



PPGEM



Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais
Instituto Federal da Bahia

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

VÍVIA ANDRADE DOS SANTOS

**EFEITOS DO RESÍDUO DE CIMENTO-AMIANTO TRATADO TERMICAMENTE
(RCA_T) NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS ECOEFICIENTES**

Salvador
2024



PPGEM



Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais
Instituto Federal da Bahia

VÍVIA ANDRADE DOS SANTOS

**EFEITOS DO RESÍDUO DE CIMENTO-AMIANTO TRATADO TERMICAMENTE
(RCA_T) NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS ECOEFICIENTES**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof. Dra. Tharsia Cristiany de Carvalho Costa.

Coorientador: Prof. Dr. Cleber Marcos Ribeiro Dias

Salvador
2024

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM OS
DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

S237e Santos, Vivia Andrade dos

Efeito do resíduo de cimento-amianto tratado termicamente (RCAr) nas propriedades de argamassa ecoeficientes / Vivia Andrade dos Santos; orientadora Tharsia Cristiany de Carvalho Costa; coorientador Cleber Marcos Ribeiro Dias -- Salvador, 2024.

164 p.

Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais) -- Instituto Federal da Bahia, 2024.

1. Resíduo de cimento-amianto (RCA). 2. Argamassa ecoeficientes. 3. Material cimentício suplementar. 4. Aglomerante de baixo carbono. 5. Projeto estatístico de mistura. I. Costa, Tharsia Cristiany de Carvalho, orient. II. Dias, Cleber Marcos Ribeiro, coorient. III. TÍTULO.

CDU 666.961

INSTITUTO FEDERAL DA BAHIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGEM

**EFEITOS DO RESÍDUO DE CIMENTO-AMIANTO TRATADO
TERMICAMENTE (RCAT) NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS
ECOEICIENTES**

Vívia Andrade dos Santos

Produto (s) Gerado (s):

Relatório de Dissertação

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **THARSIA CRISTIANY DE CARVALHO COSTA**
Data: 11/07/2024 08:58:01-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof.^a. Dr.^a. Tharsia Cristiany de Carvalho Costa – Orientadora PPGEM/IFBA

Documento assinado digitalmente
 **CLEBER MARCOS RIBEIRO DIAS**
Data: 10/07/2024 09:49:00-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Cleber Marcos Ribeiro Dias – Coorientador Externo UFBA

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO JORGE VIDAL DULTRA**
Data: 11/07/2024 08:17:09-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Eduardo Jorge Vidal Dultra — Examinador Interno IFBA


Prof. Francisco Gabriel Santos Silva
Escola Politécnica da UFBA
SIAPE: 15224821

Prof. Dr. Francisco Gabriel Santos Silva — Examinador Externo UFBA

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela banca examinadora em 05/07/2024

*Não te mandei eu? Sê forte e corajoso; não temas, nem te espantes, porque o Senhor,
teu Deus, é contigo por onde quer que andares.*

(Josué 1:9)

AGRADECIMENTOS

Início essa dissertação com profunda gratidão a Deus, fonte de toda sabedoria e inspiração, por conceder-me a oportunidade de mergulhar nos intrincados caminhos do conhecimento. Agradeço ao Senhor por guiar meus passos e iluminar minha mente durante esta jornada acadêmica. Reconheço Sua bondade e misericórdia, que têm sido constantes ao longo desse processo de pesquisa. Que este trabalho seja uma expressão de louvor e gratidão ao Deus Todo-Poderoso, cuja graça sustenta cada passo dado em direção à compreensão e ao progresso. Que Seu nome seja glorificado em cada descoberta e em cada palavra escrita. Obrigado meu Deus por ter me dado forças e me permitido concluir mais uma etapa, com saúde, integridade e gratidão.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha família, cujo amor, apoio e compreensão foram fundamentais em cada etapa desta jornada acadêmica. Agradeço por estarem sempre ao meu lado, encorajando-me nos momentos de dúvida, celebrando minhas conquistas e oferecendo seu apoio incondicional. Seu carinho e sacrifício foram a força motriz que me impulsionou a superar desafios e a perseverar diante das adversidades. Registro aqui um agradecimento extraordinário aos meus pais Jorge e Marisa, ao meu amado tio Carlos, por desde a época da graduação me apoiar e orar por mim, minhas irmãs Quézia e Vitória, minhas sobrinhas Ester e Abigail, ao meu amado esposo Danilo pelo apoio, companheirismo, paciência, ao meu cunhado Victor Isaías pelas diversas vezes que recuperou o arquivo corrompido da dissertação (rs), à minha sogra Ana Lúcia, enteada Ana Júlia, cunhada Lorena, obrigada por não desistirem de mim, incentivando a seguir em busca dos meus objetivos, amo vocês.

Gostaria de expressar minha mais sincera gratidão ao Professor Dr. Cleber Dias, cuja dedicação e excelência como ser humano, mestre e cientista foram verdadeiramente inspiradoras. Agradeço por ter sugerido e confiado a mim um tema desafiador e inovador. Sua orientação diligente, paciência em ensinar, entendendo as minhas limitações, e apoio incansável foram fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho. Além de sua notável competência acadêmica, destaco sua generosidade em compartilhar conhecimento, sua capacidade de estimular o pensamento crítico e sua habilidade em transmitir sabedoria com humildade e empatia. Ao longo desse percurso, aprendi não apenas sobre minha área de pesquisa, mas também sobre integridade, perseverança e compromisso. Sinto-me profundamente privilegiada por ter sido orientada por alguém tão excepcional. Que este trabalho seja uma expressão modesta de minha gratidão e admiração por você. Que seu legado como educador e cientista

continue a inspirar e influenciar positivamente as gerações futuras. Muito obrigada por sua orientação e apoio.

Agradeço a Professora Dra. Tharsia pela coorientação, por ter depositado sua confiança e oportunidade na minha pessoa e ter aceitado o desafio dessa orientação. Reconheço que seus ensinamentos e suportes foram essenciais para finalização do mestrado.

Agradeço aos professores Dr. Francisco Gabriel, Dr^a Vanessa Silva, Dr. Eduardo Dultra por terem aceitado o convite de participar da banca examinadora e contribuições feitas nesse trabalho.

Agradeço a Central de Tratamento de Resíduos (CTR-BA) em nome do engenheiro Bruno Nascimento pela oportunidade que me foi dada de visitar a planta de tratamento.

Expresso minha gratidão ao meu amigo e colega Gessivaldo, cuja presença, mesmo que à distância, foi um pilar fundamental ao longo desta jornada de pesquisa. Sua dedicação e exemplaridade como ser humano e pesquisador foram uma inspiração constante para mim. Agradeço imensamente por sua generosidade, orientação e auxílio meticuloso na análise dos resultados, que foram primordiais para a conclusão desse trabalho. Sua disposição em corrigir e aprimorar o texto, bem como sua orientação perspicaz, foram de inestimável valor durante todo o processo. Por isso, meu amigo, aceite minha mais profunda gratidão. Seu apoio e amizade foram verdadeiros pilares que sustentaram meu caminho até o final desse percurso acadêmico.

Gostaria de expressar minha gratidão ao meu amigo Cezar Miguel, por sua contribuição na correção do trabalho, na estrutura da apresentação e na criação dos esquemas. Sua atenção aos detalhes, cuidado e busca pela perfeição foram fundamentais para o sucesso desse projeto. Muito obrigado por sua dedicação e apoio constante. Agradeço a querida Rubya pelo esforço na correção e revisão ortográfica do texto, pelo apoio e amizade.

Expresso minha gratidão aos alunos de iniciação científica Suelen e Pedro que generosamente dedicaram seu tempo, energia e talento para contribuir com a parte experimental desse estudo. Menino Pedro, você é um profissional excepcional! Sinto-me honrada por poder dividir essa pesquisa com você, irmãozinho da ciência (rs)!

Sou muito grata ao meu colega e parceiro de curso Rafael Ribeiro pelo incentivo incondicional, por sempre me falar: “Desistir não é uma opção”, por acreditar em mim, por todas as palavras de ânimo, pelas conversas e risadas nos momentos difíceis. Com certeza você foi muito importante nesse processo. Agradeço aos meu amigo Jean Felipe pela amizade, confiança, por tamanha generosidade em me auxiliar verificando toda a parte elétrica envolvida nesse trabalho, ao meu colega Renê pelo apoio dado na manutenção dos equipamentos, tendo

sempre uma palavra de Deus, ao Diego pelo suporte dado na programação do controlador de temperatura.

Sou grata a todos os meus irmãos de igreja e amigos, a Cíntia, Paulo Roberto, Miquéias, Mariana, Ionara, Bruno, Danilo, Adriano, Caroline, Priscila, Alana, Juliana, Igor, Henrique, Tatiana, Catharine Brandão, Ana Lúcia, Marianna Luna, Fernanda, a Juliana Moreira, Milena, pelo suporte, conselhos, risadas, parcerias, pelo apoio, companheirismo, a troca de experiências e conhecimentos.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao Hospital Sarah Kubitschek em nome dos engenheiros Álvaro, Mariana e Leonardo por sua compreensão e flexibilidade ao permitir a adaptação de meu horário de trabalho para que eu pudesse dedicar tempo ao desenvolvimento desse estudo. Agradeço aos meus amigos e colegas Brenda, Eduardo, Caroline, Nilton (Amaral), Uelinton, Jorge Dantas, Jeremias, Jailson, Misael, Osias e toda a equipe da manutenção. O apoio demonstrado por vocês foi essencial para esse resultado.

Registro meu agradecimento ao Laboratório de Geotecnia da UFBA, representado pela coordenadora Luciene, por gentilmente ceder a infraestrutura e o forno necessários para a realização desta pesquisa. Gostaria de estender meu sincero agradecimento aos queridos técnicos Armando, Júlio e Romeu. O cuidado, prestatividade e disponibilidade em auxiliar neste trabalho foram verdadeiramente notáveis. Suas contribuições foram além das expectativas e seu comprometimento em garantir o sucesso desse projeto me enche de gratidão e admiração. Que este gesto de generosidade e colaboração seja reconhecido e retribuído em abundância. Muito obrigado pela dedicação e comprometimento

Registro aqui meus sinceros agradecimentos ao técnico Paulo por seu apoio incansável, suas valiosas orientações e as diversas conversas que tivemos ao longo desse trabalho. Seus ensinamentos foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa e para o meu crescimento profissional e acadêmico. Também expressei minha gratidão ao CETA (Centro Tecnológico de Argamassa), em nome da coordenadora Vanessa Silveira, pela generosa disponibilização dos equipamentos e espaço necessários para a realização dos experimentos. Sem o suporte e infraestrutura fornecidos por esta instituição, este trabalho não teria sido possível. Mais uma vez, meu profundo agradecimento ao técnico Paulo e ao CETA por tornarem este projeto uma realidade.

Minha gratidão à empresa Concreflex pelo generoso apoio concedido durante o desenvolvimento desta pesquisa. A colaboração fornecida pela empresa, por meio da concessão de desconto em materiais utilizados no decorrer do estudo, foi de inestimável importância para o seu progresso e sucesso.

Agradeço também aos técnicos Carina, Yuri, Helder e ao IFBA - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia por toda assistência e disponibilidade em realizar ensaios fundamentais para essa pesquisa.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma nesta dissertação, muito obrigado.

FORMAÇÃO DA CANDIDATA

Bacharel em Engenharia Civil, formada pela Universidade Salvador – UNIFACS (2017)

RESUMO

A utilização de materiais com amianto enfrenta proibição global devido ao seu potencial carcinogênico, tornando o tratamento dos resíduos de cimento-amianto (RCA) uma prioridade. Reciclar matérias-primas secundárias em produtos cimentícios é um campo de pesquisa em crescimento devido ao impacto ambiental da indústria do concreto. Essa prática ajuda a economizar matérias-primas primárias e reduzir as emissões globais de CO₂. Embora haja um crescente interesse na reciclagem de resíduos no setor da construção civil, a influência específica do resíduo de cimento-amianto tratado termicamente (RCA_T) nas propriedades de argamassas ecoeficientes ainda não foi amplamente investigada, deixando uma oportunidade para explorar seu potencial como material sustentável e seguro. Este estudo propõe utilizar e avaliar a eficiência do tratamento térmico para inertizar a crisotila e analisar a substituição parcial do Cimento Portland (CP) por resíduo tratado, em argamassas ecoeficientes visando reduzir a emissão de CO₂ e a destinação nobre de resíduos com potencial aglomerante. Para o tratamento térmico, adotou-se os parâmetros ótimos, que para o tipo de forno empregado, consistem em temperatura de 800°C, um tempo de calcinação de 1 hora e uma massa de resíduo por lote de 5 kg. O projeto de mistura foi determinado utilizando o software *Design-Expert*, que otimizou o planejamento piloto resultando em dezenove combinações. Estas combinações possibilitaram a construção de modelos matemáticos baseados em dados experimentais para previsão e otimização. As argamassas tiveram suas propriedades avaliadas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. No estado fresco, foram analisados o índice de consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água. No estado endurecido, foram avaliadas a densidade, resistência à tração na flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência potencial de aderência à tração ao substrato e superficial, e variação dimensional. A análise estatística dos dados permitiu avaliar o efeito de cada componente nas propriedades das argamassas e identificar anormalidades nos dados. A significância estatística dos fatores foi estabelecida por meio de análise de variância (ANOVA). Confirmou-se a eliminação da crisotila no RCA_T, garantindo a segurança do material. A análise estatística mostrou que a adição do resíduo de cimento-amianto tratado (RCA_T) influencia em várias propriedades da argamassa. Com base na formulação ótima verificou-se que o uso de RCA_T permite uma redução significativa no teor de clínquer das argamassas, diminuindo-o em até 38%. Além disso, a alta área superficial do RCA_T melhora a retenção de água, possibilitando a eliminação do aditivo retentor de água. As propriedades mecânicas das argamassas, como resistência à compressão e à tração na flexão, não foram negativamente influenciadas pelo RCA_T, demonstrando seu potencial como substituto sustentável e seguro em argamassas. O trabalho em questão avaliou a substituição de até 44% do cimento Portland por RCA_T, resultando em uma argamassa inovadora que manteve as propriedades mecânicas, atendendo todas as exigências classificatórias estabelecidas pela norma NBR 13281 (ABNT, 2023) para argamassas do tipo ARV-II. Os resultados revelaram uma redução de custo substancial, com a argamassa sendo 37% mais econômica. O delineamento estatístico de mistura se mostrou eficiente na previsão das propriedades avaliadas, resultando em uma argamassa de revestimento ecoeficiente.

Palavras-chave: resíduos de cimento-amianto (RCA), argamassas de revestimento ecoeficientes, material cimentício suplementar, aglomerante de baixo carbono, projeto estatístico de mistura.

ABSTRACT

Utilization of asbestos-containing materials faces a global ban due to their carcinogenic potential, making the treatment of asbestos cement waste (ACW) a priority. Recycling secondary raw materials into cementitious products is a growing research field due to the environmental impact of the concrete industry. This practice helps to save primary raw materials and reduce global CO₂ emissions. While there is a growing interest in waste recycling in the construction sector, the specific influence of thermally treated asbestos cement waste (TCW) on the properties of eco-efficient mortars has not yet been widely investigated, leaving an opportunity to explore its potential as a sustainable and safe material. This study proposes to use and evaluate the efficiency of thermal treatment to inert chrysotile and analyze the partial replacement of Portland Cement (PC) with treated waste, in eco-efficient mortars aiming to reduce CO₂ emission and the noble disposal of waste with agglomerating potential. For thermal treatment, the optimal parameters were adopted, which for the type of furnace used, consist of a temperature of 800°C, a calcination time of 1 hour and a waste mass per batch of 5 kg. The mixing design was determined using the Design-Expert software, which optimized the pilot planning resulting in nineteen combinations. These combinations allowed the construction of mathematical models based on experimental data for prediction and optimization. The mortars had their properties evaluated both in the fresh and hardened states. In the fresh state, the consistency index, mass density, incorporated air content and water retention were analyzed. In the hardened state, density, flexural tensile strength, compressive strength, modulus of elasticity, potential tensile adhesion strength to the substrate and surface, and dimensional variation were evaluated. Statistical analysis of the data allowed the evaluation of the effect of each component on the properties of the mortars and the identification of abnormalities in the data. The statistical significance of the factors was established through analysis of variance (ANOVA). The elimination of chrysotile in TCW was confirmed, guaranteeing the safety of the material. Statistical analysis showed that the addition of treated asbestos cement waste (TCW) influences various properties of the mortar. Based on the optimal formulation, it was found that the use of TCW allows a significant reduction in the clinker content of mortars, reducing it by up to 38%. In addition, the high surface area of TCW improves water retention, allowing the elimination of the water-retaining additive. The mechanical properties of mortars, such as compressive and flexural tensile strength, were not negatively influenced by TCW, demonstrating its potential as a sustainable and safe substitute in mortars. The study in question evaluated the replacement of up to 44% of Portland cement with TCW, resulting in an innovative mortar that maintained its mechanical properties, meeting all the classification requirements established by ABNT NBR 13281 for ARV-II type mortars. The results revealed a substantial cost reduction, with the mortar being 37% cheaper. The statistical design of the mixture was shown to be efficient in predicting the evaluated properties, resulting in an eco-efficient coating mortar.

Keywords: asbestos cement waste (ACW), eco-efficient mortars, supplementary cementitious material, low carbon binder, statistical mix design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais tipos comerciais de amianto.....	26
Figura 2 - Fibras de amianto crisotila in natura.....	29
Figura 3 - Representação esquemática da estrutura tubular da crisotila, em camadas octaédricas de Mg na superfície da seção transversal sobrepondo a camada de Si tetraédrica.....	29
Figura 4 - Principais etapas químicas do processo de decomposição térmica da crisotila.....	40
Figura 5 - Representação das sequências esquemáticas da decomposição térmica da crisotila e as mudanças na forma e estrutural do mineral.	41
Figura 6 - Região triangular (Simplex) que abrange todos os pontos cujas somas das frações dos ingredientes (X_i) são iguais a 1.....	59
Figura 7 - Região dentro do diagrama que atende às restrições de consumo das matérias-primas.	61
Figura 8 - Exemplos de funções desejabilidade para: (a) maximização de uma variável, (b) minimização de uma variável, (c) tendo um valor da variável como alvo e (d) valores para a variável dentro de uma fatia pré-estabelecida.	68
Figura 9 - Forno mufla Linn Elektro Therm.	69
Figura 10 - Fluxograma resumido para o programa experimental.	70
Figura 11 – Análise das propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.	71
Figura 12 - Processo de beneficiamento do RCA.....	72
Figura 13 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	94
Figura 14 - Distribuição granulométrica do CP II-F 40 RS.	94
Figura 15 - Difratoograma de raios-X do CP II-F-40 RS com a identificação das fases.	96
Figura 16 - Análise termogravimétrica (TG e DTG) do CP II-F-40 RS40.	97
Figura 17 - Difratoograma de raios X do RCA com a identificação das fases.....	100
Figura 18 – Análise de microscopia eletrônica de varredura: (a) micrografia de uma seção fraturada da telha de cimento-amianto, mostrando as fibras de amianto.	102
Figura 19 - Análise química obtida por EDS (%) “Selected Area 1”.....	104
Figura 20 - Análise termogravimétrica (TG e DTG) do RCA.	105
Figura 21 - Distribuição discreta e acumulada dos tamanhos das partículas do RCA _T	107
Figura 22 – Representação das fases mineralógicas encontradas no difratograma de raios-X da amostra do RCA _T	110
Figura 23 - Análise termogravimétrica (TG e DTG) do RCA _T	112

Figura 24 - Espectros FTIR comparativos do resíduo de cimento-amianto antes (RCA) e após tratamento térmico (RCA _T).	114
Figura 25 - Micrografia eletrônica de varredura (MEV) do resíduo de cimento-amianto tratado (RCA _T), mostrando a morfologia das partículas após o tratamento térmico.....	116
Figura 26 - Representação do espalhamento das argamassas do projeto de mistura.	123
Figura 27 – Correlação entre resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.	124
Figura 28 – Correlação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade.....	124
Figura 29 - Correlação entre densidade no estado fresco e densidade no estado endurecido.	126
Figura 30 - Diagramas ternários para o IC das misturas. Observar nos diagramas a indicação dos sentidos de crescimento das frações dos ingredientes.	129
Figura 31 - Diagramas ternários para a RA das misturas. Observar nos diagramas a indicação dos sentidos de crescimento das frações dos ingredientes.	130
Figura 32 - Diagramas ternários para a <i>Rt</i> das misturas. Observar nos diagramas a indicação dos sentidos de crescimento das frações dos ingredientes.	132
Figura 33 - Diagramas ternários para o MOE das misturas. Observar nos diagramas a indicação dos sentidos de crescimento das frações dos ingredientes.	133
Figura 34 - Representação da forma de ruptura no ensaio de resistência potencial de aderência e resistência à tração superficial, respectivamente.	139

LISTA DE QUADROS

Quadro 2 - Classificação das argamassas de revestimento.....	49
Quadro 3 - Classificação das argamassas de revestimento em função das camadas.....	50
Quadro 4 - Requisitos classificatórios e informativos das argamassas. Argamassa para revestimento de paredes e tetos ARV-I, ARV II, ARV III e AET	52
Quadro 5 – Informações da caracterização física dos aditivos: retentor de água (R_A), incorporador de ar (I_A), plastificante (PCX).....	75
Quadro 6 - Propriedades físicas do CP II-F 40 RS.....	95
Quadro 7 - Composição química do RCA_T e CP-II-F-40 RS na forma de óxidos (% em massa).	109
Quadro 8 - Formulações experimentais de argamassas com diferentes frações mássicas de $X_{CP II}$, X_{RCAT} , X_{AREIA} , plastificante (X_{PCX}), incorporador de ar (X_{IA}), retentor de água (X_{M-HEC}) e X_{AGUA} , juntamente com as propriedades no estado fresco.	118
Quadro 9 - Formulações experimentais de argamassas com diferentes frações mássicas de $X_{CP II}$, X_{RCAT} , X_{AREIA} , plastificante (X_{PCX}), incorporador de ar (X_{IA}), retentor de água (X_{M-HEC}) e X_{AGUA} , juntamente com as propriedades no estado endurecido.	119
Quadro 10 - Correlações lineares r entre os parâmetros de dosagem e as propriedades das argamassas.	121
Quadro 11- Formulação otimizada em função dos parâmetros requeridos para a argamassa de revestimento ecoeficiente ARV-III.	136
Quadro 12 - As propriedades no estado fresco e endurecido previstas para esta formulação, bem como os resultados experimentais.	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização química do CP II-F 40-RS.	73
Tabela 2 - Caracterização física e mecânica do Cimento Portland CP II-F-40 RS.	74
Tabela 3 - Ingredientes e limites adotados no projeto de mistura em fração mássica.	79
Tabela 4 - Formulações de base estabelecidas e randomizadas pelo software Design Expert®, com as respectivas frações mássicas dos materiais com as formulações de repetição.	80
Tabela 5 - Composição química do RCA na forma de óxidos (% em massa).	98
Tabela 6 - Propriedades físicas do RCA _T	106
Tabela 7 - Propriedades físicas do CP II-F-40 RS40 RS e RCA _T	108
Tabela 8 - Parâmetros para atendimento dos requisitos classificatórios descritos na NBR 13281 (ABNT, 2023).	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AI	Teor de ar incorporado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABREA	Associação Brasileira dos Expostos ao Amianto
ARE	Argamassa de revestimento ecoeficiente
BET	Brunauer, Emmet e Teller
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DEF	Densidade no estado fresco
DEE	Densidade no estado endurecido
DRX	Difratometria de raios-X
DSC	Calorimetria diferencial de varredura
DTG	Termogravimetria derivada
FRX	Fluorescência de raios-X
FTIR	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier
IARC	Agência Internacional para Pesquisa do Câncer
IC	Índice de consistência
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MOE	Módulo de elasticidade
OMS	Organização Mundial da Saúde
RA	Retenção de água
RCA	Resíduo de cimento-amianto
RCA _T	Resíduo de cimento-amianto tratado
R _C	Resistência à compressão axial
R _T	Resistência à tração
TG	Termogravimetria

SUMÁRIO

RESUMO.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE QUADROS.....	xv
LISTA DE TABELAS.....	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvii
1 INTRODUÇÃO	21
2 OBJETIVOS	25
2.1 OBJETIVO GERAL.....	25
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
3 REVISÃO DA LITERATURA	26
3.1 FIBRAS DE AMIANTO	26
3.2 APLICAÇÕES DAS FIBRAS DE AMIANTO	30
3.3 RISCOS À SAÚDE ASSOCIADOS AO AMIANTO	31
3.4 RESÍDUOS DE CIMENTO-AMIANTO.....	33
3.5 TRATAMENTO DOS RESÍDUOS CIMENTO-AMIANTO.....	34
3.5.1 Tratamento Químico.....	35
3.5.2 Tratamento mecanoquímico	36
3.5.3 Solidificação e estabilização.....	37
3.5.4 Vitrificação	37
3.5.5 Métodos biológicos	38
3.5.6 Tratamento Térmico	39
3.6 REUTILIZAÇÃO DO RCA _T NA PRODUÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS..	41
3.6.1 Considerações do capítulo apresentado.....	45
3.7 IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS À PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND.....	46
3.8 ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO.....	47
3.8.1 Conceito de argamassa	47
3.8.2 Cenário atual.....	50
3.8.3 Efeitos das matérias-primas na produção de argamassas de revestimentos	53
3.9 PROJETO ESTATÍSTICO DE EXPERIMENTOS	57
3.9.1 Considerações do capítulo apresentado.....	68

4	METODOLOGIA.....	69
4.1.1	MATERIAIS	71
4.1.2	Procedimentos de caracterização de materiais	75
4.1.3	Metodologia de dosagem das argamassas ecoeficientes	78
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	81
4.3	PREPARAÇÃO DA ARGAMASSA.....	81
4.4	MÉTODOS DE ENSAIO.....	82
4.4.1	Caracterização das argamassas no estado fresco.....	82
4.5	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDIO	85
4.5.1	Densidade de massa aparente no estado endurecido	85
4.5.2	Resistência à tração na flexão e compressão.....	86
4.5.3	Resistência de aderência à tração	87
4.5.4	Aderência superficial.....	87
4.5.5	Módulo de elasticidade.....	88
4.5.6	Determinação da variação dimensional de barras de argamassa.....	89
4.5.7	Estudo das formulações de base e determinação da formulação otimizada	90
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	93
5.1.1	Caracterização do agregado miúdo.....	93
5.1.2	Caracterização do Cimento Portland CP II-F-40 RS40 RS.....	94
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO RCA.....	97
5.2.1	Caracterização por Fluorescência de Raios-X.....	97
5.2.2	Caracterização por Difração de Raios-X.....	99
5.2.3	Observação por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	101
5.2.4	Caracterização por Análise Térmica.....	104
5.3	CARACTERIZAÇÃO do RCA _T	106
5.3.1	Caracterização física.....	106
5.3.2	Caracterização química por Fluorescência de raios-X (FRX).....	108
5.3.3	Caracterização mineralógica por Difração de raios-X (FRX).....	109
5.3.4	Caracterização por Análise Térmica (TG/DTG)	112
5.3.5	Caracterização por Análise FTIR	114
5.3.1	Caracterização microestrutural por Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)	
	115	
5.4	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS	117

5.4.1	Correlações lineares destacáveis	120
5.4.2	Modelos de previsão das respostas experimentais	127
6	CONCLUSÕES.....	141
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	144
8	REFERÊNCIAS	145
9	ANEXOS	160

1 INTRODUÇÃO

O cimento-amianto foi amplamente utilizado na indústria da construção civil em virtude da sua boa resistência mecânica, incombustibilidade, e excelente propriedade isolante. A indústria de cimento-amianto foi a maior consumidora de amianto, utilizando 85% do amianto como componente de telhas, reservatórios, tubos, painéis entre outros produtos (Luberto *et al.*, 2019).

De acordo com (Spasiano; Pirozzi, 2017), a exploração global de amianto ultrapassou 210 milhões de toneladas entre 1900 e 2015, sendo que o seu auge aconteceu em 1977, quando foram produzidas aproximadamente 4,8 milhões de toneladas em 25 países (Park *et al.*, 2012). No Brasil, essa exploração alcançou 8,8 milhões de toneladas entre os anos de 1940 e 2018 (Flanagan, 2019; Virta, 2006).

De acordo com as estimativas baseadas na quantidade de fibras de amianto extraídas para consumo interno no Brasil, calcula-se que atualmente existam cerca de 100 milhões de toneladas de produtos manufaturados contendo fibras de amianto (Carneiro, 2021).

O potencial carcinogênico do amianto começou a ser evidenciado no início do século XX, mas foi na década de 1930 que os primeiros estudos sistemáticos começaram a documentar os riscos à saúde (Cooke, 1924; Castleman, 1991). Embora a menção ao ano 1907 esteja associada aos primeiros relatos de doenças pulmonares em trabalhadores expostos ao amianto (Murray, 1907), foi na década de 1950 que a ligação entre amianto e câncer se tornou mais clara e amplamente aceita. O primeiro estudo epidemiológico demonstrando a associação entre exposição ao asbesto e câncer de pulmão foi descrito em 1955, por Doll (1955).

No entanto, a descoberta do potencial carcinogênico das fibras de amianto, resultou na proibição da sua exploração em vários países (ABREA, 2018). Dados publicados pela *International Agency for Research on Cancer* (IARC) informam que, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), cerca de 125 milhões de pessoas estão expostas às fibras dispostas nos artefatos presentes no local de trabalho, além de estimar a morte de 107 mil pessoas por ano causadas pela exposição ao amianto (IARC, 2012).

Este número foi atualizado num estudo de 2015, que estima que no ano 2013 morreram de câncer, por exposição ocupacional ao amianto, cerca de 194 mil pessoas. Esse número significa que o amianto é a causa de quase dois terços (63,8%) de todos os cânceres ocupacionais (Forouzanfar *et al.*, 2015).

Atualmente mais de 70 países proibiram a industrialização e a comercialização de artefatos reforçados com esse silicato fibroso (Kazan-Allen, 2023). No Brasil, a proibição aconteceu em 2017, após determinação do Supremo Tribunal Federal mediante art. 1º da Lei Federal nº 9.055/1995 que proibiu a extração, a produção, a industrialização, a utilização e a comercialização de todos os tipos de amianto em todo território nacional.

A fibra de amianto não é biodegradável, e a gestão de seus resíduos se tornou uma preocupação global. Em muitos países onde o amianto já foi proibido, um nível significativo do mineral ainda permanece em contato direto com a população, seja através do próprio ambiente, nos edifícios e dispositivos, a exemplo da Itália: país onde a quantidade de RCA atingiu 30 milhões de toneladas (Plescia *et al.*, 2003).

Da mesma forma, em países como Bélgica e Polônia, as autoridades sanitárias informaram que a quantidade atual de produtos à base de amianto dentro e à volta dos edifícios é estimada em 3,7 e 15,5 milhões de toneladas, respectivamente. Nos dois países, esse montante de resíduo motivou a implementação de planos de eliminação progressiva dos materiais contendo amianto. No caso da Bélgica, especificamente, o plano tem como meta de erradicação, o ano de 2040 (Ovam, 2016; Witek; Kusiorowski, 2017).

Em diversas partes do mundo (Itália, Polônia, Canadá, Austrália, Brasil) têm sido realizadas pesquisas com o objetivo de desenvolver métodos que possibilitam a eliminação da crisotila e a reutilização dos RCA, a partir de tratamentos físicos, químicos, biológicos e térmicos (Gleichmar *et al.*, (1997); Gualtieri *et al.*, (2008); Viani; Gualtieri (2013); Kusiorowski *et al.*, (2016); Witek; Kusiorowski, (2017); Spasiano *et al.*, (2019), Janeczek; Obmiński (2020); Ligabue *et al.*, (2020)).

No Brasil, ainda não existem perspectivas para a criação de planos de eliminação dos RCA, contudo, estudos realizados por Carneiro (2021) e Santana (2024) foram pioneiros em transformar os RCA em material cimentício suplementar ou precursor para matrizes alcali-ativadas, sem comprometer as suas propriedades mecânicas.

Carneiro (2021) avaliou que os resultados de tratamento térmico mostraram que as condições ótimas à realização do tratamento foram 5 kg de RCA, 800 °C, durante 1 h. Utilizando estes parâmetros, a crisotila foi completamente eliminada, e o resíduo tratado apresentou 40,42% de belita, o que confere ao material a capacidade aglomerante, com emissão de CO₂ estimada em 175,6 g/kgCO₂ de resíduo tratado.

As opções mais efetivas de tratamento incluem tratamento químico, mecânico, solidificação, vitrificação, biológicos e térmicos. Elas são responsáveis por alterar as

propriedades químicas e morfológicas das fibras de amianto, resultando em compostos inertes e seguros. Desta maneira, as presentes técnicas permitem a conversão de resíduos perigosos como os RCA, em materiais com valor agregado, contudo, o processo de inertização do resíduo é uma tarefa complexa e dispendiosa, mas, fundamental para a destinação nobre desse material (Iwaszko *et al.*, 2018).

De acordo com o Brycht, 2022 o tratamento térmico é um dos métodos mais conhecidos e eficazes. Este processo envolve a neutralização do amianto em temperaturas acima de 700° C. O produto obtido pode ser utilizado com sucesso no setor de construção para a produção de cerâmica, cimento e geopolímeros.

A utilização do RCA_T torna-se uma alternativa sustentável como fonte de SiO₂ e CaO, componentes constituintes no cimento Portland, aglomerante principal em argamassa de revestimento industrializada: material utilizado para revestir superfícies de paredes e tetos em construções. Ela desempenha várias funções, incluindo a proteção da alvenaria ou substrato, o nivelamento de irregularidades e a preparação da superfície para a aplicação de tintas ou revestimentos decorativos.

A argamassa de revestimento é amplamente utilizada na construção civil, entender suas propriedades e comportamento pode levar a melhorias significativas na qualidade das construções, durabilidade e estética dos edifícios. A NBR 13281 (ABNT, 2023) especifica os critérios e requisitos para a obtenção de argamassas de revestimento, apresenta um significativo desafio e uma busca constante por parte dos fabricantes locais. A norma estabelece parâmetros rigorosos de desempenho, como aderência, resistência mecânica, permeabilidade, e durabilidade, que são essenciais para a segurança e a longevidade das edificações.

A classificação brasileira das argamassas, categorizadas como ARV-I, ARV-II e ARV-III, demanda uma análise criteriosa das propriedades e do desempenho dos materiais utilizados. Dentre essas categorias, a ARV-III destaca-se por ser uma argamassa inorgânica indicada para revestimentos internos de qualquer edificação e para revestimentos externos de edifícios com altura superior a 60 metros, considerando o nível médio da rua da fachada principal. A escolha de estudar especificamente a argamassa de revestimento é justificada pela sua relevância técnica e prática no cenário da construção civil.

Nesse contexto, aliado às novas exigências técnicas, a indústria da construção civil tem buscado alternativas sustentáveis para a produção de argamassas.

As argamassas ecoeficientes, ou seja, aquelas produzidas com redução nos impactos ambientais, representam uma alternativa para o desenvolvimento sustentável deste material.

Estas argamassas reduzem a extração de matéria-prima, a energia de calcinação e a emissão de CO₂. Além disso, aproveitam resíduos como matéria-prima e encapsulam metais pesados. Incorporando materiais reciclados ou subprodutos industriais em sua composição, essas argamassas surgem como uma opção promissora para a construção civil sustentável. Além disso, essa modalidade de material visa reduzir o consumo de energia durante a produção ou minimizar as emissões de dióxido de carbono, um gás cuja emissão global média é de 0,83 kg CO₂ por kg de cimento produzido, representando 8% das emissões totais mundiais (Neslen; Vaughan, 2015; Teklay; Yin; Rosendahl, 2016).

O estudo aprofundado da inserção de resíduos nas argamassas é essencial para o desenvolvimento de materiais de construção sustentáveis e eficientes. A dosagem das argamassas apresenta diversas dificuldades devido à complexa interação entre os ingredientes utilizados. Cada componente, como cimento, areia, água e aditivos, influencia diretamente as propriedades do produto, como trabalhabilidade, resistência mecânica, aderência e durabilidade. Essas interações podem variar significativamente com pequenas alterações nas proporções dos ingredientes.

Dada a complexidade da formulação de traços de argamassas, torna-se importante o uso de um projeto estatístico de mistura para prever suas propriedades de forma precisa. Esse método permite a avaliação sistemática dos efeitos individuais e combinados dos componentes da mistura, proporcionando uma base sólida para a formulação otimizada. Através de modelos de previsão estatísticos, é possível identificar as proporções ideais dos materiais, garantindo que a argamassa atenda às especificações desejadas e às normas técnicas aplicáveis. Além disso, o uso desse projeto não apenas facilita a compreensão das interações entre os ingredientes, mas também contribui para a eficiência do processo de desenvolvimento, reduzindo o número de experimentos necessários, economizando tempo e recursos, e alcançando resultados mais confiáveis e repetitivos, assegurando a qualidade e a performance do produto.

Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objetivo implementar e avaliar o tratamento térmico do resíduo de cimento-amianto proposto por Carneiro (2021), utilizando o material tratado como matéria-prima na produção de argamassa de revestimento ecoeficiente. Para tanto, a dosagem foi realizada por meio de um projeto de mistura estatístico. O estudo analisou os efeitos do resíduo de cimento-amianto nas misturas e, por meio de modelos de previsão estatísticos, propôs uma equação para obtenção de uma argamassa conforme a classificação estabelecida pela norma NBR 13281 (ABNT, 2023).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos dos resíduos de cimento-amianto tratados termicamente nas propriedades das argamassas de revestimento ecoeficientes e o seu potencial de uso como material cimentício suplementar, permitindo a obtenção de um produto sustentável a partir da redução do teor de clínquer.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar este objetivo:

- Identificar as mudanças físico-químicas e mineralógicas e principais fases presentes no RCA_T ;
- Validar o processo de produção e caracterização do RCA, além de avaliar as propriedades químicas, físicas e mineralógicas do resíduo de cimento-amianto tratado (RCA_T) como material suplementar na produção de argamassas de revestimento ecoeficientes;
- Avaliar as propriedades das argamassas ecoeficientes produzidas no estado fresco e endurecido;
- Explorar o delineamento estatístico de mistura aliado à otimização simultânea e propor a equação ótima para obtenção da formulação que apresente teores ótimos de substituição do cimento Portland em argamassas de revestimento.

3 REVISÃO DA LITERATURA

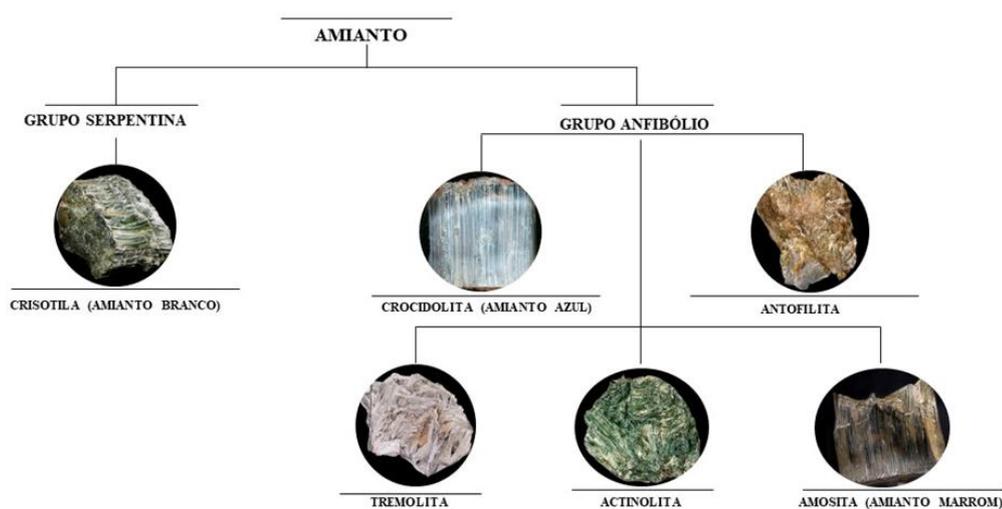
Este capítulo inicia com uma breve revisão sobre as principais características relacionadas às fibras de amianto e os resíduos de cimento-amianto. Ademais, os impactos ambientais oriundos da produção do cimento Portland, com destaque à produção de argamassas de revestimento industrializadas. Por fim, serão apresentados os conceitos do delineamento estatístico de experimentos.

3.1 FIBRAS DE AMIANTO

As fibras de amianto (asbesto) são silicatos fibrosos naturais que podem ser classificados em serpentinas ou anfibólio, em função da sua estrutura cristalina e composição química (Iwaszko, 2019). A parte fibrosa do amianto, visível na rocha *in natura*, fez com que ela fosse popularmente chamada de “rocha cabeluda”. Sua composição inclui silicatos hidratados de magnésio, ferro, cálcio e sódio (Castro; Giannasi; Novello, 2003)

Embora exista cerca de trinta minerais asbestiformes conhecidos, comercialmente o termo amianto abrange dois grupos principais: serpentinas (crisotila) e anfibólios (tremolita, actinolita, antofilita, amosita e crocidolita). Em função da sua estrutura cristalina e composição química se apresentam em diferentes tipos, cores e texturas mostradas na Figura 1.

Figura 1 - Principais tipos comerciais de amianto.



Fonte: Adaptado de Lombardi Filho (2022).

O amianto foi descoberto e explorado em Chipre, há aproximadamente 5000 anos (Strohmeier, *et al.*, 2010), sendo utilizado na manufatura de vestes de cremação, pavios de lamparinas de azeite, chapéus e sapatos (Ross; Nolan, 2003).

Na Finlândia, cerâmicas datadas de 2500 a.C. foram encontradas com amianto adicionado, utilizado para aumentar a resistência das panelas (Darcey; Feltner, 2014). O emprego de amianto em cerâmica começou na Idade da Pedra e continuou até a Idade do Ferro (Portezan, 2013). Além disso, o amianto era tradicionalmente usado para selar fendas nas habitações (Selikoff; Lee, 1978).

Uma das referências mais antigas ao uso do amianto descreve sua aplicação nos pavios da lamparina de ouro da estátua da deusa Atena, esculpida por Calímaco, um escultor ateniense do século V a.C. (Selikoff; Lee, 1978). Heródoto (484-425 a.C.) documentou o uso do amianto nos pavios das lamparinas na Grécia antiga (Ross; Nolan, 2003). Durante a Revolução Industrial, as fibras de amianto foram amplamente empregadas devido às suas propriedades, como baixa condutividade térmica e resistência a atrito e corrosão, atendendo às exigências dos equipamentos produzidos.

De todos os minerais de amianto, apenas três são amplamente utilizados comercialmente, especialmente na indústria da construção: a crisotila (amianto branco), e em menor proporção, a crocidolita (amianto azul) e amosita (amianto marrom). A caracterização mais detalhada destas três fibras pode ser observada a seguir no Quadro 1.

Quadro 1 - Características das fibras crisotila, crocidolita e amosita.

Propriedade	Crisotila	Crocidolita	Amosita
Cor	verde, dourado, amarelo, branco após fibração	azul escuro, preto	cinza, marrom
Nome comum	amianto branco	amianto azul	amianto marrom
Composição química	$[Mg_3 Si_2O_5 (OH)_4]_n$	$[NaFe_2+ 3 Fe_3+ 2 Si_8O_{22}(OH)_2]_n$	$[(Mg,Fe_{2+})_7 Si_8O_{22}(OH)_2]_n$
Brilho	sedoso, fosco	Vítrea	Vítrea
Resistência à ácidos	muito pobre	bom	Bom
Resistência a álcalis	Muito bom	bom	Bom
Resistência a álcalis	Baixo	alto	Alto
Suscetibilidade a fiação	muito bom	pobre	Pobre
Flexibilidade	Alto	médio	Médio
Resistência à tração [MPa]	560–725	700–2100	110–650
Dureza Mohs	2.5–4.0	4.0	5.5–6.0
Temperatura de decomposição [°C]	460–850	400–900	600–1100
Temperatura de fusão [°C]	1515	1170	1395
Densidade [g/cm ³]	2.4–2.6	3.0–3.4	3.1–3.6

Fonte: Adaptado de Kusiorowski *et al.* (2023).

A crisotila (amianto branco) é o único membro da família serpentina. Suas fibras são longas, encaracoladas e filamentosas, tornando-se uma excelente matéria-prima para produtos que exigem flexibilidade. O grupo das serpentinas é constituído de fibras curvas, flexíveis, finas, sedosas, que podem ser encontradas na forma polimórfica “crisotila” conforme apresenta a Figura 2.

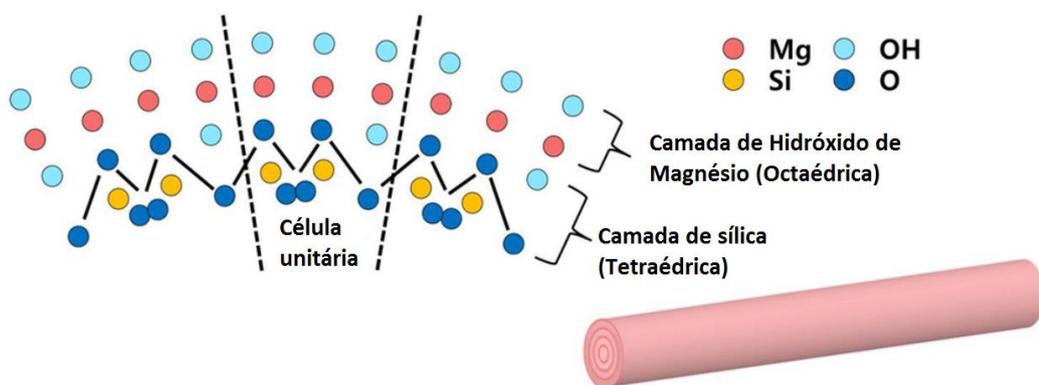
Figura 2 - Fibras de amianto crisotila in natura.



Fonte: Duarte (2010).

O tetraedro de silicato (SiO_4) é a unidade química básica de todos os minerais de silicato. O número de tetraedros na estrutura cristalina e como eles estão dispostos determinam como um mineral de silicato é classificado. Os silicatos de serpentina são classificados como 'silicatos de folha' porque os tetraedros são dispostos para formar folhas. O magnésio é coordenado com o átomo de oxigênio nos silicatos de serpentina. A Figura 3 representa, de forma esquemática, a estrutura tubular da crisotila, em camadas octaédricas de Mg na superfície da seção transversal sobrepondo a camada de Si tetraédrica (Jeong; Moon; Roh, 2016).

Figura 3 - Representação esquemática da estrutura tubular da crisotila, em camadas octaédricas de Mg na superfície da seção transversal sobrepondo a camada de Si tetraédrica.



Fonte: Adaptado de (Roh; Jeong; Moon, 2016).

A estrutura cristalina tubular do amianto crisotila está em função do enrolamento das camadas octaédricas $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$ e as tetraédricas $[(\text{Si}_2\text{O}_4)]$ que têm diferentes dimensões cristalográficas na composição da cela unitária estrutural: $a=5,4 \text{ \AA}$ e $b=9,3 \text{ \AA}$ (brucita) e $a=5,0 \text{ \AA}$ e $b=8,7 \text{ \AA}$ (sílica). Isso produz um desemparelhamento entre as camadas de magnésio e sílica. Essa tensão provoca um enrolamento das camadas, ocasionando um fenômeno conhecido como serpentinização, dando origem a uma fibrila de geometria tubular. A justaposição entre 8 a 12 camadas, obtém-se uma fibrila, com diâmetro externo entre 15 a 50 nm e 7 nm interno, aproximadamente. Esta estrutura tubular é geralmente oca podendo estar preenchida por material não cristalino (Zucchetti, 1994).

3.2 APLICAÇÕES DAS FIBRAS DE AMIANTO

Das propriedades mais importantes do amianto crisotila evidenciam-se a alta resistência mecânica e incombustibilidade. Outras características notáveis incluem alta flexibilidade, baixa resistência a ácidos, baixa condutividade térmica, boa capacidade de isolamento elétrico e acústico, baixa permeabilidade magnética, e resistência ao calor e ataques bacteriológicos. A crisotila também possui uma superfície específica que permite a absorção e adsorção de diversos produtos e moléculas, além de ter uma alta resistência dielétrica e uma afinidade elevada com cimento, resinas e ligantes plásticos, formando uma trama estrutural (Luz; Lins, 2008).

Segundo Bianchi e Bianchi (2015), os materiais contendo amianto foram empregados desde 4000 a.C. com a fabricação de produtos cerâmicos na Finlândia. A partir deste momento, as fibras de amianto foram aplicadas em mais de 3000 produtos diferentes (Bloise; Catalano; Gualtieri, 2018; Harris; Kahwa, 2003), com destaque para a indústria de manufaturados de fibrocimento (telhas, tubos e reservatórios) pelo seu amplo uso em moradias de baixa renda, devido ao custo reduzido e facilidade de instalação.

O amianto foi a primeira aplicação de fibra natural em escala industrial. Esta fibra foi incorporada na forma do mineral (asbestos) como reforço de matrizes à base do cimento. O processo de fabricação de telhas de cimento-amianto mais utilizado mundialmente foi patenteado em 1900 por Ludwig Hatschek, recebendo o mesmo nome (Couts; Ridikas, 1982).

O processo Hatschek é empregado na fabricação de papel e de telhas onduladas. Neste processo, uma suspensão de água, cimento, alguns minerais e fibras são misturados e

introduzidos em uma cuba, contendo cilindros envolvidos por uma tela. Estes cilindros recolhem uma quantia desta mistura e o excesso de água fica retido no interior do cilindro. As finas camadas formadas nestes cilindros são agrupadas em um feltro que passa ao longo de caixas de vácuo, para retirar o restante da água. As camadas acumuladas seguem para um cilindro, que prensa, uniformizando o produto (Negro *et al.*, 2005).

As telhas de cimento-amianto foram utilizadas mundialmente nas construções comerciais, residenciais e industriais. Devido a esta utilização, em mais de cem países, foram produzidos cerca de 30 milhões de toneladas anuais de telhas onduladas (Oliveira, 2010).

Essa aplicação fez o mercado multiplicar a produção de telhas, tubos e divisórias, revolucionando a construção civil. Em 1929 foi desenvolvido o processo de produção de tubos de fibrocimento para a distribuição de água potável, coleta e rede de esgotos. O fibrocimento era utilizado principalmente em reservatórios, telhas onduladas e planas, tubos de pressão, painéis de fachada, calhas, revestimentos, isolamentos térmicos/acústicos entre outros (Landim, 2020).

Donovan e Pickin (2016) realizaram um estudo onde estimaram que na Austrália no período de 1920 a 2003 o consumo de amianto foi de 12,8 milhões de toneladas (Mt). Estima-se que 90% do amianto consumido na Austrália foi utilizado em misturas cimentícias, sendo divididas em dois principais grupos, dutos de água e materiais de construção cimentícios.

As tubulações de água de cimento consumiram até 40% de amianto, ou 36% do total de amianto consumido, 60% em construções residenciais e comerciais e 10% em produtos para piso, fricção, cobertura, entre outros.

Entre os anos 2000 e 2008, as exportações brasileiras de amianto aumentaram em 177,7% e, com relação a produção nacional, 99% foi destinada a produtos de fibrocimento. No Brasil, o setor da construção civil representou por mais de 98,21% do consumo interno de fibras de amianto crisotila. O percentual restante era empregado na produção de materiais de fricção, produtos de vedação, tecidos especiais, papéis e papelões (Brasil, 2017).

3.3 RISCOS À SAÚDE ASSOCIADOS AO AMIANTO

Apesar de relatos sobre patologias associadas ao amianto datarem desde os tempos de Heródoto (484-425 a.C.), somente em 1907 surgiu os primeiros estudos científicos na Inglaterra, evidenciando que o amianto poderia provocar doenças em trabalhadores (Ross; Nolan, 2003).

Foi apenas na década de 1950 que pesquisas científicas pioneiras emergiram, demonstrando que as enfermidades relacionadas ao amianto também afetavam populações que

ocasionalmente ou indiretamente estavam expostas a essa substância. A influência dessas pesquisas acadêmicas na formulação de políticas públicas foi praticamente inexistente.

O pioneiro estudo epidemiológico que estabeleceu a conexão entre o amianto e o câncer de pulmão ocorreu em 1955, revelando um aumento significativo nos casos de câncer de pulmão entre trabalhadores expostos ao asbesto, conforme documentado por Doll (1955). Em 1978, Selikoff divulgou uma análise que envolveu 17.800 trabalhadores expostos ao amianto em estaleiros nos Estados Unidos e no Canadá. O estudo revelou uma incidência significativamente alta de câncer pulmonar nessa população. Somente por volta de 1970, discussões globais sobre o amianto começaram a surgir, e foi apenas na década de 1980 que alguns países começaram a proibir sua utilização. No Brasil, o primeiro projeto de lei nº 3.981 para a substituição gradual do amianto foi proposto em 1993. A comissão especial designada para análise do PL (projeto de lei) apresentou então um projeto substitutivo, que viria a ser sancionado pelo então Presidente da República, Fernando Henrique Cardoso, e convertido na lei Federal (nº 9.055/95) (Benjamin *et al.*, 2018).

Com a descoberta do potencial carcinogênico em 1906 (Stayner; Welch; Lemen, 2013) todos os tipos de amianto foram classificados como perigosos. Por serem respiráveis, as fibras tornam-se perigosas à saúde humana, podendo facilmente penetrar profundamente no sistema respiratório, onde não são removidas pelos mecanismos naturais de limpeza do corpo podendo causar asbestose, câncer de pulmão e mesotelioma pleural, cujos primeiros sintomas podem levar até 30 anos para se manifestar. Apesar de décadas de pesquisa, os mecanismos responsáveis por suas propriedades cancerígenas são ainda amplamente desconhecidos (Mossman, 1988).

Os níveis mais elevados de exposição ocorrem durante a reembalagem de contentores de amianto, a mistura com outras matérias-primas e o corte a seco de produtos com ferramentas abrasivas. A exposição pode também ocorrer durante a instalação e utilização de produtos contendo amianto na manutenção de veículos. Os materiais que contêm crisotila e/ou anfíbio friáveis estão ainda presentes em muitos edifícios e continuam a dar origem às fibras quando ocorre manutenção, reforma, eliminação ou demolição. A exposição pode também dar-se quando os edifícios são danificados em resultado de catástrofes naturais (OMS, 2014).

Estima-se que cerca de 100 mil pessoas morrem todos os anos, vítimas das fibras da exposição ao amianto (Iwaszko *et al.*, 2018), sendo que, no Brasil, estimou-se a morte de 3700 no período de 1980 a 2010. Dados do Ministério da Saúde apontam que foram registradas, entre 2012 e 2017, 600 mortes por mesotelioma e 92 por asbestose no Brasil - conforme a pasta, os óbitos foram causados em decorrência do contato com o amianto (ABREA, 2019).

Algranti *et al.*, (2015) relataram que houve evidência de aumento da mortalidade por mesotelioma no estado de São Paulo no período entre 2000-2012, e estimam um pico de casos de mesotelioma no Brasil entre 2021-2030, aproximadamente 30 anos após o auge de consumo do amianto no país. Frente ao cenário mundial, os países industrializados mostrarão uma tendência na queda dos casos, particularmente nos homens, decorrente ao banimento do amianto na maioria dos mesmos.

Em relação ao número de casos no Brasil, o boletim epidemiológico do Instituto de Saúde Coletiva, da Universidade Federal da Bahia (UFBA), divulgou em sua pesquisa que utilizou dados do Sistema de Informação sobre Mortalidade (SIM), que ocorreram 2.400 mortes por agravos à saúde relacionados ao amianto sendo 2.123 por mesotelioma e 265 por pneumoconiose no período de 10 anos, 2000 a 2011. (Centro Colaborador UFBA/ISC/Pisat, 2012).

No Estado do Paraná, entre os anos de 1980 e 2010, ocorreram 158 óbitos por mesotelioma maligno, sendo 81 homens e 77 mulheres (Pedra, 2015). E, entre os anos de 2001 e 2013, somam-se 47 óbitos registrados pelo SIM (Brasil, 2014b).

3.4 RESÍDUOS DE CIMENTO-AMIANTO

O amianto foi largamente consumido por diversos países por um longo período na história. Após a implantação de políticas de banimento e remoção segura dos resíduos de produção, o meio científico percebeu a necessidade de informações sobre a dispersão subsequente do resíduo no ambiente construído e nos estocados em produtos manufaturados, bem como, o volume a ser descartado. Donovan e Pickin (2016) conduziram um estudo para estimar a vida útil dos produtos contendo amianto na Austrália até o ano de 2100. Para prever a quantidade de produtos que permanecem no ambiente construído, os autores estimaram o tempo de vida médio (Lav) e os anos até que 10% (L10) permanecessem em estoque. Segundo os autores (Donovan; Pickin, 2016), na Austrália em 1981, os estoques atingiram o pico de 10,5 Mt; em 2011, 50% do total de amianto consumido permanecia em uso; em 2016, 44% (5,6 Mt) permanecia em estoque; e em 2055, 10% permanecerão ainda em estoque ou exposto na sociedade. Como o consumo de amianto cessou em 2003, em 2100 todos os produtos teriam atingido essa estimativa L10, tanto para as estimativas longas como para as curtas.

Lombardi (2022) realizou um cálculo da quantidade de materiais de cimento-amianto (MCA) no Brasil. O cálculo das estimativas dos MCA em uso no país e da geração de RCA foi realizado com base em dados de produção e consumo. O levantamento da quantidade de fibras

crisotila comercializadas no mercado nacional, no período de 1998 a 2017, ficou em 2,798 milhões de toneladas. Para o cálculo estimativo da quantidade de MCA o autor pesquisou a evolução de mercado e banimento do amianto, levantando dados de consumo interno de crisotila, de 1998 (período de permissão de uso) até 2017 (ano do banimento), a geração de resíduos de cimento-amianto (RCA) (2012 a 2017). Conforme o Painel da Geração de Resíduos (PGR) no Brasil, contido no site do IBAMA, foram geradas 103,18 mil toneladas de RCA no país, de 2012 a 2017. Constatou-se a média anual de geração de RCA em 17 mil toneladas. Atualmente, no Brasil, grande parte dos resíduos de cimento-amianto são dispostos incorretamente ou em aterros sanitários especiais, o que não possibilita a degradação das fibras.

3.5 TRATAMENTO DOS RESÍDUOS CIMENTO-AMIANTO

As decisões de mudar a forma atual de lidar com o amianto não podem ser tomadas com leveza. É um fato bem reconhecido que a fibra é altamente cancerígena e que a exposição ao amianto deve ser evitada. A melhor maneira de antecipar a possibilidade de exposição, melhor do que o isolamento é destruir completamente a estrutura fibrosa do amianto. Caso contrário, os riscos de exposição serão repassados às gerações futuras (Bureau KLB, 2018).

Uma grande porção do RCA é disposta em aterros sanitários especiais, o que não representa a inertização desses resíduos, já que suas estruturas fibrosas ainda são conservadas, oferecendo um risco para os seres humanos, além da contaminação do meio ambiente (Ramos-bonilla *et al.*, 2019).

O termo "desamiantização" surgiu como resultado da proibição do uso do amianto. Dado que não é mais permitida a extração e comercialização desse mineral, torna-se essencial remover os produtos que contêm essa fibra e dispor adequadamente deles em aterros apropriados (Landim, 2020).

No Brasil, parte do RCA ainda é disposto de forma inadequada, o que mostra que as políticas públicas ainda são pouco efetivas neste cenário. Em 2004 foi aprovada a Resolução CONAMA nº 348/ 2004 que altera a Resolução CONAMA nº 307/ 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. Assim, o Art. 3º, item IV relativo à Classe D de resíduos, passa a vigorar com a seguinte redação:

São resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde (Brasil, 2004, p.1).

Assim, devido à sua toxicidade, o resíduo contendo amianto é classificado como resíduo perigoso e está listado no Anexo A F041 da referida Norma. As orientações para realizar adequadamente todo o procedimento de disposição desses resíduos são detalhadas na NBR 12.235 (ABNT, 1992) — Armazenamento de resíduos sólidos perigosos. O material recolhido deve ser encaminhado para aterros que estejam devidamente qualificados para resíduos do tipo classe I (resíduos perigosos) (Landim, 2020).

A NBR 12.235 (ABNT, 1992) estabelece diretrizes para a contenção temporária de resíduos em áreas autorizadas pelo órgão de controle ambiental, aguardando reciclagem, recuperação, tratamento ou disposição final adequada, desde que estejam em conformidade com as condições básicas de segurança. A norma também enfatiza que nenhum resíduo perigoso pode ser armazenado sem uma análise prévia de suas propriedades físicas e químicas. Isso é fundamental, pois essa análise determina se o resíduo é perigoso ou não, influenciando diretamente no seu armazenamento apropriado (NBR 12.235, ABNT, 1992).

O manuseio do amianto que vem com o próprio processo de destruição ou com a logística de levá-lo ao local de destruição, pode gerar novos riscos de exposição. Antes que o material limpo possa ser reutilizado, deve-se estabelecer, confiabilidade nas técnicas de destruição garantindo eficácia e minimização de erros. Outros aspectos também devem ser levados em consideração, como riscos químicos ou biológicos adicionais que acompanham esses processos de destruição, ou o impacto de sua contribuição com a demanda de CO₂ na atmosfera. A introdução de novas formas de lidar com os resíduos de amianto requer um sólido estudo de negócios e uma licença social e ambiental para operar (Bureau KLB, 2018).

Entre os métodos de tratamento propostos pela literatura, destacam-se o tratamento químico, mecânico, de solidificação e estabilização, vitrificação, tratamentos biológicos e térmicos, que representam as metodologias mais efetivas (Spasiano; Pirozzi, 2017). Em suma, é essencial compreender a metodologia específica de cada tratamento, o que resulta em alternativas viáveis para o descarte de resíduos perigosos através da reutilização dessas matérias-primas. Abaixo, serão descritas tais técnicas.

3.5.1 Tratamento Químico

O método de tratamento químico consiste na dissolução da estrutura fibrosa do amianto por meio de ácidos inorgânicos e orgânicos. Em relação à sustentabilidade, o tratamento químico tem pontos fortes e fracos. Seus pontos fortes são que pode ser combinado com outros

fluxos de resíduos da indústria, como resíduos ácidos, resíduos alcalinos ou CO₂. Isso pode ser vantajoso do ponto de vista da economia de custos de descarte, baixo consumo energético e benefícios ambientais. Outro ponto forte é a destruição completa da fibra do crisotila. (Bureau KBL, 2018). A decomposição do amianto crisotila em solução aquosa de ácido fluorossulfônico foi investigada por Sugama *et al.*, (1998). O processo resultante apresentou forte afinidade pelas camadas externas de brucita da crisotila e levou à sua dissolução via lixiviação dos íons de Mg²⁺.

No entanto, no que diz respeito aos outros tipos de amianto, a destruição completa da fibra ainda precisa ser comprovada. Mas em geral, um ponto mais fraco é que os processos de tratamento químico têm um decaimento assintótico da taxa de reação (dependendo das superfícies reativas e da concentração dos reagentes). Além disso, trabalhar com ácidos fortes requer medidas rigorosas de saúde e segurança; os produtos da reação devem ser neutralizados para serem reutilizáveis.

3.5.2 Tratamento mecanoquímico

O tratamento mecanoquímico, conhecido há 300 anos, envolve a utilização de processos como a moagem para obter materiais quimicamente ativos. Desde o século XIX, a fragmentação é reconhecida como uma reação química que cria novas superfícies reativas. A mecanoquímica é aplicada em diversas reações industriais, como intensificação de processos de dissolução, síntese rápida de substâncias, e controle de propriedades minerais. Durante o processo mecanoquímico, a energia mecânica é convertida em calor e utilizada para fraturas e compressões que afetam a estrutura cristalina dos sólidos (Plescia *et al.*, 2003).

Particularmente, crisotila e anfibólios (crocidolita e amosita) foram convertidos em uma fase amorfa em 4 min e 8 e 12 min respectivamente (Plescia *et al.*, 2003).

A amorfização da crisotila provavelmente se deve à fragmentação energética causada pela moagem: as ligações OH diretas entre as folhas de sílica e brucita são destruídas ou abertas. Conseqüentemente, a ordem cristalina entra em colapso e a amorfização da crisotila é obtida (Colangelo *et al.*, 2011). Os produtos resultantes desses processos são pós isentos de amianto, que poderiam ser reaproveitados para a preparação de argamassas com propriedades mecânicas melhores que as obtidas com cal-pozolana (Colangelo *et al.*, 2011).

Os aspectos positivos de sustentabilidade do tratamento mecânico dos resíduos de amianto são sua simplicidade e robustez (garantia de qualidade simples: dimensões e teor de umidade do influxo e tempo de processo (tempo de residência nos reatores de processo)).

Instalações para limpeza das poeiras e gases de exaustão e outras técnicas de controle (possivelmente também incluindo ruído) são relativamente simples, também porque o processo ocorre, tanto quanto possível, em um sistema fechado (Bureau KLB, 2018).

O consumo de energia relativamente baixo (e a redução no potencial de pegada de CO₂) do processo de moagem (incluindo o pré-tratamento, ou seja, britagem e secagem) é outro ponto forte. Por causa de reutilização do produto, economiza-se energia para ganhar e produzir matérias-primas como cimento (Bureau KLB, 2018)

3.5.3 Solidificação e estabilização

A utilização do tratamento de solidificação e estabilização é considerada uma estratégia segura e apropriada para os resíduos perigosos destinados aos aterros. A deposição em aterro de resíduos perigosos após os tratamentos de solidificação e estabilização é considerada como uma forma segura e estratégia apropriada de gestão de resíduos (Ucaroglu, Talinli, 2012). No entanto, essa prática não resulta na inativação do amianto presente nos produtos, já que, os resíduos são encapsulados por meio de estabilizadores orgânicos e inorgânicos empregando equipamentos de pulverização, reduzindo a liberação das fibras de amianto. O encapsulamento não proporciona uma solução duradoura, uma vez que o amianto permanece no edifício. Por esta razão, o material encapsulado deve ser verificado periodicamente para garantir que o encapsulante não foi danificado. Ademais, os estabilizadores, uma vez aplicados, irão deteriorar-se com o tempo e a necessidade de repintura ocorrerá periodicamente ao longo da vida do edifício (Spasiano; Pirozzi, 2017). Além disso, o volume de resíduos destinados a aterros poderá aumentar entre 30 e 200% (Plescia *et al.*, 2003).

3.5.4 Vitrificação

O método de vitrificação baseia-se na transformação do RCA em um silicato por meio de tratamento térmico levando-o à fusão dos compostos. Normalmente, as temperaturas utilizadas nesse processo, entre 1200 e 1600 °C, permitem a eliminação completa da crisotila, resultando em um produto vitrificado (Colombo *et al.*, 2003). Esse processo além de destruir o mineral fibroso nocivo, reduz o volume de resíduos em aterros, uma vez que partes dos produtos podem ser reutilizados. A vitrificação por aquecimento pode ser realizada em instalações industriais como a estação de tratamento GeoMelt® no Japão. Esta planta, projetada para o tratamento de resíduos contaminados radioativamente, pode efetivamente destruir as fibras de

amianto e reduzir o volume em aproximadamente 80% em relação ao volume inicial do resíduo. Em especial, 3 toneladas de resíduos contendo amianto foram tratadas com uma temperatura máxima de fusão de 1565 C, por 44 h, e com eficiência de processo igual a 0,91 kW/kg (Finucane *et al.*, 2008). Dentre as principais desvantagens, está o elevado consumo energético para seu tratamento e, além disso, a emissão de CO₂ oriundo dos carbonatos presentes nos RCA (Gomez *et al.*, 2009).

3.5.5 Métodos biológicos

A atividade microbiana afeta diretamente a dissolução de minerais e argilominerais, por exemplo, pela produção *in situ* de ácidos orgânicos ou inorgânicos, biofilme de ocorrência natural (Bhattacharya *et al.*, 2016; Gadd *et al.*, 2014; Berry *et al.*, 2024), também apoiado por tratamentos com ácidos de grau analítico (Cheshire; Guven, 2005; Rozalen; Huertas, 2013). Ao contrário de outros métodos, esta estratégia poderia ser empregada para descontaminar terras, por exemplo, áreas utilizadas para armazenamento ou descarte dos RCA. Seus pontos fortes são baixo consumo de energia, processo *in situ*; espera-se que a pegada de CO₂ seja baixa; nenhum transporte é necessário para remediação do amianto no solo: o processo de remediação *in situ* é sustentável, mas lento (mês/anos) o que requer manejo/proteção do local durante o tratamento.

Borges *et al.*, (2022) investigaram uma rota biológica alternativa para promover a biorremediação desse tipo de resíduo perigoso. Com base no conhecimento de que alguns microrganismos, como *Aspergillus niger* (fungo) e *Acidithiobacillus thiooxidans* (bactéria) são potenciais produtores de ácido orgânico ou inorgânico, os autores avaliaram a dissolução da estrutura da crisotila, que é o componente tóxico nesses materiais, sob condições de cultivo submerso e em estado sólido. A porcentagem de liberação de Mg e Ca avaliada e os dados de caracterização de MEV/EDS, DRX e FTIR mostraram um alto potencial de ambos os microrganismos estudados para degradação total da crisotila (até 100%, com base no teor de Mg), usando o filtrado microbiano, cultivo submerso e em estado sólido. Os autores concluíram que o estudo se apresenta com um potencial tratamento biológico de materiais de fibrocimento que também pode ser aplicado *in situ* em áreas contaminadas com amianto, sendo uma alternativa não aplicada a métodos de uso intensivo de energia, como tratamento mecânico ou térmico.

3.5.6 Tratamento Térmico

O tratamento térmico é uma técnica bem conhecida e frequentemente utilizada para a destruição de fibras de amianto. Basicamente consiste em aquecer o resíduo a altas temperaturas por tempo suficientemente longo. Em certas temperaturas (mais altas), as fibras de amianto são instáveis e se decompõem naturalmente. Com o aumento das temperaturas ocorre a evaporação geral da água adsorvida, desidratação e cristalização (Spasiano; Pirozzi, 2017). Esse processo de conversão passa por diferentes fases, nas quais passam diferentes estágios mineralógicos intermediários (Kusiorowski *et al.*, 2012).

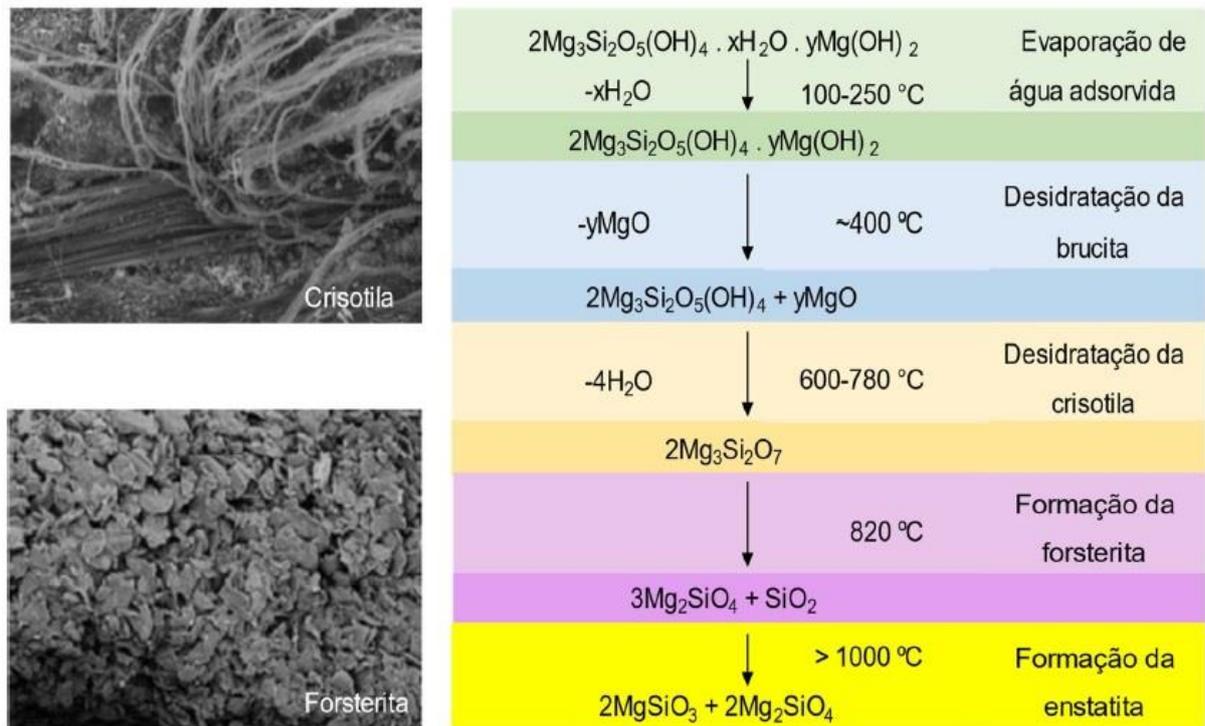
Esse método de tratamento representa uma das técnicas mais utilizadas na inertização do RCA, com a possibilidade de se reutilizar posteriormente. Essa técnica se baseia no fato de que o amianto se decompõe em altas temperaturas. Dentre as várias fontes de calor, o micro-ondas, plasma, arco elétrico ou aquecimento resistivo configuram as mais usuais (Leonelli *et al.*, 2006; Boccaccini *et al.*, 2007; Kusiorowski *et al.*, 2012, 2015;). Temperaturas acima de 700 °C provocam alterações significativas na estrutura do mineral fibroso, levando à eliminação das fibras. Alguns autores (Gualtieri; Tartaglia, 2000) demonstraram que o tratamento térmico permite a reciclagem dos resíduos contendo amianto, transformando-os em fases cristalinas sem características carcinogênicas (Iwaszko; Zawada; Lubas, 2018). Este processo de conversão passa por diferentes fases, em que são passados diferentes estágios mineralógicos intermediários (Kusiorowski *et al.*, 2012).

Spasiano e Pirozzi (2017) observaram que as fibras de amianto são instáveis em altas temperaturas. Entre 500 e 600 °C, começa a perda dos grupos hidroxila da crisotila [$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$], e com o aumento da temperatura ocorre a formação de silicatos anidros ricos em magnésio, tais como forsterita (Mg_2SiO_4) e a enstatita (MgSiO_3) (Gualtieri *et al.*, 2008). Vale ressaltar que esses dois minerais não apresentam estrutura fibrosa ou propriedades carcinogênicas (Gualtieri *et al.*, 2008).

As reações que ocorrem com o aquecimento da crisotila são mostradas na Figura 4. Na temperatura de 100-250°C, o crisotila desidrata ocasionando uma perda de 1 a 2% de seu peso. Em aproximadamente 400 °C ocorre a decomposição térmica do hidróxido de magnésio (brucita). Em temperaturas superiores a 600°C, as fibras de crisotila sofrem desidroxilação, levando a uma perda de massa de 13% (Spasiano; Pirozzi, 2017).

Nessa etapa, se obtém um anidrido amorfo denominado metacrisotila (Mg_3SiO_7). Um aumento adicional da temperatura leva à cristalização da forsterita (Mg_2SiO_4) e enstatita (MgSiO_3) respectivamente nas temperaturas de 820°C e 1000°C (Spasiano; Pirozzi, 2017).

Figura 4 - Principais etapas químicas do processo de decomposição térmica da crisotila.

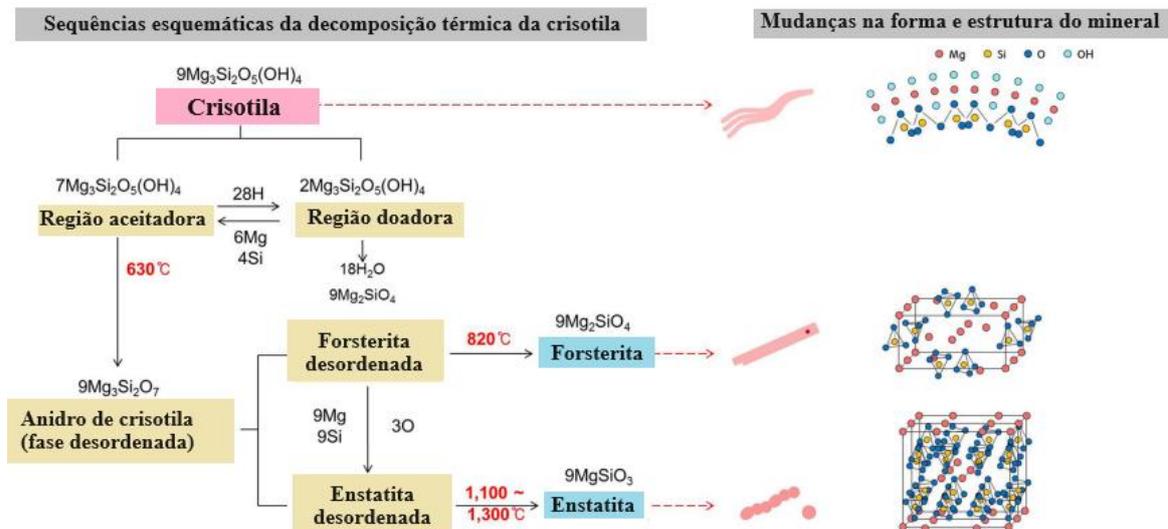


Fonte: Adaptado de Leonelli *et al.* (2006); Spasiano; Pirozzi (2017).

Em diversos estudos, o tratamento térmico se destacou entre os métodos propostos para o tratamento de resíduos de cimento-amianto, demonstrando a maior eficiência na inertização desses resíduos, pois as fibras de amianto foram eliminadas por decomposição térmica (Boccaccini *et al.*, 2007; Carneiro, 2021; Kusiorowski *et al.*, 2012; Kusiorowski; Zaremba; Piotrowski, 2015; Santana *et al.*, 2024).

O processo de decomposição térmica da crisotila e as temperaturas de reação, juntamente com as mudanças na estrutura cristalina e na forma, são apresentados esquematicamente na Figura 5.

Figura 5 - Representação das sequências esquemáticas da decomposição térmica da crisotila e as mudanças na forma e estrutural do mineral.



Fonte: Adaptado de Jeong; Moon; Roh (2016).

Os autores Jeong; Moon; Roh (2016) relatam que tratamentos térmicos a 800°C e 900°C transformam a crisotila, tornando sua superfície mais lisa e suas extremidades em cristais prismáticos arredondados, identificados como forsterita. Em temperaturas de 1.300°C, formam-se minerais esféricos nodulares devido à recristalização gradual da forsterita.

3.6 REUTILIZAÇÃO DO RCA_T NA PRODUÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS.

Diante da crescente demanda por alternativas na gestão e reaproveitamento de materiais perigosos (Gualtieri *et al.*, 2012), especialmente os resíduos contendo amianto, diversos estudos (Ambrosius *et al.*, 1996; Sprung *et al.*, 1998; Gualtieri; Tartaglia, 2000; Gualtieri; Boccaletti, 2011; Viani e Gualtieri, 2013; Zaremba e Piotrowski, 2014; Kusiorowski, Zaremba e Piotrowski, 2016) sugerem a viabilidade desses resíduos como matéria-prima potencial para a fabricação de produtos na indústria da construção civil.

A reciclagem de cimento-amianto para a produção de cimento também foi realizada (Ambrosius *et al.*, 1996; Sprung *et al.*, 1998) e um processo para a utilização de cimento-amianto moído como matéria-prima para a produção de cimento foi patenteado (Gleichmar *et al.*, 1997).

Ambrosius *et al.*, (1996) realizaram um método de tratamento térmico com temperatura de queima aproximadamente de 1800°C. Os autores concluíram que, dependendo do tipo de

combustível utilizado, a substituição do pó bruto de cimento pelo RCA ficou na faixa de 2 a 5% para produção de clínquer de cimento Portland.

Os RCA foram utilizados como matéria-prima para a produção de clínquer (Gleichmar *et al.*, 1997; Yvon; Sharrock, 2011), porém, os autores perceberam que a produção seria limitada tendo em vista os elevados custos associados à inertização dos resíduos.

Gualtieri e Tartaglia (2000) estudaram a reciclagem de materiais contendo amianto através da produção de vidro cerâmico, um componente fundamental no mercado tradicional de cerâmica. O material contendo amianto foi incorporado à sílica e ao feldspato, e posteriormente fundido para criar uma vitro-cerâmica à base de Ca e Mg, que foi então reciclada (5±10% em peso) em uma mistura para a preparação de grés porcelânicos. Os resultados revelaram a destruição do amianto e a formação de fases cristalinas recém-geradas, as quais são completamente atóxicas. O produto com 5% em peso de aditivo nomeado como GC3 apresentou melhores propriedades tecnológicas que a amostra sem aditivo. A resistência às manchas foi claramente melhorada, uma vez que a absorção de água é menor e a densidade aparente é maior. Este processo foi avaliado como promissor. Os mesmos estimaram que os custos desse processo são 10 vezes inferiores aos custos do descarte tradicional de resíduos tóxicos. Além disso, o produto resultante é totalmente seguro para o meio ambiente e apresenta alta resistência de ponto devido à redução da absorção de água e aumento da densidade aparente.

A pesquisa realizada por (Viani; Gualtieri, 2014) empregou RCA pela primeira vez na formulação de cimentos de fosfato de magnésio. Duas amostras foram misturadas com carbonato de magnésio e calcinadas a 1100 e 1300 °C. Sob estas condições, sabe-se que ocorre a destruição completa dos minerais de amianto. O produto, contendo MgO, após reação com di-hidrogenofosfato de potássio solúvel em água, levou à formação de fases hidratadas à temperatura ambiente. Os autores detectaram produtos de reação cristalinos e amorfos, sendo estes últimos provavelmente o precursor metaestável dos primeiros. As resistências medidas estão de acordo com os dados da literatura, sugerindo que este material pode ser utilizado como cimento.

Foi comprovado que a matéria-prima secundária produzida no processo de inertização térmica pode ser utilizada na produção de concreto e elementos de concreto armado, como substituto parcial do cimento (Gualtieri; Boccaletti, 2011; Ranaivomanana; Leklou, 2021), e na produção de geopolímeros (Gualtieri *et al.*, 2012; Gualtieri, 2013). Essas atividades têm um impacto positivo no meio ambiente devido à redução das emissões de CO₂ liberadas durante a produção do cimento Portland.

Os resíduos de amianto desintoxicados também foram utilizados para a produção de materiais cerâmicos incorporando o resíduo de (0-10%) em peso (Kusiorowski *et al.*, 2014, 2015). A adição de resíduos, conforme demonstrado pelos autores reduziu ligeiramente a resistência à compressão e a durabilidade (resistência ao gelo) da cerâmica de clínquer produzida em relação aos materiais de referência, mantendo os parâmetros de acordo com as normas aplicáveis. Além disso, uma pequena adição (5%) de RCA_T na produção de tijolos de construção não afeta negativamente seus parâmetros de resistência à compressão, mas causa descoloração na superfície, o que reduz a estética do produto.

Gualtieri e Boccaletti (2011) empregaram os resíduos de cimento-amianto tratados termicamente (RCA_T) na produção de concreto convencional. O comportamento desta matéria-prima secundária, denominada KRYAS, em concreto comercial foi investigado utilizando cinco misturas diferentes nas quais várias porções (0, 5, 10, 15 e 20% em peso) de cimento foram substituídas por KRYAS. Os autores concluíram que após 28 dias, embora todas as amostras de concreto sejam invariavelmente classificadas como “concreto comum” de acordo com os testes UNI 6132, aquelas com KRYAS apresentaram uma resistência à compressão inferior em relação à norma. Por outro lado, recuperaram a resistência e apresentam valores idênticos aos da norma após 90 dias. A adição da matéria-prima secundária tem o efeito de retardar a cinética de pega/endurecimento porque a principal fase de cimento presente no KRYAS é o C₂S, que tem uma taxa de hidratação mais lenta em relação ao C₃S.

Colangelo *et al.*, 2011, estudaram a produção de argamassas utilizando pó moído de RCA obtido após 120 minutos de processamento em moinho de anéis (MP120). Foi utilizado proporções 50/50 (50 M), 60/40 (60 M) e 70/30 (70 M) de MP120 para cal. Além disso, foi preparada uma argamassa de referência (RM) contendo 60% de pozolana natural (NP) e 40% de cal. Os valores de resistência à compressão medidos nas argamassas após 90 dias de cura foram de 2,26 MPa, 2,29 MPa e 2,17 MPa para os sistemas 50 M, 60 M e 70 M, respectivamente. Estes valores, segundo os autores, foram mais do dobro dos medidos para a argamassa de referência preparada com pozolana natural: neste último caso foi determinado um valor de resistência à compressão de 1,10 MPa. Os autores concluíram que estes resultados comprovam a boa atividade pozolânica dos pós isentos de amianto empregados e confirmam a possibilidade de serem reciclados como adição mineral na fabricação de materiais de construção.

Viani e Gualtieri (2013) estudaram a produção de clínquer sulfoaluminato de cálcio (CSA) com a substituição de até 29% em massa do calcário pelo RCA. Após a dosagem e mistura, as formulações foram submetidas às temperaturas de 1250 °C e 1300°C, obtendo-se a composição das fases semelhantes a um clínquer sem adição de RCA.

Staněk (2017) desenvolveu e patenteou um método para reutilização RCA por meio de tratamento térmico em fornos. Durante o processo, os resíduos são expostos a temperaturas entre 1100 e 1250°C por 2 a 4 horas, seguido por um período de manutenção nessas temperaturas por 6 a 10 horas, antes de serem resfriados gradualmente no forno. Após o resfriamento, o material resultante é triturado e misturado com resíduos de calcário granulado puro, formando entre 10% e 80% do peso total. Segundo o autor, os produtos obtidos possuem uma composição química semelhante ao clínquer Portland, com baixa saturação de cal, embora a composição geral se assemelhe mais à cal hidráulica. Além disso, o autor observou a presença de fases não hidratadas do cimento Portland, como os silicatos de cálcio e a alita.

Carneiro *et al.*, (2022) avaliaram a incorporação do RCA_T como material precursor na produção de ligante álcali-ativado de uma parte. Os autores avaliaram que as formulações com concentração de Metasilicato de sódio sólido (MSS) próximas a 5% e molaridades em torno de 1 M, apresentaram as melhores propriedades mecânicas. Nesse sentido, foi possível verificar que o resíduo tratado termicamente pode ser aplicado à produção de ligantes álcali-ativados de uma parte.

Viani e Gualtieri (2013) relatam que o RCA_T pode ser utilizado como material cimentício, já que este pode melhorar as propriedades mecânicas dos artefatos como resistência à compressão, durabilidade e absorção de água. Além disso, estes resíduos apresentam propriedades hidráulicas a partir da formação das fases mineralógicas semelhantes ao clínquer Portland, como aluminoferrita cálcica [$\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$], maienita ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$), silicato bicálcico (belita, Ca_2SiO_4) e silicato tricálcico (Ca_3SiO_5), podendo ser aplicado como matéria-prima secundária na indústria da construção civil em substituição ao cimento Portland na produção de argamassas de revestimento ecoeficientes, diminuindo assim os impactos ambientais associados às etapas de produção do clínquer e simultaneamente reinserindo na cadeia produtiva um resíduo com alto valor agregado.

Reciclar RCA em uma matéria-prima secundária sustentável seria, portanto, uma abordagem viável para eliminar resíduos perigosos do meio ambiente, reduzir o risco de saúde e conservar recursos naturais. No entanto, existem algumas barreiras a serem superadas como os elevados custos e consumo de energia exigidos pelos tratamentos térmicos, normalmente exigidos nos processos de decomposição do amianto (Spasiano; Pirozzi, 2017).

3.6.1 Considerações do capítulo apresentado

A revisão de literatura explorou profundamente o tema das fibras de amianto, abordando aspectos históricos, propriedades físicas e químicas, usos industriais, riscos à saúde e métodos de tratamento e disposição.

O capítulo de introdução, destacou a composição química da fibra e classificação em serpentinas e anfibólios. A importância histórica e os primeiros usos do amianto foram discutidos, estabelecendo o contexto para sua popularidade e aplicação industrial ao longo dos séculos.

Posteriormente foram detalhadas as propriedades físicas e químicas das principais fibras de amianto utilizadas comercialmente: crisotila, crocidolita e amosita. Suas características como resistência mecânica, flexibilidade e resistência a ácidos e álcalis foram discutidas, fornecendo uma base teórica para entender sua ampla utilização na indústria da construção.

Esse capítulo da dissertação apresentou as aplicações práticas do amianto na indústria, destacando seu uso em fibrocimento, telhas, tubos de pressão e outros produtos de construção. A pesquisa incluiu um estudo de caso da Austrália, onde o consumo de amianto e a vida útil dos produtos contendo amianto foram extensivamente documentados.

A revisão abordou os efeitos do amianto na saúde humana. Estudos epidemiológicos históricos foram levantados, mostrando a ligação entre a exposição ao amianto e doenças graves como asbestose, câncer de pulmão e mesotelioma pleural. Além disso, foram discutidos os desafios na gestão e disposição dos resíduos de amianto, bem como as oportunidades para inovação em métodos de tratamento e reciclagem do RCA. A evolução das políticas públicas em resposta a esses achados também foi abordada.

O estudo bibliográfico explorou os principais métodos de tratamento, que incluem tratamento térmico, químico, mecanoquímico, solidificação e estabilização, e métodos biológicos. O tratamento térmico é amplamente utilizado devido à sua eficácia na decomposição das fibras de amianto, transformando-as em fases minerais não carcinogênicas. No entanto, os elevados custos e consumo de energia são desafios para a implementação de tratamentos eficazes e sustentáveis.

O levantamento de estudos prévios indicou que RCA_T podem ser reutilizados na produção de materiais cimentícios, cerâmicos e concreto, melhorando as propriedades mecânicas dos produtos. A reciclagem dos resíduos de amianto contribui para a eliminação de resíduos perigosos, redução de riscos à saúde e conservação de recursos naturais.

Por fim, a síntese bibliográfica proporcionou uma visão abrangente e crítica dos múltiplos aspectos relacionados ao amianto. Desde suas propriedades e usos históricos até os impactos na saúde e métodos de tratamento, a análise ofereceu uma base sólida para entender os desafios e oportunidades na gestão dos resíduos de amianto. As tendências e direções futuras destacadas sugerem caminhos para a inovação e a sustentabilidade na indústria da construção civil.

3.7 IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS À PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

Segundo Agopyan; John (2011), a emissão de CO₂ à atmosfera é o impacto ambiental mais importante associado à produção de cimento, seja pelo consumo de combustíveis fósseis, bem como a produção do clínquer Portland. Nesse sentido, o cimento Portland representa o material artificial mais consumido no mundo e é responsável por cerca de 8% das emissões globais de carbono, sendo o ingrediente “clínquer” responsável pela maior parte.

Prevê-se que a procura global de cimento aumente 48%, de 4,2 bilhões para 6,2 bilhões de toneladas até 2050, impulsionada principalmente pelos países em desenvolvimento (RMI, 2023).

Para tal, faz-se necessário a exploração excessiva dos recursos naturais, com destaque às pedreiras de calcário (Wu *et al.*, 1983). Em 2016, segundo o US Geological Survey, foram produzidas 4,2 bilhões de toneladas de cimento no mundo. O Brasil foi o nono maior produtor desse material, produzindo 57,8 milhões de toneladas, um total de 280 kg por habitante, com uma emissão específica *in situ* de 700 kg de CO₂ por tonelada do aglomerante (Ministério de Minas e Energia, 2017).

Assim, a indústria do cimento enfrenta um grande desafio na busca pelo desenvolvimento sustentável. A substituição parcial do cimento Portland por resíduos representa uma alternativa à redução do passivo ambiental.

De acordo com o Acordo Climático de Paris de 2015, a indústria global do cimento é responsável por uma parcela significativa das emissões de CO₂ e, portanto, tem metas para reduzir essas emissões a fim de limitar o aquecimento global a 1,5°C. A meta estabelecida exige que a indústria reduza suas emissões em 16% até 2030 e alcance emissões líquidas zero até 2050. Para atingir essas metas, a indústria deve adotar uma série de inovações tecnológicas, como a substituição do clínquer, o uso de combustíveis alternativos e a captura e

armazenamento de carbono. Essas medidas são essenciais para alinhar o setor aos objetivos climáticos globais e garantir a sustentabilidade a longo prazo (Teixeira *et al.*, 2021).

Diante do desafio de procurar meios para reduzir, ainda mais, as emissões de CO₂, a indústria do cimento do Brasil, em parceria com a Agência Internacional de Energia (IEA), a Corporação Financeira Internacional (IFC) - braço do Banco Mundial – o Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) e uma equipe de cientistas de renomadas universidades brasileiras - sob a coordenação técnica do professor e ex-ministro José Goldemberg - lançou em 2019 o Roadmap Tecnológico do Cimento. Como Elevar ainda mais o uso de adições - o Brasil é atualmente referência mundial - e reduzir a quantidade de clínquer no cimento representa a principal alternativa do setor para mitigar suas emissões. Reduzindo a razão clínquer/cimento de 68% em 2014 (ano base do Roadmap) para 52% em 2050 – ou, inversamente, aumentando as adições de 32% para 48% - seria possível evitar a emissão acumulada de 290 Mt de CO₂ ao longo do período. Isto representaria 69% do potencial de redução do setor até 2050 segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) (VISED; PECCHIO, 2019).

3.8 ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

3.8.1 Conceito de argamassa

A argamassa inorgânica é uma mistura homogênea de um ou mais ligantes inorgânicos, agregados miúdos e água, que pode conter fibras, adições e/ou aditivos, com características específicas de desempenho adequada à utilização. Além disso, a norma NBR 7211 (ABNT, 2020) descreve que as argamassas podem ser preparadas *in situ* ou industrializadas, já suas características variam em função da aplicação.

A norma NBR 13529 (ABNT, 2013) estabelece os critérios relativos à natureza, tipo de ligante hidráulico, propriedades e condições de fornecimento e preparo das argamassas, além das respectivas definições conforme representa o Quadro 2.

Para a norma NBR 13529 (ABNT, 2013), a argamassa de revestimento corresponde ao cobrimento de uma superfície com uma ou mais camadas superpostas de argamassa, apto a receber acabamento decorativo ou constituir-se em acabamento.

Nascimento (2014) relata que as argamassas de revestimentos têm a função de proteger contra agentes agressivos, contribuir com a durabilidade da estrutura, garantir o conforto hidroscópico, térmico e acústico no ambiente, além de preparar a superfície à aplicação de

revestimento cerâmico, pintura entre outras. Para Baía e Sabbatini (2000), as argamassas de revestimentos podem ser aplicadas em massa única (única camada) ou emboço e reboco (duas camadas).

No Quadro 3 pode ser observado a classificação das argamassas de revestimentos em função das camadas constituintes do revestimento (Honório; Carasek, 2010).

Quadro 1 - Classificação das argamassas de revestimento.

Critério de classificação	Tipo	Descrição
Quanto à natureza do aglomerante	Argamassa aérea	Argamassa preparada com aglomerante(s) aéreo(s)
	Argamassa hidráulica	Argamassa preparada com aglomerantes hidráulico(s)
	Argamassa de cal	Argamassa preparada com cal como único aglomerante
Quanto ao tipo de aglomerante	Argamassa de cimento	Argamassa preparada com cimento como único aglomerante
	Cimento e cal	Argamassa preparada com cimento e cal como aglomerantes
	Argamassa de gesso	Argamassa preparada com gesso
Quanto ao número de aglomerantes	Argamassa simples	Argamassa preparada com um único aglomerante
	Argamassa mista	Argamassa preparada com mais de um aglomerante
	Argamassa de revestimento	Mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento
Quanto à propriedade da argamassa	argamassa inorgânica para assentamento de unidades de alvenaria	argamassa utilizada para a ligação de blocos ou tijolos na elevação da alvenaria
	argamassa inorgânica para fixação horizontal de alvenaria	argamassa utilizada na fixação da alvenaria sem função estrutural (vedação), para o preenchimento da interface com a estrutura (viga ou laje), ou seja, sobre a última fada da alvenaria
	Argamassa colante	Argamassa com propriedades adesivas, empregadas no assentamento de peças para revestimento (cerâmicas, porcelanato, pedras de revestimento, entre outros).
	Argamassa comum	Argamassa simples ou mista, cujas propriedades dependem, em princípio, da proporção e do tipo do(s) aglomerante(s) e agregado(s) empregados.
Quanto as condições de fornecimento ou preparo	Argamassa dosada em central	Argamassa cujos materiais constituintes são medidos e misturados em central dosadora, fornecida no estado fresco, pronta para uso.
	Argamassa preparada em obra	Argamassa cujos materiais constituintes são medidos e misturados na própria obra.
	Argamassa industrializada	Proveniente de processo controlado e dosagem precisa, em instalação industrial, fornecida embalada ou a granel
	Mistura semipronta	Mistura fornecida embalada ou a granel, cujo preparo é completado em obra, por adição de aglomerante(s) e, eventualmente, aditivo(s)

Fonte: NBR 13529 (ABNT, 2013).

Quadro 2 - Classificação das argamassas de revestimento em função das camadas

Chapisco	Camada de preparo do substrato, aplicada de forma contínua ou descontínua, com o objetivo de uniformizar a superfície para a melhor absorção e aderência do revestimento.
Emboço	Camada de revestimento intermediária, executada para cobrir e regularizar a base, proporcionando uma superfície que possibilite receber outra camada, de reboco ou revestimento decorativo.
Reboco	Camada de revestimento de acabamento, utilizada para cobrimento do emboço, com o objetivo de promover uma superfície em condições de receber o revestimento decorativo (como pintura) ou que se constitua no acabamento.
Camada massa única	Revestimento de um único tipo de argamassa aplicado à base, sobre o qual é aplicada uma camada decorativa, também chamado popularmente de “massa única” ou “reboco paulista”. Representa a alternativa de revestimento mais empregada no Brasil.
Revestimento decorativo monocamada	Trata-se de um revestimento aplicado em uma única camada, que faz, simultaneamente, a função de regularização e decorativa, sendo muito utilizado na Europa.

Fonte: (CARASEK, 2010).

A NBR 13281 (ABNT, 2023) estabelece os requisitos, critérios e métodos de ensaios para as argamassas inorgânicas destinadas ao revestimento de paredes e tetos, independentemente de sua forma de produção (produzidas em canteiro, industrializadas, estabilizadas, usinadas, prontas para uso ou outras) e de aplicação (manual ou mecanizada).

Segundo a referida norma, as argamassas de revestimento utilizadas em paredes e tetos devem atender a uma série de características e propriedades específicas para garantir o desempenho adequado e a durabilidade dos revestimentos. As principais características e propriedades que essas argamassas devem incluir resistência potencial de aderência à tração ao substrato e superfície, módulo de elasticidade, variação dimensional.

3.8.2 Cenário atual

A NBR 13281 (ABNT, 2023) estabelece os requisitos, critérios e métodos de ensaios para as argamassas inorgânicas destinadas ao revestimento de paredes e tetos,

independentemente de sua forma de produção (produzidas em canteiro, industrializadas, estabilizadas, usinadas, prontas para uso ou outras) e de aplicação (manual ou mecanizada). As argamassas são classificadas mediante a sua utilização, conforme descrição abaixo:

- I. NBR 13281-1: (ABNT, 2023) – Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios – Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos.
- II. ABNT NBR 13281-2: (ABNT, 2023) – Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios – Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria.

3.8.2.1 Classificação das argamassas inorgânicas de revestimento para ambientes internos e externos

A classificação das argamassas inorgânicas de revestimento para ambientes internos e externos é um aspecto fundamental para garantir a adequação e eficácia desses materiais em diversas aplicações construtivas. Considerando a variedade de ambientes e condições de exposição, uma classificação precisa permitir uma seleção mais criteriosa e adequada das argamassas, levando em conta aspectos como resistência, durabilidade e desempenho específico em cada contexto de uso.

A norma NBR 13.281 (ABNT, 2023) – Argamassas inorgânicas, define quatro classes de argamassas inorgânicas para revestimento, cada uma com critérios de desempenho que se tornam mais rigorosos conforme a altura da edificação aumenta:

- I. ARV-I: Essa argamassa inorgânica pode ser aplicada como revestimento interno de qualquer edificação. Nos revestimentos externos, pode ser aplicada em edificações com menos que 10 m de altura.
- II. ARV-II: Em revestimentos externos, são destinadas à aplicação em edificações de altura total intermediária entre 10m e até 60m. Pode ser usada em revestimentos internos sem restrições.
- III. ARV-III: Material de maior desempenho, deve ser usado em fachadas de edifícios com altura superior a 60 m do nível da rua. Também pode ser usado sem restrições em revestimentos internos.
- IV. AET (argamassa de emboço técnico): é definida como a argamassa inorgânica aplicada como primeira camada (aparente) do revestimento de edificações. Faz parte de um revestimento de ATD (argamassa técnica decorativa) multicamadas,

estabelecido na NBR 16648 (ABNT, 2018) – Argamassas inorgânicas decorativas para revestimento de edificações – Requisitos e métodos de ensaios.

Os requisitos e critérios de caracterização e de desempenho estabelecidos na norma devem ser considerados conforme a seguir:

- a) Requisitos classificatórios: classificam as argamassas em ARV-I, ARV-II, ARV-III ou AET. De acordo com a sua utilização, a argamassa deve atender aos critérios de cada requisito.
- b) Requisitos informativos: devem ser apenas informados. O fabricante, no caso de argamassas fornecidas para a obra, ou o responsável (legal e/ou técnico) pela obra, no caso de argamassas produzidas no canteiro, devem informar na embalagem e/ou na ficha técnica e/ou no relatório de ensaio em laboratório e/ou no registro nos controles da obra a classe a que a argamassa se enquadra, considerando as faixas determinadas para cada um dos requisitos e o tempo de uso.

O (Quadro 4) indica os requisitos de caráter classificatório, no estado endurecido, e os de caráter Informativo, nos estados fresco e endurecido.

Quadro 3 - Requisitos classificatórios e informativos das argamassas. Argamassa para revestimento de paredes e tetos ARV-I, ARV II, ARV III e AET

Requisitos classificatórios		Requisitos informativos	
		Estado fresco	Retenção de água
			Densidade de água no estado fresco
			Teor de ar incorporado
			Tempo de uso
Estado endurecido	Resistência potencial de aderência à tração ao substrato	Estado endurecido	Densidade de massa no estado endurecido
	Resistência potencial à tração superficial		Resistência à tração na flexão
	Módulo de elasticidade		Coefficiente de absorção de água por capilaridade
	Varição dimensional (retração ou expansão linear)		Fator de resistência à difusão de vapor de água

Fonte: ((NBR, 13281-1 (ABNT, 2023)).

As argamassas inorgânicas para revestimento devem atender integralmente a todos os requisitos classificatórios e informativos estabelecidos nesta Parte da NBR 13281 (ABNT,

2023), independentemente da forma de produção quer sejam produzidas em canteiro, industrializadas, estabilizadas, usinadas, prontas para uso ou outras, bem como da forma de aplicação (manual ou mecanizada).

No caso de argamassas fornecidas à obra, o fornecedor deve classificar seu produto e disponibilizar as informações conforme estabelecido na NBR 13281 (ABNT, 2023). No caso de argamassas produzidas em canteiro, o responsável (legal e/ou técnico) pela obra deve realizar os ensaios estabelecidos, registrar e manter sob seu domínio os resultados e confirmar o atendimento à classificação determinada na norma. A manutenção desses registros é de fundamental importância, uma vez que eles são indispensáveis no recebimento do revestimento de argamassa conforme previsto na NBR 13749 (ABNT, 2013), em caso de eventual ocorrência de manifestações patológicas.

3.8.3 Efeitos das matérias-primas na produção de argamassas de revestimentos

A NBR 13529 (ABNT, 2013) cita quatro tipos de aditivos importantes para argamassas, dentre eles estão: o incorporador de ar, que estabiliza as bolhas de ar incorporadas na estrutura; o redutor de água, que reduz a quantidade de água para uma mesma trabalhabilidade; e o retentor de água, que confere capacidade de reter água frente ao substrato e ao meio ambiente. Os aditivos mais utilizados são os superplastificantes, incorporadores de ar e retentores de água (Seabra; Labrincha; Ferreira, 2007).

A combinação de cimento com materiais suplementares e aditivos, como incorporador de ar, e plastificante, tem impactos significativos nas propriedades e desempenho das argamassas de revestimento industrializadas. O uso de materiais suplementares como cinzas volantes ou escórias de alto-forno, pode influenciar a formação das fases do cimento, afetando a composição mineralógica e a reatividade durante a hidratação. Essa interação pode resultar em retardo ou aceleração no tempo de pega do cimento.

3.8.3.1 Incorporador de ar

A adição de aditivos incorporadores de ar como agentes formadores de bolhas, pode melhorar a trabalhabilidade da argamassa e aumentar sua resistência ao congelamento e descongelamento, reduzindo o risco de fissuras em condições adversas. Os aditivos celulósicos podem atuar como modificadores reológicos, influenciando a viscosidade e a coesão da argamassa, além de proporcionar melhor aderência (Romano; Cincotto; Pileggi, 2018).

A introdução dos aditivos incorporadores de ar (AIA) e sua utilização em materiais cimentícios representaram um avanço tecnológico significativo no setor da construção civil (Du; Folliard, 2005), pois possibilita: melhorar a trabalhabilidade; melhorar a coesão dos sistemas; reduzir a tendência à exsudação; facilitar o espalhamento e o manuseio, e aumentar a produtividade; utilizar formas que suportem menores pressões; reduzir as cargas sobre as estruturas, a dimensão das fundações e o módulo de elasticidade; aumentar a resistência a ciclos de gelo-degelo; e reduzir o consumo de cimento nas composições.

A incorporação de ar nas argamassas de revestimento favorece o ganho de trabalhabilidade da mistura, diminuição da densidade (Romano; Torres; Pileggi, 2015) e (Seabra; Labrincha; Ferreira, 2007), retarda as reações de hidratação do cimento, devido à obstrução parcial ocasionada pelo incorporador de ar (IAR), o que causa redução do pico de temperatura, favorecendo a não ocorrência de fissuração por retração térmica (Mendes; Moro, *et al.*, 2017). O teor de ar incorporado influencia diretamente na porosidade, aumenta a quantidade dos poros, o tamanho, a dispersão e pode deixar a superfície frágil e pulverulenta (Mendes; Moro, *et al.*, 2017). Esse alto teor de poros age como ponto de concentração de tensão, facilitando a ruptura (Romano; Torres; Pileggi, 2015). Com isso, o aumento da porosidade é inversamente proporcional à resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, pois a estrutura se torna mais deformável (Romano; Torres; Pileggi, 2015; Mendes; Moro, *et al.*, 2017; Rath *et al.*, 2017), estabelecem que o tamanho crítico de bolhas de ar é por volta de 500 μm , na qual, bolhas acima desse tamanho são instáveis e podem facilmente escapar ou unir-se em bolhas maiores.

A adição de ar melhora a coesão das argamassas de revestimento, diminui a propensão à exsudação, aprimora a plasticidade e permite a redução da quantidade de água requerida para o amassamento. Essa redução potencialmente minimiza tanto a retração plástica quanto a retração por secagem (Beningfield, 1988; Alves, 2002).

No estado endurecido, a incorporação de ar, apesar de melhorar algumas propriedades elásticas, térmicas e acústicas, é responsável pela redução da resistência mecânica e pelo aumento da permeabilidade (Romano; Torres; Pileggi, 2015). A distribuição granulométrica resultante na formulação desempenha um papel crucial na determinação da quantidade de água necessária para o amassamento, sendo que uma proporção maior de finos demanda uma quantidade maior de água para atingir a consistência adequada. Além disso, é pertinente ressaltar que um aumento no volume de pasta entre os agregados aumenta a capacidade de incorporação de ar e intensifica a sensibilidade às variáveis de processamento (Romano; Cincotto; Pileggi, 2018).

3.8.3.2 Plastificante

Plastificantes são aditivos químicos usados onde é necessária uma suspensão de partículas bem dispersas. Eles se tornaram constituintes indispensáveis de qualquer mistura de argamassa de cimento atualmente. Essa modalidade de aditivos tem a capacidade de reduzir a quantidade de água necessária para manter a consistência desejada, melhorando a trabalhabilidade da argamassa.

Os aditivos superplastificantes melhoram as características mecânicas e a impermeabilidade do revestimento (Wu *et al.*, 2015), reduzem a porosidade, a absorção por capilaridade, a absorção por imersão e aceleram o tempo de pega (Wetzel; Arend, 2015; Khudhair; Youbi; Elharfi, 2017).

Os aditivos possuem propriedade dispersante pois superam as forças de van der Waals entre as partículas através de uma forte força repulsiva, eletrostática ou estérica, na interface superfície/líquido, liberando a água aprisionada (Spiratos *et al.*, 2003). Os aditivos plastificantes agem principalmente por forças eletrostáticas e os superplastificantes por forças estéricas, sendo as forças estéricas mais fortes que as forças eletrostáticas. Alguns aditivos, como o lignosulfonato ou policarboxilato, ainda aumentam a tensão superficial da água, aumentando o efeito na consistência e incorporando ar (Hartmann *et al.*, 2011; Wetzel; Arend, 2015; Łąźniewska-Piekarczyk *et al.*, 2015).

De uma forma geral, a densidade aumenta e a porosidade diminui, melhorando a resistência mecânica, diminuindo a absorção por capilaridade e por imersão (Khudhair; Elyoubi; Elharfi 2018).

No estudo de He *et al.*, (2020), diferentes plastificantes de policarboxilato (PECs) foram avaliados quanto à sua capacidade de incorporar ar na argamassa de cimento fresca e seu efeito no desempenho mecânico. PCEs com grupos éster aumentaram a capacidade de incorporação de ar, enquanto os com grupos ácido sulfônico reduziram essa capacidade. Os PCEs com grupos éster também mostraram melhor dispersibilidade e reduziram a porosidade da argamassa endurecida, resultando em maior resistência à compressão, ao passo que os PCEs com grupos ácido sulfônico mantiveram poros grandes na argamassa endurecida, prejudicando sua estrutura.

3.8.3.3 Retentor de água

Os aditivos retentores de água são amplamente utilizados em argamassas para preservar a água durante o processo de desidratação, ocasionado pela absorção do substrato ou pela evaporação para a atmosfera (Paiva *et al.*, 2006). Esse fenômeno pode acarretar uma hidratação insuficiente dos componentes cimentícios, comprometendo as propriedades mecânicas da argamassa (Patural *et al.*, 2011).

O princípio ativo mais utilizado e conhecido para a finalidade de retenção de água são os produtos de celulose (Patural *et al.*, 2011). Celulose é um polissacarídeo insolúvel em água devido a fortes interações via hidrogênio. Para torná-lo solúvel, é realizada a eterificação, substituição de grupos hidroxilas por grupos hidroxi-alquilo (Cappellari; Daubresse; Chaouche, 2013), resultando em produtos como hidroxipropil metil celulose (HPMC/ MHPC), hidroxietyl metil celulose (HEMC/ MHEC) (Paiva *et al.*, 2006, 2009), hidroxietyl celulose (HEC).

Tem-se o uso de retentores de água como solução para melhorar a capacidade de retenção de água das argamassas de revestimento e assentamento, aumentar a aderência, aumentar a coesão, melhorar a trabalhabilidade e melhorar o processo de hidratação do cimento (Paiva *et al.*, 2006a; Paiva *et al.*, 2006b).

A adição de retentores de água aumenta a consistência da argamassa (Seabra; Labrincha; Ferreira, 2007), reduz a água livre da mistura aumentando a viscosidade (Paiva *et al.*, 2006), sendo o teor de aditivo incorporado proporcional ao impacto da propriedade na argamassa (Pierre; Perrot; Guevel, 2015). O aumento na viscosidade e na retenção de água também está associado ao aumento da massa molar do composto (Patural *et al.*, 2011).

Segundo Khayat (1998), os éteres de celulose podem atuar em três categorias:

- Adsorção: As moléculas poliméricas adsorvem e fixam-se em parte da água do sistema devido à natureza hidrofílica do polímero, expandindo-se e aumentando a viscosidade da água;
- Associação: Há uma força de atração entre moléculas adjacentes da cadeia polimérica, formando um gel que restringe a locomoção da água e aumenta a viscosidade;
- Entrelaçamento: Sob baixas tensões cisalhantes e em altas concentrações do polímero, as cadeias poliméricas podem se entrelaçar, resultando no aumento da viscosidade. No entanto, com tensões cisalhantes maiores, o entrelaçamento pode se desfazer, resultando em fluidificação.

Esses mecanismos de ação dos éteres de celulose sempre levam ao aumento da viscosidade. Portanto, recomenda-se o uso de retentores de água juntamente com redutores de água para garantir a trabalhabilidade da argamassa (Paiva *et al.*, 2009).

3.9 PROJETO ESTATÍSTICO DE EXPERIMENTOS

A seleção dos tipos e proporções dos materiais componentes empregados na elaboração das misturas cimentícias é seguida por uma fase complexa: a dosagem. No entanto, a diversidade de materiais e a pouca compreensão da interação entre eles tornam a dosagem uma atividade ainda mais desafiadora (Ribeiro, 2021). Nessa perspectiva, a aplicação de delineamento estatístico de experimentos em misturas viabiliza a concepção de projetos precisos, os quais identificam a proporção ideal entre os materiais, por meio da utilização de modelos estatísticos de previsão desenvolvidos com base em resultados experimentais obtidos a partir de formulações previamente definidas.

A dosagem de misturas cimentícias através do delineamento estatístico de experimentos com misturas (DEEM) envolve a identificação da proporção ideal entre os materiais, baseando-se em modelos estatísticos de previsão desenvolvidos a partir de resultados experimentais obtidos com formulações pré-definidas.

Nesse estudo serão adotadas as terminologias descritas abaixo:

- Formulação base: formulações pré-estabelecidas;
- Regra de mistura: modelos estatísticos que relacionam as propriedades das misturas com a proporção dos materiais;
- Ingrediente ou componente: substância, pura ou não, que será posta em contato direto com outra(s) substância(s) para construir a mistura;
- Mistura: combinação de dois ou mais ingredientes;
- Mistura pura: porção constituída somente por um dos ingredientes;
- Fração mássica: é a razão entre a massa de um ingrediente e a soma dos volumes de todos os ingredientes em uma mistura;
- Fração volumétrica: é a razão entre o volume de um ingrediente e a soma dos volumes de todos os ingredientes em uma mistura;
- Formulação: é a sequência das frações mássicas ou volumétricas dos ingredientes de uma mistura;

- Fatores: são os parâmetros controláveis em um experimento, que, no caso de experimento com misturas, normalmente são as frações mássicas ou volumétricas dos ingredientes;
- Nível: valor da fração mássica ou volumétrica de um ingrediente;
- Respostas: propriedades das misturas, por exemplo, a viscosidade de uma mistura cimentícia fluida ou a resistência mecânica no seu estado endurecido;
- Superfície de resposta: “mapa” que representa as respostas experimentais.

As etapas da dosagem pelo método DEEM são: a) o estabelecimento das formulações de base, que consiste na elaboração do projeto de mistura; b) preparo e caracterização das formulações de base para a obtenção das respostas; c) análise de dados e estabelecimento dos modelos e; d) determinação da formulação ótima.

3.9.1.1 Estabelecimento das formulações de Base

Conforme descrito por Piepel (2006), a condução de um experimento com misturas envolve a combinação de duas ou mais matérias-primas em diversas proporções, seguida pela avaliação das propriedades do produto resultante. Essas propriedades refletem características tecnológicas significativas que estão intimamente ligadas às proporções entre as matérias-primas.

Em sua obra de 1958, Henri Scheffé, embasado na pesquisa de Claringbold (1955), expõe que as formulações de um projeto de mistura são passíveis de representação por pontos contidos em uma região experimental reconhecida simplex. Adicionalmente, Scheffé propõe o emprego de modelos empíricos com a finalidade de prognosticar as propriedades das misturas, mais tarde identificados como polinômios canônicos de Scheffé.

A abordagem metodológica desenvolvida por Scheffé consiste em uma mistura com q ingredientes, onde X_i representa a fração mássica (ou volumétrica) do i -ésimo ingrediente da mistura. A fração mássica é definida como a relação entre a massa do ingrediente e a soma de todas as massas dos componentes da mistura, não ultrapassando o valor de 1, conforme expresso na Equação 1 (Cornell, 1981).

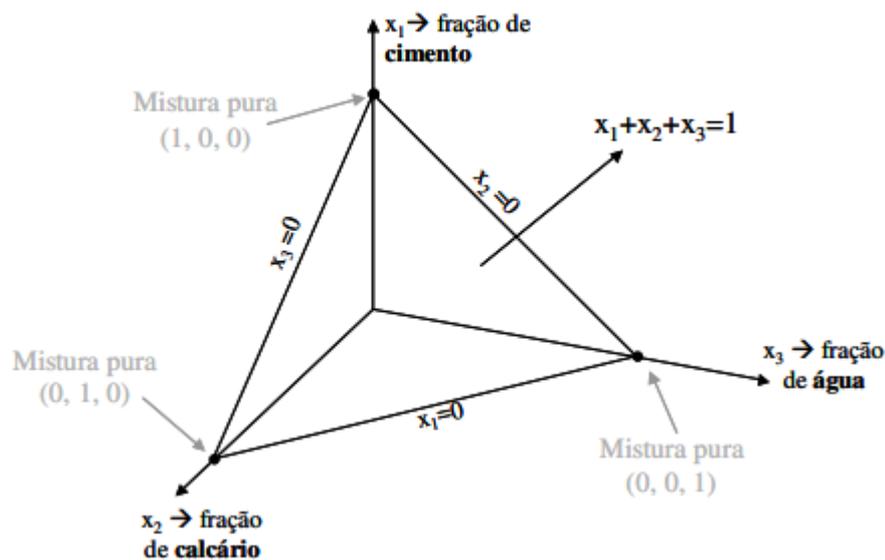
$$0 \leq x_i \leq 1 \quad \sum_{i=1}^q x_i = 1 \quad (\text{Equação 1})$$

Em que q é o número de matérias-primas e x_i é a fração da i ésima matéria-prima. Para efeito ilustrativo, considera-se que a mistura constituída de cimento, calcário e água cujas frações são representadas, respectivamente, por X_1 , X_2 e X_3 .

As propriedades medidas estão intrinsecamente ligadas às proporções das frações correspondentes em cada formulação, possibilitando assim a construção dos modelos de regressão. (Scheffé, 1958; Cornell, 2002; Piepel, 2006; Javier, 2015; Anderson, 2018).

A região Simplex pode ser entendida como o espaço geométrico que engloba todos os pontos experimentais nos quais a soma das frações dos ingredientes totaliza 1, incluindo os pontos de mistura pura constituída de somente uma das matérias-primas. Para ilustrar, considere uma mistura composta por cimento, calcário e água, representadas respectivamente por X_{CP} , X_{CaCO_3} e X_{H_2O} , entre as três matérias-primas existem infinitas proporções possíveis como demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Região triangular (Simplex) que abrange todos os pontos cujas somas das frações dos ingredientes (X_i) são iguais a 1.



Fonte: Adaptado de (Dias, 2011).

Conforme Cornell (1973), os polinômios canônicos de Scheffé emergem como uma ferramenta simplificada e altamente eficaz para o ajuste de dados em projetos de misturas. Adicionalmente, de acordo com as observações de Cornell (2002), tais modelos facilitam a

correlação das respostas experimentais das misturas com as proporções dos ingredientes, oferecendo uma série de vantagens destacáveis:

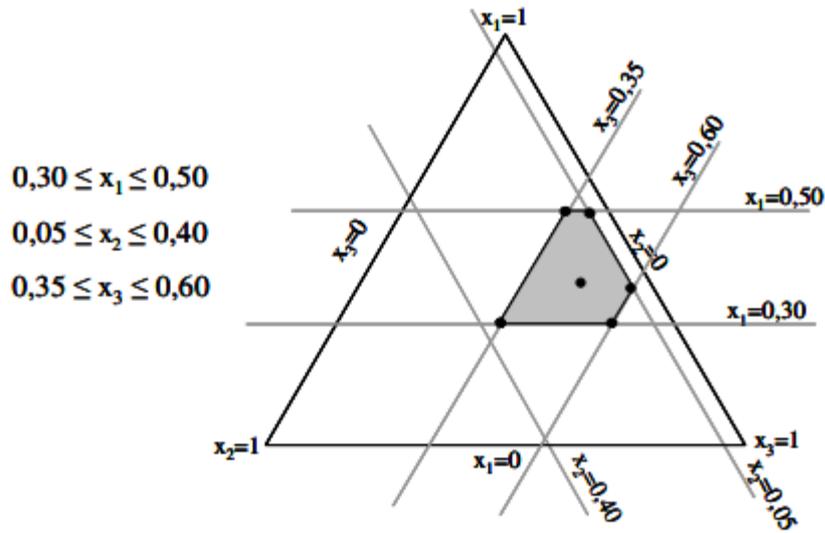
- I. Permitem a avaliação da influência de cada ingrediente e suas interações nas respostas;
- II. Facilitam a identificação dos componentes que exercem maior impacto em uma resposta específica;
- III. Possibilitam a realização de previsões sobre o comportamento de formulações, mesmo que não tenham sido previamente caracterizadas experimentalmente;
- IV. Facilitam a determinação da proporção ótima entre os ingredientes para alcançar valores desejáveis para cada resposta.

Em materiais cimentícios, é impraticável utilizar misturas puras para processamento de componentes. Para alcançar a solidificação do material, são indispensáveis pelo menos duas matérias-primas: cimento e água. O método de projeto de vértices extremos, introduzido por McLean e Anderson (1966), oferece um procedimento estatístico específico para experimentos com misturas. Nesse método, as frações de várias matérias-primas são restringidas a valores mínimos e máximos, representados por a_i e b_i , os quais podem variar entre 0 e 1, como indicado pela Equação 2.

$$0 \leq a_i \leq x_i \leq b_i \leq 1 \quad \sum_{i=1}^q x_i = 1 \quad (\text{Equação 2})$$

Em que X_i é a fração correspondente à fração mássica da i ésima matéria-prima, a_i é o limite inferior da fração da i ésima matéria-prima, b_i é o limite superior e q é o número de matérias-primas. Os limites de consumo de cada matéria-prima são estabelecidos por impedimentos tecnológicos, econômicos e por sua disponibilidade. Supondo que se queira limitar o consumo de cimento entre 30 e 50%, o de calcário entre 5 e 40% e o de água entre 35 e 60%. A Figura 7 mostra a região restrita dentro do simplex que atende às restrições de consumo expostas. Neste caso, os limites de consumo foram estabelecidos aleatoriamente.

Figura 7 - Região dentro do diagrama que atende às restrições de consumo das matérias-primas.



Fonte: (Dias, 2011).

Normalmente, as propriedades obtidas por meio de experimentos estão associadas à formulação usando polinômios de Scheffé lineares (Equação 3) ou quadráticos (Equação 4) (Cornell, 1981). Os coeficientes desses polinômios são calculados pelo método dos mínimos quadrados. Polinômios de grau mais baixo são preferíveis quando estatisticamente significativos, pois possuem menos termos.

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^q \beta_i X_i \quad (\text{Equação 3})$$

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^q B_i X_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j \quad (\text{Equação 4})$$

Em que \hat{y} é o valor estimado da propriedade de interesse do composto, q é o número de matérias-primas, β_i é o coeficiente constante do termo x_i do polinômio de ajuste, assim como β_{ij} é para $x_i x_j$ e x_i é a proporção da i ésima matéria-prima.

Na análise de materiais cimentícios, propriedades mecânicas como a resistência à compressão e a tenacidade, podem ser relacionadas às proporções das matérias-primas usando

esses polinômios. A validade do modelo deve ser verificada por meio de testes estatísticos, como o teste F, que avalia se a resposta é independente das proporções das matérias-primas, e pelo coeficiente de determinação (R^2), que indica a fração da variação da resposta explicada pelo modelo. Assim, é essencial desenvolver métodos alternativos de dosagem que alinhem as características das matérias-primas com propriedades físicas, mecânicas, mineralógicas, entre outras.

Em situações em que há um número considerável de matérias-primas na mistura ($q \geq 6$), como é frequente em algumas composições de argamassas que incorporam adições, é recomendável utilizar a técnica chamada de screening. Esse método foi desenvolvido por Snee e Marquardt (1976) com o propósito de determinar quais matérias-primas em um conjunto de misturas têm maior impacto em características específicas do produto. O método de screening tem sido empregado para analisar um conjunto restrito de formulações, mesmo quando o número de matérias-primas na mistura é elevado (Cornell, 1981; Martinello *et al.*, 2006).

Este tipo de delineamento é útil para reduzir o número de experimentos necessários para explorar o espaço de design, permitindo a identificação eficiente de fatores-chave. É uma ferramenta valiosa na fase inicial de otimização, ajudando a direcionar os esforços experimentais para áreas mais promissoras.

Ao conduzir um DEEM é crucial definir claramente os objetivos da pesquisa, identificar os fatores relevantes e escolher a métrica de resposta apropriada. Além disso, é importante utilizar métodos estatísticos adequados para análise dos resultados, como análise de variância (ANOVA) e análise de superfície de resposta, para extrair informações significativas sobre o impacto dos fatores estudados.

3.9.1.2 Preparo e Caracterização das Formulações de Base

De acordo com Ribeiro (2021) a etapa de preparo das formulações de base talvez seja a que demanda maior cuidado. Nesta etapa é imperativo utilizar amostras representativas dos ingredientes, randomizar a sequência de experimentos e executar repetições autênticas.

A coleta de amostras representativas dos lotes dos ingredientes desempenha um papel crucial na obtenção de dados experimentais confiáveis. No contexto da extração dos ingredientes para a preparação das misturas cimentícias, é imperativo homogeneizar os materiais e realizar o quarteamento, especialmente dos materiais particulados, visando obter

amostras reduzidas do ingrediente, a menos que o lote seja uma variável considerada no planejamento experimental.

No contexto das misturas cimentícias, é crucial exercer cautela especial no armazenamento dos ligantes, visando assegurar a manutenção das características do material ao longo do período de condução dos experimentos. Mudanças indesejáveis, como a hidratação precoce do ligante devido à exposição à umidade, representam uma preocupação primordial que deve ser evitada.

Nos experimentos envolvendo misturas, é comum a realização de repetições autênticas. Muitas vezes, os pesquisadores têm o desejo de executar as repetições de uma mesma formulação de forma sequencial, o que é conveniente, porém desaconselhado. Por exemplo, um erro inadvertido na calibração de uma balança, que ocorra coincidentemente durante a pesagem sequencial dos ingredientes das repetições de uma formulação, pode resultar em interpretações equivocadas e invalidar os modelos elaborados com base nos dados obtidos.

Os métodos estatísticos exigem que as respostas experimentais ou erros (resíduos) sejam variáveis aleatórias independentes entre si, o que é garantido pela randomização. Ao randomizar adequadamente o experimento, faz-se com que os erros experimentais e efeitos de fatores extrínsecos ao planejamento experimental sejam aleatoriamente distribuídos ao longo dos experimentos (Montgomery; George, 2018).

A execução de repetições, por sua vez, permite estimar o erro experimental que é um parâmetro usado para determinar se as diferenças observadas nas respostas são estatisticamente diferentes. Além disso, se a média de uma resposta for usada para estimar a verdadeira resposta, a replicação permitirá que o experimentador obtenha uma estimativa mais precisa desse parâmetro (Montgomery; George, 2018). As repetições são empregadas, também, para se determinar as significâncias das faltas de ajuste dos modelos.

É frequente a intenção de utilizar diferentes corpos de prova produzidos em uma mesma batelada para gerar dados de repetições. Entretanto, é importante destacar que uma repetição autêntica requer que o corpo de prova seja produzido utilizando ingredientes que tenham sido submetidos novamente à pesagem e ao processo de mistura. Além disso, é necessário moldar e caracterizar esse corpo de prova utilizando o mesmo procedimento adotado para os demais corpos de prova.

Geralmente, o critério I é aplicado em projetos de segunda ordem, os quais desempenham um papel crucial na otimização, como o polinômio quadrático de Henri Scheffé (1958) e Montgomery (2013). A metodologia adotada nesse tipo de experimento estatístico começa com a seleção de uma região de interesse para o experimento, seguida pela escolha de

candidatos que atendam aos requisitos iniciais, resultando na definição do projeto ótimo (Montgomery, 2013; Mohamed; Hasan Masood; Lal Bhowmik, 2016).

Os projetos *Optimal*, originados por algoritmos computacionais, são especialmente adequados para regiões experimentais irregulares e modelos não convencionais. Utilizando algoritmos de troca de ponto (*Point Exchange*) e/ou troca de coordenadas (*Coordinate Exchange*), as formulações do projeto são geradas de forma estratégica, selecionando pontos para otimizar um critério pré-definido (Mohamed; Hasan Masood; Lal Bhowmik, 2016; Myers; Montgomery; Anderson-cook, 2016). Entre os critérios de otimização disponíveis para a elaboração de projetos estatísticos ideais, a *I-Optimality* (também conhecida como *IV-*, *Q-* e *V-Optimality*) representa a estratégia que busca minimizar a variação média das previsões em toda a região de interesse (Montgomery, 2013).

É recomendado utilizar o critério *I-Optimality* na elaboração de projetos de superfície de resposta sempre que o objetivo for otimizar as configurações das variáveis de controle em um processo que demande maior precisão na estimativa. Além disso, a redução da variação média da previsão contribui para uma maior precisão no projeto experimental. A *I-Optimality* também pode incorporar restrições na região de interesse, como a exclusão de áreas onde as respostas não podem ser medidas (Mohamed; Hasan Masood; Lal Bhowmik, 2016).

3.9.1.3 Análise dos Dados e Elaboração dos Modelos

Na análise de dados de experimentos com misturas, o primeiro passo é verificar se existem correlações lineares entre as respostas e as frações mássicas de cada ingrediente. Essa avaliação visa determinar se há correlações lineares entre as respostas. O coeficiente de correlação linear r é o parâmetro utilizado nessa análise, sendo calculado pela Equação 5.

$$r = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}}{S_x} \right) \cdot \left(\frac{y_i - \bar{y}}{S_y} \right) \quad (\text{Equação 5})$$

Em que: N representa o número de formulações avaliadas, X_i é a i ésima fração do material considerado, \bar{X} é a média das frações do material, S_x é o desvio padrão das frações do material, Y_i é o i ésimo valor para a propriedade considerada, \bar{Y} é o valor médio para a propriedade considerada e S_y é o desvio padrão dos valores para a propriedade considerada.

Os polinômios de Scheffé podem ser avaliados a partir dos coeficientes de determinação R^2 , R^2 ajustado (R^2_{adj}) e R^2 de previsão (R^2_{pred}).

O coeficiente de correlação linear (r) varia entre -1 e 1. Quando seu módulo se aproxima de 1 significa que há forte correlação linear entre as variáveis. O valor positivo ou negativo representa que o valor de uma variável, de resposta por exemplo, aumenta ou diminui, respectivamente, com o aumento da outra variável (fração mássica de um ingrediente, por exemplo). Além disso, se o valor se aproxima de zero, é uma indicação de que não existe correlação linear entre a propriedade e a fração mássica do material (Neto *et al.*, 2001), o que não anula a possibilidade de uma variável estar exercendo influência sobre a outra.

A qualidade de ajuste dos modelos (polinômios de Scheffé, por exemplo) determinados empregando-se o método dos mínimos quadrados, é avaliada por meio dos coeficientes R^2 , R^2 ajustado, R^2_{pred} e da análise de variância (ANOVA). O coeficiente de determinação R^2 (Equação 6) expressa a fração da variação total das observações em torno da média que é descrita pelo modelo (Neto *et al.*, 2010). O R^2_{adj} (Equação 7), por sua vez, é um parâmetro mais eficiente que o R^2 para avaliar a qualidade de ajuste de uma regressão, pois, leva em consideração o número de parâmetros do modelo (p). O aumento do número de termos do modelo faz com que o R^2_{adj} reduza. Já o R^2_{pred} (Equação 8) é uma medida da precisão do modelo na previsão de uma resposta. Quanto mais esses parâmetros aproximam de 1, melhor será a qualidade do modelo.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (\text{Equação 6})$$

$$R^2_{\text{adj}} = 1 - \frac{\frac{SSE}{N-p}}{\frac{SST}{N-1}} \quad (\text{Equação 7})$$

$$R^2_{\text{pred}} = 1 - \frac{SST}{SSR+SSE} \quad (\text{Equação 8})$$

Em que SST é a soma total dos quadrados dos desvios dos valores de uma resposta experimentais em relação à média, y , é o i ésimo valor experimental, \bar{y} , é a média dos valores experimentais, SSE é a soma dos quadrados dos desvios dos valores da resposta experimental

em relação ao valor previsto pelo modelo, N é o número de resultados experimentais para a resposta em análise, \hat{y}_i , é o i ésimo valor previsto pelo modelo e SSR é a soma dos quadrados dos desvios devido ao modelo.

O valor-F, parâmetro estatístico determinado conforme a Equação 9 pode ser comparado ao F crítico, que é obtido conforme a distribuição de Fisher-Snedecor (Magalhães; De lima, 2011), de acordo com o nível de significância adotado e os graus de liberdade da SSR e SSE , que correspondem a $p-1$ e $N-p$, respectivamente. São considerados apropriados (significantes), para o nível de significância considerado, os modelos que apresentam valor de F superior ao F crítico.

$$F = \frac{\frac{SSR}{p-1}}{\frac{SSE}{N-p}} \quad (\text{Equação 9})$$

Adicionalmente, a falta de ajuste (*lack of fit*) é outro parâmetro estatístico crucial para avaliar a qualidade de um modelo, pois indica a consistência dos resultados. Suponha que as propriedades de um projeto experimental tenham sido medidas em duplicata e que, hipoteticamente, modelos lineares tenham sido adotados para representá-las. Nesse caso, para cada valor de X, existirão dois valores distintos de Y. Independentemente do modelo escolhido para representar a propriedade, ele não poderá simultaneamente passar pelos dois valores medidos, resultando em resíduos que podem ser atribuídos. A soma quadrática residual não explicada pelo modelo pode ser associada aos erros aleatórios e à falta de ajuste. No entanto, a parcela atribuída à falta de ajuste pode ser reduzida ao adotar um modelo de ordem superior (Neto *et al.*, 2010).

É recomendado, ainda, avaliar se os resíduos, diferenças entre os valores previstos pelo modelo e os observados experimentalmente, estão aleatoriamente distribuídos ou seguem algum padrão dependente dos valores previstos pelo modelo ou do sequenciamento dos experimentos. Padrões nessas distribuições indicam que o modelo não é apropriado.

3.9.1.4 Determinação da formulação ótima

No delineamento estatístico de mistura, a utilização do método de otimização múltipla no processo de dosagem possibilita a escolha da formulação com desempenho promissor. Por exemplo, tal aplicação permite relacionar as múltiplas propriedades de uma matriz cimentícia relacionando suas propriedades mecânicas e seu comportamento reológico.

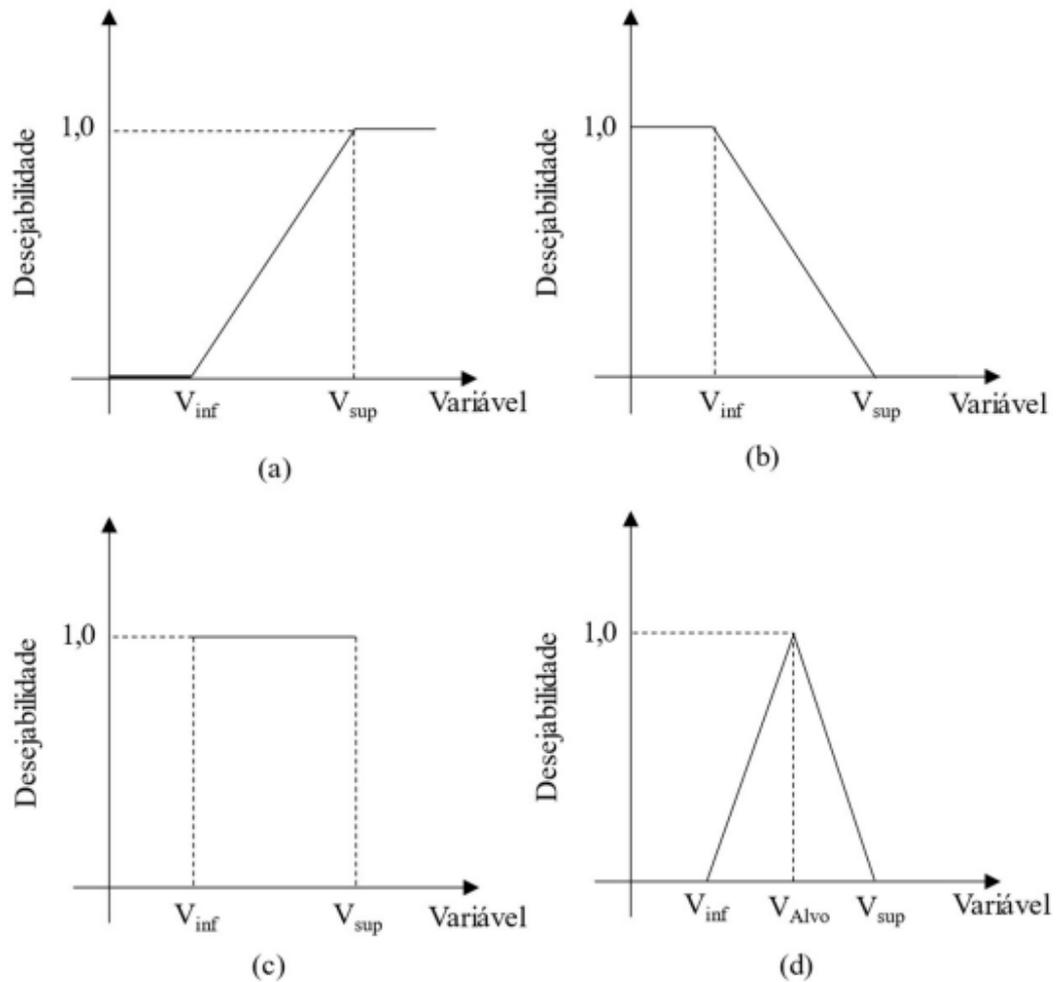
Nos procedimentos de dosagem em que é importante considerar diversas respostas experimentais, por exemplo, na dosagem de concretos autoadensáveis, em que há a necessidade de se obterem valores específicos para os parâmetros de fluxo, bem como para a resistência mecânica, os métodos de otimização simultânea tornam-se imprescindíveis. O objetivo da otimização simultânea é obter a proporção ótima entre os ingredientes da mistura para que múltiplos requisitos de comportamento sejam atendidos.

Derringer e Suich (1980) propuseram um método de otimização múltipla baseado na desejabilidade global (D), que consiste na média geométrica das desejabilidades individuais (d_i) obtidas da solução (Equação 10). As desejabilidades são notas (pesos ou pontuações) entre 0 e 1, atribuídas ao valor de cada variável por meio de funções desejabilidade de maximização (Figura 8a), de minimização (Figura 8b), de alvo (Figura 8c) ou de faixa (Figura 8d). O método de otimização de Derringer e Suich (1980) busca maximizar a desejabilidade global da solução.

$$D = \sqrt[k]{d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_k} \quad (\text{Equação 10})$$

Em que D é a desejabilidade global, k é o número de variáveis de resposta e fatores, quando necessário, considerados na otimização e d_i é a desejabilidade obtida para a solução referente a i ésima variável.

Figura 8 - Exemplos de funções desejabilidade para: (a) maximização de uma variável, (b) minimização de uma variável, (c) tendo um valor da variável como alvo e (d) valores para a variável dentro de uma fatia pré-estabelecida.



Fonte: (Derringer; Suich, 1980).

3.9.1 Considerações do capítulo apresentado

O capítulo aborda a aplicação de delineamento estatístico de experimentos (DEEM) na dosagem de misturas cimentícias, buscando determinar a proporção ideal dos materiais através de modelos estatísticos baseados em resultados experimentais. A metodologia envolve a combinação de ingredientes em diversas proporções, avaliação de suas propriedades e construção de modelos de regressão para prever comportamentos futuros. O processo é dividido em etapas: estabelecimento das formulações de base, preparo e caracterização das formulações, análise de dados e elaboração dos modelos, e determinação da formulação ótima. A análise detalha o uso de polinômios de Scheffé, métodos de otimização múltipla e a importância de replicações e randomização para garantir a precisão e confiabilidade dos resultados.

4 METODOLOGIA

Neste trabalho, para o tratamento térmico do RCA, foi aplicada a metodologia proposta por Carneiro (2021) que, para o tipo de forno empregado, obteve como solução ótima a calcinação de 5 kg de RCA, à 800°C por 1 hora, a fim de eliminar seu caráter carcinogênico e promover fases com presenças de hidroxilas. O forno empregado foi um forno mufla da Linn Elektro Therm (Figura 9) com controlador de temperatura modelo CC-405 que permite a programação de rampas de aquecimento conforme necessidade do experimento. Após conclusão do programa, a amostra foi mantida no forno para resfriamento até alcançar a temperatura ambiente.

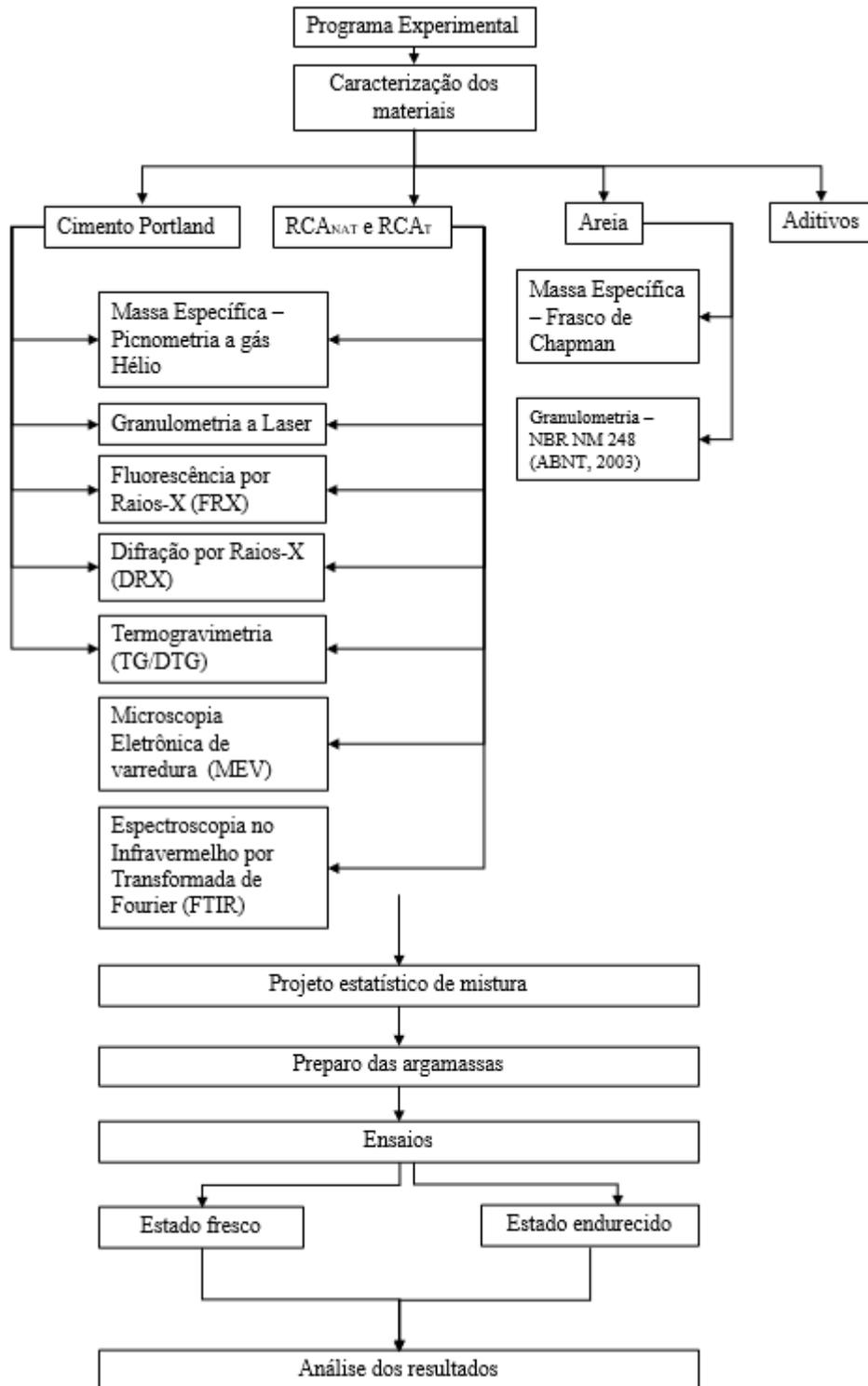
Figura 9 - Forno mufla Linn Elektro Therm.



Fonte: (AUTORA, 2024).

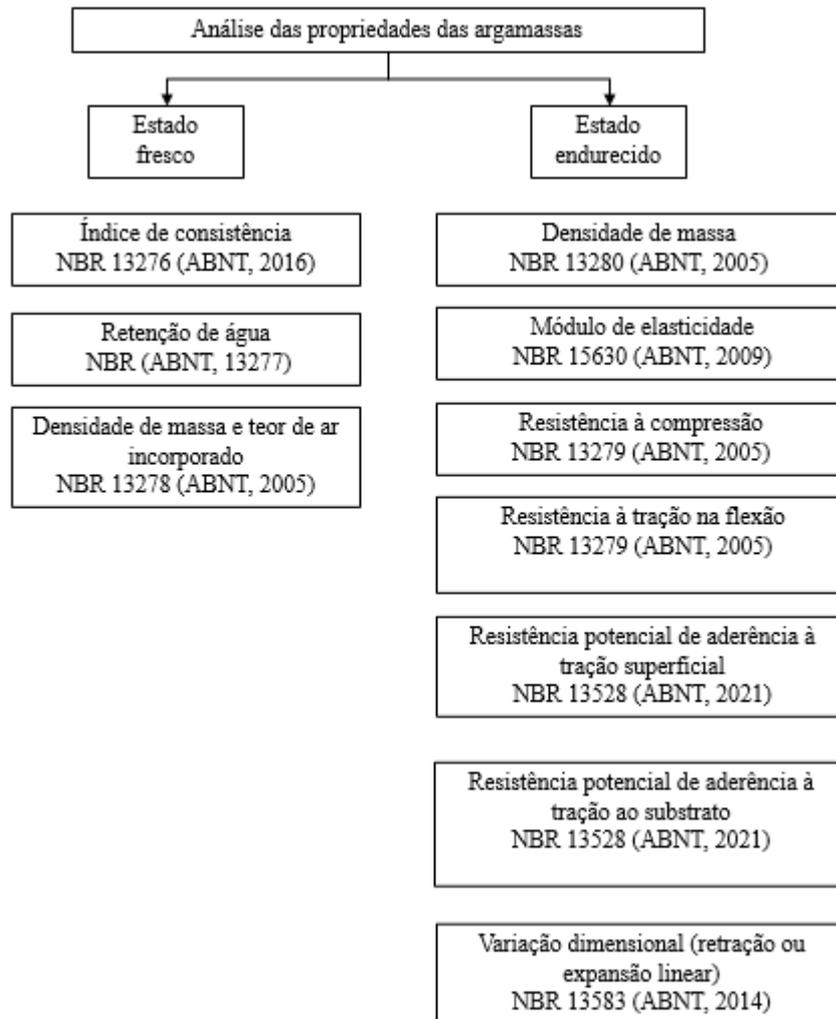
Na sequência, o material foi direcionado para as demais etapas experimentais compreendida no fluxograma da Figura 10, foram moldados corpos de prova em quantidade recomendada pelas normas técnicas correspondentes a cada ensaio empregado. A Figura 11 apresenta os ensaios realizados e respectivas normas.

Figura 10 - Fluxograma resumido para o programa experimental.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

Figura 11 – Análise das propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

4.1.1 MATERIAIS

O resíduo de cimento-amianto (RCA) a ser utilizado como material cimentício suplementar para produção de argamassas ecoeficientes foi coletado mediante extração de amostras do aterro industrial de resíduos Classe I. As telhas apresentavam espessura nominal igual a 4 mm, e eram provenientes da produção da máquina Hatschek.

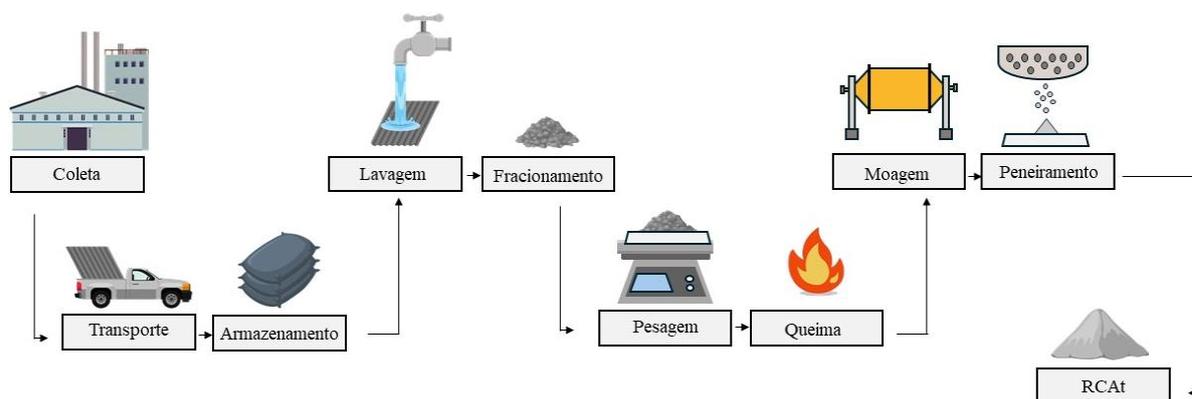
4.1.1.1 Beneficiamento do RCA

A metodologia adotada para a coleta e processamento do RCA seguiu um protocolo rigoroso, visando minimizar a exposição às fibras de amianto e garantir a eficácia na remoção e tratamento adequado do material contaminado.

Primeiramente, a coleta do resíduo de cimento-amianto foi realizada com os devidos equipamentos de proteção individual (EPI's), tais como máscaras respiratórias, luvas de proteção e roupas adequadas para evitar o contato direto com as fibras.

Após a coleta, o resíduo foi transportado para uma área de processamento nas dependências da Universidade Federal da Bahia, onde foi submetido às etapas de tratamento apresentadas na Figura 12.

Figura 12 - Processo de beneficiamento do RCA.



Fonte: (AUTORA, 2024).

As amostras do RCA foram selecionadas aleatoriamente no lote obtido e submetidas à lavagem branda em água corrente para a remoção de materiais depositados nas suas superfícies. Em seguida, as telhas tiveram seu tamanho reduzido manualmente, a fim de adequação ao espaço do forno. O material obtido após tratamento térmico seguido de cominuição foi denominado de RCA_T. Os RCA_T foi cominuído em um moinho de bolas horizontal durante 6 h, peneirado na peneira 150 µm.

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CP II-F-40 RS, obtido por meio de doação realizada por uma indústria local de produção de argamassas. O material foi coletado diretamente dos silos de armazenamento, de forma a se obter uma amostra representativa com massa de aproximadamente 100 kg. Posteriormente, o cimento foi acondicionado em

embalagens plásticas hermeticamente fechadas. Em seguida, o material foi armazenado em sacos plásticos adicionais para prevenir a ocorrência de hidratação.

As características químicas, físicas e mecânicas do cimento Portland CP II-F-40 RS, foram fornecidas pelo fabricante desse produto e estão apresentadas na Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1 - Caracterização química do CP II-F 40-RS.

Óxido	Limites de	
	Norma/Especificação	Teores (%)
	NBR16697/2018	
MgO	N/A	3,09
SO ₃	≤ 4,5	3,18
Fe ₂ O ₃	N/A	3,03
Al ₂ O ₃	N/A	4,2
CaO	N/A	57,72
SiO ₂	N/A	18,4
K ₂ O	N/A	0,81
Na ₂ O	N/A	0,14
Eq. Alc	N/A	0,67
RI	≤ 7,5	3,5
PF	≤ 12	9,36

Fonte: (Fabricante, 2023).

Os resultados dos ensaios físicos e mecânicos estão apresentados na Tabela 2 abaixo. A massa específica do cimento foi 3,03 g/cm³, e o C₃A do clínquer 6,39%.

Tabela 2 - Caracterização física e mecânica do Cimento Portland CP II-F-40 RS.

Ensaio físico e mecânico												
Finura (%)			Blaine	Água de	Tempo de pega		Falsa Pega	Exp. Quente	Resist. à Compressão (MPa)			
#200	#325	#400	cm ² /g	consist. (%)	Início (min)	Fim (min)	(mm)	(mm)	1 Dia*	3 Dias	7 Dias	28 Dias
≤ 10,0	N/A	N/A	N/A	N/A	≥ 60	N/A	≥ 33,0	≤ 5,0	N/A	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0
0,2	1,5	4,2	5808	29,4	165	220	38	0,5	20,4	32,3	38,2	

Fonte: (FABRICANTE, 2023).

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural quartzosa. O material foi obtido por meio de doação realizada pela mesma indústria local de produção de argamassas. A amostra de areia foi previamente seca em estufa a uma temperatura de aproximadamente 100°C, durante um período de 24 horas, em seguida resfriada ao ar livre, e posteriormente peneirada na peneira de abertura 2,36 mm, apenas para a retirada de partículas grosseiras indesejadas, antes de serem utilizadas nas argamassas.

Os aditivos utilizados para elaboração do projeto de pesquisa, a saber, plastificante a base de policarboxilato (PCX), retentor de água a base de hidroxietil-metilcelulose (H-MEC), e incorporador de ar à base de laurel sulfato de sódio (IA), foram adquiridos via doação de um fabricante da indústria química. O Quadro 5 indica as especificações da ficha técnica de cada material vide fabricante.

Quadro 4 – Informações da caracterização física dos aditivos: retentor de água (RA), incorporador de ar (IA), plastificante (PCX)

Material	Propriedade	Resultado
Retentor de ar (RA)	Viscosidade	7.000 a 13.000 cps
	Umidade	<8,0%
	pH (2% solução)	5,0 - 9,0
	Tamanho da partícula	< 177 Um min. 95%
Incorporador de água (IA)	Aparência	Pó fino e branco
	Teor de ativos (%)	Mínimo 94
	Na ₂ SO ₄ (%)	≤ 2,5
	Umidade (%)	≤ 3,0
	pH (solução 1%)	7,5 - 9,5
Plastificante (PCX)	Aparência	Pó branco
	Densidade	0,6 ± 0,1 g/cm ³
	pH (40% solução)	9 a 11
	Teor de Na ₂ SO ₄	≤ 3,0%
	Teor de Cl ⁻	≤ 0,1%
	Taxa de redução de água	≥ 22%

Fonte: (FABRICANTE, 2023).

Como água de amassamento foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento de água da Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A (EMBASA).

4.1.2 PROCEDIMENTOS DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

4.1.2.1 Massa específica: Massa específica

A areia foi submetida a análise de composição granulométrica e massa específica, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022) e NBR 16916 (ABNT, 2021) respectivamente, tendo sua granulometria classificada de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022).

As massas específicas dos materiais: RCA_T, cimento Portland, e aditivos foram determinados por meio da técnica de Picnometria a gás hélio, com picnômetro *AccuPyc II* 1340 da *Micromeritics*. Para estas determinações, as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 24 horas e, em seguida, acondicionadas em um dessecador. Foram utilizados cerca de 20 g/amostra e 3 amostras de cada material. A densidade determinada correspondeu à média de 5 determinações por amostra.

4.1.2.2 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica do RCA_T e CP II-F-40 RS foi determinada por meio da difração a laser por via úmida utilizando um analisador de tamanhos de partículas modelo *Helos KR*, da *Sympatech*. As amostras em pó (~0,10 g) foram adicionadas em um Becker e dispersa em H₂O + Na₄P₂O₇. A mistura foi homogeneizada a 1000 rpm utilizando um agitador mecânico modelo RW20DZM.n da *IK Labortechnik*. Em seguida, a mistura foi direcionada à unidade externa de dispersão até que a concentração ótica do sinal atingisse ~10. Para isso, utilizou-se um ultrassom modelo SSBuc 151, da *Solid Steet* por 120 s, registrando 3 leituras de 10 s em cada lente. As análises foram realizadas na faixa de 0,1 a 350 µm.

4.1.2.3 Área superficial específica (BET)

A área superficial específica do RCA_T e CP II-F-40 RS40 foi determinada pelo método BET. Para determinar as áreas superficiais específicas dos materiais, as amostras foram reduzidas a 10 gramas usando um amostrador rotativo. Em seguida, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 110 °C por 24 horas e resfriadas por 2 horas à temperatura ambiente. Em seguida, as amostras foram armazenadas em um dessecador com sílica gel e pressão de vácuo para evitar a absorção de umidade. Na sequência, as amostras com massa igual a 1,5154 g, passaram por um pré-tratamento no equipamento BELPREP-vacII, que aplicou uma pressão de vácuo de 10⁻² kPa, "*spoon sampling*", a 40 °C por 16 horas. Assim, a área superficial específica foi determinada utilizando a isoterma de adsorção de gás N₂ a 77 K, seguindo o método BET multiponto (faixa de p/p₀ entre 0,05 e 0,25). Para isso, foi utilizado o equipamento Belsorp Max, Bel Japan.

O RCA e RCA_T foram submetidos à caracterização química por fluorescência de raios-X (FRX), mineralógica por difratometria de raios-X (DRX) e análise termogravimétrica (TG/DTG), e à análise química-estrutural a partir da espectrofotometria infravermelha (FTIR) e à caracterização física.

4.1.2.4 Caracterização química por Fluorescência de raios-X (FRX) e Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

As composições químicas do CP II-F-40 RS, RCA, RCA_T, foram determinadas, na forma de óxidos, por meio da técnica de fluorescência de raios-X (FRX). Os teores apresentados

foram determinados em amostra fundida com tetraborato de lítio, na calibração CIM-1 (Cimentos), relativa à análise quantitativa por comparação com materiais de referência certificados, em espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Malvern Panalytical, modelo Zetium. A Perda ao Fogo (PF) foi realizada a 1.020 °C por 2h.

Foi realizada também a análise do RCA e RCA_T por espectroscopia no infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). Essa técnica pode fornecer informações sobre alterações na estrutura da fibra e na composição química do material com o tratamento térmico. Para tanto, foi utilizado o espectrômetro de infravermelho FT-IR Shimadzu, IRTracer-100, com acessório de refletância total atenuada empregando um cristal de seleneto de zinco (ZnSe) com recobrimento em diamante. Os espectros foram analisados na faixa de 600 a 4000 cm⁻¹, com resolução de 4 cm⁻¹ e 45 varreduras. Antes de analisar as amostras, foi determinado o espectro de infravermelho chamado "branco" empregando o cristal sem amostra. Os espectros das foram obtidos da seguinte forma: a amostra foi espalhada e prensada sobre a superfície do cristal de ATR, em seguida, foi realizada a obtenção do espectro.

4.1.2.5 Caracterização mineralógica por Difração de raios-X (FRX)

A caracterização mineralógica do CP II-F-40 RS, RCA e RCA_T por DRX foi feita utilizando-se um difratômetro de raios-X da *Panalytical* modelo *Empyrean*, com tubo em alvo de cobre (CuK α) de 40 kV e 40 mA. Os espectros de DRX foram obtidos para 2 θ entre 0° e 75°, no modo contínuo, para o passo de 0,02° e o tempo do passo de 300 s, utilizando o detector por área. Para identificar as fases cristalinas, foi utilizado o software *Panalytical X-Pert HighScore Plus* (versão 4.9) em conjunto com o banco de dados *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) e o banco de dados *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). Esta técnica se apresenta fundamental para o conhecimento do teor de calcita (% calcita), teor de crisotila (% crisotila), teores dos polimorfos da belita (% α 'H-C₂S, % β -C₂S e % γ -C₂S) e teor de amorfo (% amorfo), em relação à massa total. A presença da fase griceite (fluoreto de lítio – LiF) é evidenciada no difratograma. O fluoreto de lítio (LiF) foi escolhido como padrão interno a ser utilizado em todas as amostras principalmente pelo fato de não apresentar picos com sobreposição aos das fases presentes nos materiais de estudo. Gobbo (2009) retratam que por apresentar poucos picos no halo de amorfismo, e por pertencer ao sistema cristalino cúbico, o que torna o refinamento de sua estrutura cristalina mais simples, O LiF apresenta coeficiente de absorção similar à dos materiais em estudo.

4.1.2.6 Caracterização térmica por Termogravimetria (TGA)

Foi realizada também a análise termogravimétrica (TGA) do CP II-F-40 RS, RCA, RCA_T visando a determinação do perfil de decomposição térmica, com as perdas de massa em função da temperatura. A análise térmica dos materiais foi realizada em uma termobalança Netzsch T209 F1 Libra, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, até 1000 °C, em atmosfera inerte de nitrogênio (N₂), com vazão de N₂ igual a 20 ml/min. O tempo de estabilização antes do início do ensaio foi de 15 min. Assim, foi possível identificar os eventos principais de decomposição térmica dos RCA, como o pico de desidroxilação da crisotila e de descarbonatação da calcita, além de observar o comportamento desses picos nos RCA_T, auxiliando a quantificação das fases.

4.1.2.7 Caracterização microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na avaliação da morfologia do RCA e RCA_T, foi empregada a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Tal análise foi realizada por meio de microscópio tipo FEG (*field emission gun*), da marca FEI, modelo *Inspect F50*, com tensão de 15 a 20 kV, corrente de 0,96 mA. Para as análises químicas pontuais (EDS), foi utilizado o detector de sinais EDS (*Energy Dispersive X-ray Detector*, EDX ou EDS) da marca EDAX e distância de trabalho próxima a 10 mm, além de utilizar o equipamento BAL-TEC BALZERS SCD 050 *Sputter Coater* para recobrimento das amostras.

4.1.3 METODOLOGIA DE DOSAGEM DAS ARGAMASSAS ECOEFICIENTES

O procedimento de dosagem das argamassas ecoeficientes foi feita baseando-se em um projeto estatístico de mistura por meio da metodologia *Optimal Custom*. Neste projeto, inicialmente, foram determinados os limites mínimos e máximos das frações mássicas dos sete componentes utilizados no projeto de mistura: RCA_T (X_{RCA_T}), CP II F-40 (X_{CP}), areia (X_{AREIA}), plastificante (X_{SP}), modificador de viscosidade (X_{H-MEC}) incorporador de ar (X_{IA}) e água (X_{H₂O}), conforme apresenta a Tabela 3. Os limites das frações mássicas do RCA_T e água foram

definidos a partir de dados da literatura, ficha técnica de fabricantes e estudo de prospecção em laboratório buscando características reológicas adequadas para as misturas.

Tabela 3 - Ingredientes e limites adotados no projeto de mistura em fração mássica.

Componentes	CP II-F-40 RS (X_{CP})	RCA_T (X_{RCA_T})	Areia] (X_{AREIA})	Policarboxilato (X_{PCX})	IA (X_{IA})	H-MEC (X_{H-MEC})	Água (X_{H_2O})
Mín	0,0500	0,0000	0,6500	0,00010	0,00000	0,00000	0,1450
Máx	0,1800	0,0950	0,7700	0,00041	0,00041	0,00041	0,1530

Fonte: (A AUTORA, 2024).

Para a elaboração do projeto experimental do tipo *D-Optimal Screening Design*, foi utilizado o algoritmo Best no software Design Expert®, a fim de selecionar as melhores formulações de base.

A Tabela 4 apresenta as dezenove formulações de base estabelecidas e randomizadas pelo software Design Expert®, com as respectivas frações mássicas dos materiais, formulações de repetição, principais razões adotadas e indicação dos valores máximos e mínimos. Dentre as séries selecionadas, quatorze são formulações adotadas para estimar os coeficientes dos termos no modelo. As demais séries foram adicionadas para melhorar as estimativas dos coeficientes do modelo, a significância da falta de ajuste, além de apoiar a otimização e fornecer uma estimativa de erro puro, por meio da repetição do centroide e de pontos estrategicamente selecionados.

Para determinação das massas dos materiais utilizados na preparação da argamassa, empregou-se o método baseado nas densidades dos componentes e no volume fixo da mistura, estabelecido em 2 litros devido a capacidade volumétrica do misturador. Para o fator areia/ligante, adotou-se como ligante o somatório da fração mássica do cimento e do RCA_T.

Tabela 4 - Formulações de base estabelecidas e randomizadas pelo software Design Expert®, com as respectivas frações mássicas dos materiais com as formulações de repetição.

<i>Run</i>	X _{CP}	X _R CAT	X _A REIA	X _P CX	X _I A	X _H -MEC	X _A GUA	Areia/ligante	X _A GUA/ ligante	X _A GUA/ materiais secos	X _P CX/ ligante	X _I A/ligante	X _I A g/L argamassa	X _H - MEC/ligante
1	0,1076	0,0401	0,7026	0,0003	0,0002	0,0002	0,1490	4,7600	1,0086	0,1751	0,0017	0,0014	0,4410	0,0014
2	0,1076	0,0401	0,7026	0,0003	0,0002	0,0002	0,1490	4,7600	1,0086	0,1751	0,0017	0,0014	0,4410	0,0014
3	0,0765	0,0000	0,7700	0,0001	0,0000	0,0004	0,1530	10,0700	2,0003	0,1806	0,0013	0,0000	0,0000	0,0054
4	0,1099	0,0950	0,6500	0,0001	0,0000	0,0000	0,1450	3,1700	0,7077	0,1696	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,1008	0,0950	0,6500	0,0004	0,0004	0,0004	0,1530	3,3200	0,7815	0,1806	0,0021	0,0021	0,8804	0,0021
6	0,1076	0,0401	0,7026	0,0003	0,0002	0,0002	0,1490	4,7600	1,0086	0,1751	0,0017	0,0014	0,4410	0,0014
7	0,1800	0,0000	0,6741	0,0001	0,0004	0,0004	0,1450	3,7400	0,8056	0,1696	0,0006	0,0023	0,8915	0,0023
8	0,1012	0,0950	0,6500	0,0004	0,0004	0,0000	0,1530	3,3100	0,7799	0,1806	0,0021	0,0021	0,8809	0,0000
9	0,0500	0,0950	0,7015	0,0001	0,0000	0,0004	0,1530	4,8400	1,0552	0,1806	0,0007	0,0000	0,0000	0,0028
10	0,1800	0,0165	0,6500	0,0001	0,0004	0,0000	0,1530	3,3100	0,7787	0,1806	0,0005	0,0021	0,8838	0,0000
11	0,1076	0,0401	0,7026	0,0003	0,0002	0,0002	0,1490	4,7600	1,0086	0,1751	0,0017	0,0014	0,4410	0,0014
12	0,0500	0,0342	0,7700	0,0004	0,0004	0,0000	0,1450	9,1500	1,7225	0,1696	0,0049	0,0049	0,8796	0,0000
13	0,0765	0,0000	0,7700	0,0001	0,0004	0,0000	0,1530	10,0700	2,0003	0,1806	0,0013	0,0054	0,8709	0,0000
14	0,1800	0,0246	0,6500	0,0004	0,0000	0,0000	0,1450	3,1800	0,7087	0,1696	0,0020	0,0000	0,0000	0,0000
15	0,1076	0,0401	0,7026	0,0003	0,0002	0,0002	0,1490	4,7600	1,0086	0,1751	0,0017	0,0014	0,4410	0,0014
16	0,1800	0,0000	0,6662	0,0004	0,0000	0,0004	0,1530	3,7000	0,8500	0,1806	0,0023	0,0000	0,0000	0,0023
17	0,0500	0,0950	0,7095	0,0001	0,0000	0,0004	0,1450	4,8900	1,0000	0,1696	0,0007	0,0000	0,0000	0,0028
18	0,0500	0,0338	0,7700	0,0004	0,0004	0,0004	0,1450	9,1900	1,7309	0,1696	0,0049	0,0049	0,8790	0,0049
19	0,0766	0,0000	0,7700	0,0004	0,0000	0,0000	0,1530	10,0500	1,9976	0,1806	0,0054	0,0000	0,0000	0,0000
Mínimo	0,0500	0,0000	0,6500	0,0001	0,0000	0,0000	0,1450	3,1723	0,7077	0,1696	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000
Máximo	0,1800	0,0950	0,7700	0,0004	0,0004	0,0004	0,1530	10,0667	2,0003	0,1806	0,0054	0,0054	0,8915	0,0054

Obs.: A série 1 corresponde a formulação do centroide e as séries 2,6,11 e 15 representam a repetição de pontos no design.

Fonte: (A AUTORA, 2024).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Após o preparo das argamassas de revestimento, as misturas foram avaliadas quanto às propriedades nos estados fresco e endurecido. As respostas experimentais no estado fresco foram: índice de consistência, a retenção de água, a densidade de massa, o teor de ar incorporado. Para caracterizar as pastas no estado endurecido foram determinadas: a densidade de massa, a resistência à tração na flexão, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade dinâmico, e para a formulação otimizada: a resistência potencial de aderência à tração ao substrato, a resistência potencial à tração superficial, e a variação dimensional (retração ou expansão linear). A formulação otimizada, prevista pelos modelos estatísticos para obtenção de uma ARV-III, foi avaliada no estado endurecido nas idades de 14 e 28 dias.

4.3 PREPARAÇÃO DA ARGAMASSA

A determinação das massas dos materiais no projeto de mistura foi realizada considerando a massa específica individual de cada componente, juntamente com a fixação de um volume de 2 litros. Este volume foi selecionado com base na capacidade volumétrica da cuba do misturador, assegurando assim a uniformidade e a precisão no preparo das amostras de argamassa. A argamassa foi preparada de acordo as recomendações estabelecidas pela NBR 13276 (ABNT, 2016).

Para a moldagem dos corpos de prova prismáticos, foram seguidas as recomendações da NBR 13276 (ABNT, 2016) e mediante testes prévios realizados em laboratório. Foi realizada a pesagem do material anidro e posteriormente toda massa foi colocada na cuba do misturador. Em seguida, na velocidade baixa, adicionou-se 75% da água da mistura com proveta nos 20 segundos iniciais, misturando até completar o tempo de 30 segundos, desde o acionamento do misturador. Logo mais, mudou-se a velocidade para modalidade alta e o processo de mistura foi continuado por mais 60 segundos, quando se fez um momento de pausa de 90 segundos para mistura e raspagem da superfície interna e da pá. Em seguida, acionou-se o misturador na velocidade baixa e foi adicionado o restante da água (25%) nos primeiros 20 segundos,

continuando a mistura até completar 30 segundos, seguindo de velocidade alta por mais 60 segundos, e então, misturou-se a argamassa por mais 60 segundos na velocidade alta.

Para a moldagem dos corpos de prova foram utilizados moldes prismáticos de 40x40x160 mm seguindo as recomendações da NBR 13279 (ABNT, 2005e). Após o preparo da argamassa, foi colocada uma camada de argamassa no molde e feito o espalhamento em cada compartimento com o auxílio do nivelador. O molde foi fixado na mesa vibratória e permaneceu por um período de 20 s para o adensamento. Em seguida, foi realizado o rasamento dos corpos-de-prova com a régua metálica. Por fim, os corpos de prova ficaram nos moldes por 24 horas, para depois serem desformados e submetidos à cura ao ar com parâmetros de temperatura (23 ± 2) e umidade (60 ± 5) por 28 dias.

4.4 MÉTODOS DE ENSAIO

A fim de avaliar o desempenho das argamassas ecoeficientes produzidas a partir do RCA_T, as propriedades foram verificadas de acordo com os ensaios descritos a seguir, como consta no (Quadro 4) e classificados de acordo com os critérios e requisitos da NBR 13.281 (ABNT, 2023) na seção 3.2.8.1 desse trabalho.

4.4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

4.4.1.1 Índice de consistência

O Índice de Consistência das argamassas foi determinado empregando-se o procedimento da NBR 13276 (ABNT, 2016), que consiste na medição do espalhamento horizontal de uma argamassa acomodada em um molde troncocônico padrão sobre uma mesa de consistência (*flow table*). Neste ensaio, a argamassa é inserida no molde em três camadas de argamassa, com alturas iguais, que recebem 15, 10 e 5 golpes, respectivamente, com soquete metálico padrão. Em seguida, retira-se o molde e aplicam-se 30 quedas sucessivas da mesa. Após o espalhamento foram realizadas três medidas do diâmetro espalhado em direções diferentes. A média das três medições representa o Índice de Consistência.

4.4.1.2 Retenção de água

O ensaio de retenção de água consiste na medida da massa de água retida pela amostra de argamassa após a sucção realizada por meio de uma bomba de vácuo a baixa pressão, em um funil de filtragem. A NBR 13277 (ABNT, 2005) define especificamente a aparelhagem necessária para a execução do ensaio, que consiste em um funil de Buncher modificado com bomba de vácuo, discos de papel-filtro, soquete metálico, régua, balança e cronômetro.

Para a realização do ensaio, o papel filtro foi umedecido e posicionado sobre o prato, sendo este, por sua vez, colocado sobre o funil, garantindo a estanqueidade entre eles. Com a torneira fechada, a bomba de vácuo é acionada aplicando uma sucção de 51 mm de mercúrio. Em seguida, abriu-se a torneira por 90 segundos para retirada do excesso de água do papel-filtro, e fechado logo em seguida.

A argamassa, então, foi preenchida no prato e executado 16 golpes com soquete junto à borda e 21 golpes em pontos distribuídos na parte central. O excesso de argamassa do prato foi retirado usando régua metálica com movimentos do centro para a borda do prato. Com as bordas do prato limpas, o conjunto foi colocado novamente sob o funil. Com a torneira aberta, foi aplicado uma sucção de 51 mm de mercúrio durante 15 minutos e fechado em seguida.

A determinação da retenção de água (R_a) foi calculada através na Equação 11, prevista na mesma norma citada anteriormente e classificada pela NBR 13281 (ABNT, 2023).

$$R_a = \left[1 - \frac{m_a - m_s}{AFx(m_a - m_v)} \right] \times 100 \quad (\text{Equação 11})$$

Em que o fator água/argamassa fresca (AF) calculado pela Equação 12:

$$AF = \frac{mw}{m + mw} \quad (\text{Equação 12})$$

Em que R_a a retenção, em porcentagem; m_a a massa do conjunto com argamassa, em gramas; m_s a massa do conjunto após a sucção, em gramas; m_v a massa do conjunto vazio, em

gramas; mw a massa total de água acrescentada à mistura, em gramas; m a soma das massas dos componentes anidros, em gramas.

4.4.1.3 Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado

As densidades de massa das argamassas no estado fresco foram determinadas seguindo o procedimento da NBR 13278 (ABNT, 2005). Nos ensaios de determinação desta propriedade foram utilizados: uma balança com resolução de 0,1 g, um recipiente cilíndrico metálico rígido, espátula e uma placa de vidro plano. Imediatamente após o preparo, a argamassa foi introduzida suavemente, com colher em três camadas de alturas aproximadamente iguais. Em cada camada, foram aplicados 20 golpes ao longo do perímetro da argamassa. Cada golpe correspondeu à entrada e saída da espátula na posição vertical. Após o adensamento com a espátula efetuou-se três quedas do recipiente com altura aproximada de 3 cm. Essas quedas têm o objetivo de eliminar os vazios entre a argamassa e a parede do recipiente. Fez-se o rasamento do recipiente com a espátula, em duas passadas ortogonais entre si, fazendo movimentos de vai-e-vem, com inclinação de 45° em relação à superfície da argamassa. Após a eliminação de qualquer partícula ou água aderida à parede externa do recipiente, pesou-se e registrou-se a massa do molde com a argamassa (m_c).

A densidade de massa da argamassa, no estado fresco, obtida em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3) e o teor de ar incorporado são obtidos pela Equação 13 e Equação 14 respectivamente.

$$d = \left(\frac{m_c - m_v}{v_r} \right) \times 100 \quad \text{(Equação 13)}$$

Em que d é a densidade de massa da argamassa, em g/cm^3 , m_c é a massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio, em gramas, m_v é a massa do recipiente cilíndrico vazio, em gramas e v_r é o volume do recipiente cilíndrico, em cm^3 .

Para o teor de ar incorporado na argamassa tem-se:

$$A=100 \times \left(1 - \frac{d}{dt}\right) \quad (\text{Equação 14})$$

Em que A é o teor de ar incorporado, em porcentagem, d é a densidade de massa da argamassa, em g/cm^3 . Para argamassas industrializadas, a densidade de massa teórica deve ser calculada pela (Equação 15):

$$dt = \frac{ms + \text{m\u00e1gua}}{\frac{ms}{ys} + \text{m\u00e1gua}} \quad (\text{Equação 15})$$

Em que ms é a massa da argamassa anidra, em gramas; m\u00e1gua é a massa de \u00e1gua que comp\u00f5em a argamassa fresca; em gramas, ys é a massa espec\u00edfica da argamassa anidra, em gramas.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDIO

4.5.1 Densidade de massa aparente no estado endurecido

As densidades de massa no estado endurecido das argamassas foram determinadas empregando-se o procedimento da NBR 13280 (ABNT, 2005). Para isso, foram moldados tr\u00eas corpos de provas com dimens\u00f5es iguais a (4 x 4 x 16) cm por s\u00e9rie, que foram e curados ao ar at\u00e9 os 28 dias. Aos 28 dias realizou-se a pesagem dos corpos de prova em balan\u00e7a de precis\u00e3o e a medi\u00e7\u00e3o da altura, comprimento e largura dos corpos de prova com paqu\u00edmetro, para defini\u00e7\u00e3o de seu volume aparente. As densidades de massa dos corpos de prova foram calculadas empregando-se a Equa\u00e7\u00e3o 16:

$$\rho_{m\u00e1x} = \frac{m}{v} \times 1000 \quad (\text{Equa\u00e7\u00e3o 16})$$

Em que $\rho_{máx}$ é a densidade de massa, em kg/m³, m a massa do corpo de prova, em gramas, v o volume do corpo de prova, em m³.

4.5.2 Resistência à tração na flexão e compressão

O método descrito na NBR13279 (ABNT, 2005) para medir a resistência à compressão da argamassa envolve moldar três corpos de prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm) com argamassa recém-preparada, compactá-los na mesa vibratória, mantê-los nos moldes por 24 horas em condições controladas e depois desmoldá-los, mantendo-os até a ruptura aos 28 dias em cura ao ar. Realizou-se o ensaio de resistência à tração por flexão, usando o equipamento EMIC DL30000N. O corpo de prova foi posicionado no dispositivo de carregamento de modo que, a distância dos apoios das extremidades ficasse em 25 mm; desse modo à peça ficou com 100 mm entre os apoios.

Para a determinação da resistência à compressão das argamassas foram utilizadas as metades dos corpos de prova do ensaio da flexão. O equipamento Emic 23-5D foi usado para a realização deste ensaio; a carga aplicada em cada amostra foi de (500±50) N/s até ocorrer à ruptura dos corpos de prova. A força de ensaio foi aplicada continuamente e sem choques, com velocidade de carregamento de 0,3 MPa/s a 0,8 MPa/s, sendo a força de ruptura lida em kgf.

A resistência à tração na flexão foi calculada empregando-se a Equação 17.

$$R_f = \frac{1,5F_f \times L}{40^3} \quad (\text{Equação 17})$$

Em que R_f é a resistência à tração na flexão, em MPa; F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N, L é a distância entre os suportes, em mm.

A resistência à compressão foi calculada empregando-se a Equação 18:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (\text{Equação 18})$$

em que R_c é a resistência à compressão, em MPa; F_c é a carga máxima aplicada, em N; e 1600 é a área da seção do corpo de prova considerada quadrada (40 x 40 mm).

4.5.3 Resistência de aderência à tração

A NBR 13528 (ABNT, 2021) descreve o ensaio de resistência de aderência à tração de argamassas, que requer equipamento de tração, pastilhas, cola, gabarito, equipamento de corte, paquímetro, régua, colher de pedreiro e substrato conforme NBR 14081-2 (ABNT, 2015). Para o ensaio foi utilizado um aparelho para arrancamento hidráulico manual, para argamassas, com indicação digital de força e memória de pico, capacidade 1500 kgf, resolução 1kgf.

O ensaio consistiu em aplicar argamassa no substrato, cortar delimitando os corpos de prova, colar pastilhas e aplicar tração até a ruptura aos 28 dias. A NBR 14081-2 destaca que a medição só é válida se a ruptura ocorrer na interface chapisco/substrato ou chapisco/argamassa. Os valores médios de resistência são calculados a partir dos resultados aproveitáveis.

Após analisar a forma de ruptura, calculam-se os valores médios de resistência de aderência à tração dos corpos de prova.

A resistência de aderência ao substrato (R_{Sub}), expressa em megapascals (MPa), é calculada pela Equação 19 a seguir:

$$R_{Sub} = \frac{P}{A} \quad \text{(Equação 19)}$$

Em que P é a carga de ruptura, expressa em newtons (N); A é a área da pastilha metálica, em mm².

4.5.4 Aderência superficial

A NBR 13528-1 (ABNT, 2021) - Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – determinação da resistência de aderência à tração – Parte 1: Requisitos gerais, especifica o método para determinar a aderência superficial de revestimentos de argamassa por ensaio de tração, aplicados em substratos inorgânicos não metálicos. Para o ensaio na idade de 28 dias foi

utilizado um aparelho para arrancamento hidráulico manual, para argamassas, com indicação digital de força e memória de pico, capacidade 1500 kgf, resolução 1kgf.

Foram testados 10 corpos de prova com características semelhantes, independentemente do local do ensaio. Os corpos de prova foram distribuídos aleatoriamente no painel revestido, com pontos de arrancamento espaçados no mínimo 50 mm entre si e das quinas.

A resistência de aderência superficial (R_S), expressa em megapascals (MPa), é calculada pela Equação 20 a seguir:

$$R_S = \frac{P}{A} \quad \text{(Equação 20)}$$

Em que P é a carga de ruptura, expressa em newtons (N); A é a área da pastilha metálica, em mm².

A carga P e a área A devem ser introduzidas na expressão de cálculo como números inteiros, enquanto a resistência de aderência superficial (R_S) deve ser expressa com duas casas decimais. A ruptura pode ocorrer em qualquer interface ou no interior de uma das camadas do revestimento, devendo ser declarada com o valor da resistência de aderência superficial do sistema. Em casos de múltiplas formas de ruptura em um mesmo corpo de prova, deve-se anotar a porcentagem aproximada da área de cada forma de ruptura.

4.5.5 Módulo de elasticidade

De acordo com a NBR 15630 (ABNT, 2009), é o método não destrutivo com o uso de ondas ultrassônicas. A mesma norma traz que o módulo de elasticidade deverá ser executado aos 28 dias da produção das argamassas.

Os corpos de prova prismáticos (40 x 40 x 160 mm) utilizados no ensaio de tração na flexão foram usados para a medição do módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada e pelo método do ultrassom. Para avaliação do módulo de elasticidade dinâmico pelo ultrassom foi necessário primeiramente realizar a medição da velocidade do pulso, sendo feito pelo aparelho Pundit Lab, da marca PROCEQ, com pulso de 54 kHz. Primeiramente o equipamento foi calibrado segundo especificações do fabricante, posteriormente foram realizadas as leituras necessárias. Nos transdutores foi passado uma camada de gel para

promover melhor contato com a superfície do corpo de prova. Em seguida os transdutores foram posicionados nas extremidades do corpo de prova prismático a fim de possibilitar a leitura de forma direta e calcular a velocidade das ondas ultrassônicas conforme Equação 21.

$$E_d = \frac{\rho V^2 (1+\nu)(1+2\nu)}{(1-\nu)} \quad (\text{Equação 21})$$

Em que E_d é o módulo de elasticidade dinâmico, em Mpa, ρ é a densidade do corpo de prova, em kg/m³, V é a velocidade de pulso km/s, ν é o Coeficiente de Poisson – adotado igual a 0,2.

4.5.6 Determinação da variação dimensional de barras de argamassa

As amostras de argamassa foram moldadas para realizar a determinação da variação dimensional de barras de argamassa, conforme determinado pela NBR 15261 (ABNT, 2005). Os moldes foram preparados e em seguida as juntas e as superfícies internas dos moldes foram vedadas. Os pinos foram colocados de modo com que ficassem limpos, colocou-se uma camada de argamassa que ficou por um período de 20 segundos na mesa vibratória. Os corpos-de-prova permaneceram nos moldes durante as primeiras (48 ± 6) h, contadas a partir do início da mistura, em ambiente de laboratório temperatura de (23 ± 2) °C e umidade relativa do ar de (50 ± 5) %, devidamente protegidos contra a perda de umidade cobertos com filme PVC. Logo após a desforma, os corpos-de-prova foram identificados, assinalando inclusive uma referência que permita colocá-los sempre na mesma posição no aparelho de medida. Em seguida, determinou-se a massa dos corpos de prova e efetuou-se as leituras iniciais (L_0 e m_0).

O resultado deve ser expresso e calculado conforme a Equação 22 e Equação 23, arredondando sempre ao milésimo mais próximo:

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25} \quad (\text{Equação 22})$$

$$\Delta m_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} 100 \quad (\text{Equação 23})$$

Em que ε_i é a medida da variação dimensional, caracterizada como retração (quando negativa) ou expansão (quando positiva), na idade "i", arredonda ao centésimo mais próximo, em milímetros por metro; L_i é a leitura efetuada na idade final, em milímetros; L_0 é a leitura efetuada após a desforma, em milímetros; i é a idade de leitura.

4.5.7 Estudo das formulações de base e determinação da formulação otimizada

Para a avaliação das formulações de base, utilizou-se a Análise de Variância (ANOVA). Esta técnica estatística permite observar e identificar as correlações existentes entre as variáveis estudadas. Através do ANOVA, foi possível determinar se existem diferenças estatisticamente significativas entre os grupos de dados e como as variáveis interagem entre si, proporcionando uma compreensão aprofundada dos efeitos e relações dentro das formulações testadas.

A correlação linear r é um parâmetro estatístico que varia entre -1 e 1. O valor positivo de r representa que o aumento no valor de uma variável está associado ao um aumento no valor da outra variável. Já r negativo implica que o aumento no valor de uma variável está associado à redução no valor da outra variável. Quando $|r|$ se aproxima de 1, há forte correlação linear entre as variáveis envolvidas, enquanto ao se aproximar de zero, haverá baixa dependência linear entre as variáveis envolvidas.

A partir do projeto de mistura foram gerados nove modelos distintos para investigar essas correlações e propriedades das argamassas: índice de consistência (IC), retenção de água (RA), ar incorporado (AI), densidade no estado fresco (DEF), densidade no estado endurecido (DEE), módulo de elasticidade (MOE), resistência à compressão (R_C), resistência à tração (R_t) e custo (C).

O custo (C) das argamassas é uma variável crucial no processo de formulação e otimização de materiais de construção e sua relação com a fração mássica de cada ingrediente. Esta relação é fundamental para entender como a composição das argamassas influencia diretamente o custo final por metro cúbico, além de outros aspectos importantes como o teor de

clínquer e as propriedades físicas do material no estado fresco. Com base nos dados obtidos dos materiais, e a densidade no estado fresco, foi possível estimar o custo, em R\$/m³, de cada formulação proposta. Nessa análise adotou-se custo zero para obtenção do RCA_T considerando a hipótese que a indústria responsável pela doação do resíduo arcará com o custo do tratamento. Para os demais materiais os preços foram obtidos via fabricantes e mercado local.

Para garantir uma referência de custo padronizada para a argamassa, foi adotado o maior custo dentre as formulações base. Esse valor, obtido a partir da formulação 14, no valor de R\$ 330,41 por metro cúbico e foi considerado como parâmetro máximo padronizado. Esta abordagem garante que quaisquer reduções de custos alcançadas através do processo de otimização sejam refletidas com precisão em relação a um intervalo bem definido.

A estimativa do teor de clínquer em cimentos Portland é fundamental para otimizar suas propriedades e desempenho. Com base nos resultados de perda de massa do carbonato de cálcio obtidos através de ensaios de termogravimetria, foi possível estimar a quantidade de clínquer presente no cimento Portland, dado que este é um componente primário do cimento. Para complementar esta análise, o conhecimento da densidade no estado fresco e a fração mássica do cimento nas formulações permitem uma estimativa mais precisa do teor de clínquer em cada mistura.

Para cada um dos modelos gerados, foram determinadas as equações que descrevem as relações entre as variáveis analisadas e os coeficientes correspondentes. Essas equações são essenciais para compreender como cada fator individualmente e em combinação influencia as propriedades da argamassa. As equações completas dos coeficientes de todos os nove modelos serão apresentadas, fornecendo uma base robusta para análises subsequentes e validação dos modelos.

Embora todas as equações dos coeficientes sejam importantes para uma compreensão completa dos modelos, a discussão será focada nas superfícies de resposta das propriedades mais relevantes. As superfícies de resposta permitem visualizar como variáveis interagem de forma bidimensional e, oferecendo insights visuais sobre os efeitos combinados das variáveis sobre uma determinada propriedade.

Para obtenção da formulação otimizada que detém as especificações vide na norma NBR 13281 (ABNT, 2023) para classificação de uma ARV-III foi realizada uma otimização simultânea empregando-se a função de desejabilidade proposta por Derringer e Suich (1980), que consiste no peso entre 0 e 1, dado a cada valor das propriedades. A partir desse

procedimento, pode-se investigar a maximização da desejabilidade global da solução no problema de otimização. Esta, por sua vez, é igual a média geométrica das desejabilidades individuais obtidas com a solução para as propriedades avaliadas. A desejabilidade global na otimização das variáveis respostas foi de 0,68.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

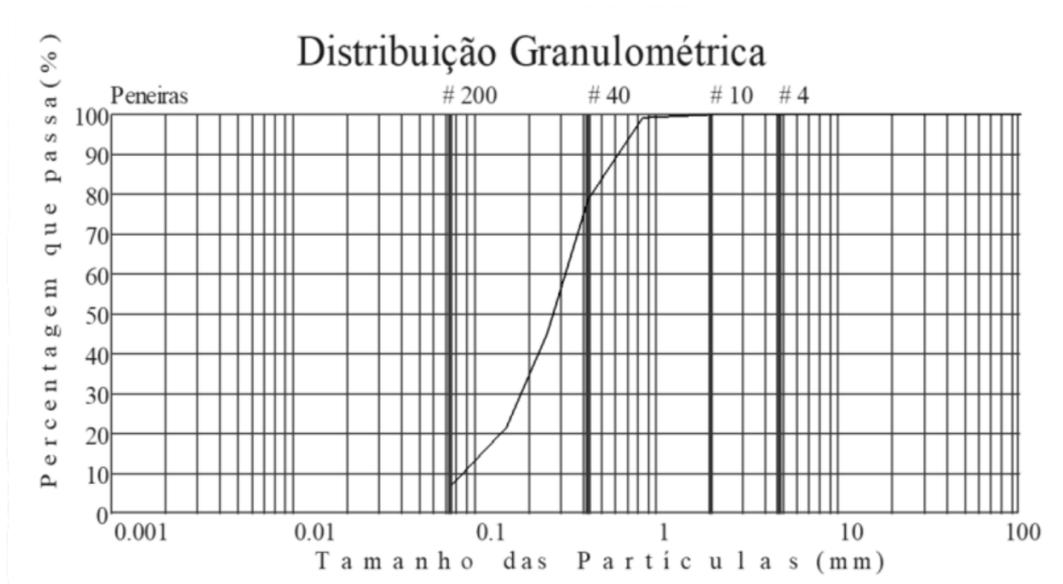
Neste capítulo serão apresentados os resultados da caracterização dos materiais empregados no estudo, incluindo os resíduos de cimento-amianto na condição natural (RCA) e após tratamento (RCA_T). Em seguida, serão apresentados os resultados da caracterização das argamassas no estado fresco e no estado endurecido. Será apresentado também, o delineamento estatístico dos resultados experimentais, bem como o resultado e discussões da otimização simultânea visando a obtenção da formulação ótima para a argamassa contendo o RCA_T classificada como ARVIII.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1 Caracterização do agregado miúdo

O agregado miúdo empregado na produção das argamassas apresentou massa específica igual a 2,618 g/cm³ conforme NBR 16916 (ABNT, 2021). Sua distribuição granulométrica (ver Figura 13), que resultou na dimensão máxima característica igual a 1,18 mm e módulo de finura de 2,51.

Figura 13 - Curva granulométrica do agregado miúdo.

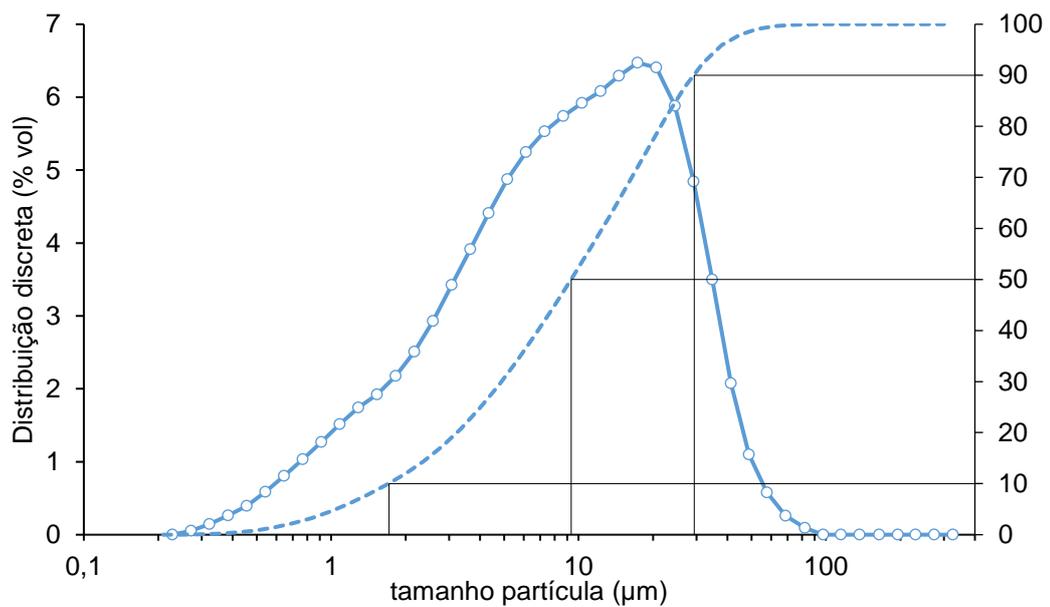


Fonte: (A AUTORA, 2024).

5.1.2 Caracterização do Cimento Portland CP II-F-40 RS40 RS

A Figura 14 apresenta a distribuição granulométrica discreta e acumulada do CP II-F-40 RS.

Figura 14 - Distribuição granulométrica do CP II-F 40 RS.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

Este gráfico mostra que a distribuição granulométrica do material é contínua e bem graduada, com a maioria das partículas concentradas entre 1 μm e 100 μm . A distribuição discreta atinge o pico em torno de 20 μm . O Quadro 6 apresenta os valores de D_{10} , D_{50} e D_{90} , bem como a área superficial específica e densidade do CP II-F-40 RS.

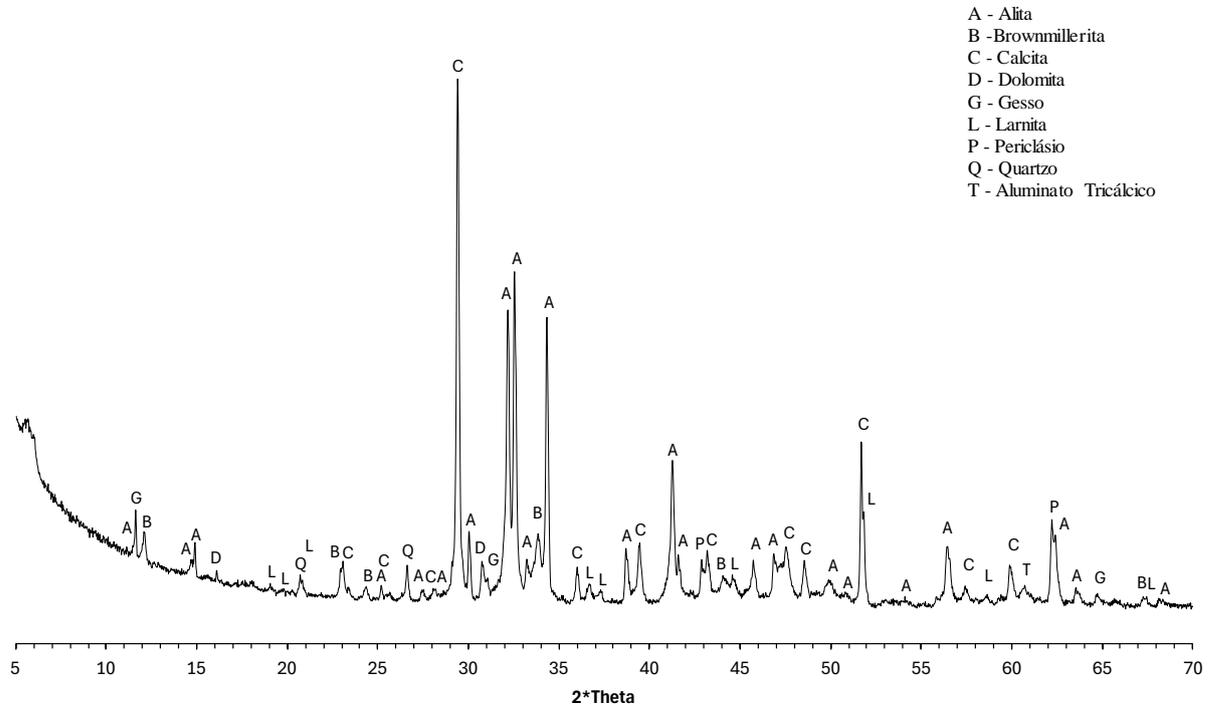
Quadro 5 - Propriedades físicas do CP II-F 40 RS.

Propriedades físicas	Valor	Método de ensaio
Área Superficial Específica (m^2/g)	2,23	BET
Densidade real (g/cm^3)	3,05	Picnometria a gás He
Área Superficial volumétrica (m^2/cm^3)	6,80	
D10	1,7	
D50	9,3	Granulometria a laser
D90	29,4	

Fonte: (Fabricante, 2023).

A Figura 15 apresenta o difratograma de raios-X do CP-II-F 40. As fases cristalinas identificadas foram alita (C_3A) (96-154-0705-ICDD), calcita (CaCO_3) (96-901-6707-ICDD), quartzo (SiO_2) (96-154-0705-ICDD), dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] (96-900-4930-ICDD), gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (96-500-0040-ICDD), Brownmillerita ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$) (96-901-6158-ICDD), cal (CaO) (96-900-4930-ICDD) e periclásio (MgO) (96-901-4360-ICDD). A alita (C_3S), fase majoritária na amostra responsável pelo endurecimento e resistência nas primeiras idades do cimento, é a principal fase do clínquer, correspondendo a cerca de 40% a 70% da massa do clínquer.

Figura 15 - Difratoograma de raios-X do CP II-F-40 RS com a identificação das fases.

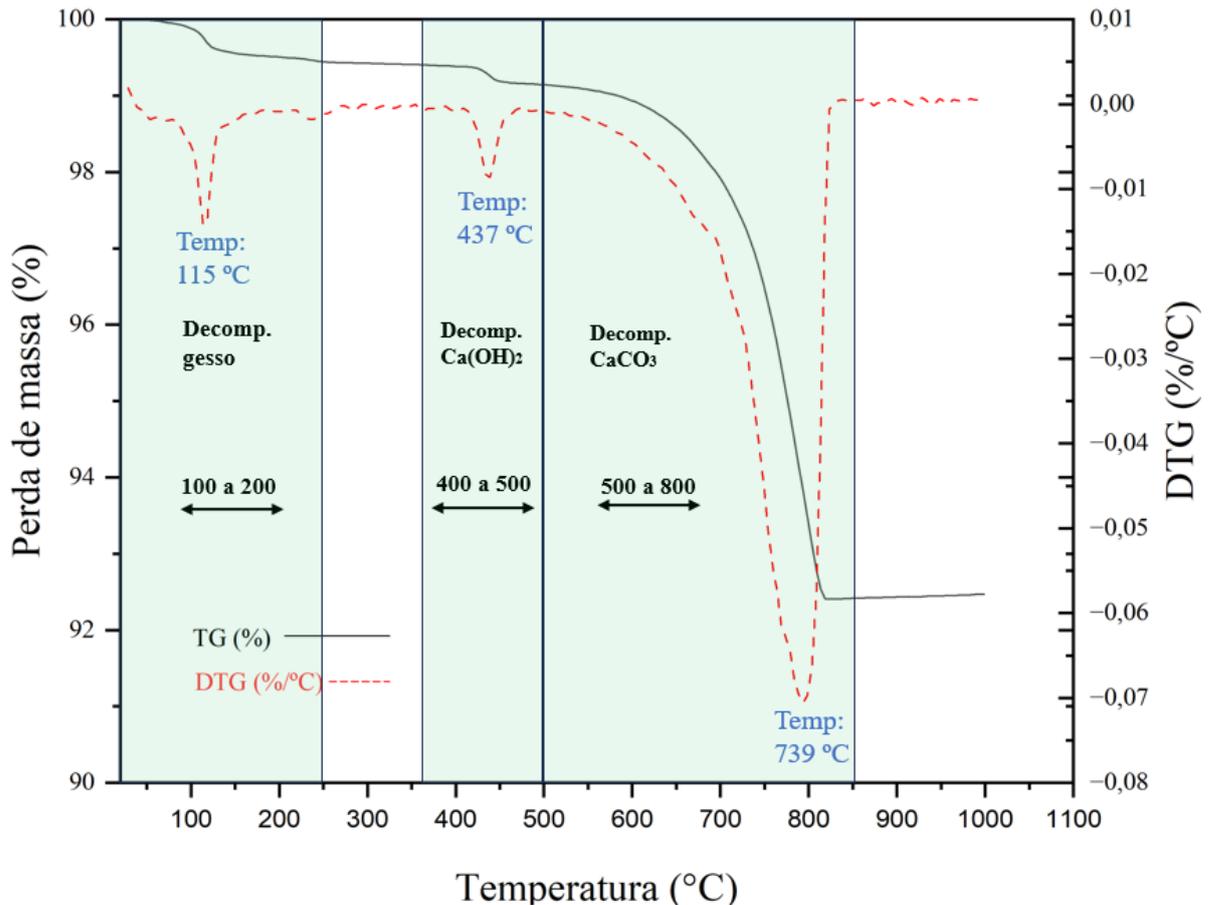


Fonte: A Autora (2024).

A Figura 16 apresenta as curvas de análise termogravimétrica (TG/DTG) do CP II-F-40 RS em que se verificam os seguintes fenômenos:

- a) entre 100 °C e 200 °C, correspondendo à decomposição do gesso;
- b) os que acontecem entre 400 °C e 500 °C corresponde a decomposição do hidróxido de cálcio; e entre 500 °C e 900 °C a decomposição do CaCO_3 . Esses resultados corroboram com estudos de Taylor (1997) que menciona esse comportamento para o cimento anidro.

Figura 16 - Análise termogravimétrica (TG e DTG) do CP II-F-40 RS40.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO RCA

5.2.1 Caracterização por Fluorescência de Raios-X

A Tabela 5 fornece a composição química do resíduo de cimento-amianto não tratado (RCA) na forma de óxidos, expressa em porcentagem de massa (% em massa). Os resultados mostram que o RCA é constituído majoritariamente pelos óxidos de cálcio CaO (40,6% em massa) e de silício SiO₂ (12,6 % em massa), essenciais para a formação do silicato dicálcico (belita, C₂S). Verificou-se também um valor elevado de perda ao fogo (32,4%), o que está relacionado com o alto teor de carbonatos resultado do estágio avançado da carbonatação das telhas, elementos que ficaram diretamente expostas ao intemperismo por longo período. Além desses óxidos, o RCA contém 7,23% de MgO (7,23% em peso), 2,61% de Fe₂O₃ e 2,31% de

Al₂O₃. A composição química é complementada com óxidos presentes em quantidades inferiores a 1% como oTiO₂, Na₂O, K₂O e SO₃.

Tabela 5 - Composição química do RCA na forma de óxidos (% em massa).

Material	CaO	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Outros	PF*
RCA	40,6	12,6	7,23	2,61	2,31	1,24	0,38	0,63	32,4

Obs.:*Perda ao fogo à 1000 °C.

Fonte: (A AUTORA, 2024).

Kusiorowski *et al.*, (2024) examinou três materiais contendo amianto em fim de vida (20 a 50 anos de exposição) com espessura aproximadamente de 5 a 7 mm, provenientes da Lituânia. Todas as amostras testadas eram placas corrugadas de cimento-amianto, mas variaram quanto ao local de coleta e ao tempo de uso e operação. As placas eram constituídas de 32 a 33% de SiO₂, 25 a 30% de CaO e a perda ao fogo variou entre 20 para 25%, em massa. A amostra obtida da província de Trakai (TR) apresentou um teor de Fe₂O₃ no valor de 5,2% em massa, moderadamente superior ao encontrado para o RCA do presente estudo.

Carneiro (2021) avaliou o RCA oriundo de telhas que foram produzidas com espessura nominal igual a 4 mm, largura igual a 60 cm e comprimento igual a 213 cm, em máquina Hatschek, ficando expostas ao intemperismo por aproximadamente 23 anos. O pesquisador observou que os teores de CaO e SiO₂ no RCA eram iguais a cerca de 38,69 e 13,16%, respectivamente.

Santos (2022) analisando a mesma amostra de Carneiro (2021), inferiu que o resíduo poderia ser utilizado como substituto parcial do calcário na produção de clínquer de cimento Portland.

O teor elevado de cálcio dos RCA está relacionado ao cimento Portland utilizado como matéria-prima principal na produção de fibrocimentos. Foi observado, ainda, que o RCA apresentou consideráveis teores de MgO (6,97%) e de SO₃ (1,69%), também identificados em estudos realizados por Schoon *et al.* (2012). Estes pesquisadores observaram que os teores de silício e cálcio são de 56,60% a 64,40%, de MgO de 2,00 a 9,00% e SO₃ de 2,00% a 6,00%.

Staněk *et al.*, (2017) avaliaram amostras do resíduo obtidas de tubulações de cimento-amianto e observaram que teores de CaO e SiO₂ nas amostras eram de cerca de 47 e 18% respectivamente.

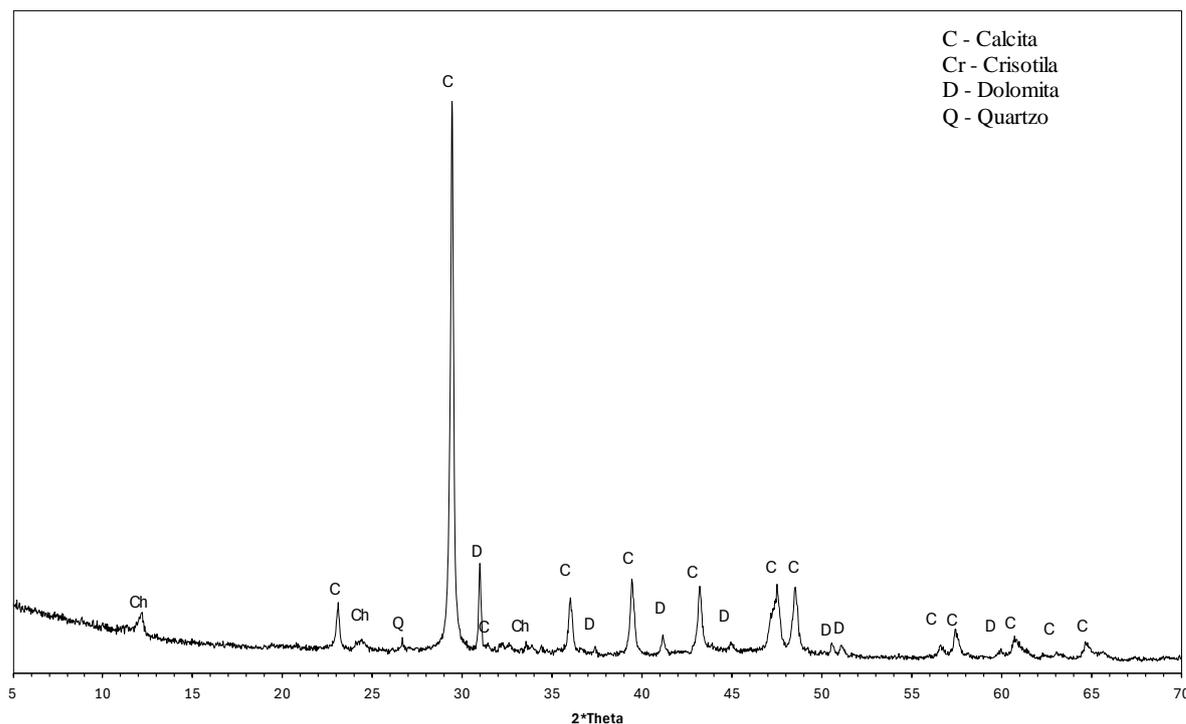
Viani *et al.*, (2013) conduziram análises em 27 amostras de resíduos de cimento-amianto provenientes de diversas localidades da Itália. Os pesquisadores notaram que os teores de CaO e SiO₂, somados nos resíduos de cimento-amianto (RCA) situavam-se entre aproximadamente 21 e 45%, e 26 a 38% respectivamente. Conforme observado por Viani e Gualtieri (2013), a presença de SiO₂ nos resíduos de cimento-amianto desempenha um papel crucial no controle da formação de belita (C₂S) durante o tratamento térmico.

A composição química do RCA, dominada por óxidos de cálcio, silício e magnésio, sugere que o material tem um potencial significativo para ser utilizado como um substituto parcial em misturas cimentícias, melhorando suas propriedades mecânicas e durabilidade. A perda ao fogo relativamente alta destaca a presença de componentes voláteis, que devem ser considerados no processamento e utilização do material.

5.2.2 Caracterização por Difração de Raios-X

A Figura 17 apresenta o difratograma de raios-X do RCA, os padrões de difração de raios-X da amostra, predomina as reflexões de difração da matriz cimentícia. Os principais componentes cristalinos identificados foram calcita (CaCO₃) (ICSD #80869), quartzo (SiO₂) (ICSD #26429), dolomita [CaMg(CO₃)₂] (ICSD #31277). A presença da crisotila [Mg₃Si₂O₅(OH)₄] (ICSD # 413633) que foi confirmada pela presença dos picos característicos desse mineral nos ângulos de difração 2θ iguais a ~12° e 24,37°. foram identificados picos característicos de outros tipos de amianto.

Figura 17 - Difratoograma de raios X do RCA com a identificação das fases.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

Kusiorowski *et al.*, (2024) realizou um estudo na Lituânia, onde três materiais contendo amianto foram avaliados in natura. As amostras analisadas eram placas de cimento-amianto onduladas. A amostra 1 (TR) veio de Trakai, província da Lituânia, e foi usada como agente endurecedor de terrenos, estando em contato com o ambiente externo por vários anos. As amostras 2 e 3 (V2 e V5) vieram de uma propriedade privada perto de Vilnius, capital da Lituânia, com tempos de uso no telhado de aproximadamente 20 e 50 anos, respectivamente.

Os autores apontaram como principais fases cristalinas identificadas nas amostras de cimento-amianto foram calcita (CaCO_3), quartzo (SiO_2), e crisotila ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). De acordo com o estudo levando em consideração o teor de MgO dos testes de fluorescência de raios-X, estimou-se que o teor de crisotila no material era de aproximadamente 14% em peso. Além das fases citadas, foram também identificadas a aragonita (CaCO_3), a larnita (Ca_2SiO_4), a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), a etringita $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ e a brownmillerita ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$). No caso das amostras V2 e V5 também foi identificado vestígio de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Devido ao envelhecimento prolongado e ao desgaste das amostras.

Santos (2022) identificou os picos da calcita (CaCO_3), do quartzo (SiO_2), da crisotila [$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$] e da dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], minerais também identificados por Viani *et al.*

(2013); Viani; Gualtieri (2014) e. No entanto, estes autores encontraram outras fases mineralógicas no RCA, tais como a portlandita $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, a belita β (Ca_2SiO_4), o amianto anfibólio e a aragonita (CaCO_3), em virtude da variedade de amostras avaliadas.

Um estudo conduzido por Carneiro (2021) indicou que a presença de calcita e a ausência de compostos hidratados no RCA podem ser explicadas pelo estágio avançado de carbonatação do compósito. Este processo geralmente ocorre em um período relativamente breve, devido à fina espessura das telhas.

Iwaszko (2019) avaliou uma placa de cimento-amianto usada para cobertura, derivada de desmontagem. Uma parte de aproximadamente 8 cm^2 foi retirada da placa e depois dividida mecanicamente em fragmentos com uma área média de aproximadamente 1 cm^2 cada. No material natural foram encontradas apenas 3 fases, nomeadamente calcita (CaCO_3), larnita (Ca_2SiO_4) e crisotila $[\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$, onde a fase definitivamente dominante era a calcita.

Staněk *et al.*, (2017) avaliaram amostras do resíduo obtidas a partir de canos de cimento-amianto. A amostra continha principalmente portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), calcita (CaCO_3) e algumas fases anidras do clínquer (especialmente $\beta\text{-C}_2\text{S}$ (Ca_2SiO_4)).

Esses minerais também identificados por Viani *et al.* (2013), e Viani e Gualtieri (2014). No entanto, os autores encontraram outras fases mineralógicas, como a portlandita $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, belita β ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), amianto anfibólio e aragonita (CaCO_3), entre outras fases, em virtude da variedade de amostras avaliadas.

O tratamento térmico dos RCA pode induzir alterações na estrutura da crisotila $[\text{Mg}_3(\text{OH})_4\text{SiO}_5]$, potencialmente fornecendo uma fonte de sílica para a cristalização da belita. Adicionalmente, o processo de tratamento pode promover a formação de periclásio (MgO), akermanita $[\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)]$ e merwinita $[\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2]$ (Viani; Gualtieri, 2014).

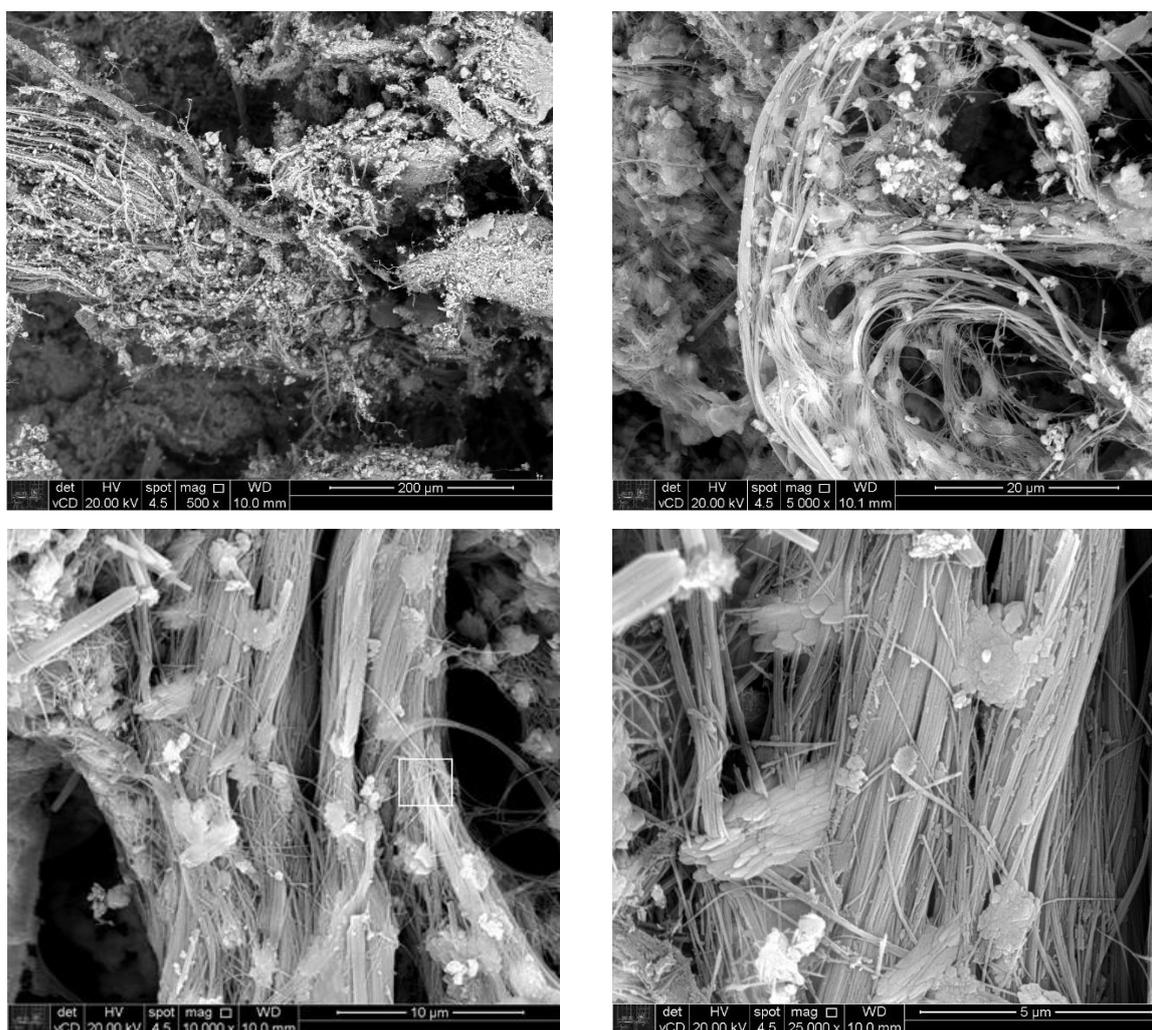
5.2.3 Observação por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As micrografias do resíduo de cimento-amianto *in natura* (RCA) considerado nesse estudo são apresentadas nas (Figuras 18 a,b,c,d). A Figura 18a apresenta uma micrografia da seção fraturada da telha de cimento-amianto, obtida através de microscopia eletrônica de varredura, em que se pode observar a presença de feixes fibrosos característicos do amianto distribuídos na matriz cimentícia e bem incorporados semelhantes aos observados por Kusiorowski *et al.*, (2024), Iwaszko (2019), Pawełczyk *et al.*, (2017) e Belardi e Piga (2013).

Pode-se observar que as fibras contidas no resíduo de cimento-amianto não exibem uma orientação preferencial nos feixes, caracterizando-se por uma estrutura aparentemente tubular com curvaturas ao longo de seu comprimento, características da crisotila.

Pawelczyk *et al.* (2017) avaliaram também a morfologia de RCA, antes do processo de moagem, e também observaram a presença de feixes fibrosos dispostos na morfologia do compósito cimentício reforçado com fibras de amianto.

Figura 18 – Análise de microscopia eletrônica de varredura: (a) micrografia de uma seção fraturada da telha de cimento-amianto, mostrando as fibras de amianto.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

Kusiorowski *et al.* (2024) examinaram imagens de três placas de cimento-amianto diferentes. A amostra TR foi usada como agente endurecedor de terrenos locais em propriedade privada próxima a Trakai e ficou exposta ao ambiente externo por vários anos. As amostras V2

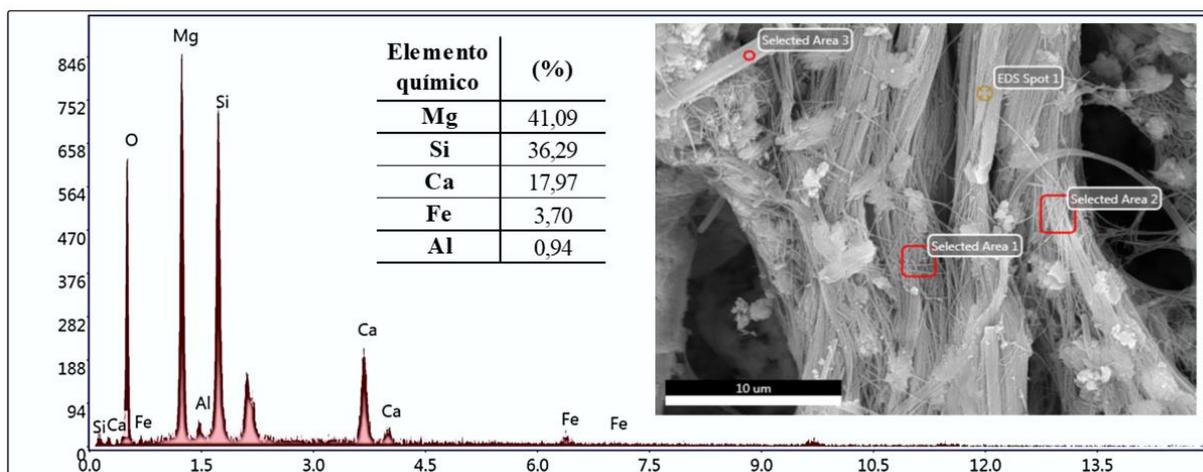
e V5 foram desmontadas do mesmo local próximo a Vilnius, mas diferiam no tempo de uso no telhado, com V2 tendo aproximadamente 20 anos e V5 aproximadamente 50 anos. Enquanto TR e V2 apresentavam superfícies lisas e compactas, com as fibras de amianto bem incorporadas na matriz de cimento, V5 mostrou feixes de fibras mal incorporados e facilmente removíveis, devido ao alto grau de intemperismo. A análise das imagens de V5 revelou a presença de grãos irregulares e isolados de carbonato de cálcio, principal produto do envelhecimento de 50 anos do material.

Iwaszko (2019) avaliou uma placa de cimento-amianto usada para cobertura, derivada de desmontagem. O autor avaliou que a microestrutura do resíduo no estado *in natura* apresentava numerosas fibras de amianto, que ocorreram tanto na forma de feixes quanto de fibras isoladas. A orientação das fibras de amianto e a forma como foram localizadas na matriz cerâmica não apresentaram características preferenciais ou ordenadas. O diâmetro das fibras individuais de amianto era de 1 a 2 μm , e o comprimento ultrapassava 5 μm , portanto eram fibras respiráveis com propriedades cancerígenas. As fibras não corriam retas, mas eram fortemente curvadas, o que comprova sua flexibilidade, conforme apresentado na Figura 18b.

Esses resultados assemelham-se também aos dados obtidos por Belardi e Piga (2013) e Pawelczyk et al. (2017). Verifica-se que telha de cimento-amianto apresenta, também, a orientação preferencial nos feixes de fibras, com uma estrutura aparentemente tubular com curvas ao longo de seu comprimento.

A análise química conduzida por *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) indicou que as fibras em questão são constituídas pelos elementos Mg, Si, Ca, Fe, Al e S. Importante ressaltar que a identificação química da amostra, realizada por Fluorescência de Raios-X (FRX), revelou a presença de óxidos similares aos elementos identificados na análise pontual por EDS. Este achado está em consonância com o estudo conduzido por Belardi e Piga (2013), os quais também observaram, ao investigar o amianto *in natura*, uma correspondência nos elementos identificados através da análise pontual por EDS. Além disso, é plausível inferir que o tipo predominante de amianto na amostra em análise seja a crisotila, dado que a razão molar Mg/Si se aproxima de 1,5, conforme apontado por Belardi e Piga (2013). A análise química por EDS é apresentada na Figura 19.

Figura 19 - Análise química obtida por EDS (%) "Selected Area 1".



Fonte: (A AUTORA, 2024).

No estudo conduzido por Jeong *et al.*, (2016) a análise EDS confirmou que a composição química do amianto branco, olivina e piroxênio consistia em Mg, Si e O. os autores inferiram que a transição de fase ocorreu devido à desidratação sem alteração no principal componentes. Portanto, considerou-se que o tratamento térmico do amianto branco pode ser utilizado como processo que garante a desidroxilação da fibra, pois o amianto branco fibroso é transformado em minerais inofensivos como a olivina e o piroxênio. Uma fraca estrutura tubular oca ainda foi observada na amostra tratada termicamente a 800°C, mas a ponta do feixe de fibras tornou-se arredondada, com bordas ou extremidades lisas e não pontiagudas.

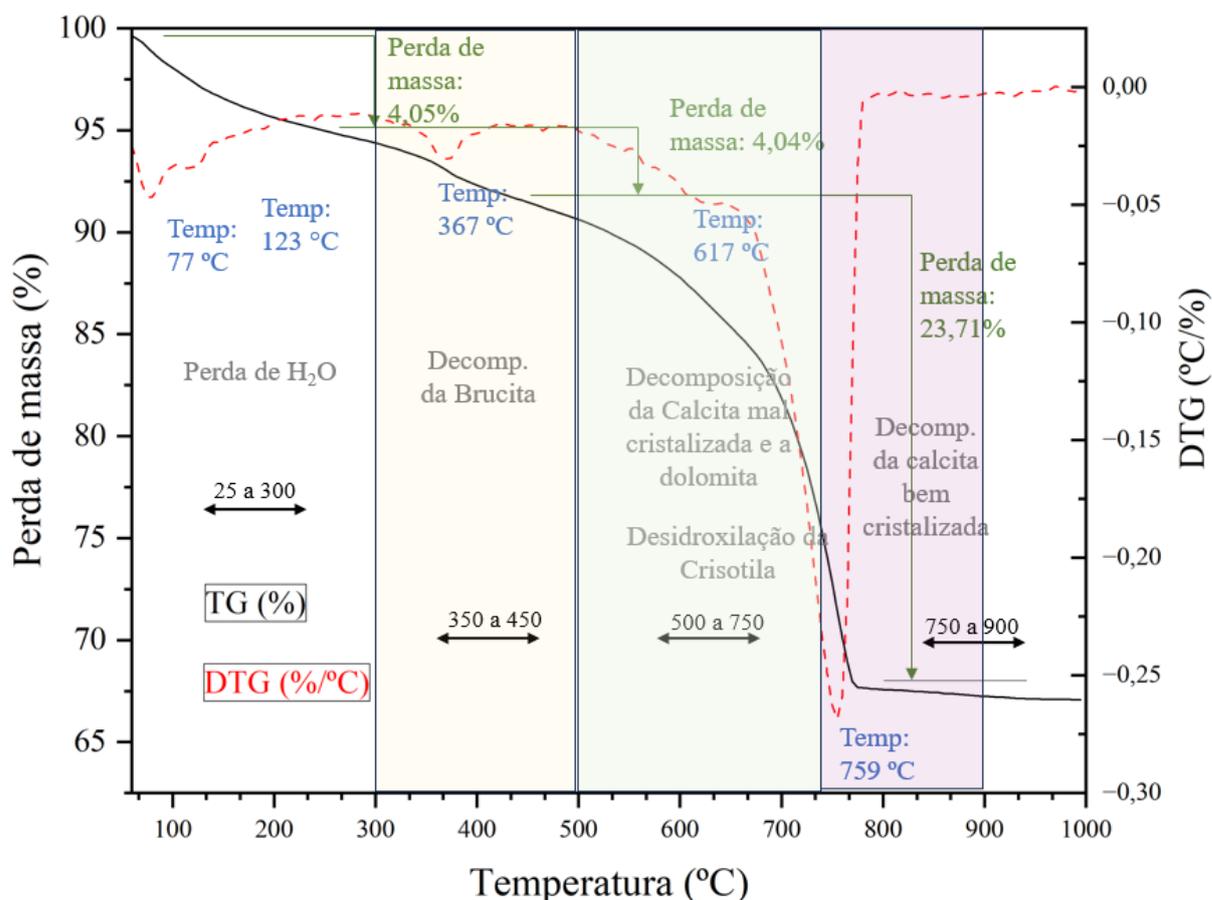
5.2.4 Caracterização por Análise Térmica

O progresso qualitativo do processo de decomposição térmica do RCA estudada é representado na Figura 20, a imagem apresenta as curvas de análise termogravimétrica (TG/DTG) do RCA, em que se verificam os seguintes fenômenos:

- pico entre 25 °C e 300 °C referente à perda de massa (4,05%) que corresponde à evaporação da água livre e da água adsorvida em compostos hidratados, como o C-S-H (Stepkowska *et al.*, 2004; Witek E Kusiorowski, 2017);

- b) pico entre 350 °C e 450 °C referente à perda de massa (4,04%) correspondente a decomposição térmica do hidróxido de magnésio (brucita), com uma pequena contribuição das fibras de amianto (DIAS *et al.*, 2008);
- c) pico entre 500 °C e 750 °C, referente à perda de massa (23,71%) que corresponde à descarbonatação da dolomita e da calcita mal cristalizada (DIAS *et al.*, 2008), bem como à desidroxilação das fibras de amianto crisotila (Witek; Kusiorowski, 2017). Kusiorowski *et al.*, (2024) avaliou que nesta faixa de temperatura também deverá ocorrer a decomposição térmica do amianto crisotila; no entanto, os seus efeitos característicos de decomposição térmica são mascarados pela descarbonização da matriz cimentícia.
- d) pico entre 750 °C e 900 °C que corresponde à decomposição da calcita bem cristalizada (Chen *et al.*, 2004).

Figura 20 - Análise termogravimétrica (TG e DTG) do RCA.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

5.3 CARACTERIZAÇÃO DO RCA_T

5.3.1 Caracterização física

Para um melhor entendimento das características físicas das matérias-primas utilizadas nesta pesquisa, estas foram caracterizadas quanto à área superficial específica B.E.T, massa específica, distribuição do tamanho das partículas e morfologia por microscopia eletrônica de varredura. As características do RCA_T são apresentadas na Tabela 6 abaixo. O RCA_T massa específica em consonância com a literatura (Carneiro, 2021).

A área superficial específica está intimamente relacionada à reatividade química e à taxa de hidratação do resíduo. Uma área superficial maior geralmente está associada a uma melhor hidratação e desempenho do cimento em aplicações concretas

Tabela 6 - Propriedades físicas do RCA_T.

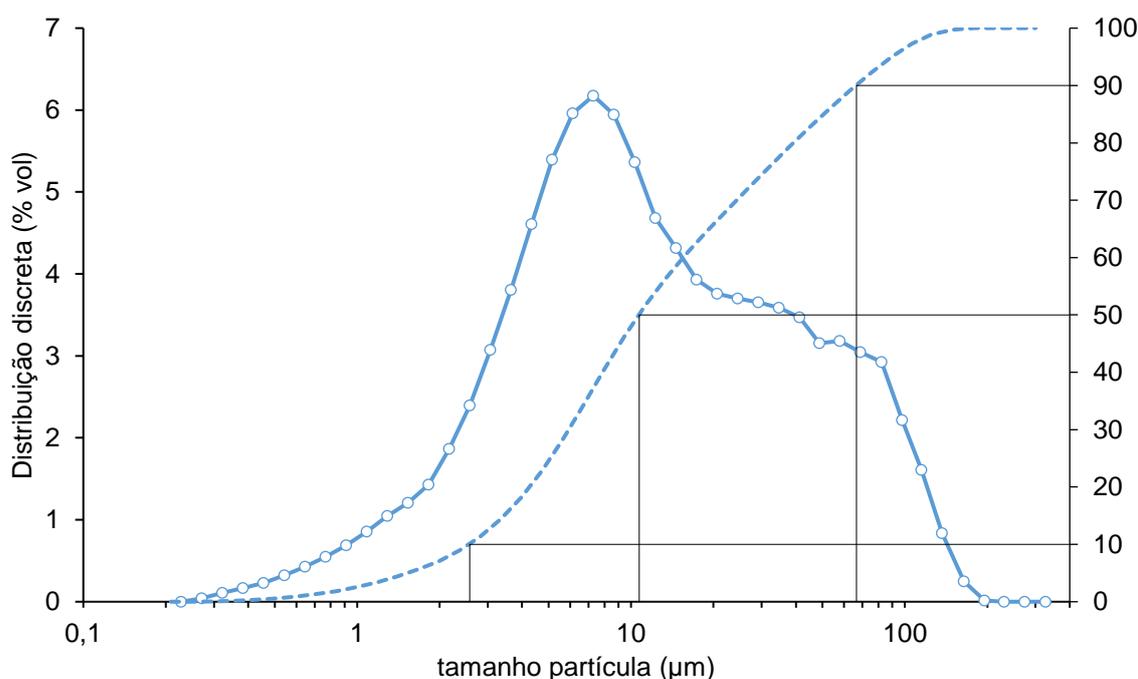
Propriedades físicas	Valor	Método de ensaio
Área Superficial Específica		
(m ² /g)	10,70	BET
Densidade real (g/cm ³)	3,05	Picnometria a gás He
Área Superficial volumétrica		
(m ² /cm ³)	33,18	
D10 (μm)	2,60	Granulometria a laser
D50 (μm)	10,40	
D90 (μm)	66,0	

Fonte: (A AUTORA, 2024).

Os resultados obtidos na análise de distribuição granulométrica do RCA_T mostraram que o processo de moagem adotado no procedimento experimental foi efetivo na cominuição do RCA, resultando em um D90 de 66 μm. Observou-se que os valores de D10 e D50 foram de 2,60 μm e 10,70 μm, respectivamente, indicando que 90% das partículas possuem tamanho inferior a 66 μm. Outro ponto importante é o esqueleto granular formado pelo resíduo quando

adicionado às misturas cimentícias, sugerindo que partículas de RCA_T menores que 150 μm podem contribuir de forma efetiva para o empacotamento das partículas. A Figura 21 apresenta a distribuição discreta e acumulada dos tamanhos das partículas.

Figura 21 - Distribuição discreta e acumulada dos tamanhos das partículas do RCA_T.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

A comparação das distribuições granulométricas entre o resíduo de RCA_T moído e o cimento Portland revelou diferenças significativas nas dimensões das partículas de cada material. Primeiramente, ao observar o D₁₀, notou-se que o RCA_T possui um valor de 2,6 μm, enquanto o cimento Portland apresenta um valor de 1,7 μm. Isso indica que 10% das partículas do RCA_T são maiores que 2,6 μm, em contraste com o cimento Portland, em que 10% das partículas são maiores que 1,7 μm. Portanto, o RCA_T possui partículas relativamente maiores nessa faixa.

Em relação ao D₅₀, que representa a mediana do tamanho das partículas, o RCA_T o mostra um valor de 10,7 μm, enquanto o cimento Portland teve um valor de 9,3 μm. Este dado confirma que a mediana das partículas do RCA_T é maior do que a do cimento Portland, indicando uma predominância de partículas de maior tamanho no primeiro material.

No que tange ao D_{90} , que reflete o tamanho abaixo do qual 90% das partículas se encontram, o RCA_T apresentou um valor de 66,6 μm , significativamente maior que o valor de 29,4 μm observado no cimento Portland. Isso sugeriu que o RCA_T possui uma quantidade maior de partículas maiores comparado ao cimento Portland, onde a maioria das partículas é menor.

Essas comparações elucidam as diferenças na distribuição de tamanhos de partículas entre o RCA_T moído e o cimento Portland, destacando como essas variações podem afetar as propriedades físicas e químicas de cada material. A Tabela 7 apresenta os dados comparativos da área superficial específica do CP II-F-40 RS e RCA_T .

Tabela 7 - Propriedades físicas do CP II-F-40 RS40 RS e RCA_T

Propriedades físicas	CP II-F-40 RS	RCA_T
Área Superficial Específica		
(m^2/g)	2,23	10,70
D10	1,7	2,6
D50	9,3	10,7
D90	29,4	66,6

Fonte: (A AUTORA, 2024).

5.3.2 Caracterização química por Fluorescência de raios-X (FRX)

O Quadro 7 apresenta a composição química do RCA_T e do CP II-F-40 RS, na forma de óxidos, expressa em porcentagem de massa, em que pode ser verificado que óxidos de cálcio, silício e alumínio compõem majoritariamente o RCA_T .

Quadro 6 - Composição química do RCA_T e CP-II-F-40 RS na forma de óxidos (% em massa).

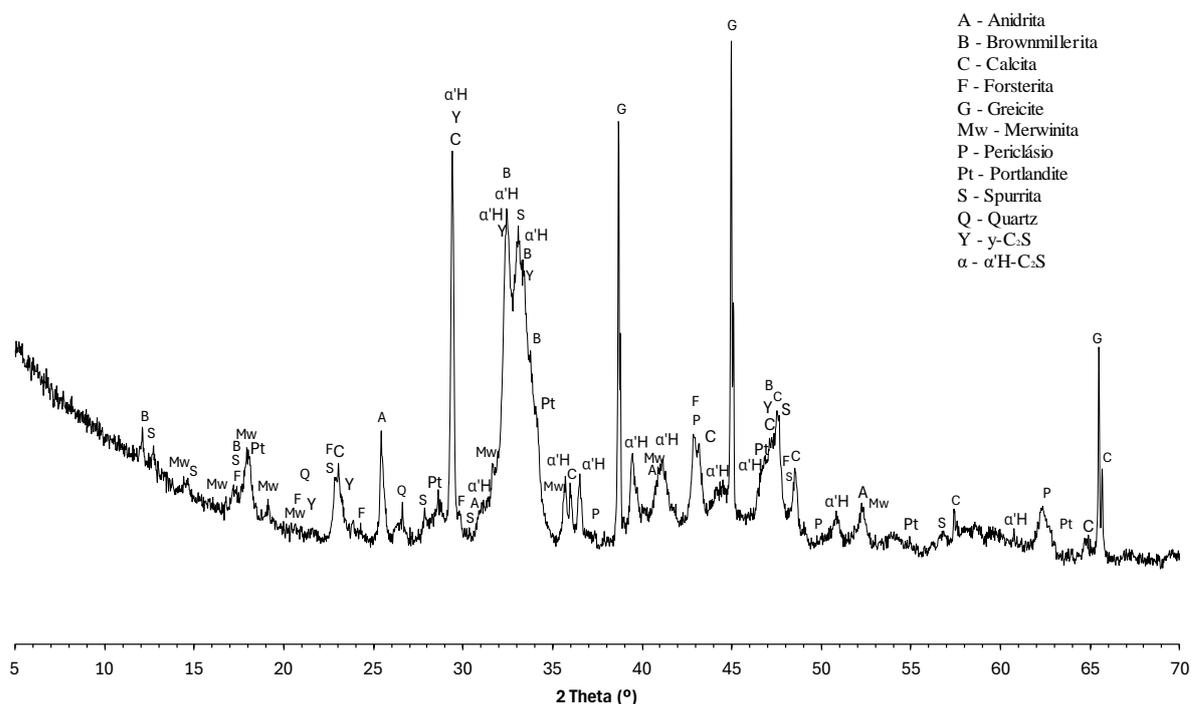
Material	CaO	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Outros	PF*
RCA _T	45,7	23,2	12,5	3,36	3,03	2,25	0,53	0,52	8,91
CP II-F-40 RS	58,7	18,4	3,26	2,98	3,96	3,40	0,75	0,41	8,14

Obs.:*Perda ao fogo à 1000 °C.

Fonte: (A AUTORA, 2024).

5.3.3 Caracterização mineralógica por Difração de raios-X (FRX)

Os padrões de difração de raios-x da amostra do RCA_T são apresentados na Figura 22. Pode ser observada a presença de diversas fases mineralógicas, evidenciando o efeito do tratamento térmico dos RCA na modificação de sua estrutura cristalina. Dentre as fases mineralógicas identificadas, estão presentes picos de difração provenientes de fases minerais como quartzo (SiO₂) (ICSD # 26429), calcita (CaCO₃) (ICDD 96-900-0966), portlandita (CaOH) (ICDD 96-100-1770), belita (2CaO.SiO₂) (ICSD (#81097)), periclásio (MgO) (ICDD 96-900-6792), merwinita [Ca₃Mg(SiO₄)₂] (ICSD #43078), anidrita (CaSO₄) (ICSD #16382), Spurrita [Ca₅(SiO₄)₂(CO₃)] (ICDD 96-900-4962), os polimorfos α'-H-C₂S (ICSD #81097), e γ-C₂S (ICSD #81095) do silicato dicálcico em ângulos de baixa intensidade.

Figura 22 – Representação das fases mineralógicas encontradas no difratograma de raios-X da amostra do RCA_T.

Fonte: (A AUTORA, 2024).

No RCA_T não foram encontrados picos característicos da crisotila. Observou-se a presença da fase Portlandita (hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂). A presença dessa fase após o tratamento térmico a 800°C pode ser explicada por uma reidratação do óxido de cálcio (CaO), que é formado durante a calcinação do cimento. Quando o material é exposto ao ambiente, especialmente durante etapas como o peneiramento, o CaO pode reagir com a umidade do ar, levando à formação de portlandita. Verificou-se nos ângulos característicos a crisotila a presença da fase brownmillerita [Ca₂(Al,Fe³⁺)₂O₅] (ICDD 96-900-3342), também conhecida como tetracálcio aluminoferrita (C₄AF). A difração de raios-X (DRX) é uma técnica altamente eficaz para a identificação de fases cristalinas em materiais. No entanto, para ângulos de baixa intensidade, é necessário complementar essa técnica com análises adicionais, a fim de obter uma caracterização mais completa e precisa das amostras estudadas. Para tanto procedeu-se com análise por FTIR, TG/DTG e MEV para confirmação da eficácia do tratamento térmico no processo de desidroxilação.

Não foram identificados picos de crisotila nos difratogramas da amostra calcinada a 800 °C, indicando a completa desidroxilação das fibras de amianto, em consonância com os achados de Zheng *et al.* (2020). De acordo com Oliveira (1996), esse fenômeno pode ser

atribuído à desidroxilação das fibras e à quebra dos anidritos amorfos. Segundo Dias *et al.* (2008), Witek; Kusiorowski, (2017) a desidroxilação da crisotila ocorre dentro da faixa de temperatura entre 500 e 820 °C.

Indica-se que, durante a decomposição térmica da crisotila, o óxido de magnésio foi possivelmente alterado a partir do silicato de magnésio anidro, e na presença de um meio com alto teor de cálcio, formou a estrutura de novos minerais contendo magnésio, como a merwinita, ausente na fase de caracterização da amostra natural.

Carneiro (2021) identificou em seu estudo, a presença da calcita, dolomita, os polimorfos α' -C₂S (ICSD #81097), β -C₂S (ICSD #81096) e γ -C₂S (ICSD #81095) do silicato dicálcico, periclásio (ICSD #9863), merwinita (ICSD #43078), CaO (ICSD #52783), wollastonita (CaSiO₃), comumente encontradas em resíduos de cimento Portland tratados termicamente.

Viani *et al.* (2013) relatam que o silicato de dicálcico (C₂S) é uma fase cristalina mais provavelmente formada a partir do aquecimento do RCA. Essa transformação pode ser explicada pelo efeito da termodinâmica associada a desproporcionalidade entre os teores de silicatos de cálcio e de magnésio, o que possivelmente resultou em um desequilíbrio no sistema, resultando na formação da fase C₂S.

Foi observado que o α' -C₂S representa a estrutura cristalina predominante nos RCA_T tratados entre 700 e 800 °C, conferindo uma maior área superficial e menor tamanho de partículas (Serpell; Zunino, 2017). Tais características contribuíram para o aumento da reatividade e da solubilidade em água do polimorfo C₂S (Hong; Young, 1999).

Observa-se que a maior reatividade do α' -C₂S em comparação ao β -C₂S, pode contribuir para o aumento do calor de hidratação e da resistência mecânica (Serpell; Zunino, 2017). Segundo Kacimi; Cyr; Clastres (2010), Cuesta *et al.* (2012) e Bouzidi *et al.* (2014), dentre os polimorfos do C₂S, a estrutura α' se constitui na fase mais hidráulica, seguida da fase β . Já o polimorfo γ não apresenta propriedade hidráulica (Ávalos-Rendón *et al.*, 2018).

Kusiorowski *et al.*, (2024) identificaram que os reflexos de difração do resíduo tratado a 1100°C eram formados de fases minerais como quartzo (SiO₂), akermanita [Ca₂Mg(Si₂O₇)], larnita (Ca₂SiO₄), monticelita [Ca(Mg,Fe)SiO₄] e merwinita [Ca₃Mg(SiO₄)₂]. Além disso, os autores identificaram reflexos adicionais provenientes da forsterita (Mg₂SiO₄) e também da magnetita (Fe₃O₄). A maioria deles foi o resultado da síntese em alta temperatura de

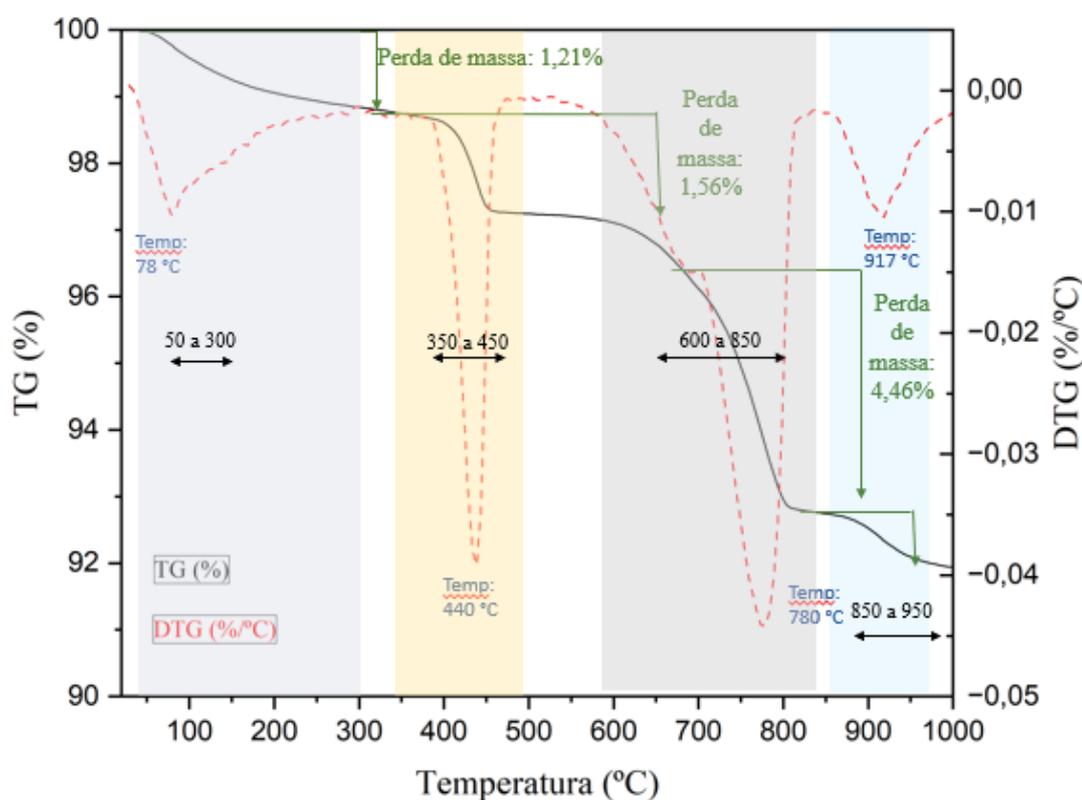
ingredientes da matriz de cimento com compostos de magnésio provenientes do produto da decomposição térmica do amianto crisotila.

Os autores avaliaram que do ponto de vista tecnológico, em todos os padrões de difração obtidos, não foram registrados reflexos característicos dos minerais de amianto. Isto confirma diretamente que, nesta condição térmica, ocorreu a decomposição do amianto.

5.3.4 Caracterização por Análise Térmica (TG/DTG)

A Figura 23 apresenta as curvas TG e DTG do RCA_T. Na faixa de temperatura de 50 a 300 °C foi observado na curva TG, o pico relacionado à perda da água livre e parte da água combinada do C-S-H. Em 440° C observa-se um pico de decomposição térmica da portlandita [Ca(OH)₂], com pequena perda de massa (1,57%) indicando uma leve hidratação do RCA_T ocorrida durante a etapa de estocagem e manuseio do resíduo. Esse resultado está coerente com a análise de DRX em que foi identificada a portlandita.

Figura 23 - Análise termogravimétrica (TG e DTG) do RCA_T.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

Na faixa de 600 a 850 °C ocorre a decomposição dos carbonatos, principalmente carbonatos de cálcio (CaCO_3), calcita identificada na amostra por meio da DRX.

Na faixa de temperatura de 850 a 950 °C há um pico característico da decomposição da espurrita [$\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2\text{CO}_3$]. Glasser (1973) relata que a faixa de decomposição da espurrita é entre (790 ± 5) °C e (912 ± 5) °C. Este resultado está coerente com a análise de DRX, que identificou fases desse mineral na amostra de resíduo tratado.

Os autores Jeong; Moon; Roh, (2016) avaliaram o processo de decomposição térmica da crisotila e a temperatura de reação, além das mudanças subsequentes na estrutura cristalina e na morfologia. A crisotila fibrosa [$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$] passa por uma desidratação, em que os grupos hidroxila são removidos. Esta primeira fase de desidratação, conforme os resultados da análise TG-DTA, ocorre a 634,2°C, exibindo uma reação endotérmica com uma perda de peso de 9,4%. A desidratação ocorre entre aproximadamente 600 e 650°C, iniciando mudanças na estrutura cristalina devido à remoção dos grupos hidroxila (OH) das camadas de MgOH na estrutura octaédrica.

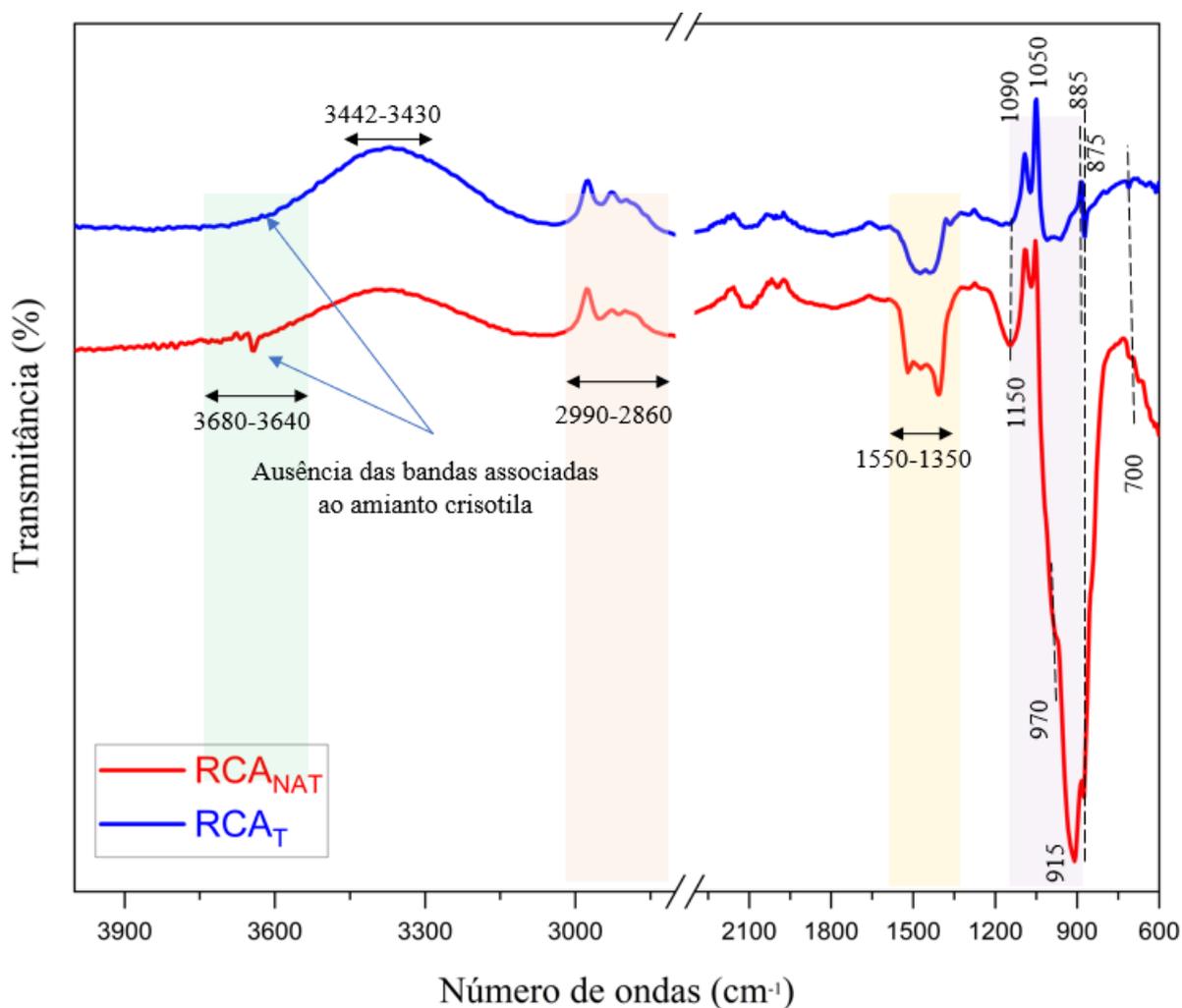
Após a remoção dos grupos hidroxila, conforme indicado pelos resultados das análises de DRX e TG, a estrutura fibrosa e a estrutura tubular oca começam a colapsar entre 600 e 700°C. Estudos de Ball e Taylor (1963) confirmam que a crisotila se transforma em um mineral anidro amorfo (anidrita da crisotila), sugerindo que este estágio prepara o material para a transição de fase com o aumento da temperatura. De acordo com Spasiano; Pirozzi (2017) nessa etapa de decomposição é formado um anidrido amorfo conhecido como metacrisotila (Mg_3SiO_7).

Na segunda fase de desidratação, a análise das mudanças na estrutura cristalina indica que a crisotila amorfa, ao atingir cerca de 800°C, forma pequenas quantidades de forsterita com morfologia de prismas colunados e extremidades lisas. A transição de fase da crisotila culmina em uma reação exotérmica a 822,4°C, resultando na formação completa de forsterita através de recristalização. Este achado é consistente com os estudos de Brindley e Hayami (1965), que observaram que a crisotila desidratada se transforma em forsterita amorfa antes da cristalização progressiva.

5.3.5 Caracterização por Análise FTIR

A Figura 24 apresenta os espectros de FTIR do RCA e RCA_T que valida a eliminação da crisotila com o tratamento térmico através da ausência das bandas em 3680-3640 cm⁻¹. Isso evidencia a desidroxilação completa da crisotila, não sendo possível identificar as bandas típicas de estiramento interno e externo das hidroxilas (O-H⁻) nas ligações Mg-OH da crisotila (Iwaszko *et al.*, 2018; Kusiorowski *et al.*, 2015; Maciejewska, 2012). Nota-se ainda que as bandas em 3442-3430 cm⁻¹ são atribuídas às vibrações de estiramento simétrico (ν₁) e assimétrico (ν₃) da ligação O-H presentes nas moléculas de H₂O (Borges *et al.*, 2023).

Figura 24 - Espectros FTIR comparativos do resíduo de cimento-amiante antes (RCA) e após tratamento térmico (RCA_T).



Fonte: (A AUTORA, 2024).

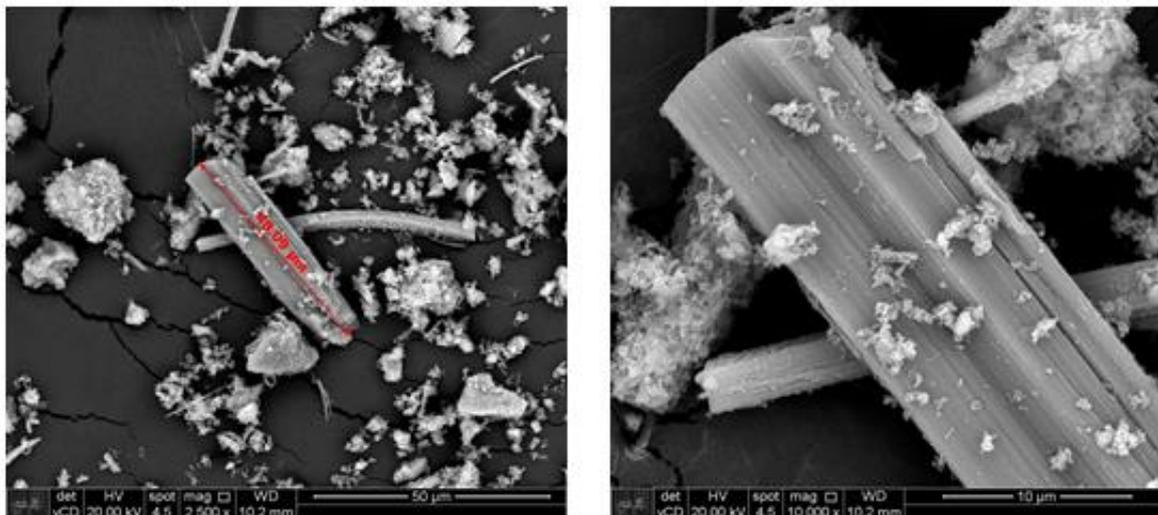
Observa-se na Figura 24 que as bandas em $2983\text{-}2875\text{ cm}^{-1}$, $1550\text{-}1350\text{ cm}^{-1}$ e em 875 cm^{-1} (Fletcher; Hall; Hughes, 1995; Ylmén *et al.*, 2009), correspondem ao ν_3 e as vibrações de deformação no plano (ν_2) do (CO_3^{2-}) (Colangelo *et al.*, 2011), indicando a presença de carbonatos (CaCO_3) nos resíduos de cimento-amianto (RCA). De acordo com Colangelo *et al.* (2011) as bandas centradas em 1150 e 700 cm^{-1} são dadas as vibrações ν_3 e a deformação fora do plano (ν_4) dos sulfatos (SO_4^{2-}). Nota-se também que os picos em $1100\text{-}900\text{ cm}^{-1}$ são devidos as vibrações de estiramento Si-O-Si na rede de sílica (Kusiorowski *et al.*, 2015). Para Iwaszko (2019), as bandas centradas em 1016 cm^{-1} e 966 cm^{-1} são características da crisotila. Ramachandran e Beaudoin (2002) descrevem que a banda localizada em 970 cm^{-1} corresponde ao C-S-H dada ao modo ν_3 (Si-O).

No espectro do RCA_T verifica-se a presença da banda em 885 cm^{-1} característica da forsterita (Mg_2SiO_4) a partir das vibrações de estiramento do SiO_4 (Jolicoeur; Duchesne, 1981). Iwaszko (2019) relata que este silicato de magnésio anidro é cristalizado a partir da completa desidroxilação da crisotila em temperatura superior a $700\text{ }^\circ\text{C}$.

5.3.1 Caracterização microestrutural por Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)

Após tratamento térmico a 800°C e 900°C , verificou-se que a superfície da crisotila torna-se lisa, e suas extremidades adquirem uma forma prismática e arredondada, indicando uma transição de fase para forsterita, conforme observado em estudos anteriores (Jeong; Moon; Roh, 2016). A micrografia do RCA_T é verificada na Figura 25.

Figura 25 - Micrografia eletrônica de varredura (MEV) do resíduo de cimento-amianto tratado (RCA_T), mostrando a morfologia das partículas após o tratamento térmico.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

Portanto, o tratamento térmico apropriado da crisotila promoveu sua transição de uma forma fibrosa para os minerais não perigosos como a forsterita (Takata *et al.*, 2024) indicando que este processo pode ser utilizado como uma metodologia de desintoxicação da crisotila).

Segundo Kusiorowski *et al.*, (2024) após a decomposição térmica dos minerais de amianto, as novas fases minerais formadas preservam a forma fibrosa externa original, embora tenha ocorrido uma modificação completa da estrutura em escala molecular. Devido a esse fenômeno, denominado pseudomorfose, a fibra de amianto original perde irreversivelmente sua resistência. Elas ficam mais frágeis e podem ser fraturadas perpendicularmente ao eixo da fibra, sendo facilmente fragmentadas em grãos esféricos de novos minerais silicatos (Giacobbe, 2010; Bloise, 2019).

Segundo Jeong; Moon; Roh (2016) estes minerais esféricos são formados devido à recristalização progressiva e ao crescimento tridimensional da forsterita.

Takata *et al.*, 2024 avaliaram a carcinogenicidade da forsterita, um produto do aquecimento da crisotila, especialmente em relação ao mesotelioma. Ratos receberam injeções de crisotila, forsterita (FO-1000) ou enstatita (EN-1500), e o desenvolvimento de mesotelioma peritoneal foi observado por 24 meses. O mesotelioma peritoneal ocorreu em 91,2% dos ratos expostos à crisotila, mas não se desenvolveu nos grupos FO-1000 e EN-1500. Marcadores de dano celular aumentaram significativamente no grupo da crisotila, mas não nos grupos FO-1000 e EN-1500. Além disso, houve uma deleção significativa do gene CDKN2A/p16 no grupo

da crisotila, mas não nos outros grupos. O estudo concluiu que a forsterita não é carcinogênica e sugere que forsterita e enstatita são adequadas para a desintoxicação da crisotila.

5.4 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

No estudo experimental foram determinadas as propriedades da argamassa no estado fresco, tais como, o índice de consistência (IC), a retenção de água (RA), a densidade de massa (Dens. Fresco), o teor de ar incorporado (AI). Foram determinadas, também, as seguintes propriedades mecânicas no estado endurecido: resistência à compressão (RC) resistência à tração (RT), a densidade no estado endurecido (Dens. Endurecido) e módulo de elasticidade (MOE).

A variação ampla das frações mássicas dos ingredientes permitiu obtermos ampla variação das propriedades no estudo experimental. Como exemplo, AI variou de 6,3% a 40,00%, enquanto IC variou de 180 mm a 306 mm. Já a RC variou de 0,87 MPa à 16,8 MPa, enquanto a RT variou de 0,42 MPa a 4,42 MPa.

Os resultados referentes aos ensaios realizados nas argamassas no estado fresco estão apresentados abaixo e correspondem à consistência conferida a cada mistura, a massa específica, o teor de ar incorporado e a retenção de água. O Quadro 8 apresenta as propriedades das formulações de base no estado fresco, enquanto o Quadro 9 apresenta as propriedades no estado endurecido.

Quadro 7 - Formulações experimentais de argamassas com diferentes frações mássicas de $X_{CP II}$, X_{RCAT} , X_{AREIA} , plastificante (X_{PCX}), incorporador de ar (X_{IA}), retentor de água (X_{M-HEC}) e X_{AGUA} , juntamente com as propriedades no estado fresco.

Formulação	Fração mássica							Propriedades no estado fresco				Análise de Custo	Estimativa do teor de clínquer
	$X_{CP II}$	X_{RCAT}	X_{AREIA}	X_{PCX}	X_{IA}	X_{M-HEC}	X_{AGUA}	IC	Retenção de água (%)	Densidade no estado Fresco (g/cm ³)	AI (%)	(R\$/m ³)	(Kg/m ³)
1	0,1076	0,0401	0,7026	0,0003	0,0002	0,0002	0,149	244	86,9	1,32	38,7	177,53	114,90
2	0,1076	0,0401	0,7026	0,0003	0,0002	0,0002	0,149	247	88,1	1,34	37,9	179,92	116,44
3	0,0765	0,0000	0,7700	0,0001	0,0000	0,0004	0,153	253	95,9	1,63	23,3	191,57	100,88
4	0,1099	0,0950	0,6500	0,0001	0,0000	0,0000	0,145	190	91,5	2,04	6,3	232,57	181,60
5	0,1008	0,0950	0,6500	0,0004	0,0004	0,0004	0,153	198	92,8	1,29	40,0	187,41	105,14
6	0,1076	0,0401	0,7026	0,0003	0,0002	0,0002	0,149	244	86,4	1,33	38,1	179,47	116,16
7	0,1800	0,0000	0,6741	0,0001	0,0004	0,0004	0,145	248	91,1	1,33	39,0	236,81	193,26
8	0,1012	0,0950	0,6500	0,0004	0,0004	0,0000	0,153	229	87,1	1,29	39,8	171,03	105,94
9	0,0500	0,0950	0,7015	0,0001	0,0000	0,0004	0,153	200	96,0	1,75	17,9	172,35	71,02
10	0,1800	0,0165	0,6500	0,0001	0,0004	0,0000	0,153	261	75,5	1,35	37,6	220,40	196,16
11	0,1076	0,0401	0,7026	0,0003	0,0002	0,0002	0,149	257	88,5	1,38	35,8	185,94	120,34
12	0,0500	0,0342	0,7700	0,0004	0,0004	0,0000	0,145	278	75,6	1,43	33,5	160,27	57,78
13	0,0765	0,0000	0,7700	0,0001	0,0004	0,0000	0,153	299	62,3	1,46	31,4	168,00	90,29
14	0,1800	0,0246	0,6500	0,0004	0,0000	0,0000	0,145	277	86,1	2,01	7,9	330,41	293,00
15	0,1076	0,0401	0,7026	0,0003	0,0002	0,0002	0,149	247	87,5	1,35	37,2	181,92	117,74
16	0,1800	0,0000	0,6662	0,0004	0,0000	0,0004	0,153	270	95,6	1,75	18,6	313,85	255,38
17	0,0500	0,0950	0,7095	0,0001	0,0000	0,0004	0,145	180	96,6	1,83	15,4	180,17	73,99
18	0,0500	0,0338	0,7700	0,0004	0,0004	0,0004	0,145	248	95,8	1,33	38,0	167,17	53,85
19	0,0766	0,0000	0,7700	0,0004	0,0000	0,0000	0,153	306	76,2	1,68	21,0	194,97	104,12

Fonte (A AUTORA, 2024).

Quadro 8 - Formulações experimentais de argamassas com diferentes frações mássicas de X_{CPII} , X_{RCAT} , X_{AREIA} , plastificante (X_{PCX}), incorporador de ar (X_{IA}), retentor de água (X_{M-HEC}) e X_{AGUA} , juntamente com as propriedades no estado endurecido.

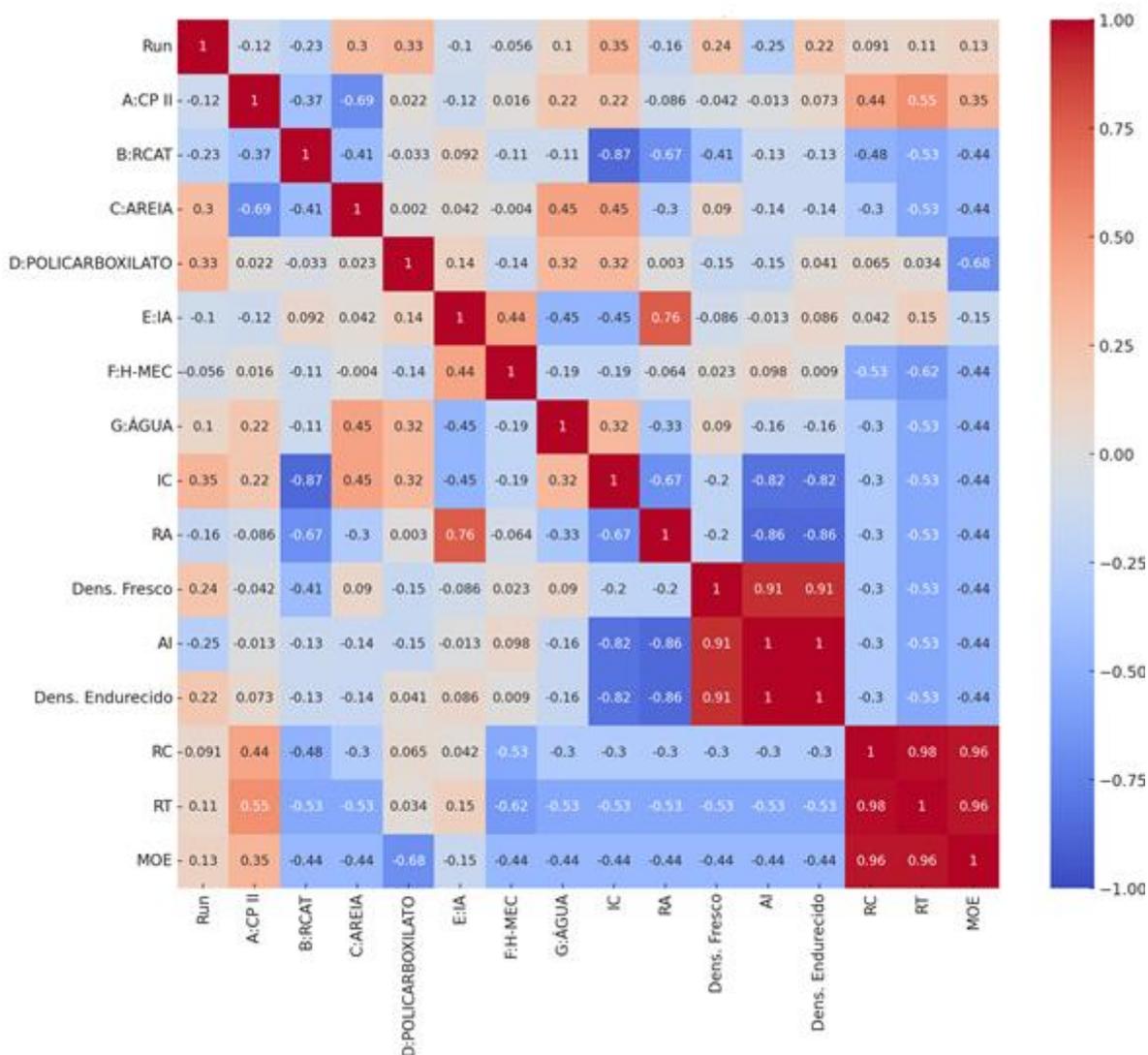
Formulação	Fração mássica							Propriedades no estado endurecido			
	X_{CPII}	X_{RCAT}	X_{AREIA}	X_{PCX}	X_{IA}	X_{M-HEC}	X_{AGUA}	Densidade no estado endurecido (g/cm ³)	Módulo de elasticidade médio (GPa)	Resistência à compressão média (MPa)	Resistência à tração média (MPa)
1	0,1076	0,0401	0,7026	0,0003	0,0002	0,0002	0,149	1,21	2,49	1,40	0,73
2	0,1076	0,0401	0,7026	0,0003	0,0002	0,0002	0,149	1,21	2,89	1,48	0,92
3	0,0765	0,0000	0,7700	0,0001	0,0000	0,0004	0,153	1,53	4,00	1,96	0,92
4	0,1099	0,0950	0,6500	0,0001	0,0000	0,0000	0,145	1,88	15,5	14,48	3,55
5	0,1008	0,0950	0,6500	0,0004	0,0004	0,0004	0,153	1,19	2,41	1,32	0,66
6	0,1076	0,0401	0,7026	0,0003	0,0002	0,0002	0,149	1,22	2,68	1,62	0,79
7	0,1800	0,0000	0,6741	0,0001	0,0004	0,0004	0,145	1,22	3,67	2,24	1,27
8	0,1012	0,0950	0,6500	0,0004	0,0004	0,0000	0,153	1,22	2,78	1,63	0,83
9	0,0500	0,0950	0,7015	0,0001	0,0000	0,0004	0,153	1,63	6,88	3,62	1,40
10	0,1800	0,0165	0,6500	0,0001	0,0004	0,0000	0,153	1,25	3,51	2,31	1,07
11	0,1076	0,0401	0,7026	0,0003	0,0002	0,0002	0,149	1,23	2,90	1,58	0,89
12	0,0500	0,0342	0,7700	0,0004	0,0004	0,0000	0,145	1,29	2,21	0,88	0,43
13	0,0765	0,0000	0,7700	0,0001	0,0004	0,0000	0,153	1,32	2,24	1,03	0,43
14	0,1800	0,0246	0,6500	0,0004	0,0000	0,0000	0,145	1,87	16,2	16,82	4,43
15	0,1076	0,0401	0,7026	0,0003	0,0002	0,0002	0,149	1,22	2,65	1,42	0,82
16	0,1800	0,0000	0,6662	0,0004	0,0000	0,0004	0,153	1,63	10,5	8,98	3,41
17	0,0500	0,0950	0,7095	0,0001	0,0000	0,0004	0,145	1,71	7,8	4,33	1,39
18	0,0500	0,0338	0,7700	0,0004	0,0004	0,0004	0,145	1,19	1,95	0,90	0,46
19	0,0766	0,0000	0,7700	0,0004	0,0000	0,0000	0,153	1,57	5,18	2,43	1,00

Fonte (A AUTORA, 2024).

5.4.1 Correlações lineares destacáveis

O Quadro 10 apresenta as correlações lineares entre os principais parâmetros de dosagem e as propriedades das formulações de base.

Como esperado foram constatadas fortes correlações positivas entre o teor de ar incorporado e a fração mássica do aditivo IA; entre a retenção de água e a fração mássica do aditivo M-HEC. São observadas fortes correlações negativas entre o índice de consistência com a fração mássica do RCA_T; entre a densidade da argamassa no estado fresco com a fração mássica do aditivo IA; entre a densidade da argamassa no estado endurecido com a fração mássica do aditivo IA. O mesmo foi obtido entre RT, MOE e a fração mássica do aditivo IA indicando que o aumento da fração mássica do aditivo promove a diminuição da RT e do MOE.

Quadro 9 - Correlações lineares r entre os parâmetros de dosagem e as propriedades das argamassas.

Obs.: As fortes correlações lineares ($|r| \geq 0,9$) e as correlações lineares moderadas ($0,8 \leq |r| < 0,9$).

Fonte: (A AUTORA, 2024).

A correlação linear mais relevante ($-0,866$) associada a adição do RCA_T nas argamassas foi entre o IC e a fração mássica de RCA_T , indicando que o aumento da fração mássica de RCA_T implica em redução no IC, o que pode ser atribuído a elevada área superficial específica do RCA_T . Vale ressaltar que a inexistência de fortes correlações lineares entre as propriedades das argamassas e a fração mássica de RCA_T , não implicam em ausência de influência desse material nestas propriedades, mas somente que a maioria das propriedades não varia de forma linear com a variação da fração mássica do RCA_T .

Bauer *et al.* (2015) afirmam que o comportamento e as propriedades das argamassas de revestimento no estado fresco são diretamente influenciados pela quantidade de água e pela granulometria e formato das partículas empregadas na mistura. Miyake e Matsushita (2007) declaram que a consistência é controlada principalmente pelo filme aquoso formado em torno dos materiais sólidos da argamassa, como o cimento e os agregados miúdos.

Uma maior área superficial específica geralmente aumenta a demanda de água, resultando em uma argamassa mais fluida se a quantidade de água for ajustada corretamente. Partículas mais finas e com maior área superficial podem melhorar a coesão da mistura, reduzindo a segregação e aumentando a homogeneidade.

O resultado da forte correlação negativa (-0,866) do IC com relação ao RCA_T . Este coeficiente revelou uma associação linear forte e inversa, onde o aumento em uma variável está intimamente associado à diminuição na outra variável de maneira quase proporcional.

Esse resultado sugere que à medida que aumenta a quantidade de RCA_T , o índice de consistência diminui significativamente, indicando que a argamassa se torna menos fluida. A influência da massa específica e da área superficial específica no índice de consistência pode interferir diretamente no comportamento da argamassa no estado fresco.

A Figura 26 representa o espalhamento das formulações propostas pelo projeto experimental. Verifica-se que as misturas com adição da fração máxima de RCA_T nas argamassas apresentaram um índice de consistência médio menor, a saber, 4 (179 mm), 5 (198mm), 8 (229 mm), 9 (200 mm) e 17 (180mm), em comparação com as demais argamassas, a exemplo, as misturas 3 (253 mm), 7 (248 mm), 13 (299 mm), 16 (270 mm), 19 (305 mm), que não tinham na sua composição adição do RCA_T . Salienta-se que esse comportamento também depende da influência dos demais ingredientes.

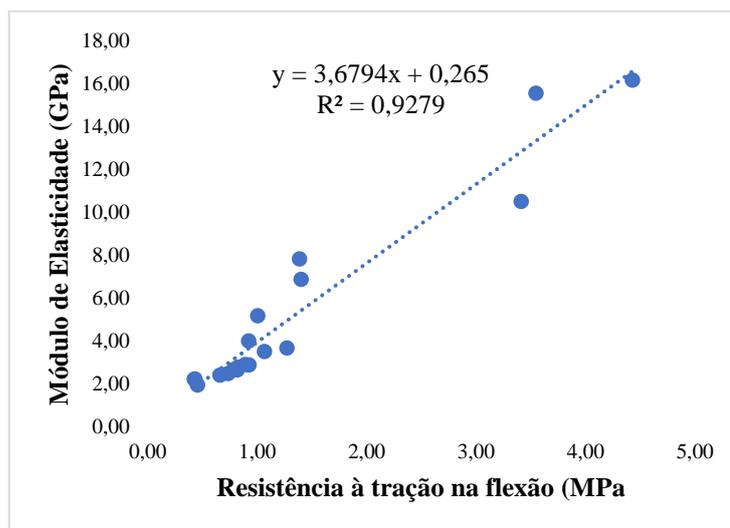
Figura 26 - Representação do espalhamento das argamassas do projeto de mistura.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

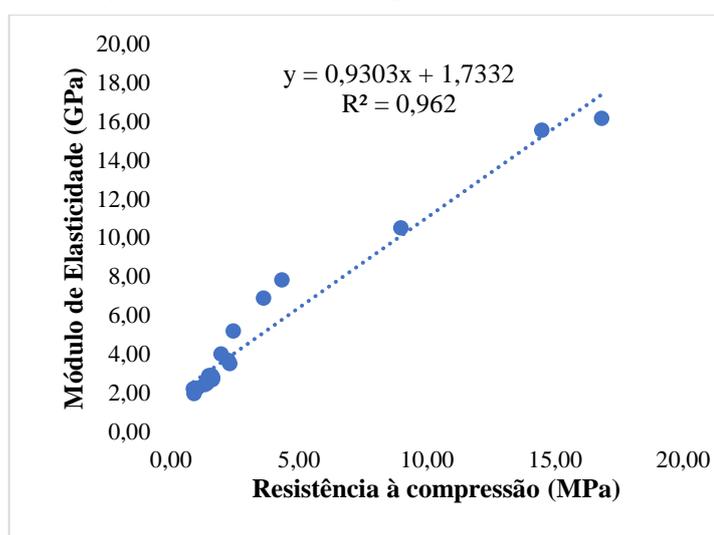
A análise estatística identificou a tendência de forte correlação positiva entre determinadas propriedades no estado endurecido. Os valores de módulo de elasticidade são diretamente proporcionais aos resultados de resistência à compressão e resistência à tração na flexão, como apresentado nas Figura 27 e Figura 28.

Figura 27 – Correlação entre resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

Figura 28 – Correlação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

A resistência à compressão da argamassa está fortemente correlacionada com o módulo de elasticidade devido à inter-relação entre essas propriedades mecânicas. O aumento da resistência à compressão influi diretamente na rigidez da argamassa, refletindo-se em um módulo de elasticidade mais alto. A resistência à compressão mede a capacidade da argamassa de suportar cargas de compressão sem falhar, enquanto o módulo de elasticidade quantifica a rigidez do material (Silva, 2011).

Revestimentos devem ser capazes de absorver contrações e expansões sem fissurar, o que está associado ao módulo de elasticidade. Argamassas com menor módulo de elasticidade apresentam maior capacidade de deformação (Silva, 2011). Ambos os parâmetros são influenciados pela microestrutura da argamassa, como porosidade, qualidade da matriz cimentícia e distribuição dos agregados. Uma argamassa com alta resistência à compressão geralmente possui uma matriz cimentícia densa e bem consolidada, resultando em menor porosidade e maior módulo de elasticidade (Neville, 2013; Mehta; Monteiro, 2014; Martins, 2008; Araújo; Guimarães; Geyer, 2012).

Além disso, a resistência à compressão e a resistência à tração da argamassa estão correlacionadas devido à maneira como a microestrutura afeta ambas as propriedades. Uma argamassa com alta resistência à compressão geralmente possui uma matriz cimentícia densa e bem consolidada, contribuindo para uma maior resistência à tração (Neville, 2013; Mehta; Monteiro, 2014; Martins, 2008; Araújo; Guimarães; Geyer, 2012).

Observam-se moderadas correlações lineares entre as propriedades Dens. fresco (-0,812), Dens. endurecido (-0,816), AI (0,819), RT (-0,604), RC (-0,578) MOE (-0,681), e a fração mássica do aditivo incorporador de ar (X_{IA}).

A incorporação de ar reduz a densidade da argamassa no estado fresco. Isso ocorre porque as bolhas de ar substituem parte do volume que seria ocupado por sólidos e água, resultando em uma mistura menos densa. A matriz de correlação indica uma correlação moderada negativa entre o aditivo incorporador de ar (IA) e a densidade no estado fresco (-0.812), confirmando que a presença de mais bolhas de ar diminui significativamente a densidade da argamassa fresca.

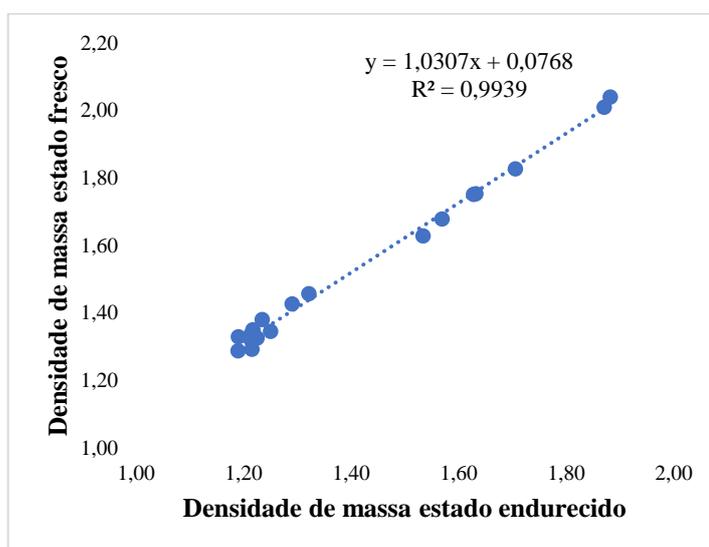
Similarmente, a densidade no estado endurecido também é afetada pela incorporação de ar. A correlação entre IA e a densidade no estado endurecido é de -0,816, sugerindo que a argamassa endurecida se torna menos densa com o aumento do conteúdo de ar. A redução na densidade

A presença de microbolhas de ar tem o efeito de aumentar o volume total de ar na mistura, o que pode ser quantificado pelo teor de ar incorporado. A matriz de correlação apresentada mostra uma forte correlação positiva entre o uso do aditivo incorporador de ar (IA) e o teor de ar incorporado (AI), com um coeficiente de correlação de 0,819. Este resultado confirma que a adição de um incorporador de ar resultou em um aumento significativo do teor de ar na argamassa. As bolhas de ar introduzidas ajudam a melhorar a trabalhabilidade e a coesão da argamassa fresca.

Segundo Alves (2002) as argamassas que possuem deficiência na fração fina (cimento + finos do agregado) exibem uma tendência de exsudar, segregar e ficarem ásperas. A presença do ar incorporado proporciona um ganho de plasticidade e um aumento na estruturação do sistema, propriedades necessárias para que as argamassas de revestimento se tornem aplicáveis em superfícies verticais e horizontais.

A Figura 29 apresentou a correlação entre a densidade de massa no estado fresco e a densidade de massa no estado endurecido da argamassa.

Figura 29 - Correlação entre densidade no estado fresco e densidade no estado endurecido.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

O gráfico sugere que a densidade de massa no estado fresco (y) aumenta linearmente com a densidade de massa no estado endurecido (x). A densidade no estado fresco pode ser um indicador confiável da densidade no estado endurecido, permitindo previsões precisas e ajustamentos na formulação de argamassas para atender às especificações desejadas.

Destaca-se a correlação linear positiva média entre RA e X_{H-MEC} . Os aditivos retentores de água, como o H-MEC (Metil Hidroxietil Celulose), aumentam a viscosidade da mistura, criando uma rede de retenção que impede a migração rápida da água. A análise estatística dos dados fornecidos revelou uma correlação significativa entre o uso do aditivo retentor de água (H-MEC) e a retenção de água (RA). Com um coeficiente de correlação de 0.764, houve uma indicação clara de que o aumento na quantidade de H-MEC melhorou substancialmente a capacidade da argamassa de reter água.

Segundo Paiva *et al.*, (2006) o emprego de aditivos retentores de água é uma das soluções utilizadas pela indústria de argamassa pré-fabricada para aumentar a capacidade de retenção de água das argamassas de revestimento e de assentamento. Também conhecidos como aditivos promotores de viscosidade, os aditivos retentores de água são em sua maioria à base de éter de celulose, sendo os mais comumente empregados na confecção de argamassas o hidroxipropil-metilcelulose (HPMC) e o hidroxietil-metilcelulose (H-MEC) (Paiva *et al.*, 2006).

5.4.2 Modelos de previsão das respostas experimentais

A análise de variância apontou que os modelos apresentados nesta seção são estatisticamente significantes ($\alpha = 0,05$) com falta de ajuste não significativa (ver Apêndice A).

A Equação 24 relaciona o teor de ar incorporado (AI) com as frações mássicas do X_{CPII} , X_{RCAT} , X_{AREIA} . O modelo linear foi significativo e apresenta R^2 ajustado (R^2_{adj}) igual a 0,9914 e R^2 de previsão (R^2_{pred}) igual a 0,9365.

A Equação 25 relaciona a densidade no estado endurecido (DEE) com as frações mássicas do X_{CPII} , X_{RCAT} , X_{AREIA} . Este modelo apresenta R^2 ajustado (R^2_{adj}) igual a 0,99 e R^2 de previsão (R^2_{pred}) igual a 0,98.

A Equação 26 relaciona a densidade da argamassa no estado fresco (DEF) com as frações mássicas do X_{CPII} , X_{RCAT} , X_{AREIA} . O modelo obtido apresenta R^2 ajustado (R^2_{adj}) igual a 0,99 e R^2 de previsão (R^2_{pred}) igual a 0,95.

A Equação 27 relaciona a resistência à compressão (Rc) com as frações mássicas do X_{CPII} , X_{RCAT} , X_{AREIA} . Este modelo apresenta R^2 ajustado (R^2_{adj}) igual a 0,99 e R^2 de previsão (R^2_{pred}) igual a 0,99.

$$\begin{aligned}
AI = & 6081,20167X_{CPII} - 2303,68686X_{RCAT} + 906,51482X_{AREIA} \\
& + 3034,00067X_{PCX} + 4,83123^5X_{IA} + 28226,97975X_{M-HEC} \\
& + 14733,31001X_{AGUA} + 5797,10390X_{CPII}X_{AREIA} \\
& - 3,16406^5X_{CPII}X_{M-HEC} - 1,62191^5X_{AREIA}X_{IA} \\
& - 23833,99138X_{AREIA}X_{AGUA} - 2,17185^6X_{IA}X_{AGUA}
\end{aligned}$$

Equação 24

$$\begin{aligned}
DEF = & +134,22258X_{CPII} + 52,97243X_{RCAT} - 17,34066X_{AREIA} \\
& - 59,69046X_{PCX} - 10615,99502X_{IA} - 602,67709X_{M-HEC} \\
& - 321,06972X_{AGUA} - 124,62275X_{CPII}X_{AREIA} \\
& + 6774,88719X_{AREIA}X_{IA} + 519,77575X_{AREIA}X_{AGUA} \\
& + 47712,81386X_{IA}X_{AGUA}
\end{aligned}$$

Equação 25

$$\begin{aligned}
DEE = & +136,96093X_{CPII} + 52,66474X_{RCAT} - 18,70776X_{AREIA} \\
& - 42,40174X_{PCX} - 9055,62374X_{IA} + 1886,11107X_{M-HEC} \\
& - 322,07515X_{AGUA} - 129,31812X_{CPII}X_{AREIA} \\
& + 7051,28588X_{CPII}X_{M-HEC} + 2399,52141X_{AREIA}X_{IA} \\
& + 529,76235X_{AREIA}X_{AGUA} + 42921,94624X_{IA}X_{AGUA} \\
& - 16778,00640X_{M-HEC}X_{AGUA}
\end{aligned}$$

Equação 26

$$\begin{aligned}
RC = & +2448,29105X_{CPII} + 1292,46189X_{RCAT} - 493,74913X_{AREIA} - 1,45^6X_{PCX} \\
& + 54165,84827X_{IA} + 933,53491X_{M-HEC} \\
& - 7556,1948314571X_{AGUA} - 1644,86985X_{CPII}X_{AREIA} \\
& - 2,54655^6X_{CPII}X_{IA} + 68359,01964X_{AREIA}X_{PCX} \\
& + 12284,04499X_{AREIA}X_{AGUA} \\
& + 6,26545^6X_{PCX}X_{AGUA} - 2,34566^6X_{IA}X_{AGUA}
\end{aligned}$$

Equação 27

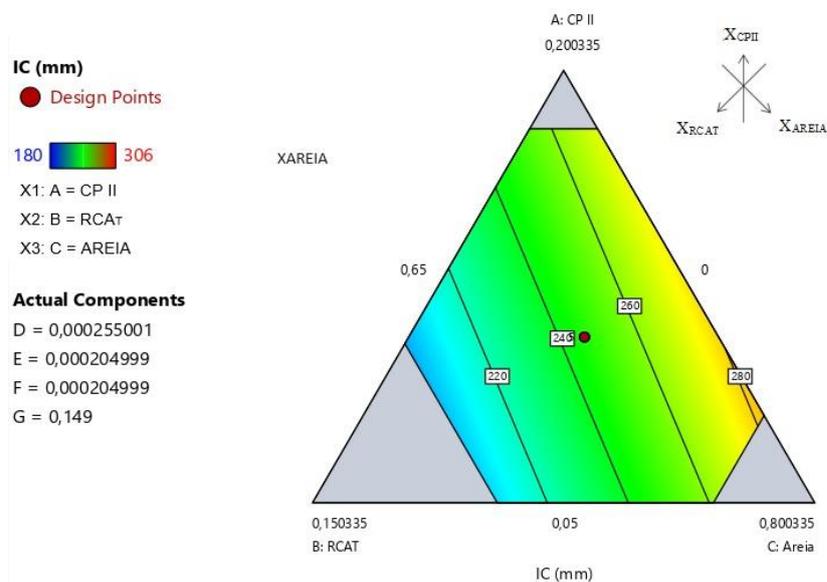
O índice de consistência (IC) das argamassas e as frações mássicas do X_{CPII} , X_{RCAT} , X_{AREIA} são relacionados por meio da (Equação 28), em que o modelo obtido apresenta R^2 ajustado (R^2_{adj}) igual a 0,95 e R^2 de previsão (R^2_{pred}) igual a 0,91. A análise de variância

(ANOVA) apontou que este modelo selecionado, assim como os demais modelos apresentados nesta seção, é estatisticamente significativo ($\alpha = 0,05$) com falta de ajuste não significativa.

$$\begin{aligned}
 IC = & +36,04138X_{CPII} - 675,94068X_{RCAT} + 149,57532X_{AREIA} \\
 & + 61236,43319X_{PCX} + 4308,54672X_{IA} - 65372,96957X_{MHEC} \\
 & + 1083,63612X_{AGUA}
 \end{aligned}
 \tag{Equação 28}$$

Na Figura 30 pode ser observado as superfícies de resposta para o IC das argamassas. Segundo Silva (2019) tanto massa específica quanto a área superficial específica dos materiais constituintes influenciam o índice de consistência da argamassa. A adição de um resíduo com uma área superficial específica de $10,70 \text{ m}^2/\text{g}$ em substituição ao cimento Portland, que possui uma área superficial específica de $2,23 \text{ m}^2/\text{g}$, afetam a demanda de água, a fluidez, a coesão e a reatividade da mistura.

Figura 30 - Diagramas ternários para o IC das misturas. Observar nos diagramas a indicação dos sentidos de crescimento das frações dos ingredientes.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

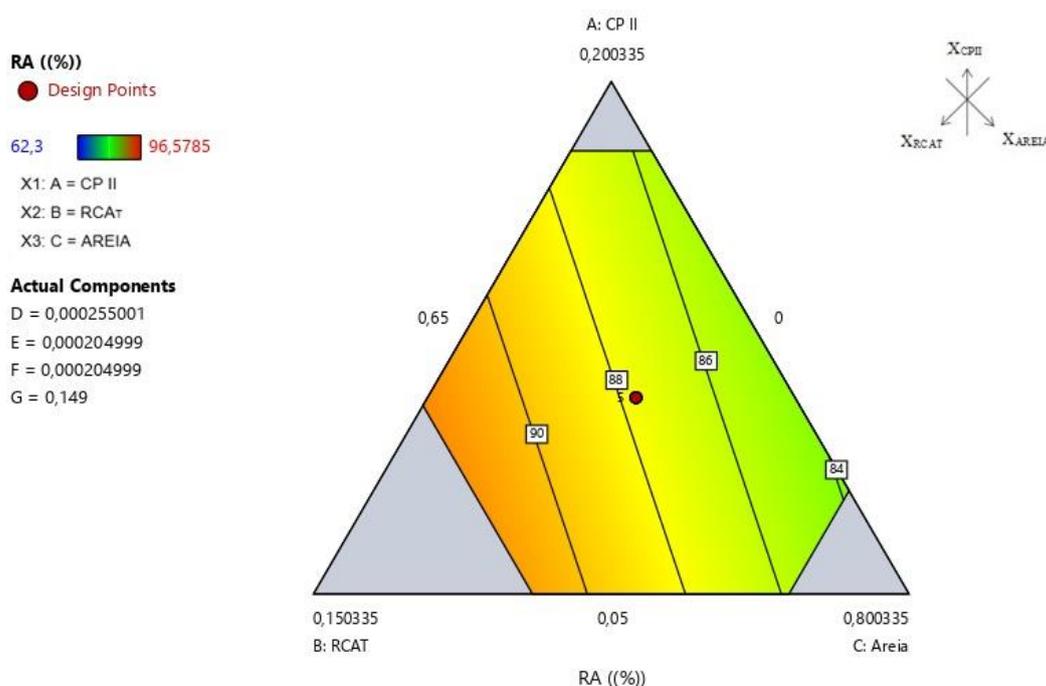
A Equação 29 relaciona a retenção de água (RA) com as frações mássicas do X_{CPII} , X_{RCAT} , X_{AREIA} . Para essa propriedade, a falta de ajuste para o modelo linear foi significativa, optando-se, então, por um modelo quadrático modificado (RA^2) que apresenta R^2 ajustado (R^2_{adj}) igual a 0,99 e R^2 de previsão (R^2_{pred}) igual a 0,98.

$$\begin{aligned}
 (RA)^2 = & +21981,46137X_{CPH} + 35608,75804X_{RCAT} + 6701,072124X_{AREIA} \\
 & + 4198458,57X_{PCX} - 2775128,62X_{IA} - 14946268,8X_{MHEC} \\
 & - 13457,22879X_{AGUA} - 21927118,29X_{CPH}X_{PCX} \\
 & - 38480756,92X_{RCAT}X_{MHEC} + 32414233,04X_{AREIA}X_{MHEC}
 \end{aligned}$$

Equação 29

Na Figura 31, são apresentadas as superfícies de resposta RA das argamassas de revestimento ecoeficiente. Observa-se uma correlação linear positiva entre a propriedade RA e a fração mássica de X_{RCAT} . A análise estatística confirmou que estas frações mássicas são significativas para os valores de RA, indicando que o incremento na fração mássica de RCA_T resulta em um aumento nos valores de RA.

Figura 31 - Diagramas ternários para a RA das misturas. Observar nos diagramas a indicação dos sentidos de crescimento das frações dos ingredientes.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

A Equação 30 relaciona a resistência à tração (R_t) com as frações mássicas do X_{CPH} , X_{RCAT} , X_{AREIA} . Este modelo apresenta R^2 ajustado (R^2_{adj}) igual a 0,99 e R^2 de previsão (R^2_{pred}) igual a 0,99.

$$\begin{aligned}
Rt = & +172,17952X_{CPII} + 171,15994X_{RCAT} + 2,47560X_{AREIA} \\
& + 1255,48870X_{PCX} - 44003,67696X_{IA} \\
& + 14499,85611X_{M-HEC} - 1,66918X_{AGUA} \\
& - 244,16199X_{CPII}X_{AREIA} - 254,26923X_{RCAT}X_{AREIA} \\
& + 56703,49867X_{AREIA}X_{IA} - 4,9148^6X_{PCX}X_{M-HEC} \\
& - 85105,80951X_{M-HEC}X_{AGUA}
\end{aligned}$$

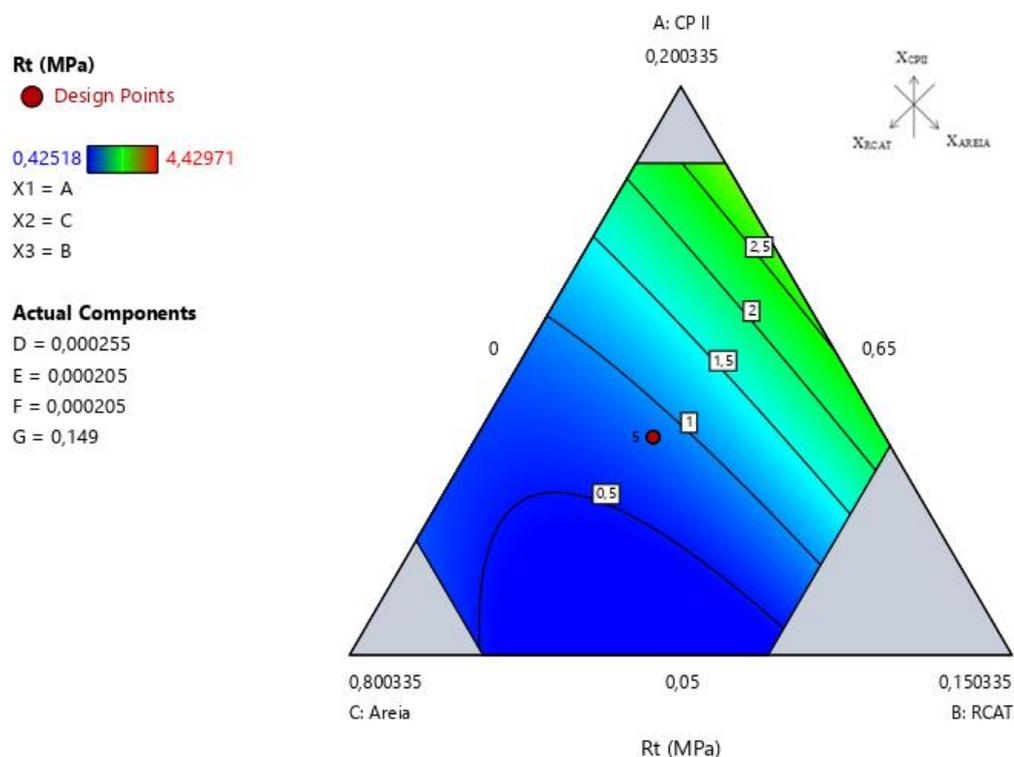
Equação 30

A Figura 32 apresenta a superfície de resposta que foi gerada a partir do modelo cúbico espacial das argamassas. No gráfico de contorno analisado, observamos que o componente X_{RCAT} (A) exerce uma influência significativa sobre a resistência à tração. Este efeito é especialmente evidente nas regiões próximas ao vértice A do triângulo. Conforme a proporção de cimento aumenta, a resistência à tração também se eleva, como indicado pelas áreas verde e amarelo-verde no gráfico. Esta correlação sugere que X_{RCAT} é um fator crucial para melhorar a resistência à tração na mistura, tornando-o um componente essencial para formulações que exigem maior robustez mecânica.

O componente X_{RCAT} (B) mostra uma influência intermediária na resistência à tração, especialmente nas áreas próximas ao vértice B do triângulo. A proporção do resíduo tratado, embora não tão significativa quanto a de X_{RCAT} , ainda contribui de maneira relevante para a resistência à tração quando combinada com o cimento. Esta interação sugere que a combinação adequada de X_{RCAT} com CP II pode ser otimizada para alcançar a resistência à tração desejada.

O componente X_{AREIA} (C) mostra uma clara tendência de reduzir a resistência à tração, especialmente nas regiões próximas ao vértice C do triângulo. Uma maior proporção de areia está associada a uma menor resistência à tração, como indicado pelas áreas azuis no gráfico. Essa correlação negativa sugere que a presença de areia em altas proporções enfraquece a estrutura da mistura, resultando em menor resistência à tração.

Figura 32 - Diagramas ternários para a R_t das misturas. Observar nos diagramas a indicação dos sentidos de crescimento das frações dos ingredientes.



Fonte: (A AUTORA, 2024).

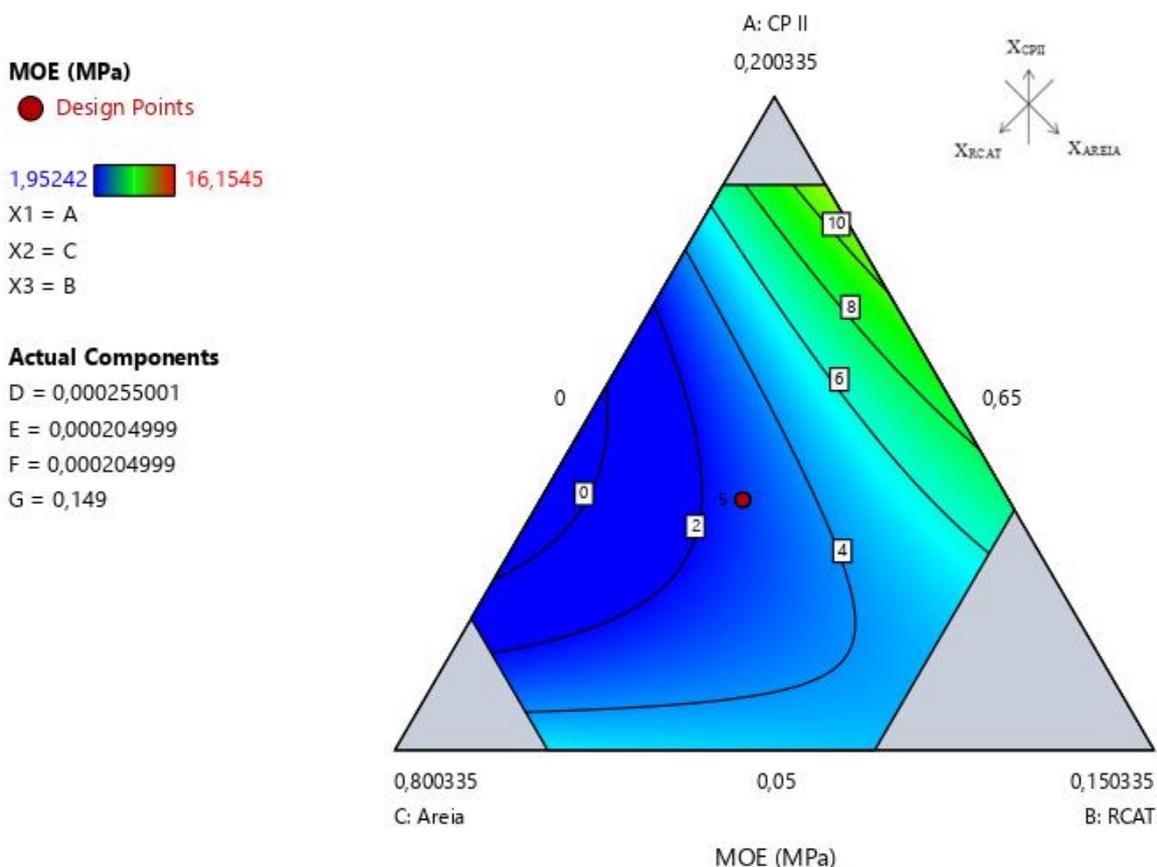
A Equação 31 relaciona o módulo de elasticidade dinâmico (MOE) com as frações mássicas do X_{CPII} , X_{RCAT} , X_{AREIA} . Este modelo apresenta R^2 ajustado (R^2_{adj}) igual a 0,99 e R^2 de previsão (R^2_{pred}) igual a 0,98.

$$\begin{aligned}
 MOE = & +2232,27228X_{CPII} + 1076,13040X_{RCAT} - 367,30593X_{AREIA} \\
 & - 2,31072^5X_{PCX} - 1,30203^5X_{IA} + 130,02345X_{M-HEC} \\
 & - 6367,05810X_{AGUA} - 1693,59784X_{CPII}X_{AREIA} \\
 & + 1,60640^5X_{AREIA}X_{IA} + 10098,03435X_{AREIA}X_{AGUA} \\
 & + 2,238215^7X_{PCX}X_{IA} + 1,53177^6X_{PCX}X_{AGUA}
 \end{aligned}$$

Equação 31

A Figura 33 mostra as superfícies de resposta do módulo de elasticidade (MOE) das argamassas de revestimento ecoeficiente. A análise revela a influência distinta de três componentes: X_{CPII} , X_{RCAT} e X_{AREIA} .

Figura 33 - Diagramas ternários para o MOE das misturas. Observar nos diagramas a indicação dos sentidos de crescimento das frações dos ingredientes.



(A AUTORA, 2024).

$X_{CP II}$ tem uma influência significativa, especialmente próximo ao vértice A do triângulo de contorno. À medida que a proporção de fração mássica dessa variável aumenta, o MOE também se eleva, indicando maior rigidez da argamassa. Por outro lado, o componente X_{RCAT} (B) mostra uma influência intermediária no MOE da argamassa. Essa influência é especialmente notável nas regiões próximas ao vértice B do triângulo. As áreas de elasticidade moderada, indicadas no gráfico, sugerem que a proporção de X_{RCAT} contribui para um aumento moderado na rigidez da argamassa. No entanto, quando X_{RCAT} é combinado com CP II, a mistura pode ser otimizada para alcançar um módulo de elasticidade desejado. Assim, embora o X_{RCAT} sozinho ofereça uma contribuição moderada para a rigidez da argamassa, sua eficácia máxima é atingida quando combinado com CP II, permitindo a formulação de uma argamassa com propriedades mecânicas equilibradas e otimizadas. A variável X_{AREIA} (C), por outro lado, reduz o MOE, principalmente nas regiões próximas ao vértice C, tornando a argamassa mais deformável.

As linhas de contorno indicam variações no MOE: áreas próximas ao vértice C apresentam menor rigidez (0 a 2 MPa), enquanto as próximas aos vértices A e B mostram maior rigidez (4 a 6 MPa e 8 a 10 MPa), destacando a contribuição significativa do X_{CPI} para melhorar as propriedades mecânicas da argamassa.

O custo (C) das argamassas e a fração mássica de cada ingrediente são relacionados por meio da Equação 32.

$$\begin{aligned}
 C = & +8307,76380X_{CPII} + 5305,39083X_{RCAT} + 736,77131X_{AREIA} \\
 & - 85139,51013X_{PCX} - 27768,04460X_{IA} \\
 & + 3792,67833X_{M-HEC} - 1905,89542X_{AGUA} \\
 & - 12503,97856X_{CPII}X_{AREIA} + 1,74878^6X_{CPII}X_{PCX} \\
 & + 3,27693^5X_{CPII}X_{MHEC} - 8156,72072X_{RCAT}X_{AREIA} \\
 & - 1,55102^6X_{RCAT}X_{IA}
 \end{aligned}
 \tag{Equação 32}$$

As formulações de argamassa analisadas apresentam um custo por metro cúbico que varia substancialmente, situando-se entre R\$160,27 e R\$330,41. Essa amplitude de custos reflete as diferentes combinações e proporções de materiais utilizados, permitindo ajustar as formulações conforme as necessidades específicas de desempenho e orçamento. Um dos principais fatores que influenciam o custo é o teor de clínquer presente em cada formulação. As estimativas do teor de clínquer variam significativamente, de 53,85 Kg/m³ a 293,00 Kg/m³. Essa variação é crucial, pois o clínquer é um dos componentes mais caros na produção de argamassa, e sua quantidade impacta diretamente o custo total. A substituição parcial do cimento Portland pelo RCA_T exerce relação direta com a otimização do custo da argamassa de revestimento ecoeficiente.

4.3.6 Otimização simultânea e validação dos modelos

Baseando-se nos requisitos classificatórios da NBR 13281 (2023) (ver ANEXO A), que apresenta os critérios classificatórios para a obtenção de uma ARV-III, foi estabelecida a desejabilidade 1 para os valores e parâmetros para atendimento desses requisitos. Os dados são apresentados na Tabela 8 abaixo:

Tabela 8 - Parâmetros para atendimento dos requisitos classificatórios descritos na NBR 13281 (ABNT, 2023).

Nome	Objetivo	Limite Inferior	Limite Superior
A: X_{CP}	No intervalo	0,050	0,18
B: X_{RCAT}		0,000	0,095
C: X_{AREIA}		0,650	0,77
X_{PCX}		0,000	0,00041
E: X_{IA}		0,000	0,00041
F: X_{M-HEC}		0,000	0,00041
G: $X_{ÁGUA}$		0,145	0,153
IC (mm)	Alvo = 260	250,0	270,0
RA (%)	No intervalo	80,0	90,0
DEF (g/cm ³)		1,40	2,00
AI (%)		10	20
DEE (g/cm ³)		1,18	1,88
Rc (MPa)		0,88	16,168
Rt (MPa)	Maximizar	0,50	3,00
MOE (GPa)	No intervalo	6,00	9,50
Custo (R\$/m ³)	Minimizar	0,49	1,00
Teor de Clínquer (Kg/m ³)		53,850	292,30

Fonte: (A AUTORA, 2024).

A desejabilidade global na otimização das variáveis respostas foi de 0,68. Para o procedimento de otimização dos ensaios de resistência potencial de aderência à tração ao substrato, resistência potencial à tração superficial e variação dimensional, não foi possível desenvolver uma equação individual para cada uma dessas propriedades com base nas 19 formulações utilizadas. Para tanto, foram moldadas placas para os ensaios, seguindo os parâmetros estabelecidos pelas normas pertinentes. No Quadro 11 encontram-se as frações mássicas dos materiais para a formulação ótima, obtidas após simulação em software Design-expert®.

Quadro 10- Formulação otimizada em função dos parâmetros requeridos para a argamassa de revestimento ecoeficiente ARV-III.

Material	Fração mássica
X_{CPII}	0,0731
X_{RCAT}	0,0596
X_{AREIA}	0,7139
X_{PCX}	0,0004
X_{IA}	0
X_{H-MEC}	0
X_{AGUA}	0,1530

Fonte: (A AUTORA, 2024).

As propriedades previstas para esta formulação, bem como os resultados experimentais são apresentados no Quadro 12. Durante este período, as amostras foram submetidas a condições controladas de temperatura, umidade, conforme especificado na norma NBR 13281 (ABNT,2023).

Os resultados obtidos aos 28 dias indicaram que os parâmetros de mistura propostos são adequados para as condições experimentais. Observamos uma homogeneidade satisfatória nas amostras, indicando que o processo de mistura foi eficiente. Além disso, a análise de consistência e estabilidade mostrou que os produtos resultantes mantiveram suas propriedades físicas e químicas dentro das expectativas previstas.

Quadro 11 - As propriedades no estado fresco e endurecido previstas para esta formulação, bem como os resultados experimentais.

Propriedade	Média Prevista	Observado	Desvio Padrão	Erro Padrão da Média	Intervalo de confiança (95%) Limite inferior	Intervalo de confiança (95%) Limite superior
IC (mm)	260	263,83	7,47	4,73	249,68	270,32
RA (%)	86,71	84,6	0,69	N/A	85,28	88,12
Dens. Fresco (g/cm ³)	1,71	1,88	0,02	0,02	1,67	1,75
AI (%)	20	11,9	1,06	0,87	17,94	22,06
Densidade endurecido (g/cm ³)	1,62	1,80	0,01	0,01	1,59	1,64
Rc (MPa)*	2,77	5,31	0,11	0,11	2,49	3,04
Rt (MPa)*	1,25	2,37	0,07	0,07	1,09	1,41
MOE (GPa)*	6,87	10,15	0,16	0,17	6,47	7,26
Custo (R\$/m ³)	174,90	206,75	0,01	0,01	168,30	184,80
Teor de clínquer (Kg/m ³)	101,03	111,33	1,70	1,93	96,45	105,60
Varição dimensional (mm/m)	-	0,029		-	-	-
Resistência potencial à tração superficial (MPa)		0,67				
Resistência potencial de aderência à tração ao substrato (MPa)		0,54				

*Resultado obtidos na idade de 28 dias.

Fonte: (A AUTORA, 2024).

O valor obtido para o ensaio de variação dimensional da argamassa da placa moldada com a formulação otimizada mostrou-se dentro dos parâmetros exigidos para uma argamassa

classificada como ARV-III, $0,0 \geq \epsilon_i \geq 0,70$, demonstrando a conformidade do material com as exigências de estabilidade dimensional previstas pela norma NBR 13281 (ABNT, 2023).

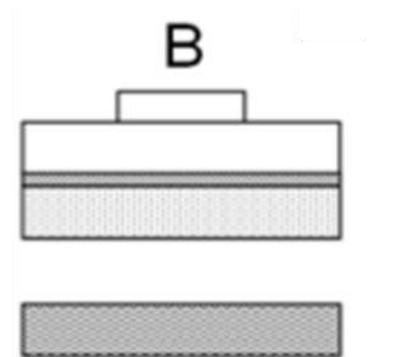
Os resultados indicaram que, para a resistência potencial de aderência, ocorreu uma ruptura do tipo B (conforme Figura 34), caracterizada pela ruptura na interface substrato/argamassa, com valor de 0,54 MPa. A NBR 15258 (ABNT, 2021) estabelece os valores mínimos de resistência potencial de aderência à tração ao substrato (R_i) para diferentes classes de argamassas de revestimento. Para argamassas das classes ARV-I, ARV-II e ARV-III destinadas a revestimentos internos com aplicação de pintura ou textura, a classe RA1 exige um R_i mínimo de 0,20 MPa. Para revestimentos internos aplicados com peças cerâmicas ou revestimentos externos, a classe RA2 requer um R_i mínimo de 0,30 MPa. No caso das argamassas AET, voltadas para aplicações mais específicas, a classe RA3 segue os critérios estabelecidos pela NBR 16648 (ABNT, 2018).

A argamassa otimizada RCA_T , com um valor de 0,54 MPa, apresenta uma resistência potencial de aderência à tração ao substrato superior ao exigido pela norma para revestimentos internos aplicados com peças cerâmicas ou revestimentos externos, que requer um valor mínimo de 0,30 MPa. Isso demonstra que a argamassa atende e supera os requisitos mínimos normativos para essas aplicações, conferindo maior segurança ao revestimento.

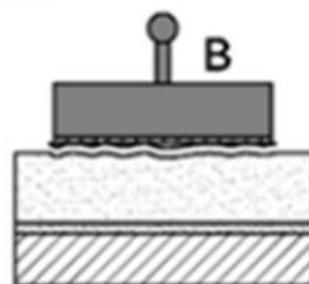
Já para a resistência à tração superficial, teve-se valor obtido de 0,67 MPa e apresentou ruptura observada, de acordo com a norma, foi também do tipo B (conforme Figura 34), sendo essa associada à ruptura na superfície do revestimento. A NBR 15258 (ABNT, 2021) define os requisitos mínimos de resistência potencial à tração superficial (R_i) para diferentes classes de argamassas de revestimento. Para argamassas das classes ARV-I, ARV-II, ARV-III e AET destinadas a revestimentos internos com aplicação de pintura ou textura, a classe RS1 exige um valor mínimo de R_i de 0,20 MPa. Quando o revestimento interno é destinado à aplicação de peças cerâmicas, ou quando o revestimento externo é destinado à aplicação de pintura ou textura, a classe RS2 requer um R_i mínimo de 0,30 MPa. Já para argamassas utilizadas em revestimentos externos destinados à aplicação de placas cerâmicas, a classe RS3 exige um R_i mínimo de 0,50 MPa. A argamassa com RCA_T apresentou um valor de 0,67 MPa, classificando-se como adequada para aplicações mais exigentes, como a aplicação de placas cerâmicas.

Esses resultados confirmam a conformidade do material com os parâmetros normativos e sua adequação para as aplicações previstas.

Figura 34 - Representação da forma de ruptura no ensaio de resistência potencial de aderência e resistência à tração superficial, respectivamente.



b) Ruptura na interface substrato/argamassa



b) Tipo B – Ruptura da superfície do revestimento

Fonte: (A AUTORA, 2024).

Apesar dos resultados positivos obtidos tanto para as propriedades no estado fresco, incluindo índice de consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água, quanto para as propriedades no estado endurecido, como resistência potencial de aderência à tração ao substrato, resistência potencial à tração superficial e variação dimensional, não foi possível classificar a argamassa de revestimento como ARV-III, conforme inicialmente

proposto pelo modelo de previsão do Design-expert®. A limitação principal está associada aos valores do módulo de elasticidade (MOE), que não atingiram os níveis necessários para a classificação como ARV-III.

No entanto, a argamassa foi adequadamente classificada como ARV-II, em conformidade com as especificações da norma NBR 13281 (ABNT, 2023), demonstrando que, embora não tenha alcançado o desempenho máximo, atende satisfatoriamente aos requisitos necessários para sua aplicação em revestimentos que exigem boas propriedades mecânicas.

A norma NBR 13281 (ABNT, 2023) define a argamassa de revestimento ARV-II como argamassa inorgânica que, em revestimentos externos, são destinadas à aplicação em edificações de altura total intermediária entre 10m e até 60m, e pode ser usada em revestimentos internos sem restrições.

Portanto, mesmo não atingindo a classificação ARV-III, o enquadramento como ARV-II é considerado satisfatório, pois garante que a argamassa possui as propriedades necessárias para aplicações práticas em revestimentos que não exigem as características mais rigorosas de uma ARV-III. Este resultado demonstra a viabilidade do uso da argamassa com substituição parcial do RCA_T dentro das condições especificadas, oferecendo desempenho confiável para a sua aplicação.

6 CONCLUSÕES

A caracterização química do RCA revelou que é constituído principalmente por óxidos de cálcio (CaO) com 40,6% em peso e de silício (SiO₂) com 12,6% em peso, essenciais para a formação de silicato dicálcico (C₂S). O difratograma de raios-X do RCA identificou os principais componentes cristalinos como calcita (CaCO₃), quartzo (SiO₂), dolomita [CaMg(CO₃)₂] e crisotila [Mg₃Si₂O₅(OH)₄], confirmada pelos picos nos ângulos 2θ ~12° e 24.37°. Não foram encontrados outros tipos de amianto. A microscopia eletrônica de varredura mostrou feixes fibrosos de crisotila incorporados na matriz cimentícia.

Verificou-se eficácia no método de tratamento térmico proposto por Carneiro (2021) a partir da ausência de padrões do mineral crisotila nas caracterizações química, física, térmica. A solução ótima correspondente a otimização múltipla foi sinterizado a 5 kg de RCA, calcinando-o a 800 °C, durante 1 h.

Para o RCA_T, a composição química predominante é de CaO, SiO₂ e Al₂O₃, com fases mineralógicas identificadas como quartzo, calcita, belita, periclásio, merwinita, anidrita, espurrita e polimorfos do silicato dicálcico. A análise de DRX não identificou picos de crisotila na amostra calcinada a 800°C, indicando completa desidroxilação das fibras de amianto.

A análise termogravimétrica e a espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) validaram a completa desidroxilação da crisotila no RCA_T, evidenciada pela ausência das bandas características da crisotila no espectro de FTIR. Isso confirmou que o tratamento térmico foi eficaz na transformação do amianto em uma forma não fibrosa e segura.

A detecção significativa da presença da fase calcita no RCA_T constitui uma observação relevante no âmbito desta investigação. Esta constatação sugere que o processo térmico empregado no tratamento do RCA foi eficiente do ponto de vista ambiental, uma vez que não resulta na completa eliminação da calcita. Tal constatação é de particular importância, pois implica em uma menor emissão de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera quando comparada com estudos anteriores documentados na literatura.

Este achado contribui para uma compreensão mais aprofundada e embasada das implicações ambientais associadas à gestão de resíduos dessa natureza, destacando a importância da consideração cuidadosa dos processos térmicos na formulação de estratégias de sustentabilidade e redução das emissões de gases de efeito estufa.

A pesquisa contribuiu para a mitigação dos impactos ambientais causados pelo descarte inadequado do cimento-amianto, oferecendo uma solução prática para a gestão desses resíduos. A reutilização de resíduos em materiais de construção não apenas reduz a demanda por matérias-primas virgens, mas também diminui a quantidade de resíduos encaminhados para aterros, alinhando-se com os princípios da economia circular.

O projeto estatístico de mistura, método apresentado para a dosagem da argamassa, permitiu gerar um projeto experimental enxuto, com respostas que variaram de forma ampla. Os resultados mostraram que o RCA_T foi eficiente e melhorou e/ou teve influência as propriedades das argamassas (retenção de água, resistência etc.) e tende a reduzir o índice de consistência.

A análise das correlações lineares entre os principais parâmetros de dosagem e as propriedades das argamassas revelou informações importantes sobre a influência dos componentes na formulação. Os resultados destacam que o teor de ar incorporado e a fração mássica do aditivo IA apresentam forte correlação positiva, assim como a retenção de água e a fração mássica do aditivo H-MEC. Por outro lado, foram observadas fortes correlações negativas entre o índice de consistência e a fração mássica do RCA_T , bem como entre a densidade da argamassa (tanto no estado fresco quanto no endurecido) e a fração mássica do aditivo IA.

Em particular, a forte correlação negativa (-0,866) entre o índice de consistência (IC) e a fração mássica do RCA_T sugere que a adição de RCA_T reduz significativamente a fluidez da argamassa. Isso é consistente com a observação de que a presença de RCA_T aumenta a demanda de água, resultando em uma argamassa menos fluida.

Além disso, as correlações mais relevantes envolvendo o RCA_T mostraram que, embora o resíduo não apresente correlações lineares significativas com muitas propriedades, ele exerce uma influência importante na retenção de água devido à sua elevada área superficial específica. Isso sugere que o RCA_T pode melhorar a coesão e a resistência à segregação da mistura.

As correlações entre as propriedades físicas e mecânicas, como a densidade no estado fresco e endurecido, resistência à compressão e tração, e o módulo de elasticidade (MOE), com a fração mássica do aditivo incorporador de ar (IA), indicaram que a incorporação de ar teve um impacto significativo na redução da densidade e na resistência mecânica das argamassas.

O modelo gerado pelo projeto de mistura, fundamentado nas 19 formulações de base, demonstrou uma notável eficiência na predição das propriedades da argamassa no estado fresco.

Este sucesso pode ser atribuído à robustez do modelo estatístico aplicado, que levou em consideração as interações complexas entre os diferentes componentes da mistura. A análise de variância (ANOVA) confirmou a significância estatística dos modelos preditivos, com elevados coeficientes de determinação ajustados (R^2 adj) e de previsão (R^2 pred), indicando que as variações observadas nas propriedades das argamassas foram bem explicadas pelos modelos desenvolvidos.

O trabalho em questão avaliou a substituição de até 44% do cimento Portland por resíduo de cimento-amianto, resultando em uma argamassa inovadora. Os resultados, obtidos na idade de 28 dias, para as argamassas no estado fresco, endurecido e aplicado, mostraram-se promissores. As análises preliminares indicaram que as propriedades mecânicas, tais como a resistência à compressão, resistência à tração e o módulo de elasticidade, estão dentro dos valores esperados, sugerindo que a formulação da argamassa foi bem-sucedida para obtenção de uma ARV-III de maneira pioneira. Estes resultados indicaram um bom desempenho inicial das argamassas.

Os resultados revelaram que a argamassa com o RCA_T não só manteve as propriedades mecânicas comparáveis à argamassa convencional, mas também apresentou uma redução de custo substancial, sendo 37% menor. As características químicas e físicas do RCA_T dispensam o uso dos aditivos incorporador de ar (IA) e retentor de água (M-HEC).

Em conclusão, o modelo gerado a partir das 19 formulações de base mostrou-se altamente eficiente, atingindo todas as propriedades previstas para a argamassa no estado fresco, endurecido e aplicado, bem como, gerou uma argamassa de alto desempenho. Os resultados obtidos na idade de 28 dias no estado endurecido indicam que a argamassa produzida se adequa na classificação de uma ARV-II. Este estudo demonstra a importância de um planejamento experimental rigoroso e da aplicação de modelos estatísticos robustos no desenvolvimento de materiais cimentícios de alta performance.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Com base nos dados obtidos durante o desenvolvimento do projeto de mistura, formular uma proposta de otimização que permita alcançar um módulo de elasticidade dentro da faixa especificada para a classe ARV-III;
- Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da argamassa produzida com o foco em avaliar impactos ambientais e sustentabilidade de todo o processo;
- Análise química e ambiental da argamassa produzida para comprovar o desempenho ambiental desse novo material e método de tratamento, assegurando que sejam seguros para o meio ambiente;
- Estudo da reologia das argamassas de revestimento eco-eficientes, com o intuito de compreender a influência do resíduo de cimento-amianto tratado (RCA_T) na viscosidade elongacional e tensão de cisalhamento;
- Efeito da incorporação do aditivo compensador de retração nas propriedades reológicas avaliação da sua interação nos resultados;
- Avaliar o potencial durabilidade a longo prazo das argamassas à base de RCA_T ;
- Explorar o potencial do uso do RCA_T em outras aplicações cimentícias, como concreto ou elementos pré-moldados.
- Validar o modelo fatorial correspondente ao tratamento ótimo definido a partir do projeto de mistura em escala industrial.

8 REFERÊNCIAS

____. NBR 13276 – **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 2 p.

____. NBR 13277 – **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 3 p.

____. NBR 13278 – **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 4 p.

____. NBR 13279 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 9 p.

____. NBR 13280 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 2 p.

____. NBR 13281 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023. 26 p.

____. NBR 13528-2 - **Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 10 p.

____. NBR 13529 - **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 13 p.

____. NBR 13749 - **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 8 p.

____. NBR 15259 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade**. Rio de Janeiro, ABNT, 2005. 3 p.

____. NBR 16916 - **Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, ABNT, 2021c. 8p.

____. NBR 17054 - **Agregados - Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, ABNT, 2022a. 5 p.

____. NBR 7211. **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 15 p.

____. NBR 15258: **Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração**. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 16648: **Argamassas inorgânicas decorativas para revestimento de edificações - Requisitos e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2021.

_____. Ministério da Saúde. Sistema de Informação sobre a Mortalidade. Paraná. Brasília: 2014b.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. Série Sustentabilidade – V. 5. São Paulo: E. Blucher, 2011.

ALGRANTI, E., SAITO, C. A., CARNEIRO, A. P. S., MOREIRA, B., MENDONÇA, E. M. C., BUSSACOS, M. A. The next mesothelioma wave: mortality trends and forecast to 2030 in Brazil. **Cancer epidemiology**, v. 39, n. 5, p. 687-692, 2015.

ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento**. Brasília, 2002. 175 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Estrutura e Construção Civil, Universidade de Brasília.

ALVES, N.J.D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de de revestimento**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, DF, 2002.

AMBROSIUS, S., GUNDLACH, H., KIESER, J. Thermal utilization of cement-bound asbestos products in cement kilns. **ZKG Int.** 49, 444-453, 1996.

ANDERSON, M. J.; WHITCOMB, P. J.; BEZENER, M. A. Formulation simplified: finding the sweet spot through design and analysis of experiments with mixtures. Productivity Press, 2018.

ARAÚJO, S. S.; GUIMARÃES, G. N.; GEYER, A. L. B. **Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto**. São Paulo: IBRACON, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS EXPOSTOS AO AMIANTO (ABREA). **Saúde ou emprego? O dilema do amianto, que fez Goiás desafiar STF**. Disponível em: <https://abrea.org.br/noticias/publicações/347-saúde-ou-emprego-o-dilema-doamianto,-que-fez-goiás-desafiar-stf-2.html>. Acesso em: 8 dez. 2020.

ÁVALOS-RENDÓN, T. L. et al. Synthesis of belite cements at low temperature from silica fume and natural commercial zeolite. **Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology**, v. 229, p. 79–85, 2018.

BAÍA, L. L. M; SABBATINI, F. H. **Projeto e Execução de Revestimento de Argamassa** São Paulo: O Nome da Rosa, 2000. 82 p. (Coleção Primeiros Passos da Qualidade no Canteiro de Obras).

BALL, M.C. and TAYLOR, H.F.W. (1963) An X-ray study of some reactions of chrysotile. **Journal of Applied Chemistry**, v.13, p.145-150.

BARTOLI, H. **Como descartar amianto de forma segura?** Disponível em: [Como descartar amianto de forma segura? Conheça regras e procedimentos | AECweb](#) .

BAUER, E., REGUFFE, M., NASCIMENTO, M., CALDAS, L. Requisitos das argamassas estabilizadas para revestimento. **Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, v. 11, 2015.

BELARDI, G., PIGA, L. “Influence of calcium carbonate on the decomposition of asbestos contained in end-of-life products.” **Thermochimica Acta** 573, 220-228, 2013.

BENINGFIELD, N. **Air entrainment of mortar**. In 8th International Brick/Block Masonry Conference Ireland, UK, P. 118-130, 1988.

BENJAMIN, B. S., BARROS, R. B., DIAS, M. F. P., LOURENÇO, D. B. De Mágico A Assassino: O Caminho Percorrido Para O Banimento Do Amianto Crisotila No Brasil. **Revista Jurídica Luso-Brasileira**, 4(6), 1461-1485, 2018.

BERRY, T. A., WALLIS, S., DOYLE, E., DE LANGE, P., STEINHORN, G., VIGLIATURO, R., BELLUSO, E., BLANCHON, D. A Preliminary Investigation into the Degradation of Asbestos Fibres in Soils, Rocks and Building Materials Associated with Naturally Occurring Biofilms. **Minerals**, v. 14, n. 1, p. 106, 2024.

BHATTACHARYA, S.; JOHN, P. J.; LEDWANI, L. (2016). Fungal weathering of asbestos in semi arid regions of India. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 124, p. 186-192, 2016.

BIANCHI, C. and BIANCHI, T. (2015). Asbestos between science and myth. A 6,000-year story. **Medicina del Lavoro**. Mattioli 1885 S.p.A., 106(2), pp. 83–90.

BLOISE, A. Thermal behaviour of actinolite asbestos. **Journal of materials science**, v. 54, n. 18, p. 11784-11795, 2019.

BLOISE, A.; CATALANO, M.; GUALTIERI, A. F. Effect of grinding on chrysotile, amosite and crocidolite and implications for thermal treatment. **Minerals**, v. 8, n. 4, 2018.

BORGES, R., KLAIC, R., FARINAS, C. S., RIBEIRO, C. (2022). Biological treatment of asbestos cement wastes by *Aspergillus niger* and *Acidithiobacillus thiooxidans*. **Applied Clay Science**, v. 216, p. 106375, ISSN 0169-1317, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106375>, 2022.

BOUZIDI, M. A. et al. Synthesis and Characterization of Belite Cement with High Hydraulic Reactivity and Low Environmental Impact. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, p. 8659–8668, 2014.

BRASIL. Câmara dos Deputados. Dossiê Amianto Brasil: Relatório do Grupo de Trabalho da Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da Câmara dos Deputados destinado à análise das implicações do uso de amianto no Brasil. Relator: Deputado Edson Duarte. Brasília, DF, 2010. Disponível em: Acesso em: 10 mar. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 348, de 16 de agosto de 2004. Altera a Resolução CONAMA nº 307/2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília**. DF, 16 ago. 2004.

BRINDLEY, G. W.; HAYAMI, Ryozo. Mechanism of formation of forsterite and enstatite from serpentine. **Mineralogical magazine and journal of the Mineralogical Society**, v. 35, n. 269, p. 189-195, 1965.

BRYCHT, NATALIA. (2022). Recycling of Asbestos-Cement Waste – An Opportunity or a Threat?. **System Safety: Human - Technical Facility - Environment**. 4. 10-18. 10.2478/czoto-2022-0002.

BUREAU, K.L.B.; LE BLANSCH, K.; DEN BOEFT, K.; TEMPELMAN, J. **On the Lookout for Practicable Sustainable Options for Asbestos Waste Treatment: A Technical, Sustainability and Market Assessment**. Report on a Project Commissioned by the Dutch Ministry for Infrastructure and Water Management. 2018. Disponível online em: <https://www.asbeter.com/en/research-and-facts>.

CAPPELLARI, M.; DAUBRESSE, A.; CHAOUICHE, M. Influence of organic thickening admixtures on the rheological properties of mortars: Relationship with water-retention. **Construction and Building Materials**, p. 950-961, 2013.

CARNEIRO, G. O. **Cimentos álcali-ativados preparados com resíduos de cimento-amianto inertizados**. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.

CASTLEMAN, B. I. Asbestos and cancer: history and public policy. **British journal of industrial medicine**, v. 48, n. 6, p. 427, 1991.

CASTRO, H.; GIANNASI, F.; NOVELLO, C. A luta pelo banimento do amianto nas Américas: uma questão de saúde pública. **Ciências & Saúde Coletiva**, v. 8, n. 4, p. 903–911, 2003.

CENTRO Colaborador UFBA/ISC/Pisat. **Boletim Epidemiológico Morbimortalidade de Agravos à Saúde Relacionados ao Amianto no Brasil, 2000 a 2011**. Ano II, n. 5. Disponível em: http://renastonline.ensp.fiocruz.br/sites/default/files/arquivos/recursos/bol7_amiantoF9.pdf, 2012.

CHESHIRE, M., GÜVEN, N. Conversion of chrysotile to a magnesian smectite. **Clays and Clay Minerals**, v. 53, n. 2, p. 155-161, 2005.

COLANGELO, F. et al. Treatment and recycling of asbestos-cement containing waste. **Journal of Hazardous Materials**, v. 195, p. 391–397, 2011.

COLOMBO, P., BRUSATIN, G., BERNARDO, E., SCARINCI, G. (2003). Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, v. 7, n. 3, p. 225-239, 2003.

COOKE, W. E. Fibrosis of the lungs due to the inhalation of asbestos dust. **British Medical Journal**, v. 2, n. 3317, p. 147, 1924.

CORNELL, J. A. **Experiments with Mixtures: Designs, Models, and the Analysis of Mixture Data**. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1981.

CORNELL, J. A. **Experiments with mixtures: designs, models, and the analysis of mixture data**. 3th. Ed., New York, J. Wiley, 2002. 649 p.

CORNELL, J.A. Experiments with mixtures: a review. **Technometrics**, v. 15, n.3, p. 437-455, 1973.

COUTS, R.S.O.; RIDIKAS, V. **Redined wood fibre-cement products**. Rotorua: 35th Annual Conference, 1982.

CUESTA, A., LOSILLA, E. R., ARANDA, M. A., SANZ, J., & ÁNGELES, G. Reactive belite stabilization mechanisms by boron-bearing dopants. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 4, p. 598–606, 2012.

DA SILVA, Narciso Gonçalves. **Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis.

DARCEY, D. J.; FELTNER, C. Occupational and Environmental Exposure to Asbestos. In: T. D. Oury, T. A. Sporn & V. L. Roggli, edits. **Pathology of Asbestos-Associated Diseases**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 11-24, 2014.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. **Journal of Quality Technology**, Milwaukee, v. 12, n.4, p. 214-219, 1980.

DIAS, C. M. R., CINCOTTO, M. A., SAVASTANO, H., JOHN, V. M. Envelhecimento de longo prazo de telhas onduladas de fibrocimento – O efeito da carbonatação, lixiviação e chuva ácida. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 255–265, 2008.

DIAS, C.M.R. **Fibrocimentos com gradação funcional**. 2011. 156 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2011.

DOLL, Richard. Mortality from lung cancer in asbestos workers. **British journal of industrial medicine**, v. 12, n. 2, p. 81, 1955.

DONOVAN S, PICKIN J. An Australian stocks and flows model for asbestos. **Waste Management & Research**. 2016;34(10):1081-1088. doi:10.1177/0734242X16659353.

DU, L.; FOLLIARD, J. K. Mechanisms of Air Entrainment in Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 8, p. 1463-1471, 2005.

DUARTE, E. **Dossiê Amianto Brasil**. Brasília: Câmara dos Deputados Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2010.

FINUCANE, K. G., THOMPSON, L. E., ABUKU, T., & NAKAUCHI, H. Treatment of asbestos wastes using the GeoMelt vitrification process. In: **Proceeding of the Waste Materials 2008 Conference, Phoenix, AZ, USA**. 2008. p. 24-28.

FLANAGAN, D. M. Asbestos. **Science for a changing world**, p. 26–27, s/n, 2019.

FOROUZANFAR, M. H. *et al.* Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks in 188 countries, 1990–2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. **The Lancet**, [s. l.], v. 386, n. 10010, p. 2287–2323, 2015.

GADD, G. M., BAHRI-ESFAHANI, J., LI, Q., RHEE, Y. J., WEI, Z., FOMINA, M., LIANG, X. Oxalate production by fungi: significance in geomycology, biodeterioration and bioremediation. **Fungal Biology Reviews**, v. 28, n. 2-3, p. 36-55, 2014.

GIACOBBE, C., GUALTIERI, A. F., QUARTIERI, S., RINAUDO, C., ALLEGRINA, M., ANDREOZZI, G. B. Spectroscopic study of the product of thermal transformation of chrysotile-asbestos containing materials (ACM). **European Journal of Mineralogy**, v. 22, n. 4, p. 535-546, 2010.

GLASSER, F. P. The formation and thermal stability of spurrite, $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2\text{CO}_3$. **Cement and Concrete Research**, 3(1), 23–28, 1973.

GLEICHMAR, G., KIESER, J., AMBROSIUS, S., GÖRMAR, H., KRÄHMER, A., BUHRANDT, W. J. **Process of treatment and environment friendly utilization of asbestos cement products**, US Patent 5676,750, 1997.

GOBBO, L. A. **Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de Cimento Portland**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44137/tde-23072009-144653/>. Acesso em: 19 ago. 2023.

GÓMEZ, E., MUÑOZ, M., RODRÍGUEZ, A., CAAMAÑO, J. N., FACAL, N., DÍEZ, C. (2009). Vitrification of bovine blastocysts produced in vitro inflicts selective damage to the inner cell mass. **Reproduction in domestic animals**, v. 44, n. 2, p. 194-199, 2009.

GUALTIERI, A. F., CAVENATI, C., ZANATTO, I., MELONI, M., ELMI, G., GUALTIERI, M. L. The transformation sequence of cement-asbestos slates up to 1200 °C and safe recycling of the reaction product in stoneware tile mixtures. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, n. 2, p. 563–570, 2008.

GUALTIERI, A. F. Recycling asbestos- containing material (ACM) from construction and demolition waste (CDW): **Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste**, 500-525, DOI: 10.1533/9780857096906.4.500, 2013.

GUALTIERI, A. F., BOCCALETTI, M. Recycling of the product of thermal inertization of cement–asbestos for the production of concrete, **Construction and Building Materials**, 25, 3561-3569, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.049, 2011.

GUALTIERI, A. F., TARTAGLIA, A. Thermal decomposition of asbestos and recycling in traditional ceramics, **Journal of the European Ceramic Society**, 20, 1409-1418, 2000.

H. F. W. Taylor. **Cement Chemistry**. Thomas Telford, 1997.

HARRIS, L. V.; KAHWA, I. A. Asbestos: Old foe in 21st century developing countries. **Science of the total environment**, v. 307, p. 1–9, 2003.

HARTMANN, C., JEKNAVORIAN, A., SILVA, D., & BENINI, H. Aditivos químicos para concretos e cimentos. **Concreto Ciência e Tecnol.**, 1st ed., Ibracon, São Paulo, p. 347-380, 2011.

HONG, S.; YOUNG, J. F. Hydration Kinetics and Phase Stability of Dicalcium Silicate Synthesized by the Pechini Process. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 86, n. 7, p. 1681–1686, 1999.

HONÓRIO, T., & CARASEK, H. Influência da absorção de água do substrato na resistência superficial de revestimentos de argamassa. In: **3ro Congresso Portugues de Argamassas de Construção, Lisboa, Portugal**. 2010.

HUGHES, T. L., METHVEN, C. M., JONES, T. G., PELHAM, S. E., FLETCHER, P., HALL, C. Determining cement composition by Fourier transform infrared spectroscopy. **Advanced Cement Based Materials**, v. 2, n. 3, p. 91-104, 1995.

IARC. Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer. Amianto (crisotila, amosita, crocidolita, tremolita, actinolita, e antofilita). **IARC Monogr Eval Carcinog Riscos Hum.** 2012;100C:219–309 (<http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol100C/index.php>, acessado em 11 de março de 2014).

IWASZKO, J., PRZERADA, I., ZAWADA, A., 2017. Microstructural aspects of high-energy milling of asbestos-cement materials, **Ceramic Materials**, 69, 2, 84-89.

IWASZKO, J.; ZAWADA, A.; LUBAS, M. Influence of high-energy milling on structure and microstructure of asbestos-cement materials. **Journal of Molecular Structure**, v. 1155, p. 51–57, 2018.

IWASZKO, Józef. Making asbestos-cement products safe using heat treatment. **Case Studies in Construction Materials**, v. 10, p. e00221, 2019.

JAVIER, C. S. Selecting the slack variable in mixture experiment. **Ingeniería, Investigación y Tecnología**, v. 16, n. 4, p. 613-623, 2015.

JEONG, HYEONYI; MOON, WONJIN; ROH, YUL. Characterization of mineralogical changes of chrysotile and its thermal decomposition by heat treatment. **Economic and Environmental Geology**, v. 49, n. 2, p. 77-88, 2016.

JOLICOEUR, Carmel; DUCHESNE, Daniel. Infrared and thermogravimetric studies of the thermal degradation of chrysotile asbestos fibers: evidence for matrix effects. **Canadian Journal of Chemistry**, v. 59, n. 10, p. 1521-1526, 1981.

KACIMI, L.; CYR, M.; CLASTRES, P. Synthesis of α' -L-C₂S cement from fly-ash using the hydrothermal method at low temperature and atmospheric pressure. **Journal of Hazardous Materials**, v. 181, n. 1–3, p. 593–601, 2010.

KAZAN-ALLEN, L. International Ban Asbestos Secretariat. **Current Asbestos Bans**. Disponível em: http://ibasecretariat.org/alpha_ban_list.php.

KHAYAT, K. H. Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials—An overview. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, n. 2-3, p. 171-188, 1998.

KHUDHAIR, M. H. R.; ELYOUBI, M. S.; ELHARFI, A. Study of the influence of water reducing and setting retarder admixtures of polycarboxylate “superplasticizers” on physical and mechanical properties of mortar and concrete. **Journal of Materials and Environment Sciences**, p. 56-65, 2018.

KHUDHAIR, M.; YOUBI, M. S. E.; ELHARFI, A. Study of the influence of a high water-reducing super plasticizer and accelerator of setting time on the physical properties and mechanical performance of. **Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences**, 2017. ISSN 0975-8585.

KUSIOROWSKI, R., GERLE, A., KUJAWA, M., ŚLIWA, A., & ADAMEK, J. (2024). Characterisation of asbestos-containing wastes by thermal analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, p. 1-14, 2024.

KUSIOROWSKI, R., ZAREMBA, T., PIOTROWSKI, J. The potential use of cement–asbestos waste in the ceramic masses destined for sintered wall clay brick manufacture, **Ceramics International**, 40, 11995-12002, DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.04.037, 2014.

KUSIOROWSKI, R., ZAREMBA, T., PIOTROWSKI, J. Use of asbestos-containing waste to produce ceramic building materials with a sintered body, **Materialy Ceramiczne**, 67, 3, 279-285, 2015.

KUSIOROWSKI, R., ZAREMBA, T., PIOTROWSKI, J., & ADAMEK, J. Thermal decomposition of different types of asbestos. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, v. 109, n. 2, p. 693-704, 2012.

KUSIOROWSKI, R.; ZAREMBA, T. The use of asbestos wastes as a fillers on soral cement. **Ceram. Silik**, v. 62, p. 31-40, 2018.

KUSIOROWSKI, R.; ZAREMBA, T.; PIOTROWSKI, J. Influence of the type of precalcined asbestos containing wastes on the properties of sintered ceramics. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 422–429, 2016.

KUSIOROWSKI, R; LIPOWSKA, B; KUJAWA, M; GERLE, A. Problem of asbestos-containing wastes in Poland. **Cleaner Waste Systems**. Volume 4, April 2023, 100085.

LANDIM, F. A. A. (2020). **Amianto não: perspectivas para desamiantização e o manejo das telhas de fibrocimento na Universidade Federal da Bahia**. 145f, Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Saúde, Ambiente e Trabalho, Faculdade de Medicina da Bahia – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.

ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK, B.; SZWABOWSKI, J. Stability of air-content in the case of innovative air-entraining Portland multicomponent cement. **Procedia Engineering**, p. 559-567, 2015.

LEONELLI, C., VERONESI, P., BOCCACCINI, D. N., RIVASI, M. R., BARBIERI, L., ANDREOLA, F., LANCELLOTTI, I., RABITTI, D., PELLACANI G. C. Microwave Thermal Inertisation of Asbestos Containing Waste and its Recycling in Traditional Ceramics, **Journal of Hazardous Materials**, 135(1-3), 149-155, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.11.035, 2006.

LIGABUE, M. L., GUALTIERI, A. F., GUALTIERI, M. L., MALFERRARI, D., LUSVARDI, G. Recycling of thermally treated cement-asbestos for the production of porcelain stoneware slabs. **Journal of cleaner production**, V. 247, N. 119084, 2020.

LOMBARDI FILHO, P. **Gestão de pequenos volumes de materiais de cimento-amianto no Brasil: do uso aos resíduos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

LUBERTO, F.; FERRANTE, D.; SILVESTRI, S.; ANGELINI, A.; CUCCARO, F.; NANNAVECCHIA, A. M.; MAGNANI, C. Cumulative asbestos exposure and mortality from asbestos related diseases in a pooled analysis of 21 asbestos cement cohorts in Italy. **Environmental Health**, 18, 1-19, 2019.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. 2.Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990p.

MACIEJEWSKA, Aleksandra. Application of infrared spectrometry (FT-IR) for mineral identification of asbestos in bulk samples. **Medycyna Pracy**, v. 63, n. 2, p. 181-189, 2012.

MAGALHÃES, M.N.; DE LIMA, A.C.P. **Noções de probabilidade e estatística**. 6ª ed. São Paulo: EDUSP, 2011. 424 p.

MARTINELLO, T., KANEKO, T. M., VELASCO, M. V. R., TAQUEDA, M. E. S., CONSIGLIERI, V. O. Optimization of poorly compactable drug tablets manufactured by direct compression using the mixture experimental design. **International journal of pharmaceuticals**, v. 322, n. 1-2, p. 87-95, 2006.

MARTINS, D. G. **Influência do tamanho do corpo de prova nos resultados de ensaios de módulo de deformação e resistência à compressão e suas correlações para concretos produzidos em Goiânia-GO**. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

MCLEAN, R. A.; ANDERSON, V. L. Extreme vertices design of mixture experiments. **Technometrics**, v. 8, n. 3, p. 447-454, 1966.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, J. M. Paulo. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO, F. C. A. C. D. **Análise de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinza residual de lenha de algaroba**. 2012. 103p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC), UFRN, Natal - RN.

MENDES, J. C., MORO, T. K., FIGUEIREDO, A. S., DO CARMO SILVA, K. D., SILVA, G. C., SILVA, G. J. B., PEIXOTO, R. A. F. Mechanical, rheological and morphological analysis of cement-based composites with a new LAS-based air entraining agent. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 648-661, 2017.

MIYAKE, J.; MATSUSHITA, H. Evaluation method for consistencies of mortars with various mixture proportions. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 5, n. 1, p. 87-97, 2007.
MOHAMED, O. A.; HASAN MASOOD, S.; LAL BHOWMIK, J. Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion. **Measurement**, v. 81, p. 174–196, 2016.

MONTGOMERY, D. **Design and Analysis of Experiments**. 8^a ed. United States: John Wiley e Sons, p.717, 2013.

MONTGOMERY, D.C; RUNGER, G.C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 7th Edition, Wiley, Hoboken, 2018.

MOSSMAN, B. T. (1988). Carcinogenic potential of asbestos and non asbestos fibers. **Environmental Carcinogenesis Reviews**, 6(2), 151–195, 1988.

MURRAY, R. Asbestos: a chronology of its origins and health effects. **Occupational and Environmental Medicine**, v. 47, n. 6, p. 361-365, 1990.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. 4^a ed. Canada: John Wiley e Sons, p. 855, 2016.

NASCIMENTO, J. E. M. F. **Avaliação dos efeitos da substituição da cal hidratada por cinzas de algaroba em argamassas de revestimento**. 99 f. Dissertação (mestrado) - UFPE, Centro Acadêmico do Agreste, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Recife, 2014.

NEGRO, C., BLANCO, A., FUENTE, E., SÁNCHEZ, L. M., & TIJERO, J. Influence of flocculant molecular weight and anionic charge on flocculation behaviour and on the manufacture of fibre cement composites by the Hatschek process. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 11, p. 2095-2103, 2005.

NETO, B. D. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, E. R. **Como fazer experimentos pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2ª ed. São Paulo: Editora Unicamp, p. 412, 2001.

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

OBMIŃSKI, A.; JANEČZEK, J. The effectiveness of asbestos stabilizers during abrasion of asbestos-cement sheets. **Construction and Building Materials**, v. 249, paper 118767, 2020.

OLIVEIRA, A.B. **Melhoria do processo hatschek, por meio de tratamento de dados históricos, para fabricação de telhas onduladas**. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

OMS - Organização Mundial da Saúde. 2014. Chrysotile Asbestos. Disponível em: Disponível em:
<http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/chrysotile_asbestos_summary.pdf

OVAM. State of the Art: **Asbestos - Possible Treatment Methods in Flanders: Constraints and Opportunities**, 2016.

PAIVA, H., SILVA, L. M., LABRINCHA, J. A., & FERREIRA, V. M. Effects of a Water-Retaining Agent on the Rheological Behaviour of a Single-Coat Render Mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1257-1262, 2006.

PAIVA, H., ESTEVES, L. P., CACHIM, P. B., & FERREIRA, V. M. Rheology and hardened properties of single-coat render mortars with different types of water retaining agents. **Construction and Building Materials**, p. 1141- 1146, 2009.

PARK, E. K., TAKAHASHI, K., JIANG, Y., MOVAHED, M., & KAMEDA, T. Elimination of asbestos use and asbestos-related diseases: A n unfinished story. **Cancer Science**, 103(10), 1751-1755, 2012.

PATURAL, L., MARCHAL, P., GOVIN, A., GROSSEAU, P., RUOT, B., & DEVES, O. Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars. **Cement and Concrete Research**, p. 46-55, 2011.

PAWEŁCZYK, A., BOŹEK, F., GRABAS, K., & CHEĆMANOWSKI, J. Chemical elimination of the harmful properties of asbestos from military facilities. **Waste Management**, v. 61, p. 377-385, 2017.

PEDRA, F. **Mortalidade por mesotelioma no Brasil de 1980 a 2010**. 2015. 112f. Tese (Doutorado em Saúde Pública e Meio Ambiente) - Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2015.

PELL, R.; ZUNINO, F. Recycling of hydrated cement pastes by synthesis of α' HC2S. **Cement and Concrete Research**, v. 100, p. 398–412, 2017.

PIERRE, A.; PERROT, A.; GUEVEL, Y. Cellulose ethers and cement paste permeability. **Cement and Concrete Research**, p. 117-127, 2015.

PLESCIA, P., GIZZI, D., BENEDETTI, D., CAMILUCCI L, L., FANIZZA, C., SIMONE, P., PAGLIETTI, F. Mechanochemical treatment to recycling asbestos-containing waste. **Waste Management**, v.23, p 209–218, 2003.

PORTEZAN, A. C. **Amianto: Trabalho que não Dignifica, Adoece**. Monografia Brasília: Universidade de Brasília. Faculdade de Direito, 2013.

RAMACHANDRAN, V. S.; PAROLI, R. M.; BEAUDOIN, J. J.; DELGADO, A. H. **Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials**. WILLIAM AN ed. Norwich, 2002.

RATH, S., OUCHI, M., PUTHIPAD, N., & ATTACHAIYAWUTH, A. Improving the stability of entrained air in self-compacting concrete by optimizing the mix viscosity and air entraining agent dosage. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 531-537, 2017.

RIBEIRO, D. V. **Princípios da ciência dos materiais cimentícios: produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos**. Editora Appris, 2021.

ROMANO, R. C. de O.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Incorporação de ar em materiais cimentícios: uma nova abordagem para o desenvolvimento de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 289-308, abr./jun. 2018. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

ROMANO, R.C.O.; TORRES, D.R.; PILEGGI, R.G. **Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars**. *Construction and Building Materials* 8, p. 219–226, 2015.

ROSS, M.; NOLAN, R. P. History of asbestos discovery and use and asbestos-related disease in context with the occurrence of asbestos within ophiolite complexes. Em: Y. Dilek & S. Newcomb, edits. *Ophiolite concept and the evolution of geological thought*. Boulder, Colorado: **Geological Society of America Special Paper** 373, pp. 447-470, 2003.

ROZALEN, M., HUERTAS, F. J. Comparative effect of chrysotile leaching in nitric, sulfuric and oxalic acids at room temperature. **Chemical Geology**, v. 352, p. 134-142, 2013.

SANTANA, H. A. **Avaliação de desempenho de argamassas geopoliméricas autoadensáveis dosadas pelo delineamento estatístico de misturas e reforçadas por malhas poliméricas 3D impressas**. Dissertação. Universidade Federal da Bahia. 2021.

SANTANA, H. A., RUVIARO, A. S., RIBEIRO, D. V., CILLA, M. S., WALKLEY, B., DIAS, C. M. Thermally-treated asbestos-cement wastes as supplementary precursor for geopolymeric binders: CO₂ emission and properties. **Waste Management**, v. 182, p. 225-236, 2024.

SANTOS, T. A. **Obtenção de clínquer Portland a partir da utilização do fino de rocha granítica (FRG) e do resíduo de telhas de cimento-amianto (RCA) como matérias-primas alternativas**. 235f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2022.

SCHOON, J.; HEYDEN, L. V.; ELOY, P.; GAIGNEUX, M.; BUYSSER, K.; DRIESSCHE, I.; BELIE, N. Waste fibrecement: An interesting alternative raw material for a sustainable Portland clinker production. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 391-403, 2012.

SEABRA, M. P.; LABRINCHA, J. A.; FERREIRA, V. M. Rheological behavior of hydraulic lime-based mortars. **Journal of the European Ceramic Society**, p. 1735-1741, 2007.
SELIKOFF, I. J.; LEE, D. H. K. **Asbestos and Disease**. New York, San Francisco, London: Academic Press, 1978.

SILVA, R. A. **Análise do comportamento reológico de argamassas com diferentes teores de adições minerais**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SNEE, R. D.; MARQUARDT, D. W. Screening concepts and designs for experiments with mixtures. **Technometrics**, v. 18, n. 1, p. 19-29, 1976.

SPASIANO, D. AND PIROZZI, F. ‘Treatments of asbestos containing wastes’, **Journal of Environmental Management**. Elsevier Ltd, 204, pp. 82–91, 2017.

SPASIANO, D., LUONGO, V., RACE, M., PETRELLA, A., FIORE, S., APOLLONIO, C., PICCINNI, A. F. Sustainable bio-hydrothermal sequencing treatment for asbestos-cement wastes. **Journal of hazardous materials**, v. 364, p. 256-263, 2019.

SPIRATOS, N., PAGÉ, M, MAILVAGANAM, N. P., MALHOTRA, V. M., JOLICOEUR, C. **Superplasticizer for Concrete. Fundamentals, Technology and Practice**. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa, 2003.

SPRUNG, S., SCHNEIDER, C., GAJEWSKI, S., HOENIG, V. Environmentally compatible utilization of asbestos cement products. **ZKG Int.** 51, 527-541, 1998.

STANĚK, T., BOHÁČ, M., ZEZULOVÁ, A., & RYBOVÁ, A. Decomposition and utilization of asbestos-cement waste, 2017.

STANĚK, T., BOHÁČ, M., ZEZULOVÁ, A., & RYBOVÁ, A. Hydraulic Binder from Hazardous Waste. In Solid State Phenomena (Vol. 276, pp. 3–8). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.276.3>, 2018.

STAYNER, L., WELCH, L. S., LEMEN, R. The worldwide pandemic of asbestos-related diseases. **Annual review of public health**, v. 34, n. 1, p. 205-216, 2013.

STEPKOWSKA, E. T., BLANES, J. M., FRANCO, F., REAL, C., PÉREZ-RODRIGUEZ, J. L. Phase transformation on heating of an aged cement paste. **Thermochimica Acta**, v. 420, n. 1- 2 SPEC. ISS., p. 79–87, 2004.

STROHMEIER, B. R., HUNTINGTON, J. C., BUNKER, K. L., SANCHEZ, M. S., ALLISON, K., LEE, R. J. (2010). What is asbestos and why is it important? Challenges of defining and characterizing asbestos. **International Geology Review**, v. 52, n. 7-8, p. 801-872, 2010.

SUGAMA, T.; SABATINI, R.; PETRAKIS, L. Decomposition of chrysotile asbestos by fluorosulfonic acid. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 37, n. 1, p. 79-88, 1998.

TAKATA, A., YAMAUCHI, H., YAMASHITA, K., AMINAKA, M., HITOMI, T., TOYA, T., KOHYAMA, N. Mesothelioma carcinogenesis of chrysotile and forsterite compared and validated by intraperitoneal injection in rat. **Industrial health**, 2024.

TEIXEIRA, C. A. N., MENDES, A. P. D. A., COSTA, R. C. D., KOBLITZ, A. C. V., LAGE, E. S. (2021). **Neutralidade de carbono: reflexões sobre estratégias e oportunidades para o Brasil**. Revista do BNDES, v. 28, n. 56, ed. esp., 2021.

TEKLAY, A.; YIN, C.; ROSENDAHL, L. Flash calcination of kaolinite rich clay and impact of process conditions on the quality of the calcines: A way to reduce CO₂ footprint from cement industry. **Applied Energy**, v. 162, p. 1218–1224, 2016.

UCAROGLU, S.; TALINLI, I. Recovery and safer disposal of phosphate coating sludge by solidification/stabilization. *Journal of environmental management*, v. 105, p. 131-137, 2012. **environmental management**, 105, 131-137.

VAUGHAN, A.; NESLEN, A. **Global emissions nearly stall after a decade of rapid growth, report shows**. The Guardian, 2015.

VIANI, A., GUALTIERI A. F. **Preparation of magnesium phosphate cement by recycling the product of thermal transformation of asbestos containing wastes**, **Cement and Concrete Research**, 58, 56-66, DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.016, 2014.

VIANI, A., GUALTIERI, A. F., POLLASTRI, S., RINAUDO, C., CROCE, A.,URSO, G. Crystal chemistry of the high temperature product of transformation of cement-asbestos. **Journal of Hazardous Materials**, 248, 69-80, 2013.

VIRTA, R. L. **Worldwide asbestos supply and consumption trends from 1900 through 2003**. US Geological Survey, 2006.

VISEDO, G.; PECCHIO, M. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050** / coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019 64 p. 2019

WETZEL, A.; AREND, J. **Adsorbance of superplasticizers on concrete additives: microstructural in-situ experiments**. 15th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials. Delft, The Netherlands: [s.n.]. 2015.

WITEK, J.; KUSIOROWSKI, R. Neutralization of cement-asbestos waste by melting in an arc-resistance furnace. **Waste Management**, v. 69, p. 336–345, 2017.

WU, B., TAO, W. H., FU, X. H., & WANG, F. X. Study on the Performance on Some Admixture of Sulphoaluminate Cement Waterproof Mortar. **Applied Mechanics and Materials**, v. 740, p. 47-50, 2015.

YAN HE, XIONG ZHANG, WANLING HONG, LIANGLIANG SHUI, XIAOFU WANG, HAOREN WANG, LEI PENG. Effects of polycarboxylate superplasticisers with various functional groups on the pore structure of cement mortar. **Advances in Cement Research** 2020 32:11, 510-518.

YLMÉN, R., JÄGLID, U., STEENARI, B. M., & PANAS, I. Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 5, p. 433-439, 2009.

YVON, Y., SHARROCK, P. Characterization of Thermochemical Inactivation of asbestos containing wastes and recycling the mineral Residues in cement products. **Waste Biomass Valor** 2, 169-181. <https://doi.org/10.1007/s12649-011-9063-9>, 2011.

ZHENG, W. M., SUN, H. J., PENG, T. J., & ZENG, L. Novel Preparation of Foamed Glass-ceramics from Asbestos Tailings and Waste Glass by Self-expansion in High Temperature. **Journal of Non Crystalline Solids**, v. 529, paper 119767, 2020.

ZUCCHETTI, R. A. M. **Crisotila brasileira como suporte de catalisadores: aplicação na oxidação de alcoois com radiação de microondas**. Tese de Doutorado. [sn]. 1994.

9 ANEXOS

ANEXO A

A norma NBR 13281 (ABNT, 2023) especifica que as argamassas ARV-I, ARV-II, ARV-III e AET, independentemente da forma de produção, quer sejam produzidas em canteiro, industrializadas, estabilizadas, usinadas, prontas para uso ou outras, devem atender aos requisitos e critérios e ser classificadas conforme as faixas estabelecidas nas Tabelas apresentadas abaixo.

Tabela 1 – Retenção de água

Classe	Retenção de água (U) (%)	Método de ensaio
U0	$U < 70$	ABNT NBR 13277
U1	$70 \leq U < 80$	
U2	$80 \leq U \leq 90$	
U3	$U > 90$	

Fonte: (NBR 13281, ABNT 2023).

Tabela 2 – Densidade de massa no estado fresco

Classe	Densidade de massa no estado fresco (DF) (kg/m³)	Método de ensaio
DF0	$DF < 1\ 400$	ABNT NBR 13278
DF1	$1\ 400 \leq DF < 1\ 600$	
DF2	$1\ 600 \leq DF < 1\ 800$	
DF3	$1\ 800 \leq DF < 2\ 000$	
DF4	$DF \geq 2\ 000$	

Fonte: (NBR 13281, ABNT 2023).

Tabela 3 – Resistência potencial de aderência à tração ao substrato

Argamassa	Classe	Resistência potencial de aderência à tração ao substrato (Ri) (MPa)	Método de ensaio
ARV-I, ARV-II e ARV-III para produção de revestimento interno destinado à aplicação de pintura e/ou textura	RA1	$R_i \geq 0,20$	ABNT NBR 15258
ARV-I, ARV-II e ARV-III para produção de revestimento interno destinado à aplicação de peças cerâmicas (ver ABNT NBR 13754) a ou de revestimento externo	RA2	$R_i \geq 0,30$	
AET	RA3	Critérios estabelecidos na NBR 16648 (ABNT, 2018)	

Fonte: (NBR 13281, ABNT 2023).

Tabela 4 – Resistência potencial à tração superficial.

Argamassa	Classe	Resistência potencial à tração superficial (Ri) (MPa)	Método de ensaio
ARV-I, ARV-II, ARV-III e AET para produção de revestimento interno destinado à aplicação de pintura e/ou textura	RS1	$R_i \geq 0,20$	ABNT NBR 15258
ARV-I, ARV-II, ARV-III e AET para produção de revestimento interno destinado à aplicação de peças cerâmicas (ver ABNT NBR 13754) ou de revestimento externo destinado à aplicação de pintura e/ou textura	RS2	$R_i \geq 0,30$	ABNT NBR 15258
ARV-I, ARV-II, ARV-III e AET para produção de revestimento externo destinado à aplicação de placas cerâmicas (ver ABNT NBR 13755)	RS3	$R_i \geq 0,50$	ABNT NBR 15258

Fonte: (NBR 13281, ABNT 2023).

Tabela 5 – Módulo de elasticidade dinâmico

Classe	Módulo de elasticidade dinâmico (Ed) (MPa)	Método de ensaio
E1	$12\ 000 < E_d \leq 14\ 000$	ABNT NBR 15630
E2	$9\ 500 < E_d \leq 12\ 000$	
E3	$7\ 000 < E_d \leq 9\ 500$	
E4	$E_d \leq 7\ 000$	

Fonte: (NBR 13281, ABNT 2023).

Tabela 6 – Variação dimensional (retração ou expansão linear)

Classe	Variação dimensional (ϵ_i) (mm/m)	Método de ensaio
VD1	$-1,10 > \epsilon_i \geq -1,20$ (retração entre 1,11 e 1,20)	ABNT NBR 15261
VD2	$-0,90 > \epsilon_i \geq -1,10$ (retração entre 0,91 e 1,10)	
VD3	$-0,70 > \epsilon_i \geq -0,90$ (retração entre 0,71 e 0,90)	
VD4	$0,0 \geq \epsilon_i \geq -0,70$ (retração entre 0 e 0,70)	
VD5	$\epsilon_i > 0,00$ (expansão)	

Fonte: (NBR 13281, ABNT 2023).

Tabela 7 – Critérios para os requisitos de módulo de elasticidade dinâmico e de variação dimensional

Requisito	Classe	Critério por tipo de argamassa			
		ARV-I	ARV-II	ARV-III	AET
Módulo de elasticidade dinâmico MPa	E	E1 a E4	E2 a E4	E3 a E4	E4
Variação dimensional mm/m	VD	VD1 a VD4	VD2 a VD4	VD3 a VD4	VD4

Fonte: (NBR 13281, ABNT 2023).

Tabela 8 – Densidade de massa no estado endurecido

Classe	Densidade de massa no estado endurecido (DEE) (kg/m³)	Método de ensaio
DE0	$DE < 1\ 200$	ABNT NBR 13280
DE1	$1\ 200 \leq DE < 1\ 400$	
DE2	$1\ 400 \leq DE < 1\ 600$	
DE3	$1\ 600 \leq DE < 1\ 800$	
DE4	$DE \geq 1\ 800$	

Fonte: (NBR 13281, ABNT 2023).

Tabela 9 – Resistência à tração na flexão

Classe	Resistência à tração na flexão (Rf) (MPa)	Método de ensaio
R1	$Rf < 0,5$	ABNT NBR 13279
R2	$0,5 \leq Rf < 1,5$	
R3	$1,5 \leq Rf < 3,0$	
R4	$Rf > 3,0$	

Fonte: (NBR 13281, ABNT 2023).