspondentes. (NEVILLE, 2016). Os elementos primordiais provenientes da hidratação dos silicatos de cálcio são o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o hidróxido de cálcio (CH) (Neville e Brooks, 2013). E esse processo acontece por dois mecanismos distintos. No primeiro, ocorre a dissolução de fases anidras, a formação de hidratos em solução e posteriormente a precipitação de hidratos resultantes da solução supersaturada (SCRIVENER, K. *et al.*, 2019). O segundo mecanismo são as reações que ocorrem na superfície do cimento anidro e os compostos não entram na solução, denominada como hidratação do estado sólido ou topoquímico do cimento. Sendo que, a forma, o tamanho e a estrutura cristalina das partículas do cimento Portland irão afetar sua reatividade (METHA e MONTEIRO, 2014). Os elementos primordiais provenientes da hidratação dos silicatos de cálcio são o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o hidróxido de cálcio (CH) (Neville e Brooks, 2013).

A partir do momento que o C_3A entra em contato com a água sua reação ocorre rapidamente, formando hidratos cristalinos como C_3AH_6 , C_4AH_9 e C_2AH_8 e no decorrer desse processo é liberada uma grande quantidade de calor de hidratação. Como a reatividade do C_3A é muito rápida, é adicionado gipsita com a finalidade de postergar a reação e o tempo de pega, sendo o produto da hidratação do cimento Portland acrescido ao sulfato de cálcio, a etringita (AFt) (METHA E MONTEIRO, 2014; SCRIVENER; NONAT, 2011). A formação desse primeiro composto hidratado está apresentada na Equação 1. A etringita se cristaliza na forma de agulhas em torno do C_3A , devido sua elevada reação do sulfato/aluminato no início do processo de hidratação (METHA e MONTEIRO, 2014).



As reações continuam ocorrendo, em um fluxo constante de calor, entretanto com uma velocidade reduzida. Desse modo, o gesso é completamente consumido. A etringita tende a ser converter em monossulfato de cálcio hidratado (Equação 2). O monossulfato se apresenta no formato de uma placa hexagonal delgada (METHA e MONTEIRO, 2014).



O processo de hidratação que ocorre no C_3S e no β - C_2S no cimento Portland gera silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), com diferentes morfologias e com relações distintas de cálcio/sílica e na proporção de água quimicamente combinada. Os silicatos de cálcio hidratados formados nas pastas de cimento Portland é um material pouco cristalino, com características típicas de um gel rígido conhecido também como tobermorita. Sua composição química está relacionada com a relação a/c, temperatura e a idade de hidratação. As respectivas reações do C_3S (Equação 3) e do C_2S (Equação 4) são apresentadas a seguir (METHA e MONTEIRO, 2014).



Na hidratação do C_3S , aproximadamente 61% dos produtos resultam em C-S-H e 39% em hidróxido de cálcio. Assim, cimentos com alto C_3S tem menor resistência final que os com alto C_2S . Além disso, os cimentos com mais C_2S são mais duráveis em ambientes ácidos e com sulfatos. O hidróxido de cálcio, também conhecido como portlandita, desempenha um papel fundamental na regulação do pH alcalino das pastas de cimento. Representando cerca de 20% a 25% do volume total da pasta hidratada. Em contraste, com o C-S-H, ele se apresenta na forma de grãos grande e cristalinos (METHA e MONTEIRO, 2014).

Com o objetivo de melhorar o entendimento acerca dos processos de hidratação do cimento Portland, (SCRIVENER, 1989) apresenta a evolução da hidratação da microestrutura da pasta de cimento em seis etapas.

- etapa I: grão de cimento anidro;
- etapa II: 10 min: formação de etringita em pequenos bastonetes;
- etapa III: 10 h: formação de C-S-H externo, formando um envoltório no grão anidro;
- etapa IV: 18 h hidratação secundária da etringita, formando longos bastonetes;
- etapa V: 1 a 3 dias formação de monossulfato internamente;

- etapa VI: 14 dias: preenchimento do espaço de 1 μm entre o envoltório e o grão anidro pela formação de C-S-H oriundo da hidratação externa.

De acordo com Neville (2013), a quantidade de calor liberada em (joules ou calorias) por grama de cimento anidro até a hidratação completa a uma dada temperatura é definida como calor de hidratação. A quantidade total de calor liberada e as taxas de calor de hidratação de compostos individuais podem ser usadas como índice de sua reatividade e podem ser usadas para caracterizar os comportamentos de pega e enrijecimento e aumento de temperatura em pastas de cimento, argamassa e concreto.

3.2 Técnicas de caracterização de materiais cimentícios

3.2.1 *Análise térmica*

O calor liberado de um cimento em um determinado momento está relacionado ao quanto de cimento reagiu em certo período. Assim que ocorre um aumento dessa temperatura tanto a dissolução da parte anidra do cimento quanto à precipitação dos seus compostos hidratados ocorre de forma mais rápida e a mesma pode ser observada pela calorimetria que é um método muito utilizado para estudar a hidratação do cimento e da taxa de produção do calor (SCRIVENER, K.; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2018).

A calorimetria isotérmica permite o estudo por um período maior, sendo uma técnica abrangente e que possui grande relevância para os processos físicos, químicos e biológicos em que ocorre a liberação de calor. Com isso, ela também pode ser utilizada no estudo do cimento em longo prazo, permitindo assim analisar baixas taxas no processo de hidratação (LINDEROTH; WADSÖ; JANSEN, 2021).

A Figura 3.1 mostra as diferentes fases de hidratação do cimento a partir de uma medição por calorimetria isotérmica. São expostas quatro fases sendo elas (A) o período inicial de hidratação do cimento, em (B) o período de indução, em (C) o período de aceleração em (D) o período de desaceleração. O pico E representa a depleção do sulfato e está relacionada ao processo inicial da hidratação do aluminato secundário (SCRIVENER, K.; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2018).

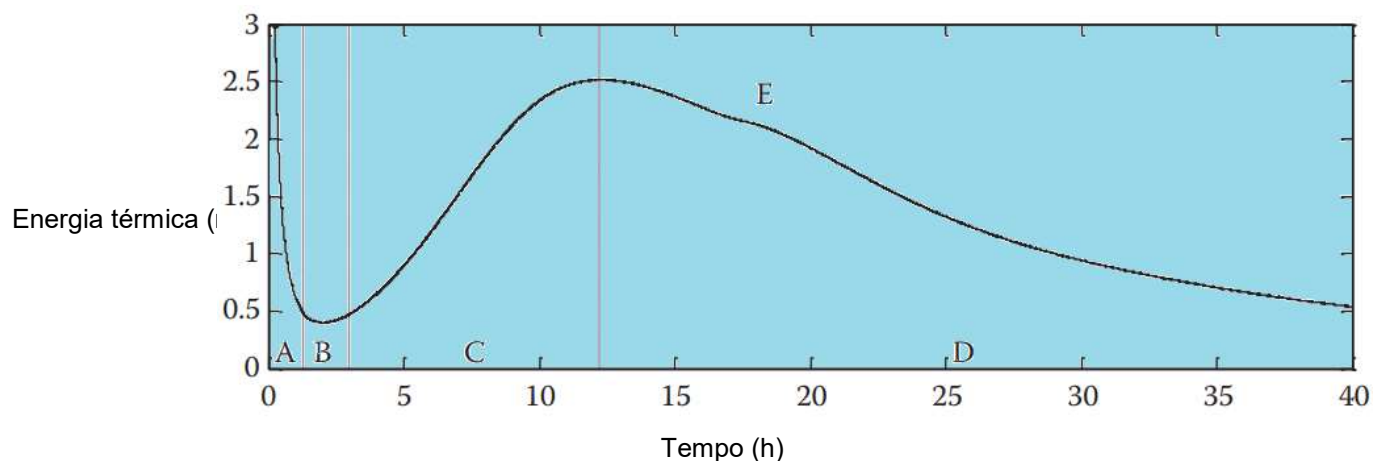


Figura 3.1- Diferentes fases de hidratação do cimento medidas por calorimetria isotérmica.

Fonte: Adaptado, SCRIVENER, K.; SNELLINGS; LOTHENBACH, (2018).

3.2.2 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TGA) é amplamente utilizada no campo da ciência do cimento. As medições de água ligada e conteúdo de portlandita por TGA são frequentemente usadas para acompanhar a reação do cimento Portland ou avaliar a reatividade dos (SCMs). A TGA é capaz de identificar hidratos amorfos de raios - X, como C-S-H e pode ser usado de forma complementar a outras técnicas, como difração de raios - X (DRX). A diferenciação dos dados termogravimétricos (TG) permite uma melhor resolução e identificação de perdas de peso consecutivas: termogravimetria derivada ou termogravimetria diferencial (DTG) (SCRIVENER, K.; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2018).

A análise termogravimétrica (TG) possibilita a mensuração de componentes (como por exemplo, o hidrato de silicato de cálcio (C-S-H), uma vez que cada fase cimentícia possui uma faixa de temperatura específica em sua decomposição térmica (SONG *et al.*, 2018). A Tabela 3.2 engloba informações das respectivas reações de decomposição de uma pasta cimentícia quando ela é sujeita a altas temperaturas (ALARCON-RUIZ *et al.*, 2005).

Tabela 3.2 - Reações de decomposição que ocorrem na pasta cimentícia submetidas a diferentes temperaturas.

Faixa de temperatura	Eventos térmicos
30° - 105°	Ocorre a liberação da água evaporável e uma parte da água quimicamente ligada.
110°C - 170°C	Acontece a decomposição da gipsita, da etringita e perda de água de parte dos hidratos de carboaluminato.
180°C – 300°C	Ocorre a perda de água ligada devido à decomposição do CSH e dos hidratos de carboaluminato.
450°C – 550°C	Desidroxilação da portlandita (hidróxido de cálcio).
700°C – 900°C	Descarbonatação do carbonato de cálcio.

Fonte: Adaptado,(ALARCON-RUIZ *et al.*, 2005).

Os resultados obtidos da análise térmica são influenciados pela arquitetura do dispositivo de medição, o tipo de recipiente utilizado, a taxa de aquecimento, a quantidade de sólido o tamanho da partícula, a taxa de fluxo utilizada, o preparo da amostra (SCRIVENER, K.; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2018).

Curvas termogravimétricas e de termogravimetria derivada (DTG) presentes na Figura 3.2 demonstram perdas de massa de um cimento que possui filer calcário em diferentes tempos de hidratação. A hidratação superficial do cimento anidro quando ele ainda se encontra armazenado em estoque, justificando portanto sinais relacionados a cimento anidros (GONÇALVES, 2021).

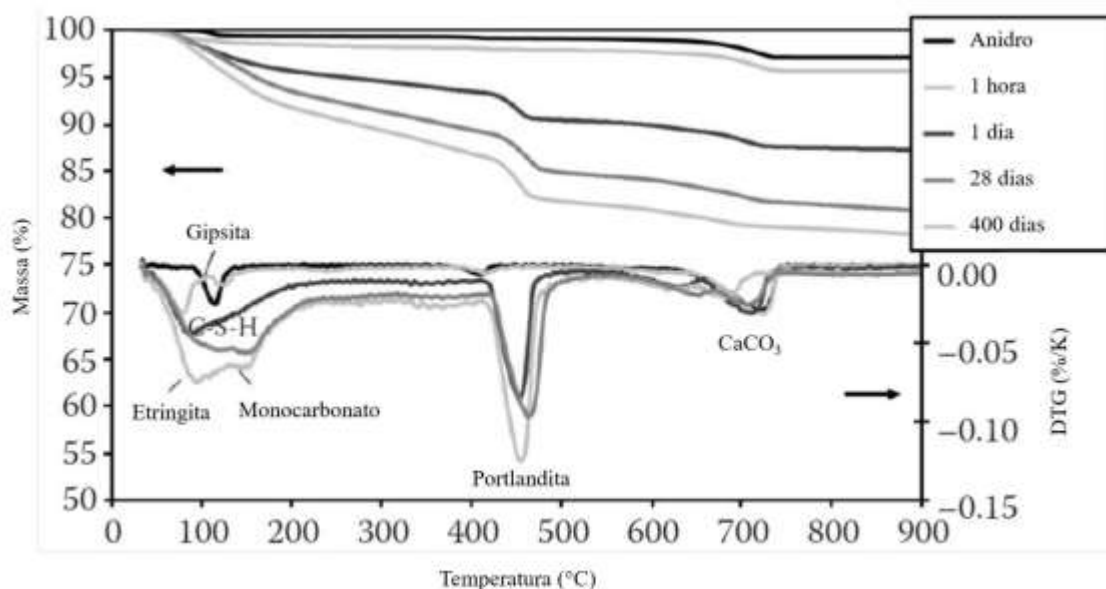


Figura 3.2- TGA/DTG de um cimento Portland hidratado contendo 4% de peso em calcário.

Fonte: Adaptado, SCRIVENER, K.; SNELLINGS; LOTHENBACH, (2018).

SUH *et al.*, (2020) observaram a perda de massa gradual após o aquecimento a 200°C, 500°C e 800°C de pastas de cimento e foi observado uma variação de 16,78% à 25,71% conforme Figura 3.3.

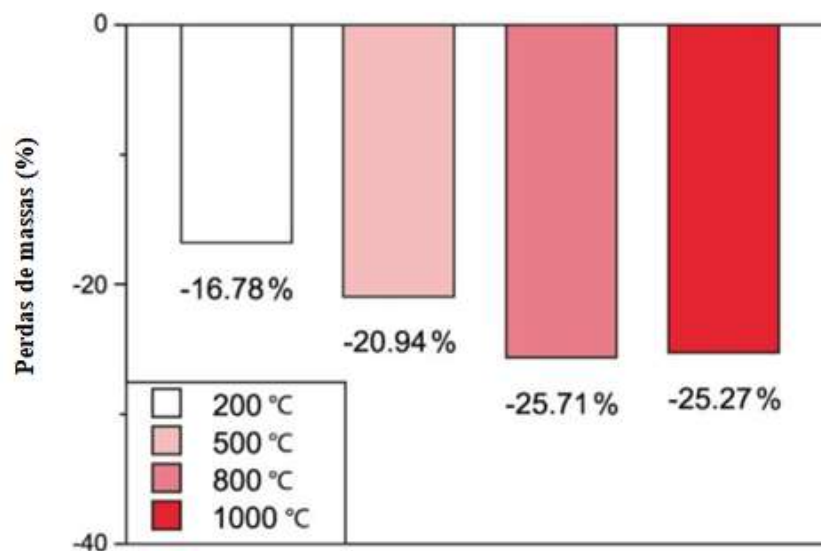


Figura 3.3- Perda de massa da pasta de Cimento Portland comum devido ao aquecimento a uma taxa de temperatura alvo.

Fonte: Adaptado, (SUH *et al.*, 2020).

3.2.3 Análises químicas

A análise química dos cimentos Portland resulta nas proporções dos óxidos presentes no material e suas propriedades estão diretamente relacionadas com as proporções de silicatos e aluminatos podendo ser analisadas a partir do resultado em análise de óxidos e essa operação determina a composição potencial do cimento. O cálculo normalmente utilizado é chamado método de Bogue, esse cálculo parte da proporção total de cal, eventualmente encontrada, a seguir é determinado às proporções de cal necessárias para a formação do ferroaluminato de cálcio, do aluminato tricálcico e de silicato bicálcico. O saldo na proporção original de óxido de cálcio é então associado à proporção de silicato bicálcico já calculada, resultando portanto na proporção atual do silicato tricálcico. A sobra de silicato bicálcico constitui o teor do composto do cimento (BAUER, 2000).

3.3 Resíduos de construção e demolição

3.3.1 Considerações gerais

Nas mais diversas partes do mundo, em especial as cidades em desenvolvimento em decorrência do aumento populacional e consequente aumento na demanda por moradias, nota-se um aumento das construções para suprir carência do setor. Um desafio em todos os países é como lidar com a crescente geração de resíduos de construção e demolição. Assim torna-se necessária a adoção de medidas que visem melhorar no gerenciamento, delinear a estruturação das cidades por um período maior com estudos que repensem a estruturação das cidades prevenindo seu aumento em grandes proporções, principalmente quanto se diz respeito a grandes demolições (DUAN *et al.*, 2019).

Devido ao aumento das construções torna-se inevitável uma maior produção de concreto e consequentemente uma maior geração de resíduos e nesse processo tem-se um aumento dos principais emissores de gases poluentes para a atmosfera o CO₂ (ASLAM; HUANG; CUI, 2020).

Com o objetivo de reduzir a geração de resíduos de construção e demolição, os países nos mais diversos continentes têm buscado por meio de legislações reduzirem os impactos ambientais severos e buscar maior conscientização. A inconsistência referente ao gerenciamento de resíduos pode gerar riscos que pode gerar em desastres. Com a produção maior de resíduos torna-se necessário a supressão vegetal de grandes áreas para destinar a construção de aterros, modificando a paisagem natural presente (AKHTAR; SARMAH, 2018).

No Brasil, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) pela lei 12.305 de 02 de agosto de 2010, definindo seus princípios, objetivos, instrumentos e as diretrizes relacionadas ao gerenciamento dos resíduos sólidos, a responsabilidade de seus geradores e os devidos instrumentos econômicos aplicáveis (BRASIL, 2010).

A Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº307/2002 também estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil (RCC) tendo como objetivo de proporcionar benefícios de ordem social, econômica e

ambiental, definindo-os como aqueles oriundos de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, resultantes de preparação e escavação de terrenos. Ela não propõe a separação dos diversos tipos de materiais passíveis de serem reciclados como agregados, a normativa classifica como “Tipo A” os resíduos passíveis de serem utilizados como agregados de concreto e solos.

Com o objetivo de reduzir os impactos gerados pela produção de concreto e com o intuito de torná-lo mais sustentável, o emprego de agregados reciclados visando a substituição por agregados naturais e o uso de adições minerais como substituição parcial ao cimento são possibilidades que podem tornar o concreto um material menos poluente (GOMES; SPITALE; POGGIALI, 2019).

3.3.2 Reaproveitamento dos resíduos de construção

As diferenças entre os resíduos de construção civil e os materiais de origem natural, são entraves encontrados para uma utilização de seu uso sistemático. Com isso cada vez mais problemas associados a sua correta disposição e a extração contínua desses recursos descrevem os longos desafios a serem enfrentados para a resolução desse problema. A heterogeneidade desses materiais está relacionada na dificuldade em separar os diversos constituintes dos resíduos (SALLES, 2021).

3.3.3 Agregados reciclados

Costa e Ribeiro, (2020) propuseram reaproveitar os resíduos de construção e demolição (RCC) como matéria-prima alternativa na produção de clínquer Portland, para isso utilizaram substituição parcial calcário-argila por resíduos de construção civil. Os resultados apresentados mostraram que essa substituição proporcionou a redução de até 8,1% nas emissões de CO₂ das matérias na produção de clínquer, uma vez que os (RCC) atuam com fonte alternativa de cálcio, substituindo parcialmente o calcário, sem afetar negativamente a formação das principais fases do cimento.

Devido as diferentes características apresentadas pelos agregados miúdos reciclados, Correa, Pereira e Rêgo, (2020) propuseram um estudo das frações granulométricas de duas areias recicladas sendo uma areia obtida de resíduo de construção e demolição (AR1) e

areia de resíduo de concreto (AR2), foram realizados ensaios de determinação de massa unitária, da absorção de água, massa específica e análises químicas foram realizadas utilizando fluorescência de raios X. As argamassas foram confeccionadas com substituições de 25% e 100% da fração de agregado natural e a argamassa com areia natural utilizada como referência. As análises demonstraram que as areias recicladas são compostas em dois grupos: de “frações grossas” e “frações finas”, a pasta de cimento irá variar conforme a fração granulométrica e a origem da areia, em substituições utilizadas com 25% às resistências à compressão mostraram que a fração fina e a fração média-fina não causaram alterações físico-mecânicos às argamassas, se comportando de maneira similar à argamassa de referência.

Salles, *et al.*(2021) analisaram a necessidade de separação dos resíduos de construção de cerâmicas de argilas e cimentício com agregados mistos, como substituição de agregados naturais graúdos em concretos estruturais. Os resultados apresentados indicaram que não haveria necessidade de realizar segregação do resíduo utilizado, pois o desempenho similar entre os agregados utilizados, porém os parâmetros reológicos foram afetados pela adição de resíduos. No entanto, a durabilidade pode ser melhorada com a utilização de agregados reciclados.

Kruger, *et al.* (2021) realizaram uma investigação com o objetivo de avaliar o quanto a distribuição granulométrica de agregados miúdos provenientes de britagem de pedra natural e resíduos de construção e demolição (RCD) influência nas propriedades físicas e mecânicas de argamassas confeccionadas com cimento Portland. Para isso, foram confeccionadas argamassas de cimento Portland com agregados miúdos de três composições granulométricas distintas, em cada curva granulométrica obtida foram estudados os dois tipos de agregados mencionados acima, mas não houve mistura de agregado de pedra natural britada e resíduos de construção e demolição, o cimento utilizado foi o cimento Portland CII-F 32. No estado fresco foram realizados ensaios de consistência e gravidade específica. Já no estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, absorção por imersão, índice de vazios e variação dimensional. Os resultados obtidos foram comparados com os obtidos com argamassas confeccionadas com agregado convencional e foi observado que houve influência nas propriedades da argamassa devido à composição mineralógica dos agregados, as argamassas produzidas com agregados de construção e demolição apresentaram

comportamentos diferentes devido ao tamanho e distribuição das partículas e que abaixo de uma zona ótima inferior à ($FM < 2,20$) seu desempenho mecânico e físico foram reduzidos, com isso sua utilização não deve ser a mesma utilizada em padrões com agregados convencionais.

Cardoso, *et al.* (2021) realizaram uma investigação sobre a influência da substituição de agregados graúdos naturais (Agn) por agregados reciclados de concreto na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado sem e com armadura de cisalhamento. Foram ensaiadas 6 vigas de 2.200 mm e seção (180mm de largura e 280mm de altura), sendo duas como referência moldadas com agregados graúdos naturais, dessas uma possuía armadura de cisalhamento e a outra não. As substituições de agregados naturais por agregados reciclados foram de 0,30 e 100% e foram concluídos que nessa substituição não foi associada redução da resistência à compressão do concreto, houve uma redução de 15% para a resistência a tração e 20% para o módulo de elasticidade para substituições de 100%. Foi demonstrado também que condições inseguras não estão associadas à utilização de agregados de concreto reciclado, contudo é importante considerar a contribuição da armadura de flexão relação das vigas de concreto armado.

Oliveira, *et al.* (2024) pesquisaram sobre a substituição do cimento Portland por pó reciclado misto (RMP) oriundo de resíduos de construção e demolição (RCDs) com o objetivo de reduzir as emissões de carbono provenientes da produção do cimento. Os resultados mostram que aos 28 dias as pastas que foram confeccionadas com até 45% de (RMP) atingiram uma resistência à compressão superior do que o referência, a utilização do empacotamento das partículas permitiu um melhor desempenho mecânico e ambiental das pastas, auxiliando no processo de economia circular e promovendo a redução das emissões de gases.

3.4 Cimento reciclado

Entende-se como cimento reciclado materiais cimentícios que foram reciclados a partir de pasta de cimento residual ou concreto e que podem evidenciar propriedades análogas às do cimento Portland comum depois de serem expostas a tratamentos físicos ou químicos. Com isso, as pesquisas demonstram que o cimento reciclado pode oferecer uma solução transformadora e ecoeficiente para o desenvolvimento sustentável na construção civil (XU *et al.*, 2022).

Splittgerber e Mueller (2003) investigaram a possibilidade de reidratação do cimento utilizando tratamento térmico e em quais temperaturas ela pode ser alcançada nas diferentes fases do cimento. As pastas foram mantidas em água por 180 dias e foram moídas até obter um material de granulometria inferior a 63 μm . Esse material foi levado a um tratamento térmico nas seguintes temperaturas 600°C, 900°C, 1100°C, 1200°C e 1400°C. As amostras que utilizaram em sua confecção escória de alto-forno não foram levadas ao tratamento do forno de 1400°C, porque fundiram completamente. Nesse estudo, os autores concluíram que as reações de hidratação do clínquer puro e do cimento Portland inicialmente hidratados são completamente reversíveis se o material for aquecido à temperatura de queima do cimento, no entanto essa reversibilidade se torna reduzida se forem utilizadas temperaturas muito baixas ou se forem adicionados outros materiais.

Alonso e Fernandez (2004) analisaram as mudanças microestruturais em pastas de cimento previamente curadas e levadas a temperaturas de 100°C, 200°C, 450°C e 750°C, utilizando informações obtidas por ^{29}Si MAS-NMR, difração de raios X e análise termogravimétrica e foram realizados aquecimento e resfriamento lento. Os autores comprovaram que ocorre a perda de água de hidratação, sem alterações de fases hidratadas. Um novo C-S-H foi encontrado a 200°C e a 450°C ele foi transformado em nesosilicato semelhante ao C_2S apresentando menor cristalinidade com uma relação $\text{Ca}/\text{SiO}_2 = 2$.

No estudo de De Araújo, *et al.* (2017) foi investigada a hidratação, desidratação e reidratação do cimento Portland com alta resistência inicial CPV-ARI a 700°C e 900°C, utilizando difração de raios X (DRX), espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (IVTF) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A pasta de cimento hidratada foi realizada utilizando uma relação *a/c* de 0,5, curada ao ar por 28 dias. Para a preparação do pó de cimento desidratada (PCD) o material foi triturado e moído até passar por uma peneira de 30 μm . O material foi então levado a um forno com uma taxa de aquecimento de 10°C/min e mantido constante por 2,5 horas até resfriamento natural em temperatura ambiente. Os difratogramas de raios X das pastas de cimento desidratadas obtidas a 700°C não apresentou picos referentes ao $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e a etringita pois a decomposição desses produtos ocorreu durante o avanço térmico. Foram visualizadas também novas fases de $\beta\text{-C}_2\text{S}$ e produtos da decomposição de C-S-H mais intensos na amostra a 900°C. Picos de CaCO_3 não puderam ser encontrados nos difratogramas das

amostras tratadas a 700°C e 900°C pois o carbonato de cálcio se decompõe em CO₂ e CaO. Nos difratogramas de pastas reidratadas apresentaram picos relacionados às fases reidratadas, de cimento anidro e a fase de portlandita foi menos intensa na amostra de 900-PCR, nessas amostras também foi possível observar picos atribuídos a silicatos não hidratados.

A estabilidade térmica foi analisada por meio de termogravimetria (TGA) podendo assim descrever a degradação da amostra de pasta de cimento hidratada (PCH) em três estágios acentuados. A perda de massa mais acentuada em um primeiro estágio foi relacionada à perda de água evaporável, fisicamente combinada e decomposição de etringita ocorrendo em torno de 170°C. Um segundo estágio acentuado de perda de massa ocorreu em torno de 435°C sendo relacionada à desidratação da portlandita, um terceiro pico de perda de massa ocorreu por volta de 680°C relacionada à decomposição de CaCO₃ em dióxido de carbono e CaO (DE ARAÚJO *et al.*, 2017).

Quanto às propriedades físicas e à de resistência a compressão os corpos de prova de PCR com até 40% de PCD foram semelhantes. No entanto os PCDs não atuaram como incorporadores de poros abertos na pasta reidratada durante o preparo. O PCD obtido a 900°C, com 60% na preparação de PCR apresentou maior potencial em relação ao PCD obtido a 700°C ao atuar como incorporador de poros abertos na pasta de cimento a ser reidratada durante o preparo (DE ARAÚJO *et al.*, 2017).

Wang, *et al.* (2018) investigaram o efeito do tratamento térmico em diferentes temperaturas 120°C, 450°C, 750°C e 1100°C. Elas foram definidas de acordo com as perdas de massa mais significativas obtidas pela análise termogravimétrica. Os resultados indicaram que a temperatura de 450° foi amais efetiva em termos de resistência a compressão, calor de hidratação e reatividade do material em contato com água. Por outro lado, a baixa temperatura de 120°C não foi suficiente para tornar o pó reativo, provavelmente devido à presença de água quimicamente ligada do C-S-H da pasta velha que não foi totalmente liberada. Por outro lado, alta temperatura 1100°C resultou na transformação do C-S-H foi transformado em wollastonita e uma pequena quantidade de larnita. No geral, cimentos reciclados produzidos nas temperaturas de 120°C e 1100°C apresentaram pouca reatividade.

Bogas, *et al.* (2019) analisaram as propriedades das argamassas produzidas com incorporações de cimento reciclado termicamente ativado com substituições de 25%, 50%, 75% e 100%, utilizando temperaturas de pré-aquecimento de 20°C, 350°C e 650°C. As argamassas foram caracterizadas em relação à resistência à compressão e flexão, velocidade ultrassônica e módulo de elasticidade dinâmico. Para a realização das análises termogravimétricas (TG) e difração de raios X (DRX), foram utilizadas temperaturas que não provocassem uma descarbonatação excessiva do material original, reduzindo assim, as emissões de CO₂. O tratamento térmico foi realizado aos 120 dias a 100°C por 1 hora, e a temperatura máxima alvo de 350°C e 650°C foi mantida por 3 horas. A taxa de aquecimento foi realizada a 20°C/min. A avaliação por DRX indicou que o cimento tratado termicamente apresenta composições com fases diferentes do cimento Portland comum, com composições de cimento anidro com menor razão cálcio/sílica, ocorrendo, portanto uma redução em sua hidratação.

As argamassas de cimento reciclado obtidas com temperaturas mais elevadas demandaram maior quantidade de água para obter uma boa trabalhabilidade. A resistência mecânica das argamassas com substituição de 60% de pasta de cimento reciclada (RCP) mais fino foi cerca de 10% maior do que as misturas com substituições de apenas 50% do (RCP) mais grosso. Concluiu-se que a diminuição da granulometria média do cimento reciclado resultou em um aumento significativo da sua capacidade de reatividade (BOGAS *et al.*, 2019)

Bogas, *et al.* (2020) analisaram a microestrutura do cimento reciclado em relação ao seu desenvolvimento na pasta para realizar estudos mais aprofundados sobre esse processos. Foram realizados ensaios de caracterização combinados entre 8h e 28 dias para obter resultados mais precisos sobre o material em estudo. As técnicas utilizadas foram termogravimetria (TG), difração de raios X (DRX), calorimetria isotérmica, microscopia eletrônica de varredura com energia dispersiva de raios X (EDS), imagem de retroespalhamento de elétrons (BSE), intrusão de mercúrio porosimetria (MIP) e adsorção de nitrogênio (N₂). Foi utilizada uma temperatura alvo de 700° C para a confecção do cimento reciclado. A análise de MIP e de microscopia eletrônica de varredura confirmaram a porosidade no cimento reciclado anidro após o processo de ativação térmica, permitindo o desenvolvimento de produtos de hidratação. de produtos de hidratação. Na termogravimetria, foi observada uma perda de massa durante a etapa de descarbonatação

maior no cimento reciclado ao comparar com o cimento Portland comum. Na difração por raios X, foram analisadas amostras do cimento reciclado antes e após a ativação térmica a 700° C durante esse tratamento térmico, a portlandita e produtos de hidratação transformaram em cal livre e silicatos de cálcio C₂S. Foi identificada, portanto, uma nova forma de C₂S com estrutura diferente e mais reativa. Ao comparar com a composição das fases do cimento Portland anidro, não foram observados a formação de silicatos tricálcicos.

Bogas, *et al.* (2020) observaram que a resistência mecânica da pasta de cimento reciclado foi semelhante à pasta de cimento Portland comum com uma mesma relação água/aglomerante para três dias. Ao analisarem para 28 dias essa resistência foi reduzida em 32%, fator que pode estar relacionado à porosidade das partículas do cimento reciclado e a menor formação de produtos densos de hidratação externa entre os grãos.

O processo de separação para o reaproveitamento e reciclagem do concreto tem sido uma etapa desafiadora. REAL *et al.*, (2021) apresentaram um novo processo com o objetivo de afinar a etapa final da separação com o objetivo de obter materiais mais limpos e refinados. A metodologia utilizada prevê a separação dos constituintes do concreto, a primeira seria a cominuição do concreto com desprendimento da pasta de cimento hidratada e a individualização dos constituintes do concreto por meio de separação magnética. Para isso, foram utilizados ímãs permanentes de alta intensidade a partir das propriedades magnéticas dos materiais envolvidos. O respectivo método sugere a trituração para a remoção da pasta de cimento e a separação dos constituintes do concreto por meio de separação magnética utilizando frações de granulometria que foram definidas nos respectivos tamanhos <125µm; 125-150µm; 250-500 µm e 500-1 mm. Foram realizadas três varreduras com o objetivo de coletar os produtos em ordem crescente de pureza, a primeira varredura foi realizada para a retirada do material não magnético e em seguida foram feitas varreduras retendo o material magnético e realizando outras varreduras com o objetivo de refiná-lo sucessivamente. A faixa granulométrica com maior eficiência se encontrava entre 150 µm-500 µm, para partículas na faixa de 125 µm-150 µm o método não foi tão eficiente por serem partículas de menor tamanho e serem afetadas por fatores externos, para partículas não magnéticas na faixa de 12 µm-1000 µm as partículas de cimento eram muito reduzidas. Cerca de 40% em peso do cimento hidratado foi recuperado do concreto residual. As pastas confeccionadas com cimento reciclado obtido a partir de resíduos de concreto confirmaram a capacidade de reidratação deste novo ligante.

Real, *et al.* (2022) analisaram o comportamento da reidratação do cimento reciclado, gerado a partir da ativação térmica de resíduos de materiais cimentícios. O cimento utilizado para a confecção do cimento reciclado foi o cimento Portland (CP) CEM I 42.5R feito com uma relação a/c de 0,5 o que resultou em uma resistência média a compressão média de aproximadamente 41 MPa. Os corpos de prova foram moldados em cubos de 150mm e, após a cura de 28 dias, foram britados e moídos para reduzir o tamanho dos grãos. Em seguida, o material foi peneirado em peneiras de 250 μ m, obtendo-se um cimento não termoativado (NT). A ativação térmica foi realizada a uma taxa de aumento de temperatura de 10°C/ min até atingir 700°C mantendo-se nessa temperatura por 3 horas. Após o período de ativação, o material foi resfriado na estufa até atingir a temperatura ambiente, obtendo-se um cimento reciclado termoativado (RC). A densidade absoluta do cimento reciclado (RC) foi obtida por meio de gás hélio, e as partículas de cimento reciclado apresentaram uma estrutura porosa, superfície irregular e alta área superficial. Foi produzida uma pasta com 100% de (RC) termoativado como aglutinante com relação a/c de 0,72 e uma pasta de referência com a mesma relação a/c, apresentando maior fluidez devido a menor demanda hídrica. Tanto os cimentos anidros de RC e PC e suas respectivas pastas PRC e PPC foram caracterizados por IC,TG, DRX,29SiRMN e MEV, fluidez, resistência à compressão e flexão.

Para analisar a liberação de calor foi empregado o método de mistura externa e somente após 45 min pôde ser medida o fluxo de calor no (RC) era duas vezes maior do que do PC, a liberação do calor não foi significativa no NT, confirmando a sua não reatividade por não ter passado por ativação térmica. Foi observado que após 3 horas de hidratação o calor acumulado no (RC) foi menor do que no (CP) apresentado na Figura 3.4. O processo de reidratação do (RC) segue os seguintes estágios de indução, aceleração e desaceleração comuns em mecanismos de precipitação e dissolução. Contudo, o RC apresentou períodos de indução e aceleração mais prolongados com menor fluxo de hidratação do que o (PC). Quanto às forças de resistência a flexão e compressão indicam que o desenvolvimento de força do PRC é comparável ao do PPC até três dias e depois diminui até 90 dias (REAL *et al.*, 2022).

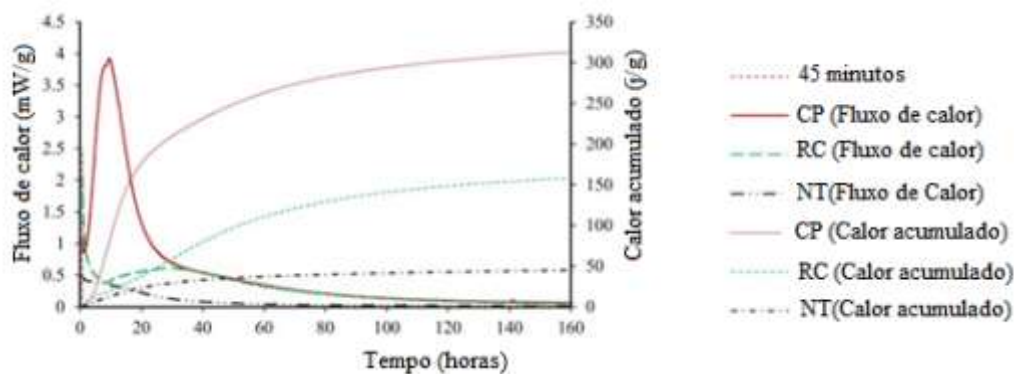


Figura 3.4 - Taxa de fluxo de calor e calor acumulado ao longo do tempo pastas com PC, RC e NT e a/c 1,0.
Fonte: Adaptado REAL *et al.*, (2022).

Ângulo, *et al.* (2022) realizaram um estudo sobre a contribuição dos silicatos de cálcio e CaO (cal viva) na reatividade dos cimentos reidratados. Para isso foram produzidos corpos de prova de pasta de cimento utilizando cimento Portland de alta resistência inicial, curados por 28 dias. Em seguida, os corpos de prova foram triturados e moídos para realização de análises utilizando QXRD e TG, calorimetria isotérmica e resistência à compressão. Os finos de cimentos foram desidratados nas temperaturas de 300°C, 500°C e 650°C. Foi constatado que após a desidratação em diferentes temperaturas resultou na decomposição da maior parte da água quimicamente ligada do C-S-H e outros compostos, com a temperatura ideal de 500°C, que converteu a maior parte da portlandita em calcita, com apenas 6,6 % g/g de cal virgem foi formado nessa temperatura. A 650°C, houve alteração da estrutura de silicato de cálcio, reagindo lentamente. Ao utilizar finos do cimento desidratados como ligante observou-se que apenas parte do calor total liberado veio do consumo dos silicatos de cálcio residuais, dos silicatos de cálcio intermediários e da cal virgem formado pelo tratamento térmico. Em relação à resistência a compressão dos cimentos reidratados foram bastante semelhantes após sete dias e a temperatura ideal foi de 500°C, assim os autores indicam que os silicatos de cálcio ou a cal viva não são os únicos responsáveis por esse ligante.

Xu, *et al.* (2022) realizaram uma revisão detalhada dos estudos sobre cimento reciclado termoativado propondo um método ótimo com todas as variáveis para a produção do RC. Assim, os pesquisadores sugerem a partir dos estudos realizados até aqui que a uma taxa de aquecimento ideal é de 10° C /min e que a ativação térmica ótima para a ativação do cimento reciclado esteja entre 650°C e 750°C, pois nessa faixa de temperatura a descarbonatação significativa é reduzida e a quantidade de liberação de CO₂ também

diminui, é importante também que o tempo de permanência no forno seja de 2h considerando amostras com tamanho inferior a 2mm. Foi considerado também que a utilização de ganga de carvão durante o processo de ativação térmica aprimora o desempenho do cimento reciclado e a escória de alto-forno granulada moída consegue aperfeiçoar a trabalhabilidade e regular o tempo de pega do cimento termicamente ativado e que o tamanho máximo da partícula seja semelhante ao cimento Portland comum. Quanto à etapa de resfriamento os mesmos autores sugerem que seja um resfriamento rápido, pois ao se realizar um resfriamento natural podem acontecer mudanças na rede de β -C₂S para γ -C₂S mineral esse sem resistência ocasionando em perda de qualidade do cimento reciclado. Eles também sugerem a utilização de redutores de água e retardadores de pega com intuito de reduzir a demanda de água em cimento termoativados.

4 MATERIAS E MÉTODOS

Este estudo tem como foco a produção de um cimento, que foi obtido a partir de pastas confeccionadas em laboratório e posteriormente foram submetidas a um processo de britagem, moagem e tratamento térmico. Com o aglomerante resultante foram produzidas argamassas com adição de areia ativada mecanicamente. Além disso, foram realizados processos de cura em ambiente (cura saturada) e em cura em autoclave, visando avaliar propriedades físicas e a microestrutura do material produzido. O fluxograma do programa experimental é apresentado na **Figura 4.1**

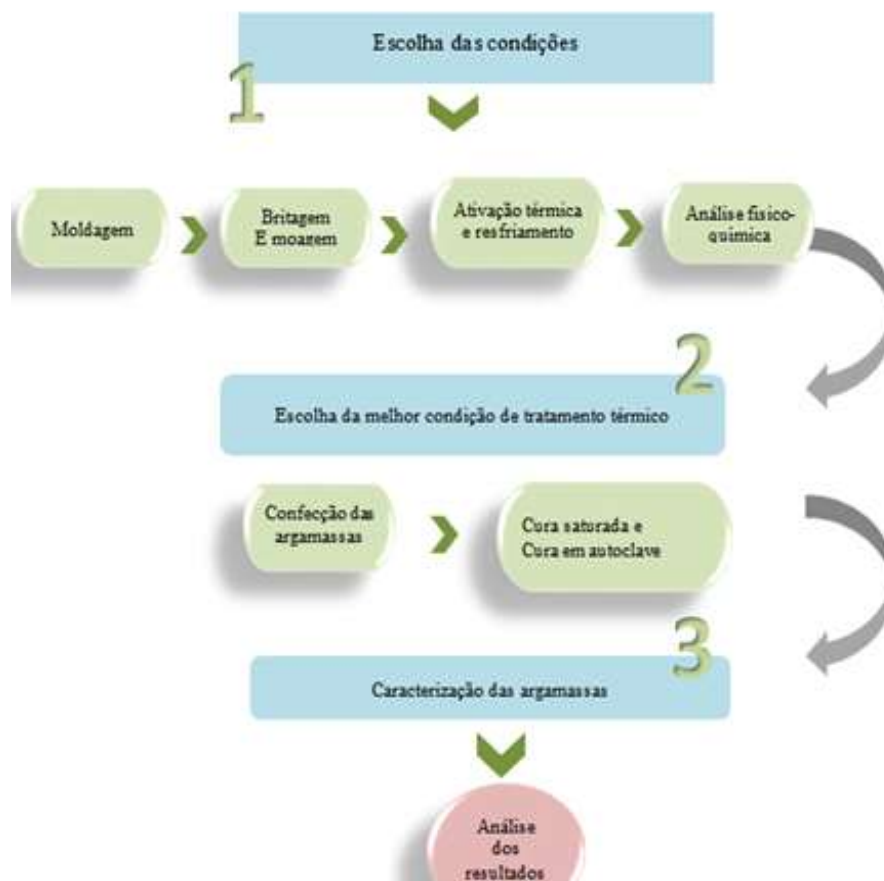


Figura 4.1 - Programa experimental

4.1 Materiais

Os materiais utilizados nesse estudo foram: cimento Portland CP-V ARI, areia normatizada, areia ativada mecanicamente e aditivo hiperplastificante à base de policarboxilato. O cimento CP-V ARI foi escolhido por ser um cimento com menor teor de adição e suas respectivas especificações foram obtidas pela composição química (Tabela 4.1) e a caracterização física demonstrada (Tabela 4.2).

Tabela 4.1 - Composição química do cimento CPV-ARI em (%)

S	SO ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	MnO
1,24	3,10	2,66	18,1	4,56	61,8	0,52	0,22	0,26	< 0,1	0,55	0,06

Fonte: MAZZARO (2022).

Tabela 4.2- Caracterização física do cimento CPV-ARI

PROPRIEDADE		NORMA	VALOR OBTIDO
Massa específica		ABNT NBR 16605 (ABNT, 2017)	2,8 à 3,2g/cm ³ , a 20°C
Finura	325	ABNT NBR 16372 (ABNT, 2015b)	1,3%
	Blaine		507 m ² /kg
Tempo de pega	Início	ABNT NBR 16607 (ABNT, 2018b)	113 min
	Fim		148 min
Resistência à compressão	1 dia	ABNT NBR 16697 (ABNT, 2018a)	26,1 MPa
	3 dias		41,4 MPa
	7 dias		47,9 MPa
	28 dias		53,7 MPa

Fonte: Fabricante (2022).

A água empregada para a confecção dos compósitos cimentícios é classificada como potável fornecida e distribuída pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais S/A (COPASA), Belo Horizonte – MG. Foi utilizada para a produção das argamassas areia natural quartzosa fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo (IPT) em 4 frações: grossa (nº100), média grossa (nº50), média fina (nº30) e fina (nº16). Na Tabela 4.3 estão apresentados os requisitos físicos e químicos, conforme NBR 7214 (ABNT,2015), das areias e na Tabela 4.4 sua granulometria.

Tabela 4.3 - Resultados de requisitos físicos e químicos ABNT NBR 7214:2015 da areia normal brasileira

Determinação	Resultados	Requisito
Teor de sílica – ABNT NBR 14656:2001	97,4	≥ 95%, em massa
Umidade – ABNT NBR 7214:2015	0,0	≤ 0,2%, em massa.
Matéria orgânica ABNT NBR NM 49: 2001	< 100 ppm	≤ 100 ppm

Fonte: IPT (2023).

Tabela 4.4 – Granulometria da areia normal brasileira

Fração	Material entre as peneiras de abertura nominal	Porcentagem em massa %	
		Resultados	Requisito
16	2,4 mm e 2,0 mm	1	≤ 10
	2,0 mm e 1,2 mm	97	≥ 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	96	≥ 95

Fonte: IPT (2023).

Para obter a areia ativada, utilizou-se um moinho planetário de bolas de alta energia (*planetary Moinho Pulverisette*), a uma rotação de 300 rpm, com recipientes de moagem e esferas de óxido de zircônio (BENEZET e BENHASSAINE, 1999; MENEZES, 2018). (MENEZES *et al.*, 2018). A areia ativada mecanicamente utilizada nesse trabalho possui tamanho médio de 3,6 µm.

O aditivo hiperplastificante utilizado é à base de policarboxilato, MasterGlenium SCC 51. Este aditivo atua como dispersante do material aglomerante propiciando elevada redução de água (aproximadamente 40%), aumenta a coesão, trabalhabilidade, atua na redução da segregação e não altera a pega do cimento (BASF, 2014). Os dados técnicos referentes ao aditivo são descritos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5- Dados técnicos MasterGlenium 51

Base química	Éter Policarboxílico
Aspecto TM761B	Líquido Branco turvo
Densidade (g/cm ³) TM 103B	1,080 a 1,120
pH TM112B*	7 – 9
Sólidos TM 613 B	45 – 49

Fonte: Fabricante

Com o objetivo de retardar o tempo de pega e permitir uma melhor trabalhabilidade na argamassa foi utilizado nesse trabalho o bórax (tetraborato de sódio). A Tabela 4.6 apresenta as propriedades físicas e químicas desse material.

Tabela 4.6- Dados técnicos Bórax DELTA PLUS

Aspecto (estado físico, forma e cor)	Sólido cristalino branco
pH	9,3(solução 0,1%, 20°C)
Ponto de fusão/ Ponto de congelamento	62°C
Densidade do vapor	1,72 á 23°C
Densidade	Relativa: água:49,74g/L a 20°C
Solubilidades (em água)	4,7% a 20°C, 65% a 100°C

Fonte: Fabricante

4.2 Métodos

Inicialmente, foram determinadas as condições ideais para a realização do processo de tratamento térmico, levando em consideração a finura típica do cimento, tais como temperatura e resfriamento, para a produção do cimento reciclado. Em seguida, foram analisadas algumas propriedades dos compostos cimentícios elaborados com esse aglomerante alternativo. Por fim foi avaliada a influência da cura em autoclave no comportamento dos compósitos cimentícios produzidos com o cimento reciclado.

4.2.1 Obtenção do aglomerante

O primeiro procedimento realizado foi obter um aglomerante a partir de pastas de cimento confeccionadas em laboratório. Esse aglomerante foi obtido a partir de tratamento térmico de pastas de cimento com relação água cimento (a/c) de 0,5 e cura em câmara úmida e aos 28 dias foram submetidos à processos de britagem e moagem. Os equipamentos utilizados para britagem primária, secundária e moagem foram do Laboratório de Tratamento de Minérios – LTM do Departamento de Engenharia de Minas DEMIN – UFMG. Inicialmente, os cilindros de pastas passaram por dois britadores de mandíbulas com diferentes aberturas de mandíbulas apresentados nas Figura 4.2.



Figura 4.2 – Britadores de mandíbulas

Os corpos de provas foram submetidos a um processo britagem primária no qual foram obtidas partículas com dimensão máxima de 70 mm (Figura 4.3 (a)). Em seguida o material foi levado a uma britagem secundária onde se obteve um material com dimensão máxima de partículas de 20 mm (Figura 4.3(b)).



Figura 4.3 - a) Material obtido na britagem primária; b) Material obtido na britagem secundária.

Após o processo de britagem, procedeu-se a etapa de moagem onde o material foi seco em estufa por 24 horas a uma temperatura de 100°C com o objetivo de reduzir a aglomeração do material. Esse procedimento gera uma menor aderência às paredes do moinho de bolas e uma redução da aglomeração de suas partículas (ZANOVELLO *et al.*, 2023) . Após esse processo o material foi retirado da estufa, resfriado e levado ao moinho de bolas horizontal Figura 4.4(a) onde foram utilizadas cargas de esferas de aço pequenas, médias e grandes Figura 4.4(b) com a finalidade de transformar o material em um pó. Esse processo teve uma duração de aproximadamente 3 horas até obter um material com finura próxima ao cimento Figura 4.4(c), granulometria será apresentada nos resultados.



Figura 4.4 - a) Moinho de bolas horizontal; d) Carga utilizada no processo de moagem; c) Material obtido do processo de moagem.

Após a homogeneização de todo o material, foram obtidos 22 kg de material moído, no qual foi levado uma amostra para análise de difração à laser conforme descrito no item 4.2.3. Diante dos resultados obtidos por pesquisas anteriores, estabeleceu-se uma faixa experimental de interesse de tratamento térmico para o material. A pasta de cimento foi então moída e na sequencia aquecida com taxa de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até diferentes temperaturas: 500°C , 600°C e 700°C nas quais permaneceu por 2 horas.

Em seguida, procedeu-se o resfriamento do material, onde para cada temperatura do estudo realizou-se um resfriamento rápido (RR) e um resfriamento lento (RL). No resfriamento rápido o material foi retirado do forno assim que foi desligado e resfriado em ambiente de laboratório até atingir a temperatura ambiente. No resfriamento lento o material permaneceu dentro do forno desligado por um período de 24hs e em seguida foi retirado e resfriado em ambiente de laboratório até atingir a temperatura ambiente. Concluída essa etapa, o material foi armazenado em dessecador. Na Figura 4.5 é apresentado um diagrama esquemático da ativação térmica.

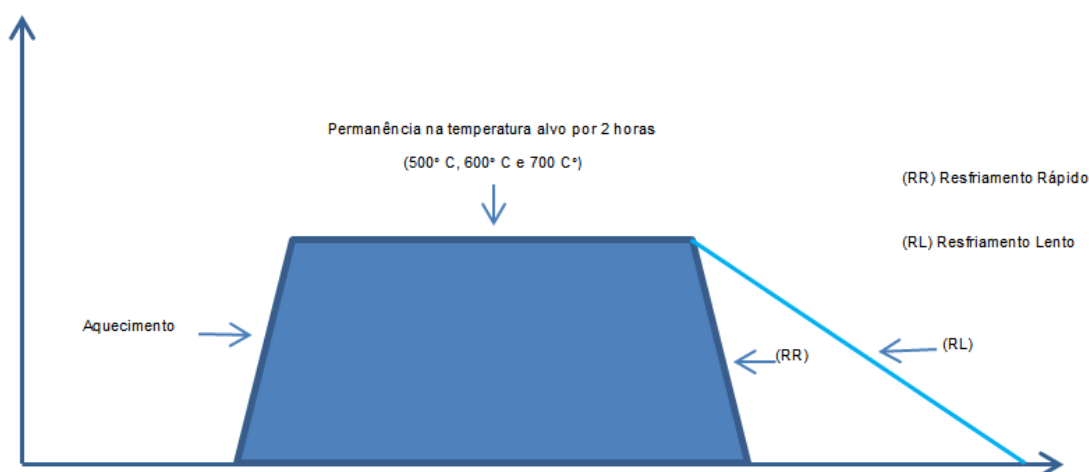


Figura 4.5 – Esquema do tratamento térmico e resfriamento utilizado na pasta.

O processo de ativação térmica foi realizado em forno mufla (Figura 4.6) com atmosfera controlada por programa computacional do modelo FL1300 marca Pechini com controlador de temperatura. A Tabela 4.7 apresenta a nomenclatura dos materiais tratados termicamente e seu respectivo tipo de resfriamento.



Figura 4.6 - Forno com atmosfera controlada.

Fonte: Laboratório de Tecnologia de Materiais de Construção Civil (DEMC), UFMG.

Tabela 4.7- Aglomerante alternativo submetido à tratamento térmico

Amostra	Tratamento térmico	Tipo de resfriamento
500 RR	500°C	Rápido
500 RL	500°C	Lento
600 RR	600°C	Rápido
600 RL	600°C	Lento
700 RR	700°C	Rápido
700 RL	700°C	Lento

4.2.2 Escolha da temperatura alvo

A escolha das condições de tratamento térmico se deu com base em ensaios de difração de raios-X e resistência à compressão. A análise das fases cristalinas foi realizada por difração de raios - X conforme descrito na seção 4.2.4.3. Para o ensaio de resistência à compressão foram moldadas argamassas, sem uso do hiperperplastificante. Para isso, foram utilizadas 4 frações de areia do IPT sendo elas grossa (n.100), média grossa (n.50), média fina (n.30) e fina (n.16), cujo traço utilizado foi de 1:3 e a relação água/cimento de 1. Essa quantidade elevada de água foi empregada para que fosse possível moldar as amostras, uma vez que o aglomerante reciclado demanda mais água, para manter sua trabalhabilidade quando se compara com o cimento convencional.

O processo foi realizado de maneira manual, primeiramente foram misturadas todas as areias, o cimento e na sequência foi sendo adicionada água procedendo-se a mistura durante 90 segundos. Foram então, confeccionadas argamassas contendo 100% do

aglomerante. Todas foram confeccionadas em três camadas, com golpes manuais cada, sendo utilizado moldes poliméricos medindo 25 mm x 50 mm. Após a moldagem, as pastas foram mantidos em seus moldes por 24 horas em temperatura ambiente. Concluído esse período, elas foram desmoldadas e colocadas em câmara úmida à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, por um período de 28 dias. A Tabela 4.8 apresenta a quantidade de materiais utilizados nessa moldagem.

Tabela 4.8 Traço das argamassas

Amostra	Proporção			
	Aglomerante alternativo tratado termicamente (g)	CPV (g)	Areia IPT(g)	Água (g)
500 RR	35	-	105	35
500 RL	35	-	105	35
600 RR	35	-	105	35
600 RL	35	-	105	35
700 RR	35	-	105	35
700 RL	35	-	105	35

Decorridos os 28 dias, as amostras (Figura 4.7) foram submetidas à realização do ensaio de resistência a compressão que foi feito em um equipamento Shimadzu Autograph modelo AGS-X com capacidade máxima de 300KN e as amostras foram submetidas a uma velocidade de ensaio de 0,14 MPa/s.



Figura 4.7 - Amostras aos 28 dias.

4.2.3 Confeção das argamassas com o aglomerante alternativo escolhido

Foi realizado sua caracterização química e física do aglomerante alternativo. Bem como, sua distribuição granulométrica após moagem e tratamento térmico à 700°C que foi obtido por espalhamento do feixe de laser conforme descrito em 4.2.4.2.

Foram moldadas argamassas com traço 1:0,25:3 (aglomerante, areia ativada, areia normatizada). A proporção de aglomerante e areia foi escolhida conforme procedimentos para teste da argamassa padrão estipulados pela norma (NBR 7215/19).

O teor de areia ativada de 25% em relação à massa de cimento foi escolhido, uma vez que este teor evita a formação de fases prejudiciais de C-S-H como o α -C₂SH em condições hidrotermais (GARCIA; WANG; FIGUEIREDO, 2018). Além disso, os RCDs como concretos e argamassas apresentam areia em sua composição.

Nesse trabalho também foi utilizado e fixado o valor 2% de bórax para a execução de todos os traços de argamassas que utilizaram o aglomerante alternativo em sua composição. Segundo estudos de (XU *et al.*, 2022) a utilização de retardadores de pega juntamente com redutores de água podem reduzir os efeitos adversos da alta demanda de água e o curto tempo de pega inicial.

O aglomerante foi composto por cimento CPV-ARI substituído em massa por cimento reciclado nas seguintes porcentagens: 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Considerando a demanda de água nos testes descritos no item 4.2.2, foi utilizado hiperplastificante para se atingir resistências adequadas. A porcentagem de aditivo hiperplastificante foi determinada de forma a garantir a consistência normal conforme (NBR 1327/16). A Tabela 4.5 apresenta a nomenclatura dos compósitos e a Tabela 4.6 apresenta a composição dos compósitos.

Tabela 4.5- Nomenclatura dos aglomerantes utilizados

Amostras	Materiais
CPV-ARI (referência) (a/c 0,5)	100 % de Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
25RC (a/c 0,5)	25% de Cimento reciclado e 75% de CPV-ARI
50RC (a/c 0,5)	50% de Cimento reciclado e 50% de CPV-ARI
50 RC (a/c 0,7)	50% de Cimento reciclado e 50% de CPV-ARI
75RC(a/c 0,7)	75% de Cimento reciclado e 25% de CPV-ARI
100RC (a/c 0,7)	100% de Cimento reciclado

Tabela 4.6- Composição dos traços utilizados na mistura

Traço	CPV (g)	Cimento reciclado (g)	Areia (g)	Pó de quartzo (g)	Água (g)	Aditivo hiperplastificante (%)	Bórax (g)
CPV-ARI	400	-	1200	100	200	0,5	0
25RC	300	100	1200	100	200	1,88	2
50RC	200	200	1200	100	200	3,5	4
50RC	200	200	1200	100	280	0,7	4
75RC	100	300	1200	100	280	1,5	6
100RC	-	400	1200	100	280	5	8

Para produzir as argamassas, os materiais foram misturados em uma argamassadeira, conforme sequência a seguir. Primeiro, foi realizado uma mistura manual de todos os materiais secos com o auxílio de uma espátula, na sequência os materiais foram misturados por 3 minutos em velocidade baixa (140 rpm) na argamassadeira.

Em seguida, foi adicionado 50% do volume de água na velocidade rápida (285 rpm) na argamassadeira por 1 minuto, posteriormente o equipamento foi desligado e os materiais foram misturados com uma espátula. Foi adicionado mais 25% de volume de da água, e realizada a mistura por mais 30 segundos em velocidade rápida. Após esse período a argamassadeira foi desligada e os materiais foram misturados com auxílio da espátula.

Logo após, foi colocado os 25% restantes da água com o hiperplastificante diluído e adicionado à mistura, em seguida a argamassadeira foi ligada novamente na velocidade rápida até ficar homogêneo e fluido o que levou mais 30 segundos. Segundo o fabricante a dosagem recomendada para utilização do hiperplastificante varia de 0,2% a 1,2% sobre o peso de cimento, contudo a dosagem ótima (para reduções de água > que 10%) pode variar conforme temperatura ambiente, tipo de cimento, quantidade de finos na mistura, relação água/cimento, condições de mistura e tipo de água utilizado.

Os procedimentos de moldagem de corpos de prova foram seguidos conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015d). As misturas foram então vertidas em moldes cúbicos de 40 mm e compactadas em duas camadas adequadamente usando uma mesa vibratória nas duas camadas. Os corpos de prova foram identificados e recobertos com plástico filme e mantidos nos moldes por 24 horas. No presente trabalho, produziu-se 108 corpos de prova, conforme mostra a Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Quantidade de corpos de prova produzidos

Traços	a/c	Dimensões	Cura saturada 7d	Cura saturada 28d	Cura em autoclave 28d	Total de CPs
CPV-ARI	0,5	40x40x40	6	6	6	18
25RC		40x40x40	6	6	6	18
50RC		40x40x40	6	6	6	18
50RC	0,7	40x40x40	6	6	6	18
75RC		40x40x40	6	6	6	18
100RC		40x40x40	6	6	6	18

Em seguida, as amostras foram desmoldadas e submetidas a dois processos de cura distintos. Para cada traço confeccionado uma parte dos corpos de prova foram desmoldados, identificados e submetidos à cura submersa em solução saturada de hidróxido de cálcio à $23 \pm 2^\circ\text{C}$, conforme recomenda à 5738 (ABNT, 2015d). A outra parte dos corpos de prova foram desmoldados, identificados e levados à autoclave (Figura 4.8).



Figura 4.8 - Equipamento de autoclave para utilização no ensaio.
Fonte: Laboratório de Materiais Metálicos, UFMG.

As amostras destinadas para a cura em autoclave, após o processo de moldagem permaneceram nos moldes cobertos por plástico filme por 24 h. Após esse período, já no estado endurecido, elas foram desmoldadas e levadas ao equipamento de autoclave, onde foram colocados juntamente com 600 ml de água destilada.

Na sequência, a autoclave foi fechada com um torque de 90 IN/LB nos seus 16 parafusos e os corpos de prova permanecem por mais 24 h até o início da realização do ensaio. O aparelho então foi ligado e gradualmente sua temperatura e pressão alcançaram os valores que atingiram uma temperatura de 220°C e pressão de 2,1 MPa, esse período levou aproximadamente 2 horas. A partir dessas condições o equipamento foi mantido assim por um período de 8 horas.

Depois disso o equipamento foi desligado, levando cerca de 12 horas para seu resfriamento. Após esse processo, os corpos de prova foram retirados do equipamento e levados a cura submersa em solução de hidróxido de cálcio até a idade do ensaio (28 dias). Essas condições de tratamento em autoclave permitem a formação de cristais de xonotlita e 11Å tobermorita, que são responsáveis pelo aumento das propriedades mecânicas (GARCIA; WANG; FIGUEIREDO, 2018).

4.2.4 Métodos empregados na caracterização

A análise da composição química e mineralógica realizada na pasta e na pasta tratada termicamente à 700°C, foi obtida por meio das técnicas de Fluorescência de Raios - X (FRX) e por Difração de Raios-X.

4.2.4.1 Determinação do índice de consistência

Após realizar a confecção das argamassas, a trabalhabilidade foi observada pelo ensaio *flow Table* que determina o índice de consistência conforme a NBR13276 (ABNT, 2016).

Finalizado a última queda foi medido o espalhamento da argamassa em três diâmetros diferentes uniformemente ao longo do perímetro. A média aritmética simples corresponde ao índice de consistência. Note que a *flow table* foi realizada para ajuste do aditivo nas argamassas de forma a se obter uma consistência 300 ± 20 mm com a realização da medição dos respectivos diâmetros de espalhamento médio de cada traço de argamassa produzida. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais cimentícios – UFMG.

4.2.4.2 Análise química

A identificação da composição química da pasta hidratada e da pasta tratada termicamente foi avaliada através do ensaio de Fluorescência de Raios – X (FRX), o qual se expressa em termos dos principais óxidos. O ensaio foi realizado no laboratório de análise química de Instituto SENAI de Tecnologia em Cerâmica – IST de Santa Catarina. As análises das amostras foram obtidas por Espectrometria de Fluorescência de Raios X, utilizando espectrômetro WDS sequencial, modelo Axios Max da marca PANalytical, com tubo de raios-X cerâmico, anodo de ródio (Rh) e máximo nível de potência 2,4 KW. As aquisições

e tratamento dos dados foram realizados por meio do software SuperQ Manager da PANalytical.

4.2.4.3 Granulometria por difração à laser

A caracterização da composição granulométrica que tem por objetivo determinar a curva granulométrica e definir o diâmetro médio das partículas da pasta inicial e da pasta tratada termicamente, foi executada por meio do ensaio de Granulometria à Laser. Sendo utilizado um analisador de partículas a laser da marca Cilas, modelo 1064L, balança com 3 casas decimais sonda Ultrassom 750Watts, marca *Sonics & Materials*, modelo VC750. Essa análise foi realizada no Instituto SENAI de Tecnologia em Cerâmica – IST de Santa Catarina.

4.2.4.4 Difração de raios-X

Essa técnica foi empregada com o objetivo de identificar os compostos cristalinos presentes nas amostras. Para a análise da difração de raios - X por pó, a amostra para a realização do ensaio estava seca e com granulometria inferior a 53 μm . O material foi então compactado no porta amostra e colocado no difratômetro de raios-X das marca Philips-Panalytical e modelo PW1710. As condições de varredura são de 3-60° (2θ), passo de 0,06° e tempo de passo de 3s. O ensaio foi realizado no Laboratório de caracterização de minérios e Materiais do Departamento de Engenharia de Minas – UFMG.

Concluída a coleta dos dados e obtenção do difratograma de raios X, os resultados são interpretados por meio da identificação e da semiquantificação de fases cristalinas presentes. Essa identificação é realizada comparando valores das distâncias interplanares e das intensidades de picos do difratogramas da amostra analisada e uma amostra de referência, utilizando banco de dados de cartas cristalográficas apresentadas em 5.2.1.

4.2.4.5 Termogravimetria

Com o objetivo de verificar a decomposição das amostras submetidas a ações térmicas, foram realizadas análises termogravimétricas na amostra da pasta e na amostra de pasta tratada termicamente à 700° C. As análises foram realizadas, no Laboratório de físico-

Química da PUC MINAS, em um equipamento *DTG-60H Shimadzu*, sob as seguintes condições cadinho de alumina, atmosfera: N_2 (50mL min^{-1}), a amostra foi submetida uma razão de aquecimento de $10^\circ\text{C min}^{-1}$ constante até atingir a temperatura de 1000°C , sendo monitorado seu comportamento ao longo do tempo. Os dados relativos a análise termogravimétricos e suas respectivas derivadas da pasta e da pasta de cimento tratada termicamente são apresentadas em 5.1.4 e 5.3.5.

4.2.4.6 Resistência à compressão

A caracterização mecânica foi realizada por meio do ensaio de resistência á compressão conforme NBR 5739 (ABNT,2018). Os ensaios foram realizados no equipamento *Shimadzu Autograph* modelo AGS-X com capacidade máxima de 300 KN, o carregamento utilizado seguiu as recomendações da norma NBR 5739 (ABNT,2018) de $0,45 \pm 0,15\text{MPa/s}$ e todo controle do ensaio, bem como a captação de dados, foi realizado com apoio de equipamentos computacionais. O ensaio foi realizado na idade de 7 e 28 dias no Laboratório de Materiais Metálicos da UFMG e a quantidade de corpos de prova ensaiada está descrita na Tabela 4.7.

4.2.4.7 Absorção de água por imersão e porosidade

O estudo da absorção de água por imersão foi realizado conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009), com a realização desse ensaio é possível obter os valores de absorção da água, índice de vazios, massa específica da amostra seca, massa específica da amostra saturada e massa específica real.

Para esse trabalho foram determinadas as massas das amostras saturadas, submersas e secas em estufa, conforme norma. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia de Materiais de Construção Civil (DEMC), UFMG. Os valores obtidos da absorção de água por imersão foram obtidos por meio da Equação 1.

$$A_i = \frac{m_s - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

A_i : absorção por imersão, expressa em %;

m_s : massa da amostra saturada em água após imersão em fervura e secagem da superfície, expressa em g;

m_{seca} : massa da amostra seca em estufa, expressa em g.

A porosidade presente nas amostras foi avaliada com análises do índice de vazios seguindo recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2009), os valores alcançados de índice de vazios foi obtido através da Equação 2.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

I_v : Índice de vazios, expresso em %;

m_{sat} : massa da amostra saturada em água após imersão e fervura, expressa em g;

m_s : massa da amostra seca em estufa, expressa em g;

m_i : massa da amostra imersa em água após fervura, expressa em g.

Os valores de absorção por imersão e porosidade são demonstrados no item 5.4.2.2

4.2.4.8 *Microscopia eletrônica de varredura.*

As imagens da microestrutura foram obtidas no microscópio eletrônico de varredura Quanta FEG 3D FEI (MEV-FEG). As amostras foram recobertas com carbono na espessura de 16 nm para que a mostra ficasse condutora. Foram utilizados detectores de elétrons secundários e retroespalhados para obtenção das imagens. A tensão de aceleração utilizada foi de 15 KV. Foram realizadas análises das partículas do cimento CPV-ARI, e do cimento reciclado e também das argamassas.

4.2.4.9 *Resistividade elétrica volumétrica*

A determinação da resistividade elétrica volumétrica seguiu as recomendações da NBR 9204 (ABNT, (2012); IBRACON (2021). Foram moldadas argamassas com traço 1:0,25:3:0,50 (aglomerante, areia ativada, areia normatizada e água) e 2% de bórax nas

amostras que foram produzidas com 25% de cimento reciclado e 50% de cimento reciclado. Para a realização deste ensaio, foram moldadas argamassas com traço 1:0,25:3:0,50 (aglomerante, areia ativada, areia normatizada e água). Os procedimentos de moldagem de corpos de prova foram seguidos conforme a NBR 5738(ABNT, 2015d). As misturas foram então vertidas em moldes cilíndricos medindo (\varnothing 50mm x 100mm) e compactadas em duas camadas adequadamente usando uma mesa vibratória nas duas camadas. Os corpos de prova foram identificados e recobertos com plástico filme e mantidos nos moldes por 24 horas. Finalizado esse período, as amostras foram desmoldadas identificados e submetidos à cura submersa em solução saturada de hidróxido de cálcio à $23\pm 2^{\circ}\text{C}$, conforme recomenda à 5738 (ABNT, 2015d) até a idade de 28 dias para a realização dos ensaios.

Um circuito em série foi utilizado (Figura 4.9), composto por duas resistências elétricas: uma do equipamento e outra da amostra. Foram inseridas duas placas de cobre com palhas de aço umedecidas na superfície de contato entre elas e as amostras, assegurando a condição da corrente elétrica. Após a montagem do equipamento, uma tensão foi aplicada entre as placas (dois eletrodos situados nas superfícies da base e do topo das amostras). Logo, foram realizadas leituras da corrente elétrica que atravessaram a amostra. Esse ensaio foi realizado no LEAT- Laboratório de Extra Alta Tensão da UFMG.



Figura 4.9- Sistema utilizado para o ensaio de resistividade elétrica.

5 RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados sequencialmente os resultados referentes à caracterização da pasta desidratada, à escolha das condições de termoativação, caracterização do cimento reciclado e caracterização das argamassas confeccionadas com cimento reciclado e areia ativada.

5.1 Caracterização da pasta inicial

Os resultados referentes à composição química, granulometria, fases presentes e comportamento térmico da pasta inicial são apresentados a seguir.

5.1.1 Análise química

Na Tabela 5.1 está apresentada a composição química do Cimento CPV-ARI e da pasta produzida para realização desse trabalho. É possível observar que o teor total de CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ e demais compostos presentes na pasta inicial é menor do que os valores observados no CPV-ARI. Em contrapartida, a perda ao fogo da pasta inicial é de 17,6%. Isso está relacionado com a presença de produtos hidratados, como hidróxido de cálcio, C-S-H, etringita e monosulfoaluminato de cálcio hidratado (SILVA, 2018).

Tabela 5.1 - Composição química do CPV-ARI e da pasta inicial

Amostra	Determinações em (%)							
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	LOI
Cimento CPV – ARI	61,80	18,10	4,56	2,66	3,10	0,52	0,55	-
Pasta inicial	57,30	16,40	4,20	1,70	1,60	0,20	0,50	17,6

5.1.2 Análise granulométrica

A Figura 5.1 apresenta os resultados obtidos pela técnica de espalhamento por feixe de laser das amostras da pasta inicial e do cimento CPV-ARI. Na Tabela 5.2 são apresentados os tamanhos granulométricos do D₁₀, D₅₀ e D₉₀ do cimento CPV- ARI e o tamanho dos grãos alcançados após o processo de moagem da pasta inicial.

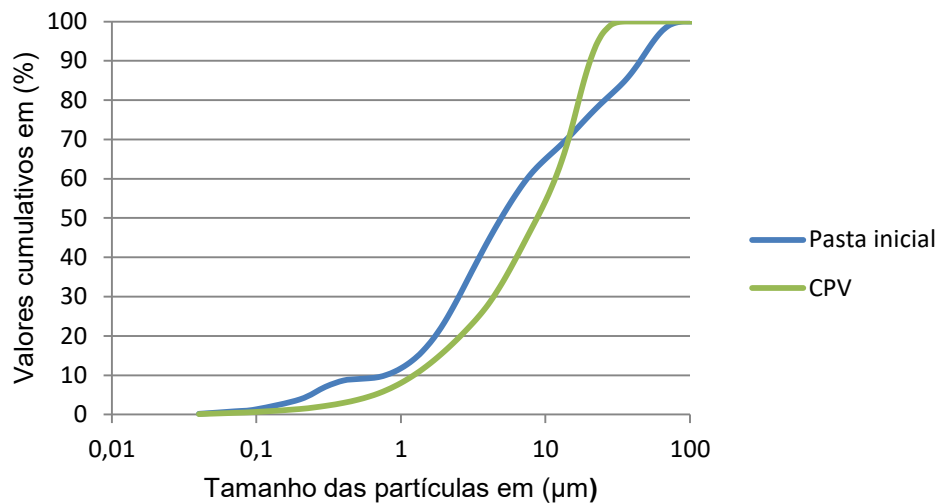


Figura 5.1 – Curva de distribuição granulométrica da pasta inicial e do CPV.

Tabela 5.2 - Dados granulométricos percentuais do Cimento CPV-ARI e da pasta inicial.

Material	D ₁₀ (µm)	D ₅₀ (µm)	D ₉₀ (µm)
*Cimento CPV-ARI	3,00	12,70	30,00
Pasta inicial	0,78	4,94	45,28

*Fonte: SOUZA *et al.*, 2022.

Os resultados indicam que a moagem realizada produziu um pó mais fino do que o cimento CPV-ARI que foi utilizado para a obtenção da pasta inicial. Ao analisá-la, constatou-se que 90% da amostra possui diâmetro abaixo de 45,28 µm, cerca de 50% do total de partículas apresentou dimensão inferior a 4,94 µm, enquanto no CPV-ARI o D₅₀ foi de 12,70 µm e a amostra apresenta cerca de 10% dos diâmetros inferiores a 0,78 µm. Contudo, apesar dessa diferença, decidiu-se considerar que a moagem foi adequada para o propósito deste estudo.

5.1.3 Análise fases presentes por difração de raios-X

As Figura 5.2 e Figura 5.3 apresentam respectivamente os difratogramas do CPV e da pasta inicial. Na amostra pulverizada de cimento Portland CPV (Figura 5.2) são encontrados fases bem definidas como alita, belita, ferrita, celita correspondente a picos principais conforme descritos na literatura (METHA E MONTEIRO, 2014). A calcita encontrada está relacionada a possibilidade de incorporar até 10% de material carbonático como adição mineral para o cimento CPV- ARI (RICARDO SANTOS NOBRE *et al.*, 2022).

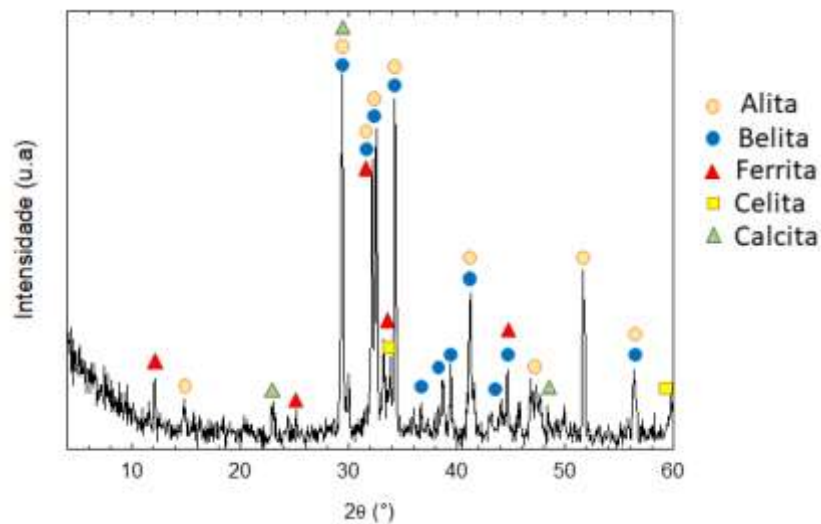


Figura 5.2 – Difratograma do cimento CPV

No difratograma da pasta inicial (Figura 5.3) analisada aos 28 dias, além de serem identificadas fases presentes no difratograma do cimento CPV, foram identificadas também a presença de AFm, portlandita e etringita constituintes presentes na pasta inicial.

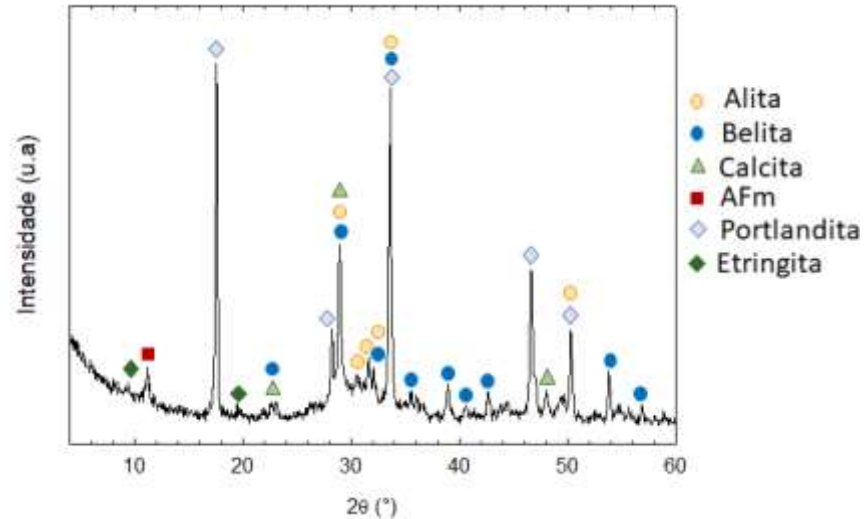


Figura 5.3 - Difratograma da pasta inicial relação a/c 0,5.

5.1.4 Termogravimetria

Na Figura 5.4 pode-se visualizar as curva de Análises Termogravimétricas (TGA), Análise Térmicas Diferenciais (DTA) e as curvas derivadas da TGA (DrTGA) da pasta inicial. E na Tabela 5.3 estão listadas as perdas de massa mais relevante obtidas da análise termogravimétrica da pasta inicial.

São observados cinco eventos relacionados à perda de massa dos compostos hidratados da pasta do CPV-ARI. O primeiro está relacionado à liberação de água evaporável e uma porção da água quimicamente vinculada e o segundo pico ocorre à decomposição da gipsita e da etringita, acompanhada pela perda de água de uma parte dos hidratos de carboaluminatos. Verifica-se também a perda de água ligada devido à decomposição do C-S-H e dos hidratos de carboaluminatos. Já no terceiro pico a perda de massa está relacionada à desidroxilação da portlandita e no quinto pico a perda de massa se dá pela descarbonatação do carbonato de cálcio. (ALARCON-RUIZ *et al.*, 2005).

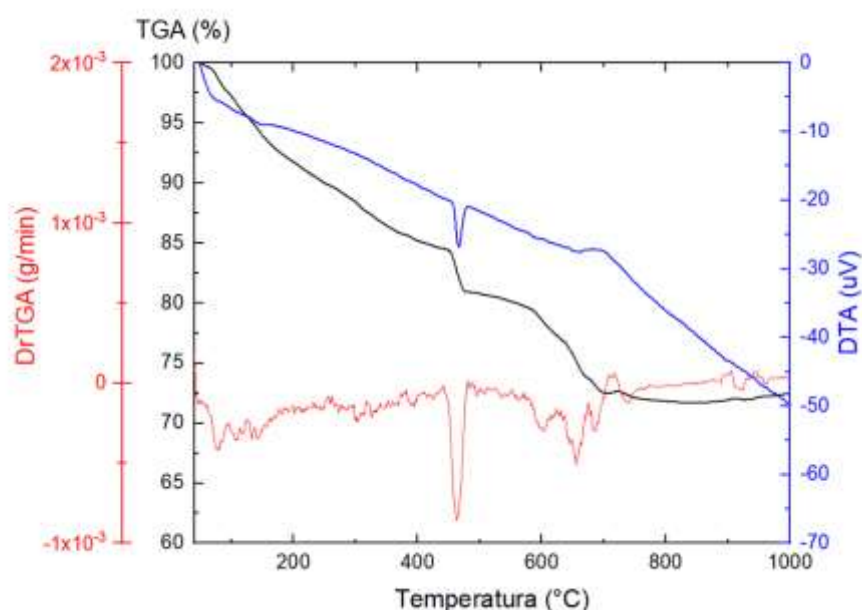


Figura 5.4 - Curva correspondente a TGA, DrTGA e DTA da pasta inicial.

No gráfico pode ser observado que no início do processo de perda de massa inferior à 100°C está relacionado à perda de água livre, a decomposição do gesso e da etringita, perda de água adsorvida pelos produtos de hidratação. Na faixa de 440-500°C esse principal pico é atribuído à desidratação do hidróxido de cálcio. Ao longo desses estágios, observa-se gradativamente a liberação de água que está ligada ao C-S-H. A perda de massa entre 500°-800°C da amostra representa ao processo de descarbonatação e entre 800°C e 1000°C nota-se uma perda bem inferior do processo de decomposição gradativa sinalizando o término do processo de desidratação. Ao final do tratamento térmico da pasta inicial foi observado uma perda de massa de 29,3% de sua massa inicial.

Tabela 5.3 – Dados termogravimétricos da pasta inicial

Material	Faixa de temperatura (°C)	Perda de massa em (%)
Pasta inicial	20-100	3,0
	100-440	12,5
	440-500	4,4
	500-800	9,2
	800-1000	0,2
	Total 20 – 1000	29,3

Na Tabela 5.3 observa-se picos mais expressivos de perdas de massa na faixa de temperatura de 100°C à 440°C e entre 500°C -800°C. E em todas as fases também ocorre perda de água quimicamente ligada ao C-S-H (TAYLOR,1997)

5.2 Avaliação das condições de tratamento térmico das pastas

Os dados que permitiram estabelecer a melhor condição de desidratação das pastas se basearam na análise da perda de massa, fases presentes e resistência à compressão das pastas tratadas termicamente em diferentes condições.

5.2.1 Perda de massa

Na Tabela 5.4 podem ser observados os dados obtidos referentes à perda de massa das pastas submetidas as temperaturas de 500°C, 600°C e 700°C onde foram respectivamente submetidas ao resfriamento rápido (RR) e resfriamento lento (RL).

Tabela 5.4 - Perda de massas das amostras submetidas a diferentes temperaturas

Temperatura alvo	Tipo de resfriamento	Massa inicial	Massa final	Perda de massa (%)
500°C	Rápido	300g	200,5g	33,2
500°C	Lento	300g	239,4g	20,2
600°C	Rápido	300g	238,4g	20,5
600°C	Lento	300g	257,6g	14,1
700°C	Rápido	300g	231,5g	22,8
700°C	Lento	300g	218,9g	27,0

As transformações que ocorrem devido à indução por aquecimento da pasta de cimento resultam na perda de peso devido à evaporação da água livre e também dos produtos de hidratação conforme as temperaturas a que a amostra é submetida (ALONSO; FERNANDEZ, 2004). A maior perda de massa foi de 33,17% com a utilização da

temperatura alvo de 500°C e com resfriamento rápido. Essa maior perda de massa pode estar relacionada a absorção de umidade relativa do ar durante o processo de queima. Uma menor perda de massa foi observada na temperatura alvo de 600°C com resfriamento lento cerca de 14,1%. Observa-se que as amostras submetidas a um resfriamento lento tiveram menos perda de massa do que as que do que aquelas submetidas a um resfriamento rápido, exceto à amostra submetida a temperatura alvo de 700°C. De uma maneira geral as amostras submetidas a tratamento térmico tiveram uma perda de massa que variou de 20,2% a 27,0%.

Segundo relatado na literatura (SUH *et al.*, 2020) observaram uma diminuição gradual de massa ao aquecer pastas de cimento a 200°C, 500°C e 800°C, com uma variação de 16,78% à 25,71%. Sob essa perspectiva, as outras amostras submetidas ao tratamento térmico se encontram próximos aos valores de perda de massa apresentado pelos autores.

Na Figura 5.5 (a) é apresentada uma imagem ilustrativa da pasta inicial e na Figura 5.5 (b) após o queima a 700°C e com resfriamento rápido. O craqueamento observado na amostra após ser retirado do forno é um indicativo da evaporação da água livre presente.

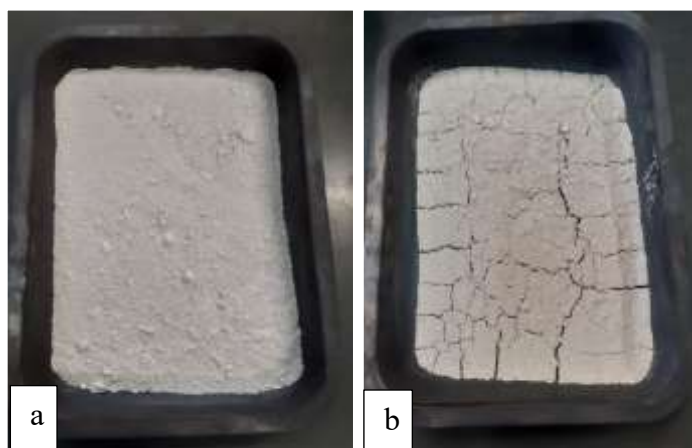


Figura 5.5- Material antes de levar ao forno (a) e material após ser submetido a tratamento térmico de 700°C (b).

5.2.2 Análise das fases cristalinas por difração de raios - X

Nesse estudo utilizou-se a análise de difração de raios-X (DRX) qualitativa, com o objetivo de identificar as fases presentes nas amostras em questão. A Figura 5.6 apresenta os difratogramas correspondentes às pastas tratadas termicamente a 500° C e submetidas a um

resfriamento lento (RL) e resfriamento rápido (RR). Pastas tratadas termicamente a 600° C e realizado o resfriamento lento (RL) e o resfriamento rápido (RR) e pastas tratadas termicamente a 700°C, e realizado o resfriamento lento (RL) e resfriamento rápido (RR). Na análise apresentada são identificados os seguintes compostos, portlandita (CH), calcita (CaCO₃), α' -C₂S, β -C₂S e C₃S. Sendo esses picos referentes encontrados em compostos hidratados e anidros do cimento.

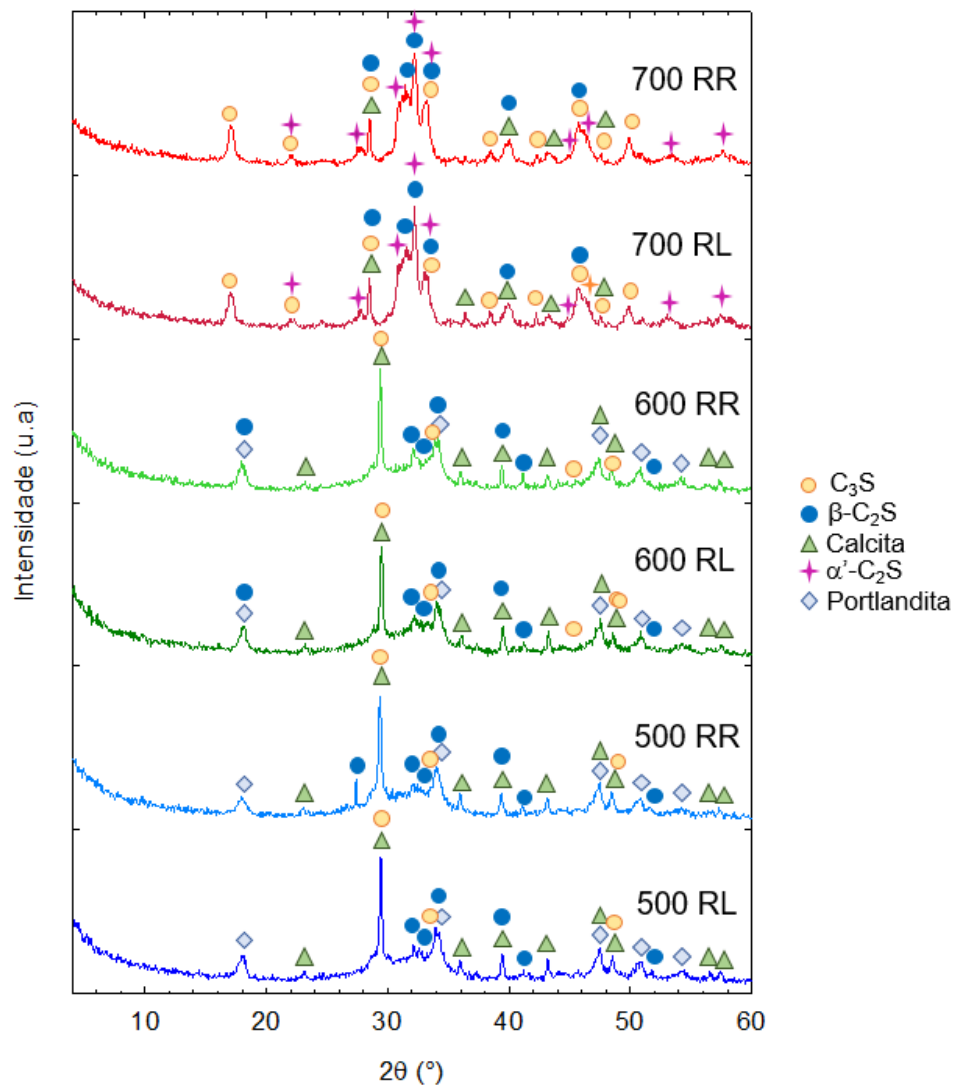


Figura 5.6 - DRX da pasta de cimento submetida a tratamento térmico de 500° C, 600°C e 700°C e submetida a resfriamento lento (RL) e resfriamento rápido.

Em todas as amostras analisadas e para os dois tipos de resfriamento, nota-se a presença de calcita. O mesmo é observado por (BANDEIRA, 2020), sendo a existência da calcita decorrente de produtos carbonatados provenientes da pasta de origem e de uma provável

carbonatação da cal livre durante o tratamento térmico realizado. Além disso, ao analisar a amostra tratada a 500°C já é possível confirmar a decomposição total da etringita.

Embora a desidroxilação total do CH no aglomerante reciclado era esperado acima de 500°C. Isso não foi verificado nas amostras com tratamento a 500°C e 600°C estudadas, mesmo havendo redução nas intensidades dos picos de CH identificáveis nas temperaturas analisadas. No entanto, o pico característico do CH com 2θ de 34,25° não foi verificado na amostra com tratamento térmico a 700°C.

Além disso, não são observadas alterações consideráveis nos difratogramas nas temperaturas de 500° C e 600°C e nem mesmo com a forma de resfriamento. Contudo, a 700° C se observa uma leve diferença entre 30° e 35° (2θ). Nota-se que os picos estão mais abertos, indicando provável diminuição da cristalinidade dos compostos. Isso pode estar associado a presença de picos de α' -C₂S (polimorfo de C₂S). A identificação do α' -C₂S foi determinada pelos picos característicos a 32,5 e 33,2°. Serpell; Lopez, (2015) também observaram a formação desses picos em cimentos reciclados obtidos com temperaturas de 660°C a 900°C. Contudo, temperaturas mais altas favorece a formação de CaO. Nos difratogramas da Figura 5.6 também são apresentados picos relacionados ao β -C₂S e C₃S. Levando em consideração todas as informações, a condição de tratamento térmico a 700°C é considerada a mais vantajosa, devido a presença de mais fases reativas, como a formação do α' -C₂S. A produção de polimórficos reativos como os α' -C₂S em baixa temperatura é creditada ao cimento reciclado (RC) ser ativado de silicatos de cálcio nanocristalinos de alta área superficial (LINK *et al.*, 2015). Note que, os α' -C₂S são formados pelos α'_L -C₂S e α'_H -C₂S, ambos com estrutura ortorrômbica. Além disso, o α'_L -C₂S é um termo genérico para uma variante complexa do α'_H -C₂S (TAYLOR, 1997).

5.2.3 Resistência à compressão

Na Figura 5.7 são apresentados os valores médios e os desvios padrões da resistência à compressão aos 28 dias de idade para argamassas produzidas com cimento tratado a diferentes temperaturas 500°C, 600°C e 700°C com resfriamento rápido (RR) e resfriamento lento (RL) e com areia normatizada. A resistência à compressão máxima foi atingida com as amostras obtidas com cimento tratado termicamente a 700°C com

resfriamento rápido. As argamassas confeccionadas com cimento tratado termicamente a 500°C e submetidas a um resfriamento lento, obtiveram uma menor resistência.

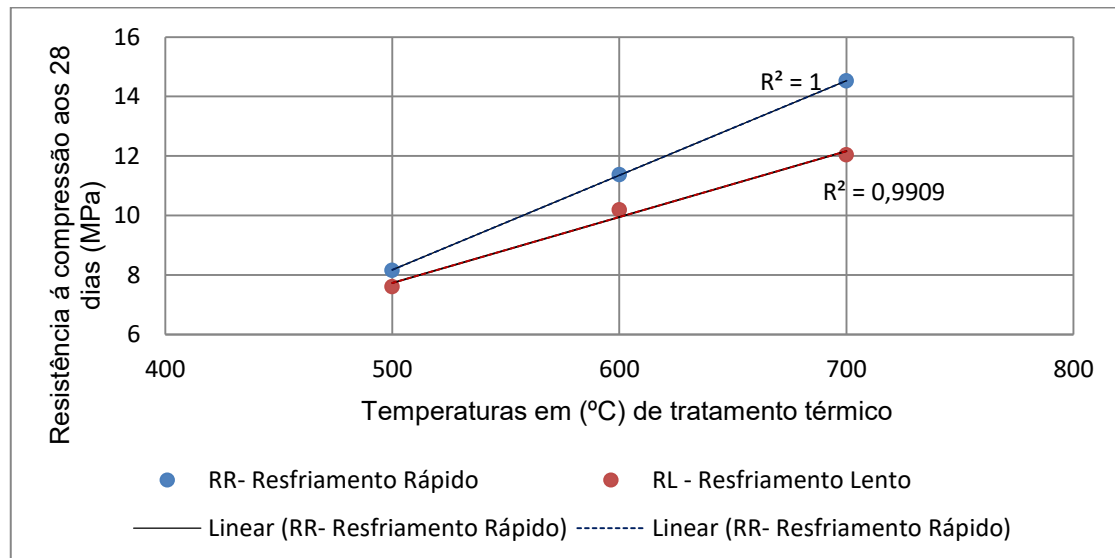


Figura 5.7 – Resistência média à compressão aos 28 dias de argamassas produzidas com cimento tratado termicamente à diferentes temperaturas.

Pesquisas indicam que a temperatura de ativação é o fator mais relevante no processo de hidratação e durabilidade das pastas confeccionadas com cimento reciclado. O impacto da temperatura nos resultados da resistência média à compressão não ocorre de forma linear, sinalizando que existe uma temperatura ótima. Um aumento do ganho de resistência pode estar relacionado a uma maior concentração relativa de α' -C₂S ao comparar com o β -C₂S por ser menos reativo (SERPELL; LOPEZ, 2013). Nesse trabalho, nota-se a presença de fases de α' -C₂S apenas na amostra tratada termicamente à 700°C. De uma maneira ampla, a partir de resultados de vários estudos e combinação de fatores propõe-se uma temperatura de tratamento térmico variando de 650°C- 750°C (XU *et al.*, 2022)

É importante destacar que, a quantidade de água utilizada para a produção das pastas com o cimento reciclado foi a relação água/cimento de 1,0, uma vez que esse cimento demanda mais água e a hidratação acontece rapidamente (SUH *et al.*, (2020). Análises visuais, mostraram que ambas as amostras apresentaram comportamento similares no estado fresco.

Considerando os dados de perda de massa e difração de raios-X, optou-se pela escolha do tratamento de desidratação a 700° C seguido de resfriado rápido, devido a maior resistência à compressão obtida dentre as amostras analisadas e formação da fase mais reativa α' -C₂S. A esse material deu-se o nome de cimento reciclado (RC).

5.3 Caracterização do cimento reciclado

Os dados referentes a caracterização do cimento reciclado obtido por desidratação a 700° C e submetido à um resfriamento rápido são apresentados juntamente com os obtidos para o cimento CPV- ARI, que foi o utilizado para a obtenção do cimento reciclado. Essa caracterização engloba análises química, granulométrica, mineralógica e térmicas.

5.3.1 Análise química

Na Tabela 5.5 está apresentada a composição química, obtidas por meio de fluorescência de raios-X, do cimento reciclado, do cimento CPV e da pasta inicial. Conforme a análise química das amostras apresentadas, é possível observar que o CaO, SiO₂, Al₂O₃, apresentam nessa sequência os maiores constituintes das amostras sendo que em conjunto esses constituintes representam 86,26% do cimento reciclado, 84,46% dos constituintes do cimento CPV-ARI e 77,90% da pasta inicial.

Tabela 5.5- Composição química do cimento reciclado, CPV e da pastas a ser desidratada

Determinações em (%)								
Amostras	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	LOI
Cimento reciclado (tratado termicamente à 700° C)	59,05	22,64	4,57	1,31	0,63	0,43	0,88	9,57
Cimento CPV – ARI	61,80	18,10	4,56	2,66	3,10	0,52	0,55	-
Pasta inicial	57,30	16,40	4,20	1,70	1,60	0,20	0,50	17,6

Conforme era esperado, o valor de perda ao fogo da pasta inicial é maior do que o cimento reciclado e isso se deve ao fato da amostra não ter passado por um tratamento térmico antes de ser submetida ao ensaio. Outro fator, pode estar relacionado à exposição do material ao ambiente, o que leva a absorção de umidade e sofre maior carbonatação (SILVA, 2018) a partir dos dados apresentados pode-se ter indicativos que o tratamento térmico não muda a composição química do material. Fato esse também observado por (BANDEIRA, 2020).

5.3.2 Análise granulométrica

A Figura 5.8 apresenta os resultados obtidos pela técnica de espalhamento por feixe de laser das amostras, do cimento CPV-ARI, da pasta inicial e do cimento reciclado. São apresentados na Tabela 5.6, os valores correspondentes ao D10, D50 e D90 das respectivas amostras são descritas. Nota-se que os valores do D10 e D50 da pasta inicial e do cimento reciclado foram inferiores aos do cimento Portland CPV-ARI e que o processo de cominuição da pasta inicial foi menor do que o realizado para a produção do cimento CPV-ARI.

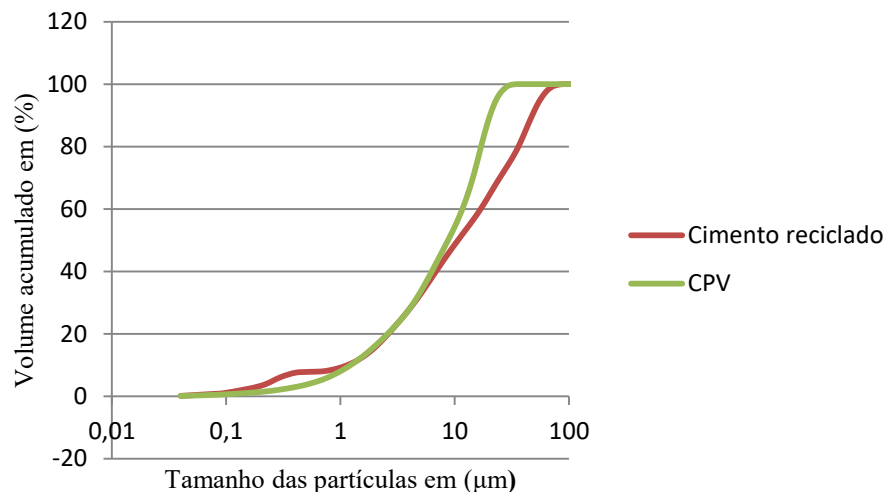


Figura 5.8- Curva de distribuição granulométrica do CPV e do cimento reciclado.

Tabela 5.6- Dados granulométricos percentuais

Material	D ₁₀ (µm)	D ₅₀ (µm)	D ₉₀ (µm)
*Cimento CPV-ARI	3	12,7	30
Pasta inicial	0,78	4,94	45,28
Cimento reciclado(tratado termicamente à 700° C)	0,73	10,69	17,18

*Fonte: SOUZA *et al.*,2022.

Estudos de (SERPELL; LOPEZ, 2015) apontam que a redução da quantidade de partículas de maior tamanho nos cimentos reciclados pode ser atribuída ao fracionamento das partículas maiores durante o tratamento térmico. Sendo esse processo decorrente das tensões internas geradas pela expansão térmica diferencial entre as fases hidratadas e anidra presente no interior da partícula. E esse fenômeno, resultante das variações de

temperatura, pode desencadear a fragmentação das partículas maiores, contribuindo assim para a diminuição da contagem de partículas grandes no cimento reciclado.

5.3.3 Análise de fases presentes por difração de raios – X (DRX)

Na Figura 5.9 são apresentadas difrações do CPV e do cimento reciclado utilizado nesse estudo. O difratograma do CPV diferencia-se do difratograma do cimento reciclado por apresentar componentes do clínquer bem definidos, no gráfico seus picos aparecem mais estreitos o que indica uma maior cristalinidade dos compostos identificados (FILIPE; LEAL, 2021).

No gráfico relativo ao cimento reciclado são identificados os seguintes compostos C_3S , β - C_2S , calcita ($CaCO_3$), α' - C_2S . Nota-se que os picos são menos definidos em relação ao CPV, observa-se uma maior abertura no difratograma sendo mais expressivos entre 30° à 35° (2θ), a intensidade dos picos também diminui indicando uma redução de sua cristalinidade. Essa presença do halo no difratograma indica a presença de fases com estruturas cristalinas mais abertas, como por exemplo a formação de α' - C_2S .

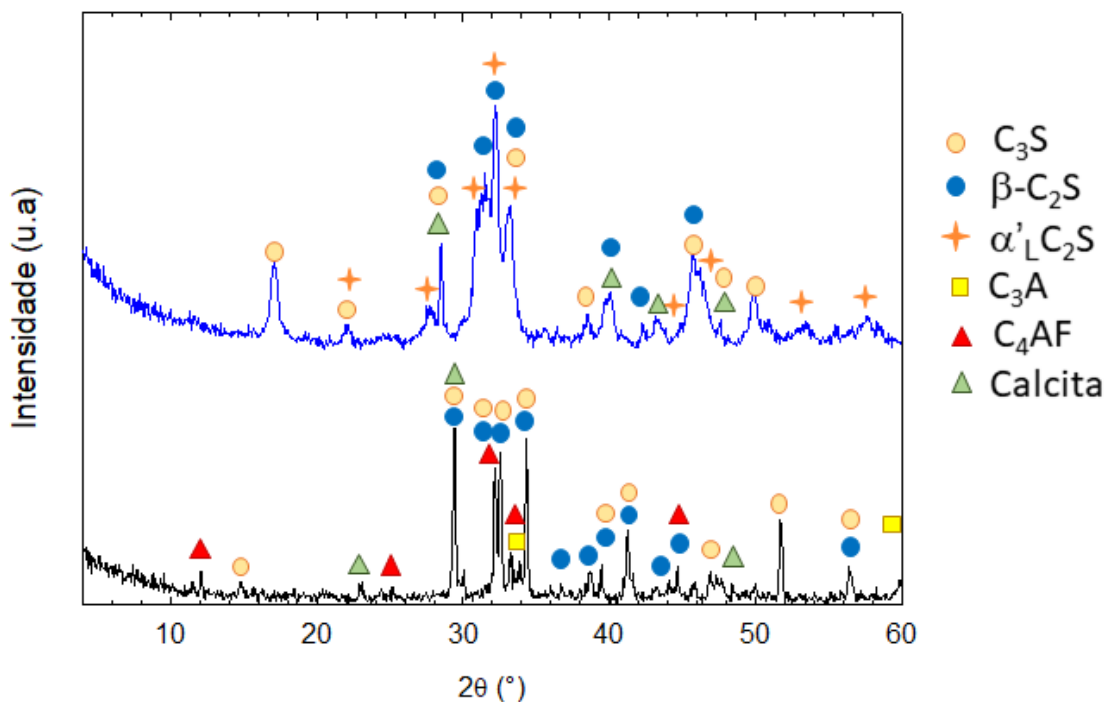


Figura 5.9 - Difratograma do pó CPV e do pó de cimento reciclado

5.3.4 Termogravimetria

Na Figura 5.10 são apresentadas as curva de Análises Termogravimétricas (TG), Análise Térmicas Diferenciais (DTA) e as curvas derivadas da TGA (DrTGA) do cimento reciclado. Na Tabela 5.7 resumem-se os valores em porcentagens relativos da perda de massa do cimento reciclado e um comparativo com a pasta inicial. O cimento reciclado no qual passou por tratamento térmico à 700°C, apresentou perdas de massa menos expressivas do que a pasta inicial.

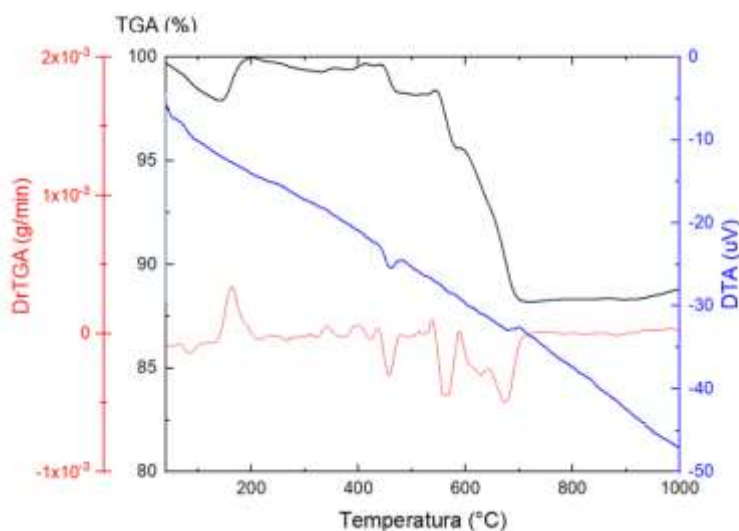


Figura 5.10- Curva correspondente a TG e DTG do cimento reciclado.

Tabela 5.7 – Dados termogravimétricos Cimento reciclado (tratado termicamente à 700° C) e um comparativo com a pasta inicial.

Faixa de temperatura (°C)	Pasta inicial (%)	Cimento reciclado (tratado termicamente à 700° C) (%)
20-100	3,0	2,4
100-440	12,5	-
440-500	4,4	1,2
500-800	9,2	9,8
800-1000	0,2	0
Total 20 – 1000	29,3	13,4

Comparando-se os dados termogravimétricos obtidos (Tabela 5.7), observa-se que na pasta inicial apresenta uma maior perda de massa entre 100°C- 440°C (12,5%), relacionada a perda de água livre da pasta. No cimento reciclado (tratado termicamente à 700° C) a perda de massa é mais expressiva entre 500°C – 800°C (9,8%) relacionada a descarbonatação de carbonatos. Além disso, a redução de massa foi 45,73% inferior no cimento reciclado ao se comparar com a pasta inicial. Isso está relacionado ao fato dessa amostra já ter sido submetida a um processo de tratamento térmico.

Alonso e Fernandes (2004) ao investigarem pastas de cimento submetidas a altas temperaturas, observaram que a amostra submetida à 750°C, apresentou perdas mínimas de peso em todas faixas de temperaturas do ensaio de termogravimetria, indicando uma possível transformação completa da pasta.

5.3.5 Morfologia

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) representa uma técnica visual de grande importância para a identificação dos produtos de hidratação do cimento e de sua análise morfológica. Nas Figura 5.11 (a) e (b) são apresentadas grãos do cimento Portland CPV e nas Figura 5.11 (c) e (d) grão do cimento reciclado.

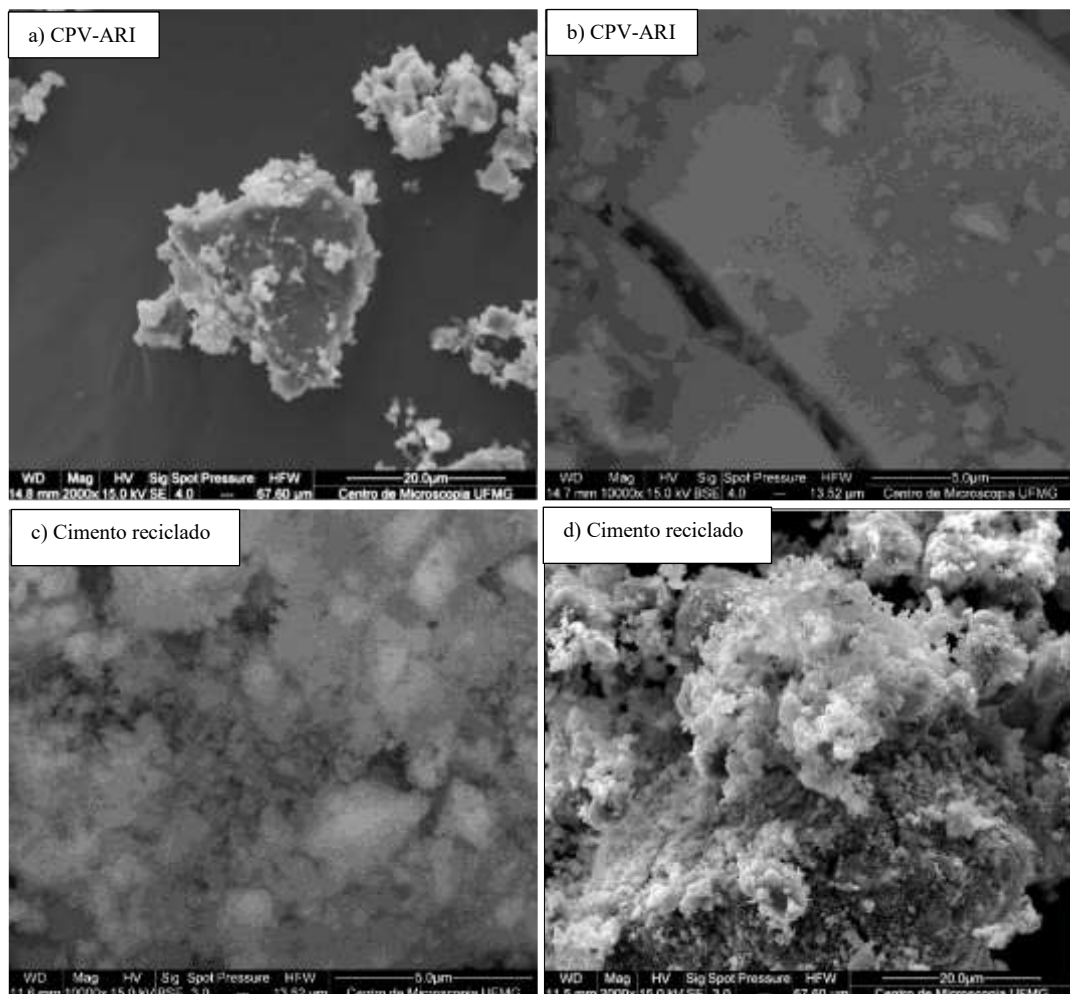


Figura 5.11– Microestrutura do grão de cimento Portland CPV-ARI (a) e (b) e microestrutura do grão de cimento reciclado submetido à tratamento térmico de 700°C (c) e (d).

Nas imagens obtidas, observa-se que o cimento reciclado possui uma maior irregularidade e rugosidade morfológica ao se comparar com o cimento CPV-ARI. Conseqüentemente, as

partículas de cimento reciclado apresentam elevada porosidade e área superficial (BOGAS, José Alexandre; CARRIÇO; TENZA-ABRIL, 2020). Estudos mostram que as essas características morfológicas do cimento reciclado são responsáveis pela elevada demanda de água e por sua reduzida trabalhabilidade (FILIPE; LEAL, 2021).

5.4 Caracterização das argamassas

Os resultados dos ensaios *Flow table*, absorção de água por imersão, porosidade, resistência à compressão assim com por MEV para as argamassas produzidas com CPV-ARI e cimento reciclado são apresentadas na sequência.

5.4.1 *Flow Table*

Os respectivos índices de consistência obtidos para as argamassas confeccionadas com CPV-ARI e cimento reciclado utilizando fator a/c 0,5 e a/c 0,7 são apresentados a seguir (Tabela 5.8). Os resultados mostram que o traço de referência e o traço com 75% de cimento reciclado apresentaram o menor espalhamento (28 cm). E o traço com maior espalhamento foi o traço contendo 50% de cimento reciclado e onde foi utilizado a/c 0,7. Contudo, ambas as amostras estiveram entre os valores estabelecidos para o abatimento determinado de 300 ± 30 mm.

Tabela 5.8 – Índice de consistência das argamassas produzidas com CPV-ARI e cimento reciclado

Amostra	Fator a/c	Índice de consistência (mm)	Teor de aditivo (%)
CPV-ARI	0,5	280	0,5
25 RC (25% de cimento reciclado)	0,5	310	1,88
50 RC (50% de cimento reciclado)	0,5	300	3,5
50 RC (50% de cimento reciclado)	0,7	320	0,7
75 RC(75% de cimento reciclado)	0,7	280	1,5
100 RC (100% de cimento reciclado)	0,7	310	5

Com base nos dados apresentados, nota-se que ao aumentar a proporção de cimento reciclado nos traços, ocorre uma diminuição da trabalhabilidade, resultando em uma maior demanda de água. Segundo estudos desenvolvidos por (ZANOVELLO *et al.*, 2023), a elevada necessidade de água dos cimentos reciclados está intimamente relacionada à sua morfologia e área superficial, que por sua vez apresentam poros abertos acessíveis nos grãos. Isso pode ser observado nas imagens de MEV apresentadas na seção 5.3.5.

5.4.2 Absorção por imersão e porosidade

Os dados obtidos no ensaio de absorção por imersão aos 7 e 28 dias de amostras de CPV e cimento reciclado submetidos a cura saturada e cura em autoclave são apresentados na Figura 5.12. Com esses dados foi possível a determinação da porosidade conforme apresentado na Figura 5.13

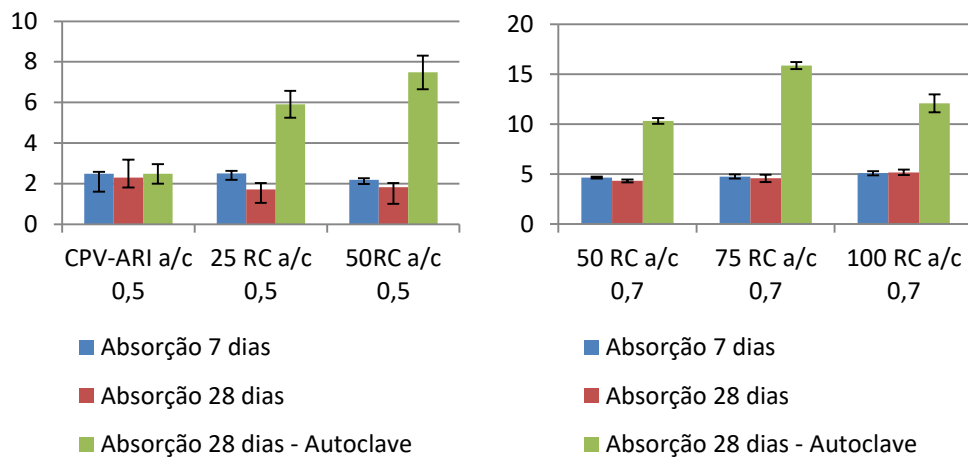


Figura 5.12 - Resultados dos ensaios obtidos por absorção de água por imersão das argamassas confeccionadas com CPV-ARI e cimento reciclado.

Os resultados indicam que houve uma redução da absorção de água na idade de 28 dias em comparação com 7 dias para todas as amostras com cura normal, menos para as substituições de 75% e 100% de cimento reciclado onde esses valores estiveram bem próximos. Além disso, exceto para a amostra referência (CPV com a/c = 0,5), houve aumento na absorção de água devido a cura em autoclave.

Na idade de 07 dias o composto cimentício ainda está no início do processo de hidratação o que justifica sua absorção ser maior do que aos 28 dias. No entanto, o processo de hidratação continua com o tempo, modificando a microestrutura do compósito. Nesse cenário, a medida que os teores de cimento reciclado são aumentados e acrescenta-se água aos traços ocorre um aumento da absorção de água (MAZZARO, 2022)

Nas argamassas que foram levadas à autoclave, para todas as condições demonstradas, houve um aumento significativo na absorção de água. E esses valores se tornam mais

expressivos para a relação a/c de 0,7, sendo o observado com a substituição de 75% de cimento reciclado, o que também se relaciona com o menor valor de resistência à compressão conforme apresentado na seção 5.4.3.

Os valores da porosidade estão apresentados na Figura 5.13. Os resultados obtidos demonstram que para uma relação água/cimento de 0,5, para cura saturada e idades de 7 e 28 dias a porosidade esteve próxima. No entanto, para relação água/cimento de 0,7 quanto maior foi a substituição de cimento reciclado, maior também foi a porosidade do traço analisado. Ao observar as amostras de argamassas que foram submetidas sob condições de cura saturada o valor mais significativo foi observado na amostra contendo 100% de cimento reciclado, o que se repetiu também para a cura aos 28 dias, esses valores podem estar relacionados a maior relação água/cimento utilizada nessas amostras.

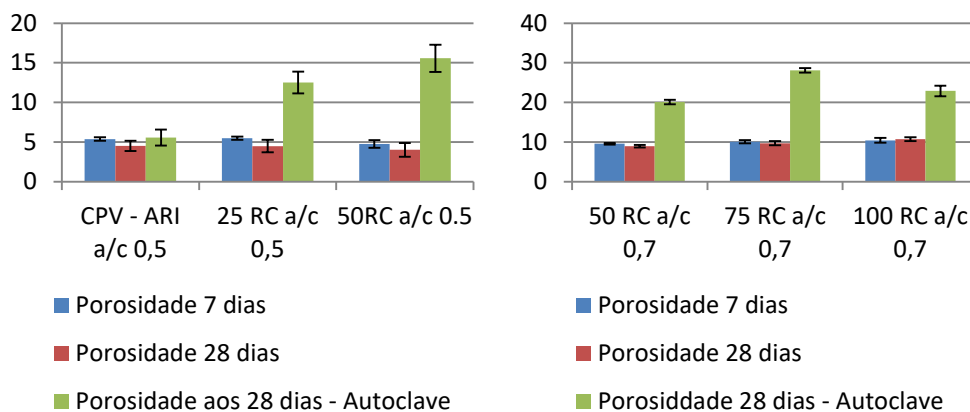


Figura 5.13- Resultados obtidos do ensaio de porosidade das argamassas confeccionadas com CPV-ARI e cimento reciclado.

As amostras que foram submetidas a cura em autoclave aos 28 dias apresentaram maiores valores de porosidade em todas as condições analisadas e esse valor foi crescente a medida que o teor de cimento reciclado das amostras foi aumentado. Esse valor foi mais significativo para a amostra contendo 75% de cimento reciclado.

5.4.3 Resistência à compressão

Na **Figura 5.14** e na Tabela 5.9 e na Tabela 5.10 estão apresentados os resultados de resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias para as argamassas produzidas com CPV, com 25% e 50% de cimento reciclado, onde as amostras com idade de 7 dias foram submetidas a cura saturada e as amostras com 28 dias foram submetidas a cura saturada e a cura em autoclave, todas com relação água/cimento de 0,5 e 0,7. Ao utilizar a relação água/cimento de 0,5 procurou-se analisar o teor máximo de substituição do cimento Portland CPV-ARI por cimento reciclado. Na idade de 7 dias, praticamente não se observa influência do uso de cimento reciclado. Aos 28 dias, observa-se que a amostra com 50% de cimento reciclado apresentou o maior ganho de resistência (48,9 MPa), com aumento de aproximadamente 15% em comparação a amostra referência (41,9 MPa).

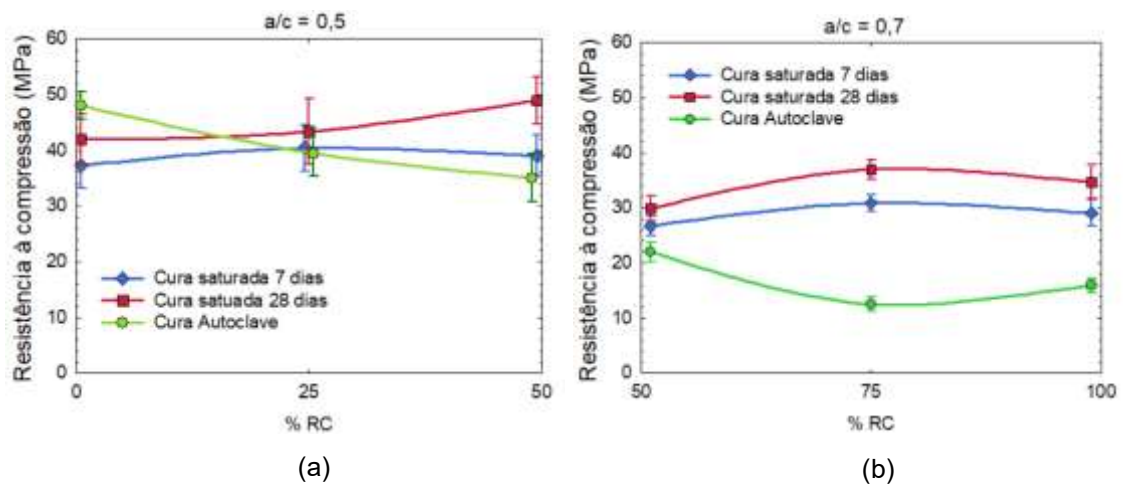


Figura 5.14 – Resistência média à compressão das argamassas aos 7 e 28 dias com a/c 0,5(a) e a/c 0,7(b).

Tabela 5.9 – Valores médios de resistência à compressão

Resistência à compressão a/c 0,5							
Cura	Idade	RC0 (MPa)	S.D	RC25 (MPa)	S.D	RC50 (MPa)	S.D
Normal	7	37,21	4,01	40,39	4,12	39,06	3,66
	28	41,95	4,53	43,35	5,86	48,90	4,25
Autoclave	28	48,00	2,44	39,45	4,03	35,07	4,26

Tabela 5.10 - Valores médios de resistência à compressão

Resistência à compressão a/c 0,7							
Cura	Idade	50 RC (MPa)	S.D	75 RC (MPa)	S.D	100 RC (MPa)	S.D
Normal	7	26,68	1,70	30,86	1,44	29,02	2,41
	28	29,87	2,34	36,96	1,81	34,67	3,10
Autoclave	28	21,98	1,78	12,50	1,38	15,89	1,33

Aos 28 dias a amostra confeccionada sem cimento reciclado (RC0) e curada em autoclave, apresentou o maior ganho de resistência à compressão, à medida que foi utilizado cimento reciclado para substituição de CPV observa-se uma redução nesses valores sendo o menor valor registrado com 50% de cimento reciclado (RC50) correspondendo a 35,07 MPa.

As argamassas moldadas com relação água/cimento de 0,7, contendo 50%, 75% e 100% de cimento reciclado aos 7 dias as amostras foram submetidas a cura saturada e aos 28 dias foram submetidas a cura saturada e em autoclave. Nas condições em que foi utilizada relação água/cimento de 0,7, buscou-se avaliar o teor máximo de cimento reciclado que poderia ser utilizado em argamassas. Em todos os casos, observa-se um ganho nos valores de resistência à compressão aos 28 dias em relação aos 7 dias, para condições de cura saturada. Na idade de 7 dias, observa-se que o menor valor de resistência à compressão foi obtido na amostra com 50% de cimento reciclado (26,7 MPa) e com valores próximos a 30 MPa para as amostras 75RC e 100RC.

Além disso, o maior valor foi obtido na amostra RC75 aos 28 dias, na qual, esse valor é aproximadamente 19,2% superior ao observado na argamassa feita com 50% de cimento reciclado (RC50) e praticamente o mesmo da argamassa confeccionada com 100% de cimento reciclado (RC100).

No estudo conduzido por (CARVALHO, 2020) foram analisados como a temperatura de ativação afeta as características do cimento reciclado e as propriedades das pastas produzidas por ele. Foram confeccionados cimentos reciclados ativados nas temperaturas entre (400-900°C). De uma maneira geral, foi observado que as pastas com cimento reciclado demandaram mais água para manter a mesma consistência, podendo alcançar de 2 a 3 vezes mais água do que o necessário para fazer pastas com cimento comum. No caso das pastas feitas com cimento reciclado tratado a 700°C, a relação água/cimento de 0,72 foi utilizada. Contudo, foi observado que a resistência máxima alcançada aos 28 dias foi de 19,2 MPa em pastas com uma relação água/cimento de 0,72 e com utilização de cimento reciclado tratado a 650°C. Por outro lado, conforme destacado por (XU *et al.*, 2022) uma boa pasta de cimento termicamente ativado pode atingir uma resistência média à compressão de 32 MPa aos 28 dias. No presente trabalho, foi obtido um valor em torno de 35 MPa, com fator a/c de 0,7 e com idade de cura de 28 dias.

Ao analisar os valores de resistência à compressão obtidos pelas argamassas submetidas ao processo de cura em autoclave é possível observar uma queda nos valores de resistência em comparação com a cura saturada, aos 28 dias. A queda foi mais expressiva nas argamassas produzidas utilizando 75% de cimento reciclado (RC75) onde esses valores alcançaram aos 28 dias 12,50 MPa.

Portanto, nota-se que a escolha do processo de cura aparenta exercer um papel significativo no desenvolvimento da resistência à compressão dos compostos que utilizam cimento reciclado em sua composição. Sendo assim, observa-se que a cura saturada é mais favorável do que a cura em autoclave quando relacionamos ao ganho de resistência mecânica. No trabalho de (BROUGHAM *et al.*, [s. d.]) também foi verificada a queda de resistência mecânica após a cura em autoclave com utilização de aglomerante alternativo. Contudo, o material utilizado foi apenas moído e não termoativado.

5.4.4 *Análise das fases presentes nas pastas submetidas a cura saturada e cura em autoclave*

Para identificar os produtos hidratados formados foi realizada DRX das pastas de cimento. A escolha de analisar as pastas ao invés das argamassas foi devido a presença do quartzo. As argamassas contêm areia quartzosa, cujos picos se sobressaem muito no difratograma, dificultando a análise dos compostos hidratados formados. Na **Figura 5.15** e **Figura 5.16** são apresentadas os difratogramas realizados aos 28 dias e submetidos a cura normal. As principais fase cristalinas presentes e identificadas foram β -C₂S, calcita, quartzo, AFm, portlandita e etringita, esses picos estão relacionados a fases reidratadas e anidras (DE ARAÚJO *et al.*, 2017).

Na **Figura 5.15** observa-se picos mais intensos de portlandita na amostra contendo 25% de cimento reciclado, nota-se também picos relacionados à β -C₂S próximos a 30° 34° (2 θ) para todas as amostras, atribuídas a fases de silicatos não hidratados, verificado também no estudo de (DE ARAÚJO *et al.*, 2017).

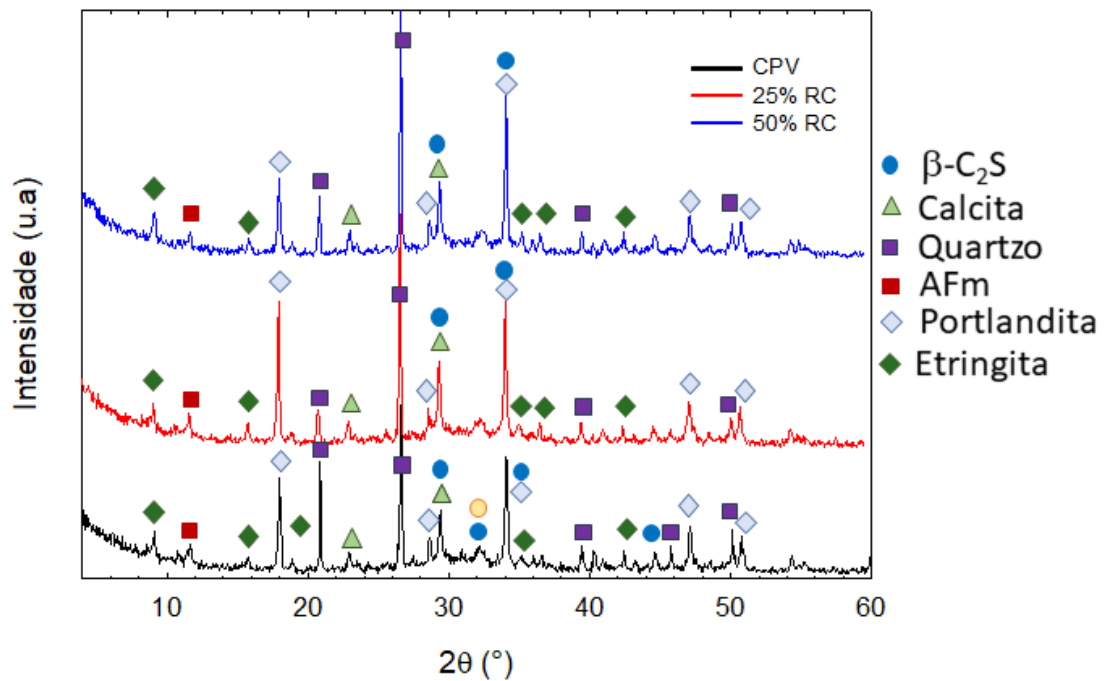


Figura 5.15 – Difração da pasta confeccionada com CPV, com 25% de cimento reciclado e com 50% de cimento reciclado e relação água/cimento de 0,5.

Na **Figura 5.16** nota-se que os picos relacionados a portlandita são mais intensos na amostra contendo 50% de cimento reciclado, já os picos relacionados à β -C₂S são observados nas amostras contendo 50% e 75% de cimento reciclado, na amostra contendo 100% de cimento reciclado não observa-se picos relacionados à fase AFm.

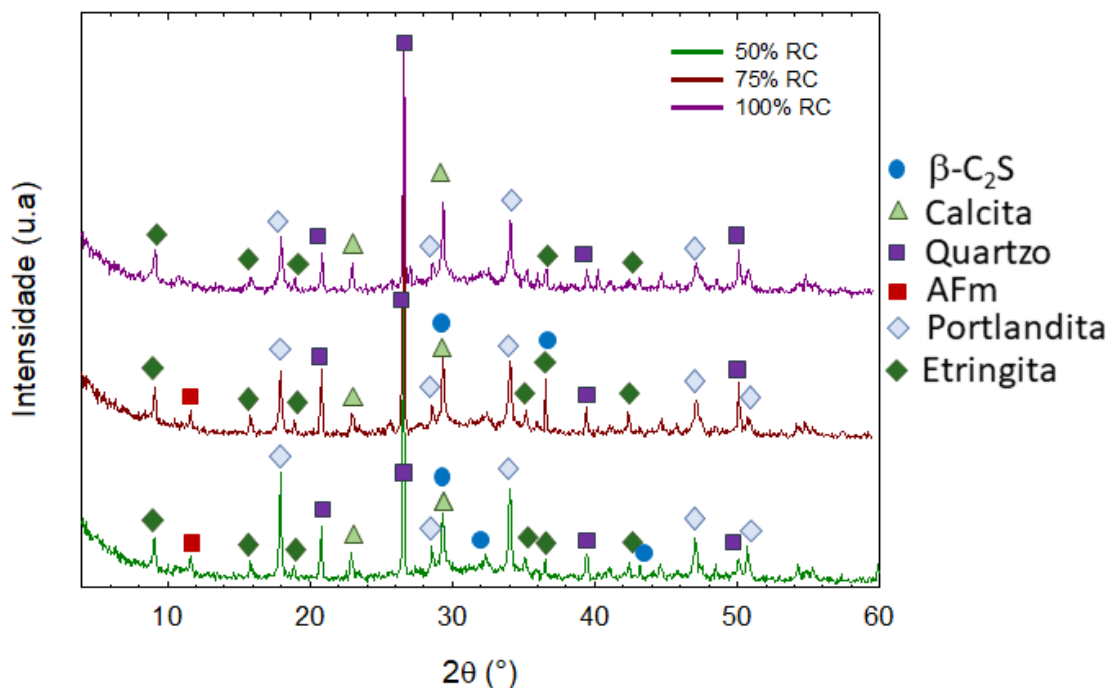


Figura 5.16 – Difração da pasta confeccionada com 50% de cimento reciclado, 75% de cimento reciclado e 100% de cimento reciclado com relação água/cimento de 0,7.

Na **Figura 5.17** e na Figura 5.18 e são apresentadas as difrações das pastas aos 28 dias de idade e submetidas à cura em autoclave. A ausência dos picos de hidróxido de cálcio está relacionada com a reatividade da areia ativada mecanicamente. Estudos apontam que a atividade pozolânica é intensificada com o aumento da temperatura (CHEYREZY; MARET; FROUIN, 1995). Além disso, os resultados apresentados mostram indícios da formação de fases cristalinas de C-S-H de tobermorita e xonotlita.

Na **Figura 5.17** onde foram confeccionadas pastas contendo CPV, 25% e 50% de cimento reciclado, nota-se uma maior quantidade de picos relacionados a xonotlita da amostra constituída por cimento CPV e na sequência na amostra com 50% de cimento reciclado, não são identificados a formação de xonotlita na amostra com 25% de cimento reciclado. Observa-se também, picos mais bem definidos e com maior intensidade na amostra contendo apenas CPV. As outras amostras a grande parte dos picos possuem menos intensidade e nota-se uma maior abertura do difratograma entre 30° e $36^\circ 2(\Theta)$.

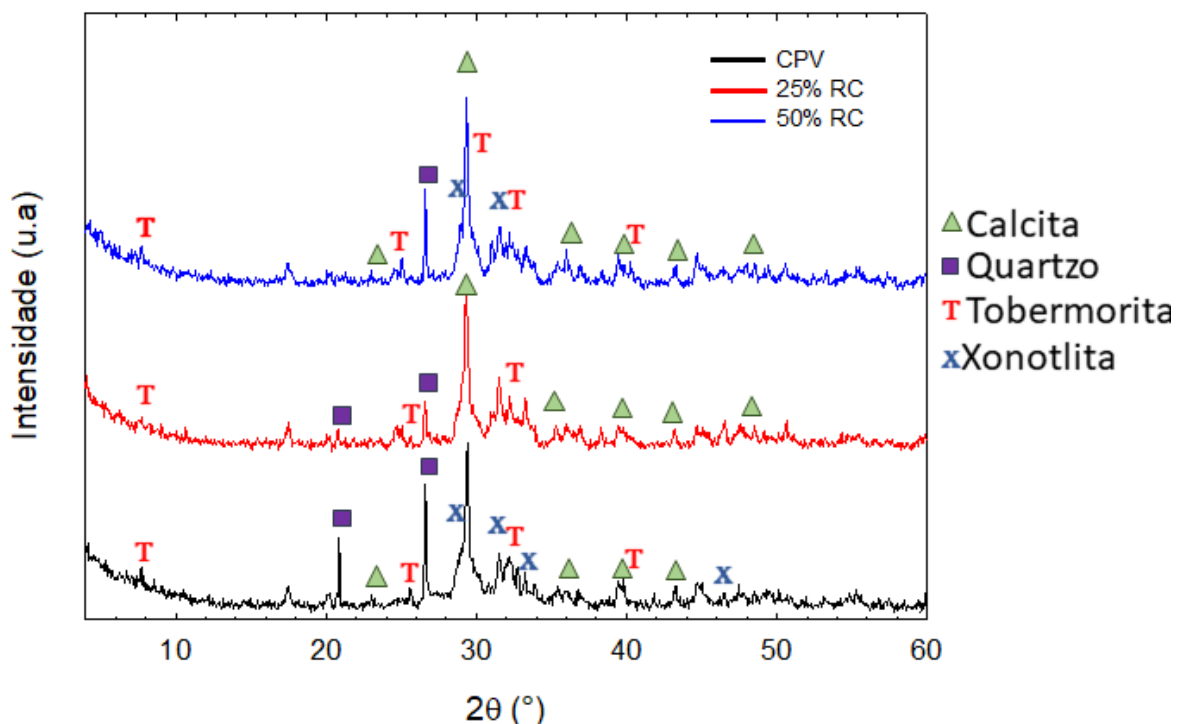


Figura 5.17 – Difração da pasta confeccionada com CPV, 25 % de cimento reciclado, 50% de cimento reciclado e com relação a/c de 0,5.

No difratograma na qual foram confeccionadas pastas com 50% , 75% e 100% de cimento reciclado com relação água/cimento de 0,7 (Figura 5.18), as principais fases identificadas foram calcita, quartzo, tobermorita e xonotlita. Nas amostras confeccionadas com 50% de cimento reciclado foram identificadas uma menor quantidade de tobermorita e não foram

identificados picos relacionados a xonotlita, observa-se um predomínio da formação de calcita. Na amostra contendo 75% de cimento reciclado não se observa a presença de picos relacionados ao quartzo e a xonotlita. Por outro lado, na amostra contendo 100% de cimento reciclado são observados a presença da calcita, quartzo, tobermorita e xonotlita.

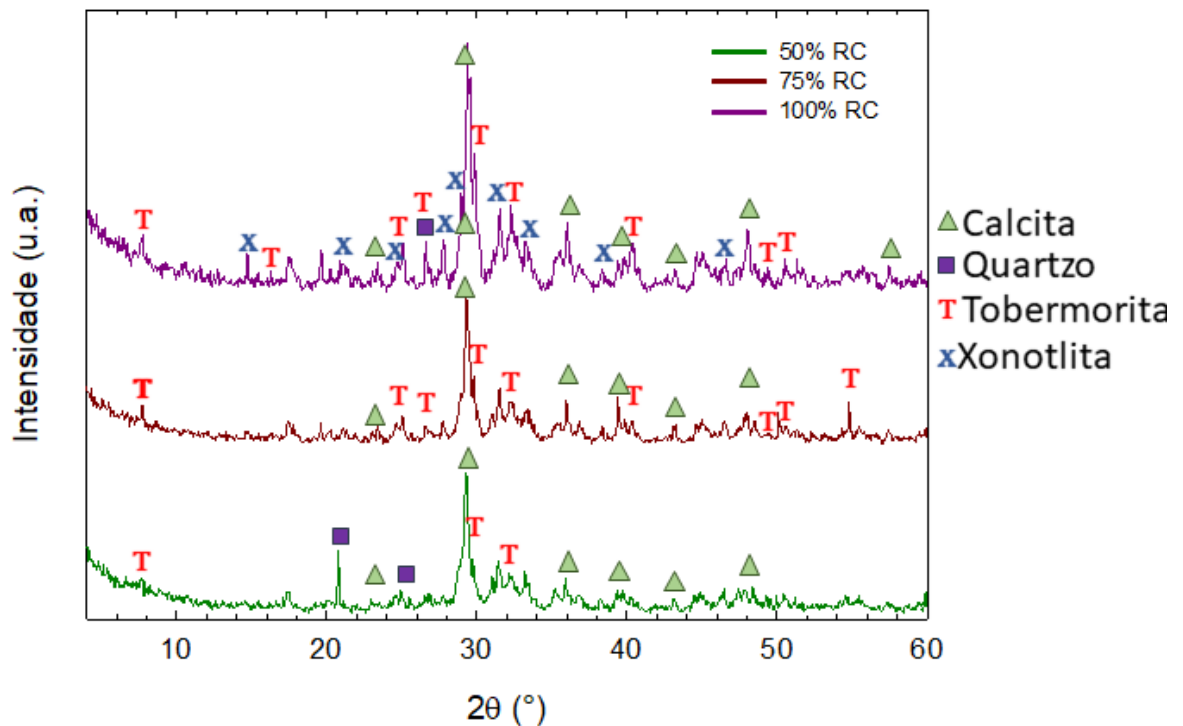


Figura 5.18 – Difração da pasta confeccionada com 50% de cimento reciclado, 75% de cimento reciclado e 100% de cimento reciclado, com relação a/c de 0,5.

5.4.5 *Análise da microscopia eletrônica de varredura*

Na **Figura 5.19** são demonstradas microestruturas de argamassas produzidas com cimento CPV-ARI (a), com adição de 25% de cimento reciclado(b), com adição de 50% de cimento reciclado (c) todas produzidas com relação água/cimento 0,5. As argamassas confeccionadas com 50% de adição de cimento reciclado (d), com 75% de adição de cimento reciclado (e) e com 100% de cimento reciclado (f), foram confeccionadas com relação água/cimento 0,7. Todas passaram por cura saturada e analisadas aos 28 dias de idade.

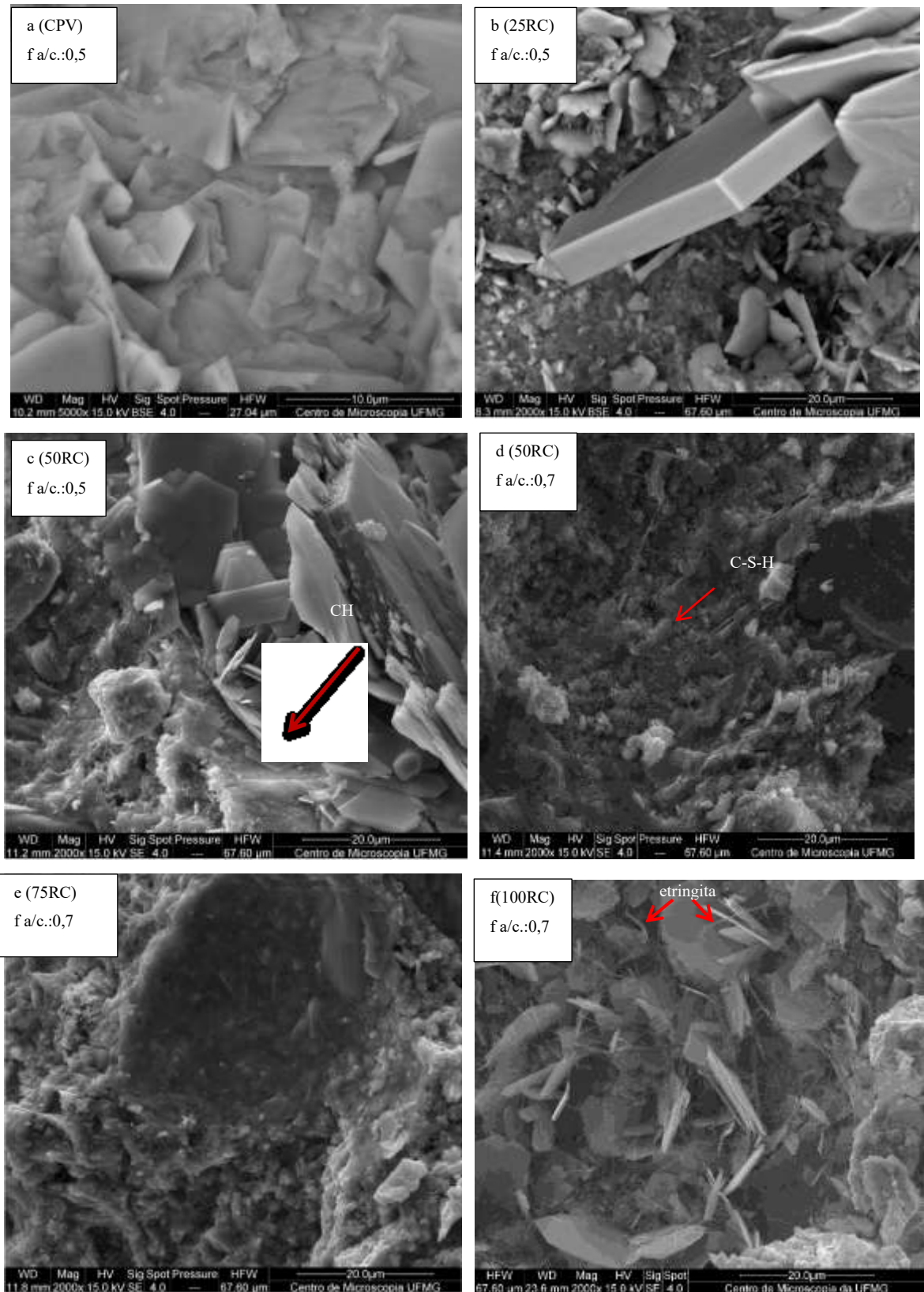
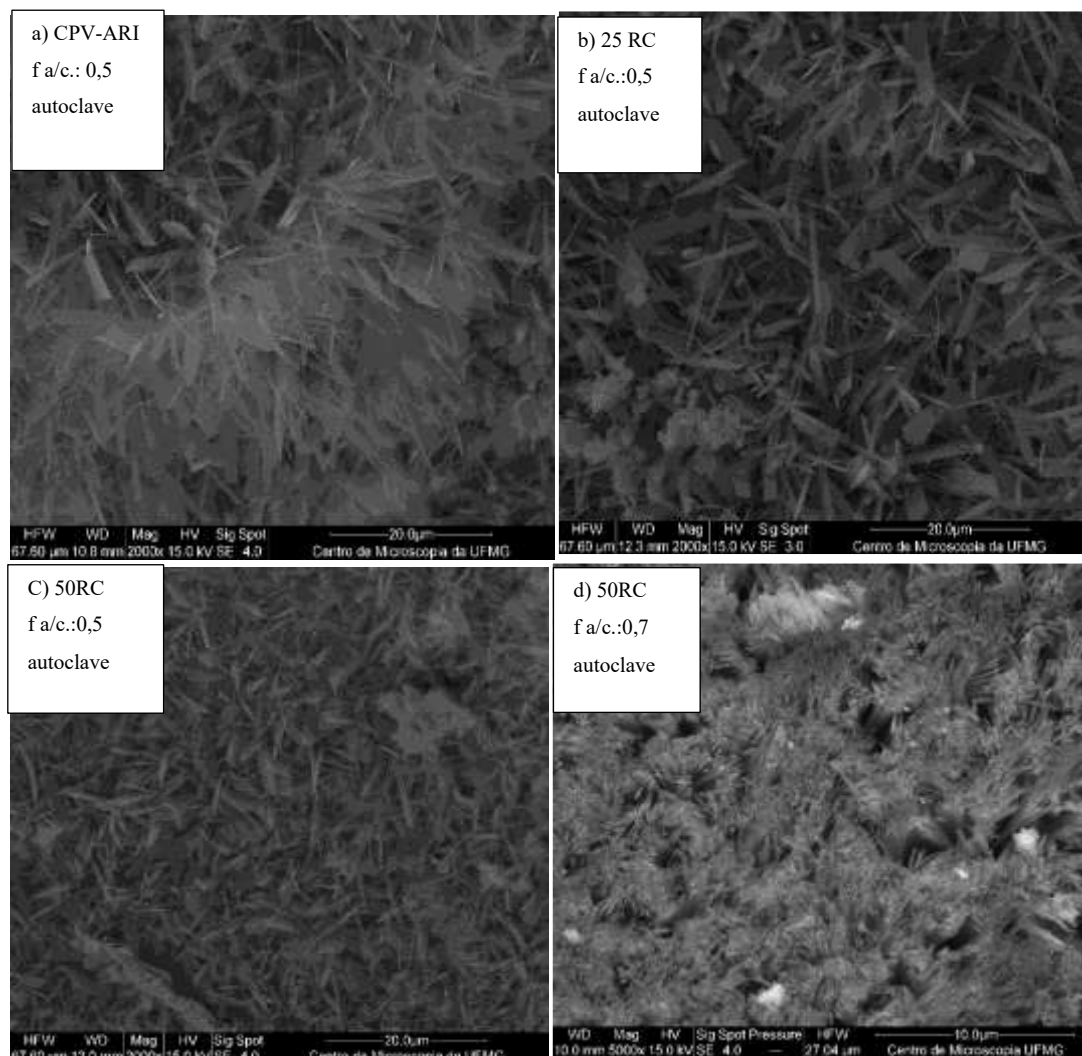


Figura 5.19– Microestruturas de argamassa de cimento CPV-ARI (a), argamassa com 25% de cimento reciclado (b), argamassa com 50% de cimento reciclado (c), argamassa com 50% de cimento reciclado (d), argamassa com 75% de cimento reciclado (e) e argamassa com 100% de cimento reciclado(f).

Observa-se que nas argamassas produzidas com cimento reciclado ocorre um processo de hidratação análogo ao formado com as pastas confeccionadas com cimento CPV-ARI. São identificados produtos formados no desenvolvimento da pasta como CH em formato hexagonal **Figura 5.19 (c)**, etringita com aspecto de agulhas **Figura 5.19 (f)**, agrupamento de C-S-H **Figura 5.19**. Etringita e portlandita também identificados análise de fases presentes através da difração de raios – X (DRX).

Na **Figura 5.20** são apresentadas a microestrutura de argamassas que foram submetidas a tratamento de cura em autoclave produzidas com cimento CPV-ARI (a), com adição de 25% de cimento reciclado (b) e de 50% de cimento reciclado (c) todas produzidas com relação água/cimento 0,5. As argamassas confeccionadas com 50% de adição de cimento reciclado (d), com 75% de adição de cimento reciclado (e) e com 100% de cimento reciclado (f), foram confeccionadas com relação água/cimento 0,7. Todas analisadas aos 28 dias de idade.



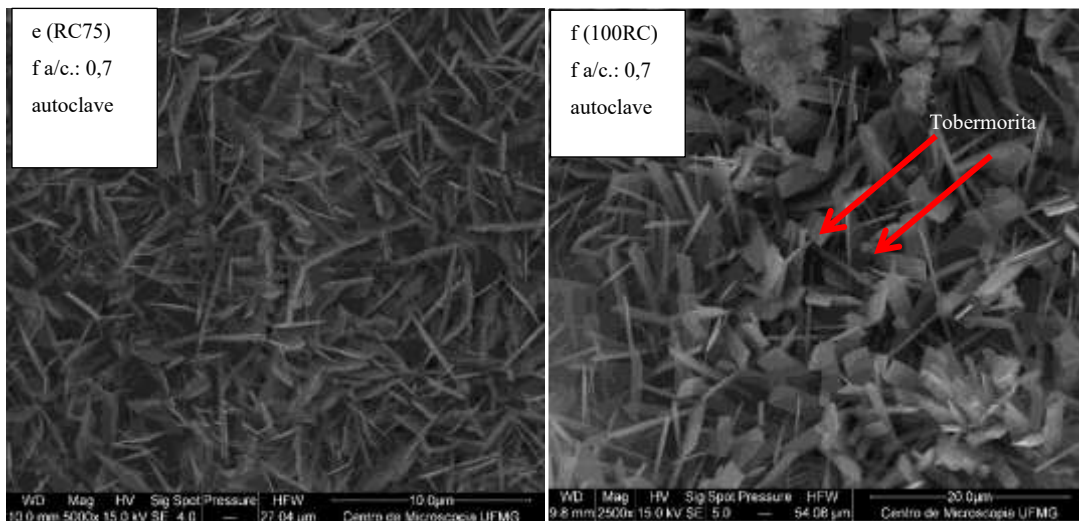


Figura 5.20- Microestruturas de argamassa com cura em autoclave produzida CPV-ARI (a) com 25% de cimento reciclado(b), 50%de cimento reciclado (c), 50% de cimento reciclado (d), 75% de cimento reciclado (e) e 100% de cimento reciclado (f).

Na **Figura 5.20** são apresentadas imagens das argamassas submetidas a tratamento térmico em autoclave e em todas foram encontradas cristais de tobermorita. De acordo com GARCIA (2019), as tobermoritas são cristais em formato de placas ou cristais alongados.

A estrutura C-S-H em temperatura ambiente mantém uma relação Ca/Si (cálcio/silício) que varia de 1,6-2,0. No entanto, quando as argamassas são submetidas a cura em autoclave, essa relação Ca/Si é aumentada para valores acima de 2, resultando na formação de α -C₂SH o que por sua vez diminui a resistência a mecânica do material. Portanto, ao submeter essas amostras a cura em autoclave é recomendável adicionar silício com o propósito de melhorar os parâmetros de resistência, promovendo a formação da tobermorita, cuja relação Ca/Si:0,83, e Xonotlita com relação Ca/Si de 1.No entanto, para que haja esse ganho de resistência através desse produtos gerados durante o processo de cura em autoclave é necessário ter uma relação água/cimento inferior 0,3. No estudo em questão os valores de a/c foram respectivamente 0,5 e 0,7, o que reduziu os valores médios de resistência à compressão. Conforme observado pelas imagens de MEV formou-se tobermorita mas ainda observa-se muitos espaços vazios aumentando assim a porosidade dos compostos.

5.4.6 Resistividade elétrica volumétrica

A resistividade elétrica volumétrica relativa das amostras contendo CPV-ARI, 25% de cimento reciclado e 50% de cimento reciclado são apresentados na Figura 5.21. Nota-se que a resistividade relativa onde foi utilizado 25% de cimento reciclado foi 70% inferior ao referência e com 50% de cimento reciclado foi 80% menor.

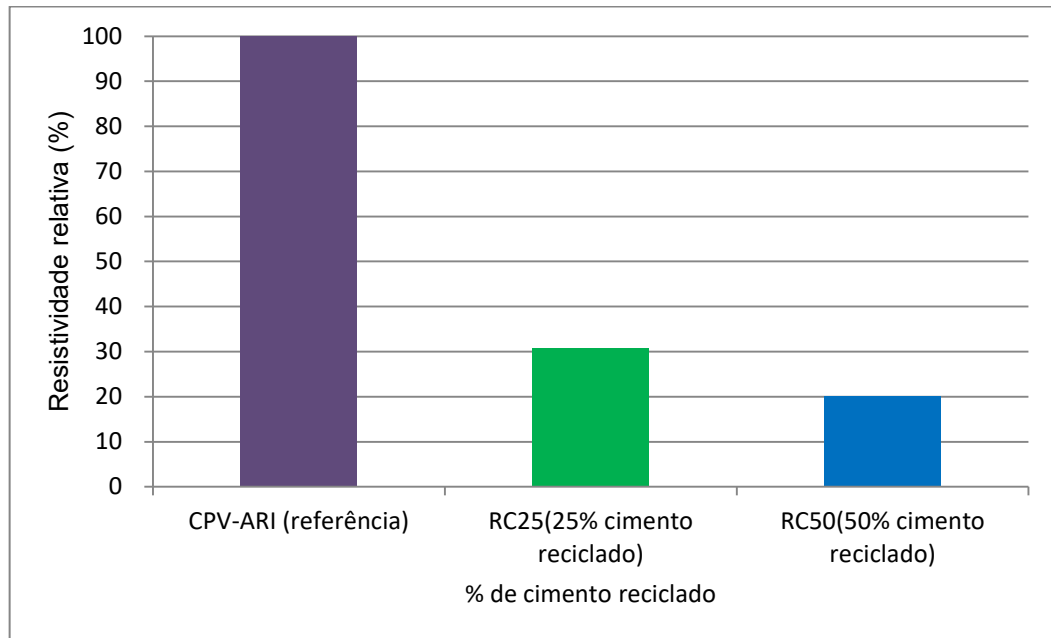


Figura 5.21– Resistividade elétrica volumétrica relativa aos 28 dias.

Observa-se uma redução significativa da resistividade elétrica volumétrica das argamassas em estudo em função do acréscimo de cimento reciclado utilizado. Onde a resistividade apresenta-se menor pode estar relacionado a maior interconectividade dos poros na matriz cimentícia, o que também pode levar a uma penetração maior de agentes agressivos externos.

O estudo desenvolvido por Zanovello et al. (2023), sobre o impacto da proporção água/aglutinante na porosidade e na resistência à compressão da pasta de cimento Portland reciclada, apontaram a importância de reduzir a demanda de água, pois, assim, a porosidade diminui e se obtém, conseqüentemente, melhores valores de resistência à compressão.

6 CONCLUSÕES

Essa dissertação teve como objetivo obter um aglomerante alternativo a partir do aproveitamento de pastas de cimento. Para isso, primeiramente foram determinadas as melhores condições de tratamento térmico para obtenção do cimento reciclado. A partir disso, foram moldadas argamassas com diferentes teores de substituição (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) do cimento CPV por cimento reciclado. Foram realizados também dois processos de cura das argamassas: saturada e em autoclave. Assim, obteve-se as seguintes conclusões:

- Através de análises experimentais e dentre as três temperaturas estudadas 500° C, 600° C e 700°C, o melhor resultado obtido para estudo desse trabalho foi do cimento reciclado que passou por tratamento térmico à 700°C e foi submetido à um resfriamento rápido, onde esse apresentou aos 28 dias o valor médio de resistência à compressão de (14,52 MPa) sendo esse valor 21,69% maior que a pasta tratada termicamente à 600° C e 43,87% maior que a pasta tratada à 500° C e ambas submetidas ao resfriamento rápido. Na pasta tratada termicamente à 700°C também se nota a presença do α' -C2S.
- Foi observada uma maior demanda de água nas argamassas contendo cimento reciclado. A amostra moldada com 100% de cimento reciclado apresentou consistência adequada apenas quando utilizados relação água/cimento de 0,7 e 5% de aditivo superplastificante. Para a mesma consistência, a amostra moldada apenas com CP-V apresentou relação água/cimento de 0,5 e 0,5% de aditivo superplastificante.
- Para a condições em que as argamassas foram curadas em autoclave, todos os valores de absorção por imersão e porosidade também foram crescentes e mais expressivo para a amostra confeccionada com 75% de cimento reciclado.
- Para cura saturada e com relação água/cimento de 0,5, a substituição de cimento CPV pelo cimento reciclado foi benéfica, aumentando a resistência à compressão, devido a redução da porosidade. O maior valor de resistência à compressão foi na amostra RC50 com 48,9 MPa. A resistência à compressão foi menor nas amostras com relação água/cimento de 0,7. Contudo, com 75% de substituição obteve-se o maior valor de resistência à compressão (36,9 MPa) aos 28 dias.

- A cura em autoclave não foi benéfica, pois houve redução da resistência à compressão e aumento da porosidade. Nas condições em que foi utilizado relação água/cimento de 0,7 o menor valor obtido de resistência à compressão foi ao utilizar 75% de cimento reciclado (12,50 MPa).
- Observa-se redução da resistividade elétrica nas amostras com utilização de cimento reciclado em comparação com a amostra referência, indicando uma maior porosidade e/ou conectividade dos poros.
- Esse estudo indica que após o tratamento térmico da pasta de cimento e sua posterior reidratação é possível identificar fases e microestruturas semelhantes a encontradas na hidratação do cimento Portland comum. Para sua aplicabilidade ainda são necessários mais estudos como especialmente no desenvolvimento de processos para separação de fases de resíduos.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar o aprimoramento dos processos de cominuição de resíduos, com alternativas de processos que visem um menor custo e consumo de energia se tornando mais sustentáveis;
- Obter e analisar um cimento reciclado com materiais percussores de mais idade de hidratação.
- Estudar o desempenho de um cimento reciclado obtido com materiais contendo pré carbonatação, carbonatação parcial ou total.
- Analisar a redução dos teores de água/cimento, bem como a redução de aditivos e sua influência na matriz cimentícia.
- Estudar o comportamento de cimentos reciclados na autoclave reduzindo a relação a/c e tempos de permanência distintos.
- Analisar a aplicabilidade direta na construção civil do cimento reciclado e comparar seu desempenho com o cimento Portland comum.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKHTAR, Ali; SARMAH, Ajit K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 186, p. 262–281, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>
- ALARCON-RUIZ, Lucia *et al.* The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 35, n. 3, p. 609–613, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.015>
- ALONSO, C.; FERNANDEZ, L. Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 39, n. 9, p. 3015–3024, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/B:JMISC.0000025827.65956.18>
- ANDREW, Robbie M. Global CO₂ emissions from cement production , 1928 – 2018. [s. l.], p. 1675–1710, 2019.
- ANGULO, Sergio C. *et al.* The role of calcium silicates and quicklime on the reactivity of rehydrated cements. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 340, n. May, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127625>
- ASLAM, Muhammad Shahzad; HUANG, Beijia; CUI, Lifeng. Review of construction and demolition waste management in China and USA. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 264, n. February, p. 110445, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110445>
- 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. **ABNT NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019a
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9204**. Concreto endurecidos – Determinação de resistividade elétrico-volumétrica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012
- BANDEIRA, José Bernardo Mota Pinto. Caracterização mecânica e retração em argamassas produzidas com cimento reciclado. [s. l.], 2020.
- BASF S.A - Ficha técnica para o aditivo MasterGlenium 51. Disponível em:<<https://doi.org/10.1590/s1983-41952021000100009>>. Acesso em: 10 setembro 2023.

- BOGAS, J. A.; CARRIÇO, A.; PEREIRA, M. F.C. Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 218, p. 377–389, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.325>
- BOGAS, José Alexandre; CARRIÇO, Ana; TENZA-ABRIL, Antonio José. Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 138, n. September, p. 106226, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226>
- BROUGHAM, Thomas *et al.* Recycling of concrete construction and demolition waste in alternative binders : Part 1 – Technical study Recycling of c oncrete c onstruction and d emolition w aste in a lternative b inders : Part 1 – Technical s tudy. [s. l.], Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/951/1/012008>
- CARDOSO, Allan Carvalho *et al.* Influence of recycled concrete aggregates on the shear strength of reinforced concrete beams. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 1–17, 2021.
- CARVALHO, Miguel Alexandre Filipe Caetano de. Caracterização de pastas produzidas com cimento reciclado sujeito a diferentes temperaturas de termoativação. [s. l.], 2020.
- CORREA, Cássia Rabelo; PEREIRA, Cláudio Henrique; RÊGO, João Henrique Silva. Influência das frações granulométricas de agregados miúdos reciclados no comportamento de argamassas de cimento. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 305–317, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000400474>
- COSTA, F N; RIBEIRO, D V. Reduction in CO₂ emissions during production of cement , with partial replacement of traditional raw materials by civil construction waste (CCW). **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 276, p. 123302, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123302>
- DE ARAÚJO, A. G. *et al.* Estudo do reaproveitamento do cimento Portland de alta resistência inicial. **Cerâmica**, [s. l.], v. 63, n. 365, p. 58–64, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633652052>
- DUAN, Huabo *et al.* Construction debris becomes growing concerns of growing cities. **Waste Management**, [s. l.], v. 83, p. 1–5, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.044>
- FILIPPE, Daniel; LEAL, Ferreira. Durabilidade de betões produzidos com cimento reciclado Engenharia Civil. [s. l.], 2021.
- GARCIA, Dayana C.S.; WANG, Kejin; FIGUEIREDO, Roberto B. The influences of quartz content and water-to-binder ratio on the microstructure and hardness of autoclaved

Portland cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 91, n. August 2017, p. 138–147, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.010>

GOMES, Camila Lacerda; SPITALE, Flávia; POGGIALI, Jacques. Concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição e adições minerais: uma análise bibliográfica Concretos with recycled aggregates of construction and demolition waste and mineral additions: a bibliographic analysis. [s. l.], 2019.

HE, Zhijun *et al.* Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 211, p. 965–973, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.289>

J.C. BENEZET, A. Benhassaine. The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powders. **Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussees**, [s. l.], n. 219, p. 17, 1999.

KIM, Jeonghyun; JANG, Haneol. Closed-loop recycling of C&D waste: Mechanical properties of concrete with the repeatedly recycled C&D powder as partial cement replacement. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 343, n. January, p. 130977, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130977>

KRUGER, P. *et al.* Influence of particle size distribution of conventional fine aggregate and construction demolition waste aggregate in Portland cement mortar. **Ceramica**, [s. l.], v. 67, n. 383, p. 269–276, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132021673833035>

LI, Xuemei *et al.* A systematic review of waste materials in cement-based composites for construction applications. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 45, n. October 2021, p. 103447, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103447>

LINDEROTH, O.; WADSÖ, L.; JANSEN, D. Long-term cement hydration studies with isothermal calorimetry. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 141, n. January, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106344>

LINK, T. *et al.* Reactivity and phase composition of Ca₂SiO₄ binders made by annealing of alpha-dicalcium silicate hydrate. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 67, p. 131–137, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.08.009>

LUKE, K. Phase studies of pozzolanic stabilized calcium silicate hydrates at 180 °C. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 34, n. 9, p. 1725–1732, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.021>

MANUAL TÉCNICO 2014 _ MANUALZZ.PDF. [S. l.: s. n.], [s. d.].

MAZZARO, Filipe Siqueira. INFLUÊNCIA DO REJEITO DE MINERAÇÃO DE

NIÓBIO NA DURABILIDADE DE MATRIZES CIMENTÍCIAS. [s. l.], 2022.

MENEZES, RMRO *et al.* Hydraulic binder obtained from recycled cement and sand powder Aglomerante hidráulico obtido de cimento reciclado e pó de areia. 2018. November, 2018. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000600003>>. Acesso em 06 de janeiro de 2022.

MEHTA, P. M.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. [S. l.: s. n.], 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2013.

OLIVEIRA, Dayana Ruth Bola *et al.* Mixed construction and demolition powder as a filler to Portland cement: study on packaged pastes. Ambiente Construído, v. 24, p. e131882, 2024. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212024000100715>>. Acesso em 21 de junho 2024.

PAZ, Candida Fachinetto *et al.* Life cycle inventory of recycled aggregates derived from construction and demolition waste. Journal of Material Cycles and Waste Management, v. 25, n. 2, p. 1082-1095, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10163-023-01594-y>>. Acesso em 21 de junho 2024.

PREPARATION, Cement-based Materials *et al.* Short Review on the Application of Recycled Powder in. [s. l.], 2022.

REAL, Sofia *et al.* **Book Chapter Influence of the Treatment Temperature on the Microstructure and Hydration Behavior of Thermoactivated Recycled Cement**. [S. l.: s. n.], 2021.

REAL, Sofia *et al.* Hydration and phase development of recycled cement. [s. l.], v. 127, n. January, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405>

RICARDO SANTOS NOBRE, Thiago *et al.* Characterization of Portland Cement Phases Using X-Ray Diffraction and ²⁹Si Solid State Nuclear Magnetic Resonance Techniques. [s. l.], p. 2022, 2022.

SALLES, Pedro Valle. A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural. [s. l.], p. 177–196, 2021.

SCIENCE, Environmental. A review on achieving sustainable construction waste management through application of 3R (reduction , reuse , recycling): A lifecycle approach A review on achieving sustainable construction waste management through

application of 3R (reduction , reuse. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/476/1/012010>

SCRIVENER, Karen *et al.* Cement and Concrete Research Advances in understanding cement hydration mechanisms. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 124, n. August, p. 105823, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105823>

SCRIVENER, Karen L; NONAT, André. Cement and Concrete Research Hydration of cementitious materials , present and future. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 41, n. 7, p. 651–665, 2011a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.026>

SCRIVENER, Karen L.; NONAT, Andr?? Hydration of cementitious materials, present and future. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 41, n. 7, p. 651–665, 2011b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.026>

SCRIVENER, Karen; SNELLINGS, Ruben; LOTHENBACH, Barbara. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/b19074>

SERPELL, Ricardo; LOPEZ, Mauricio. Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 64, p. 16–26, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.08.003>

SILVA, R B. Reidratação de Cimento de Alto Forno: Análise e Otimização por Técnicas Combinadas de Caracterização. [s. l.], p. 114, 2018.

SNIC. ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro, 2019. <https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Roadmap-Tecnologico-Cimento-Brasil-Book-1.pdf>.

SONG, Haemin *et al.* A study of thermal decomposition of phases in cementitious systems using HT-XRD and TG. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 169, p. 648–661, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.001>

SPLITTGERBER, F; MUELLER, A. Inversion of the Cement Hydration As a New Method for Identification and / or Recycling? **11th International Congress on the Chemistry of Cement.**, [s. l.], n. May, p. 1282–1291, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/2.1.2201.3766>

SUH, Heongwon *et al.* Influences of rehydration conditions on the mechanical and atomic structural recovery characteristics of Portland cement paste exposed to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 235, p. 117453, 2020.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117453>

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

WANG, Junjie; MU, Mulan; LIU, Yongliang. Recycled cement. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 190, p. 1124–1132, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.181>

XU, Lei *et al.* A systematic review of factors affecting properties of thermal-activated recycled cement. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 185, n. April, p. 106432, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106432>

ZANOVELLO, Mateus *et al.* Strength-porosity correlation and environmental analysis of recycled Portland cement. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 190, n. June 2022, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106763>