



IASMIN MARTINS ALVES DE CARVALHO RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DA MICROFIBRA DE RESÍDUO DE LÃ DE
VIDRO COMO REFORÇO ALTERNATIVO PARA
COMPÓSITOS DE FIBROCIMENTO COM POLPA
CELULÓSICA DE PINUS**

LAVRAS – MG

2023

IASMIN MARTINS ALVES DE CARVALHO RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DA MICROFIBRA DE RESÍDUO DE LÃ DE VIDRO COMO
REFORÇO ALTERNATIVO PARA COMPÓSITOS DE FIBROCIMENTO
COM POLPA CELULÓSICA DE PINUS**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Keoma Defáveri Carmo e Silva

Orientador

Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva

Coorientador

LAVRAS – MG

2023

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Rodrigues, Iasmin Martins Alves de Carvalho.

Avaliação da microfibras de resíduo de lã de vidro como reforço alternativo para compósitos de fibrocimento com polpa celulósica de pinus / Iasmin Martins Alves de Carvalho Rodrigues. - 2023.

81 p. : il.

Orientador(a): Keoma Defáveri do Carmo E Silva.

Coorientador(a): Guilherme Jorge Brigolini Silva.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Resíduo de lã de vidro. 2. Fibra vegetal. 3. Fibrocimento. I. E Silva, Keoma Defáveri do Carmo. II. Silva, Guilherme Jorge Brigolini. III. Título.

IASMIN MARTINS ALVES DE CARVALHO RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DA MICROFIBRA DE RESÍDUO DE LÃ DE VIDRO COMO REFORÇO
ALTERNATIVO PARA COMPÓSITOS DE FIBROCIMENTO COM POLPA CELULÓSICA DE
PINUS**

**EVALUATION OF GLASS WOOL WASTE MICROFIBER AS AN ALTERNATIVE
REINFORCEMENT FOR FIBERCEMENT COMPOSITES WITH PINE CELLULOSIC PULP**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Biomateriais da Universidade
Federal de Lavras, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 29 de setembro de 2023.

Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva – UFOP

Dr.a Bárbara Maria Ribeiro Guimarães De Oliveira – UFC

Dr. Saulo Rocha Ferreira – UFLA

Prof. Dr. Keoma Defáveri Carmo e Silva

Orientador

LAVRAS – MG

2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos às pessoas especiais que contribuíram de maneira significativa para a realização desta dissertação de mestrado. Suas presenças, apoio e amor incondicional foram fundamentais ao longo dessa jornada, e gostaria de expressar minha profunda gratidão.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me concedido saúde e forças para enfrentar todas as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento deste estudo, bem como nos desafios da vida em geral.

Aos meus pais, Taísa Martins Alves e Marcos José de Carvalho Rodrigues, e à minha família, em especial à minha avó, Dalva Martins, meu amor e gratidão são imensuráveis. Agradeço por todo o amor, apoio e incentivo constantes ao longo desta jornada. Sem vocês, nada disso teria sido possível. Sou profundamente grata por todo o suporte financeiro, emocional e moral que vocês me proporcionaram durante todo o processo. Sem a confiança e o suporte inabaláveis de vocês, esta conquista não seria possível. Espero que este trabalho seja uma prova do quanto suas presenças foram fundamentais em minha vida.

Aos meus professores do programa, em particular ao meu orientador, Prof. Dr. Keoma Defáveri Carmo e Silva, agradeço por toda a orientação, conhecimento compartilhado e apoio ao longo da construção deste trabalho. Sua expertise e dedicação foram essenciais para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos meus amigos, que sempre estiveram torcendo por mim e celebraram cada etapa vencida, em especial à “casa das 7”, aos que conheci no programa, na atlética e na cidade de Lavras, agradeço por todo o companheirismo, acolhimento, força e ajuda ao longo desse período. Vocês tornaram meus dias mais alegres, divertidos e memoráveis, com momentos de descontração que jamais serão esquecidos.

Ao vôlei da UFLA, da atlética das engenharias "XARADA" e a todo o pessoal da "SELT", agradeço por me proporcionarem um espaço, me acolherem e me permitirem participar de diversos campeonatos, conquistando medalhas, troféus e vivendo momentos inesquecíveis.

Ao Núcleo de Estudos em Madeira (NEMAD), agradeço por todas as experiências valiosas que adquiri e vivenciei ao fazer parte desse grupo.

À Universidade Federal de Lavras, agradeço por toda a estrutura e recursos disponibilizados, que foram fundamentais para a realização deste estudo.

Ao programa de pós-graduação em Engenharia de Biomateriais, agradeço pela oportunidade de fazer parte dele e pela contribuição para o meu crescimento acadêmico e profissional.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), agradeço pelo apoio financeiro concedido, que me possibilitou dedicar-me integralmente ao mestrado e realizar esta pesquisa de forma mais abrangente, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

A todos mencionados e a todos os que de alguma forma estiveram presentes, meu mais sincero e profundo agradecimento. Vocês foram peças fundamentais nessa conquista e sou imensamente grata por todo o apoio, incentivo e contribuição ao longo dessa jornada.

*“Você não tem que ser grande para começar, mas
você tem que começar, para ser grande”*

Zig Ziglar

RESUMO

O fibrocimento é amplamente utilizado no mundo, porém, com a proibição do uso de amianto, torna-se necessário buscar novas alternativas. Nesse cenário, o reaproveitamento do resíduo de lã de vidro (RLV) surge como uma opção promissora. Atualmente, quantidades significativas desse resíduo são produzidas e frequentemente descartadas em aterros, causando danos ambientais a longo prazo. Com isso, o objetivo principal do trabalho é avaliar o emprego do RLV em matrizes à base de cimento Portland reforçadas com polpa celulósica de Pinus (PCP). O processo incluiu o beneficiamento do RLV e das folhas Kraft de Pinus, sendo submetidos à caracterização física, química, mineralógica e morfológica. Os compósitos de fibrocimento foram confeccionados utilizando cimento Portland do tipo CPV-ARI, fíler calcário, fibras longas de Pinus e RLV. A incorporação do RLV foi realizada em diversas proporções, incluindo uma condição de referência (0%) e variações de 1%, 2%, 6%, 8% e 25%, em relação à massa do compósito. Os processos de fabricação dos compósitos ocorreram através do método de simulação Hatschek, sendo seguidos de cura por períodos de 7, 28 e 90 dias. Posteriormente, os compósitos foram submetidos a análises físicas e mecânicas. Além disso, as pastas de cimento foram produzidas seguindo a mesma proporção à utilizada para os compósitos, sendo submetidas à análise microestrutural, conduzida por meio de análises químicas, mineralógicas e morfológicas. Através das análises realizadas foi possível observar que o emprego do RLV na matriz cimentícia proporcionou uma melhor relação fibra/matriz, resultados obtidos através do MEV, o que contribuiu para a melhoria do desempenho mecânico na resistência a tração na flexão (MOR) dos compósitos (com valores de até 58% de aumento), incremento relacionado a mudanças na porosidade do compósito e à formação de uma matriz mais densa e menos porosa. A análise química demonstrou que o RLV é composto principalmente por sílica, alumínio, cálcio e ferro e com estrutura amorfa, características que sugerem seu potencial como uma pozolana. Esses resultados demonstram o potencial do RLV como uma matéria-prima alternativa na produção de compósitos, gerando benefícios ambientais e reduzindo a necessidade de descarte em aterros.

Palavras chaves: Resíduo de Lã de vidro. Fibra vegetal. Cimento Portland. Fibrocimento. Hatschek.

ABSTRACT

Fiber cement is widely used in the world, however, with the ban on the use of asbestos, it becomes necessary to seek new alternatives. In this scenario, the reuse of glass wool residue (RLV) appears as a promising option. Currently, significant amounts of this waste are produced and often discarded in landfills, causing long-term environmental damage. Thus, the main objective of this work is to evaluate the use of RLV in matrices based on Portland cement reinforced with cellulose pulp of Pine (PCP). The process included the processing of RLV and Kraft Pinus leaves, being submitted to physical, chemical, mineralogical and morphological characterization. The fiber cement composites were made using CPV-ARI Portland cement, limestone filler, long pine fibers and RLV. The incorporation of RLV was carried out in different proportions, including a reference condition (0%) and variations of 1%, 2%, 6%, 8% and 25%, in relation to the total mass of the composite. The manufacturing processes of the composites occurred through the Hatschek simulation method, followed by curing for periods of 7, 28 and 90 days. Subsequently, the composites were subjected to physical and mechanical analysis. Furthermore, the cement pastes were produced following the same proportion used for the composites, being submitted to microstructural analysis, conducted through chemical, mineralogical and morphological analyses. Through the analyzes carried out, it was possible to observe that the use of RLV in the cementitious matrix provided a better fiber/matrix ratio, results obtained through the SEM, which contributed to the improvement of the mechanical performance in the flexural tensile strength (MOR) of the composites (with values of up to 58% increase), increment related to changes in the porosity of the composite and the formation of a denser and less porous matrix. Chemical analysis showed that RLV is mainly composed of silica, aluminum, calcium and iron and has an amorphous structure, characteristics that suggest its potential as a pozzolan. These results demonstrate the potential of RLV as an alternative raw material in the production of composites, generating environmental benefits and reducing the need for disposal in landfills.

Keywords: Glass Wool Waste. vegetable fiber. Portland cement. Fiber cement. Hatschek.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Comportamento à flexão de um compósito reforçado com fibras..... | 18 |
| Figura 2 - Representação esquemática do processo Hatschek. | 35 |
| Figura 3 - Fluxograma do programa experimental. | 37 |
| Figura 4 – Amostra de a) lã de vidro comercializada, e b) RLV beneficiado | 38 |
| Figura 5 – Amostra de a) folha de papel Pinus comercializada, e b) PCP beneficiado | 39 |
| Figura 6 - Esquema de moldagem dos compósitos. | 42 |
| Figura 7 – Esquema de moldagem das pastas. | 45 |
| Figura 8 - Distribuição granulométrica do RLV. | 47 |
| Figura 9 - FTIR do RLV e da PCP. | 50 |
| Figura 10 - Difratoograma de Raios X do RLV e da PCP. | 51 |
| Figura 11 - MEV a) do RLV e b) da PCP. | 53 |
| Figura 12 - Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão para a propriedade de Densidade Aparente (DA) dos compósitos..... | 54 |
| Figura 13 – Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão para a propriedade de a) Absorção de Água (AA) e b) Porosidade Aparente (PA) dos compósitos.. | 55 |
| Figura 14 – Módulo de ruptura dos compósitos submetidos a diferentes tratamentos em 7, 28 e 90 dias..... | 57 |
| Figura 15 – Módulo de elasticidade dos compósitos submetidos a diferentes tratamentos em 7, 28 e 90 dias..... | 58 |
| Figura 16 - Curvas de Tensão x Deformação para compósitos de REF e RLV (1%, 2%, 6%, 8%, e 25%) nas idades de 7, 28 e 90 dias..... | 59 |
| Figura 17 - Interação fibra/matriz, [1 e 2] Intercepção; [3] <i>Pull-out</i> ; [4] Rompimento. | 61 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Classificação do cimento Portland | 27 |
| Tabela 2 - Composição Química do cimento Portland | 29 |
| Tabela 3 - Composição química (FRX) do RLV e da Lã de vidro comercial | 32 |
| Tabela 4 -Requisitos de resistência à flexão | 34 |
| Tabela 5 - Traço dos compósitos..... | 41 |
| Tabela 6 - Traço das pastas..... | 44 |
| Tabela 7 - Resultados da Análise de FRX | 49 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA – Absorção de água;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

RLV – Resíduo de Lã de Vidro;

DA – Densidade aparente;

DRX – Difração de raios-X

FRX – Fluorescência de raios-X;

FTIR – Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier;

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura;

Mi – Massa dos corpos de prova imerso em água;

MOE –Módulo de elasticidade;

MOR – Modulo de ruptura;

Mq - Massa dos corpos de prova após queima;

Ms – Massa dos corpos de prova após-secagem;

Mu – Massa dos corpos de prova saturado com água;

PA – Porosidade aparente;

PCP – Polpa celulósica de Pinus;

PF – Perda ao fogo;

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 | OBJETIVOS | 16 |
| 2.1 | Objetivo geral | 16 |
| 2.2 | Objetivos específicos | 16 |
| 3 | REFERENCIAL TEÓRICO | 17 |
| 3.1 | Fibrocimento..... | 17 |
| 3.1.1 | Interface fibra/matriz | 20 |
| 3.1.2 | Parâmetros de interação fibra/matriz | 21 |
| 3.2 | Fibra natural vegetal..... | 22 |
| 3.3 | Fibra de Pinus..... | 23 |
| 3.4 | Fibras de amianto..... | 24 |
| 3.5 | Cimento Portland | 26 |
| 3.5.1 | Tipos de cimento Portland..... | 26 |
| 3.5.2 | Química do cimento Portland | 28 |
| 3.5.3 | Hidratação do Cimento Portland..... | 29 |
| 3.6 | Fíler Calcário | 30 |
| 3.6.1 | Química do Fíler Calcário | 30 |
| 3.7 | Resíduo de lã de vidro (RLV)..... | 31 |
| 3.8 | Processo de Hatschek..... | 33 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 36 |
| 4.1 | Materiais | 36 |
| 4.2 | Métodos | 36 |
| 4.2.1 | Beneficiamento das matérias-primas..... | 38 |
| 4.2.2 | Caracterização das matérias-primas..... | 39 |
| 4.2.3 | Formulação e moldagem dos compósitos | 41 |
| 4.2.4 | Análises dos compósitos | 42 |
| 4.2.5 | Formulação e moldagem das pastas | 44 |
| 4.2.6 | Análise microestrutural das pastas..... | 45 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 46 |
| 5.1 | Análise das matérias-primas | 46 |
| 5.1.1 | Análise física | 46 |
| 5.1.2 | Análise química | 48 |
| 5.1.3 | Análise mineralógica | 50 |
| 5.1.4 | Análise morfológica..... | 52 |
| 5.2 | Análises dos compósitos | 53 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 5.2.1 | Análise físicas..... | 53 |
| 5.2.2 | Análise das propriedades mecânicas | 55 |
| 5.3 | Análise microestrutural da pasta..... | 61 |
| 5.3.3 | Análise morfológica..... | 61 |
| 6 | CONCLUSÕES | 63 |
| 7 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 64 |
| | REFERÊNCIAS | 65 |

1 INTRODUÇÃO

O produto de fibrocimento é um material amplamente utilizado em todo o mundo, com um mercado global estimado em US\$ 17.713,2 milhões anuais (MARKET REPORTS WORLD 2023), devido às suas propriedades versáteis e durabilidade, com uma gama muito grande de aplicações na construção civil e agricultura, como materiais de cobertura planos ou ondulados, painéis de revestimento, forros, divisórias e caixas d'água (COELHO, 2017). Essa alta demanda reflete a ampla utilização desse material em diversos setores da indústria e construção em todo o mundo. O fibrocimento é um material composto por uma matriz de cimento reforçada com fibras, que podem ser de origem vegetal, animais mineral ou sintética, oferecendo um bom desempenho térmico e acústico, bem como uma alternativa econômica e durável aos materiais tradicionais (SANDIN, ROOS, JOHANSON, 2019).

O maior objetivo do emprego dessas fibras é a necessidade de reduzir a fissuração dos materiais cimentícios, já que a matriz à base de cimento Portland apresenta comportamento frágil. Logo, a inserção de fibras resulta na redução da fissuração da matriz, interligando fibra/matriz, como consequência ocorre o aumento da tenacidade, da resistência à tração e resistência ao impacto do compósito. Além disso, o material não se rompe bruscamente após o início da fissuração da matriz por apresentar uma deformação plástica significativa de tensão/deformação (LIMA, 2007; TOLÊDO; ROMILDO, 2003).

Anteriormente a fibra de amianto era uma das fibras mais aplicadas no mundo, porém, seu emprego é associado a doenças pulmonares e fatores de risco, fazendo com que muitos países banissem o uso do amianto como reforço (IKAI, et al. 2010, SHAH; PORTER; VOLLRATH, 2014). Por essa razão, muitos pesquisadores estão direcionando seus esforços para o desenvolvimento de trabalhos com fibras alternativas, que possam oferecer características semelhantes de reforço, porém com menor impacto à saúde humana e ao meio ambiente, como por exemplo fibras sintéticas e fibras vegetais (ARDANUY, et al. 2015; SANTOS, et al. 2015), entre outros.

As fibras vegetais, principalmente as de polpa celulósica, em função de sua abundância e disponibilidade, se destacam na maioria dos estudos, em especial a têxtil e aquelas disponíveis comercialmente (polpas Kraft) de Eucalipto e Pinus (QUEIROZ et al., 2020; TONOLI, 2009), por serem amplamente disponíveis na maioria dos países em desenvolvimento, obtidas de árvores madeireiras ou de plantas anuais, apresentando características interessantes como baixa densidade, caráter renovável, biodegradável e disponibilidade a baixo custo e em uma grande variedade de morfologias e razões de aspecto (TONOLI, 2009).

O reaproveitamento de resíduos industriais vem gerando grande interesse, pois quando incorporados em matrizes cimentícias podem, em muitos casos, melhorar seu desempenho mecânico e durabilidade, bem como gerar benefícios econômicos e ambientais, uma vez que esses materiais muitas vezes são descartados implicando em custos de disposição. Seu emprego torna-se uma matéria-prima alternativa para a indústria, contribuindo assim para a redução na extração de recursos naturais não renováveis. O setor da construção civil se destaca pelo grande potencial de aproveitamento de resíduos (BORGES, et al. 2007; GARBALINSKA, et al. 2014; VIEIRA, 2016).

O resíduo de lã de vidro (RLV) é gerado por diversos setores industriais, onde originalmente são aplicados como materiais de isolamento acústico e térmico. O RLV é um resíduo composto de microfibras de vidro entrelaçadas e aglutinadas por uma resina sintética, dando-lhe um efeito visual esverdeado a amarelado (FERREIRA, 2023). Atualmente nos países da União Europeia são gerados cerca de 2,5 mil/ton de resíduos de lã mineral, sendo que 30% desse total são representados pelo resíduo lã de vidro (YAP et al., 2021). A destinação do RLV é comumente por descarte em aterros, acarretando prejuízos ao meio ambiente em médio e longo prazo, implicando um grande volume de espaço de armazenamento (BORGES, 2007, MARMORET, 2009; TSUKAMOTO, 2014, VIEIRA, 2016, YAP, 2021). Dessa maneira, diversos estudos e pesquisas têm sido desenvolvidos com o objetivo de explorar alternativas para o aproveitamento desse resíduo na produção de novos materiais (BORGES, 2007; NEVES 2015; DEFÁVERI, 2016; DEFÁVERI, 2019; LEMOUGNA, 2021; ADEDIRAN, 2021; PAVLIN, 2021; PAVLIN, 2022, FERREIRA, 2023).

O presente trabalho tem como objetivo o reaproveitamento do RLV como adição e substituição, em compósitos a base de cimento Portland e fibras longas de polpa celulósica de Pinus (PCP). Espera-se produzir compósitos fibrocimento de caráter técnico e ambientalmente corretos, empregando resíduos de difícil reaproveitamento, reduzindo o consumo de cimento Portland.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é avaliar o emprego do resíduo de lã de vidro (RLV) como substituição em compósitos a base de cimento Portland e polpa celulósica de Pinus (PCP).

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho se dão a seguir:

1. Promover a caracterização física, química, mineralógica, morfológica e microestrutural das matérias-primas e do compósito à base de cimento Portland;
2. Analisar as propriedades mecânicas dos compósitos nas idades de 7, 28 e 90 dias.
3. Analisar as propriedades microestruturais (morfológica).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Fibrocimento

O fibrocimento pode ser entendido como um material compósito formado por uma matriz cimentícia (Cimento Portland) reforçada com fibras, que podem ser de origem vegetal, mineral ou sintética, oferecendo um bom desempenho térmico, acústico, resistência à umidade e durabilidade. Além disso, o fibrocimento é reconhecido como uma alternativa econômica em comparação aos materiais tradicionais, tornando-se uma escolha popular na indústria da construção civil (SANDIN, ROOS, JOHANSON, 2019).

O principal objetivo ao utilizar fibras em materiais cimentícios reside na necessidade de mitigar a ocorrência de fissuras. Isso ocorre devido à natureza frágil da matriz composta por cimento Portland. A adição de fibras desempenha um papel fundamental na redução da propagação de fissuras na matriz, promovendo a interligação entre as fibras e a matriz (MENDES, 2019). Como resultado, observa-se um aumento na tenacidade, na resistência à tração e na resistência ao impacto do material composto. Além disso, o material não sofre ruptura imediata após o surgimento das fissuras na matriz, graças à sua capacidade de deformação plástica notável em relação à tensão e deformação (LIMA, 2007; TOLÊDO; ROMILDO, 2003).

O fibrocimento é amplamente empregado em diversos setores da construção civil, desempenhando papéis essenciais em caixas d'água, materiais de construção não estruturais, painéis de revestimento, forros e divisórias. Contudo, é nas telhas que esse material se destaca, consolidando-se como uma escolha popular no ramo da construção. Sua popularidade advém de suas propriedades versáteis, durabilidade excepcional e custo mais acessível em comparação com alternativas concorrentes. Essas características tornam o fibrocimento um segmento particularmente atraente para a população de menor poder aquisitivo, oferecendo uma solução robusta e econômica. A resistência às intempéries e a adaptabilidade a diversos contextos construtivos também contribuem para sua posição proeminente no mercado, proporcionando não apenas eficiência, mas também sustentabilidade econômica a longo prazo (TONOLI et. al., 2010, COELHO, 2017).

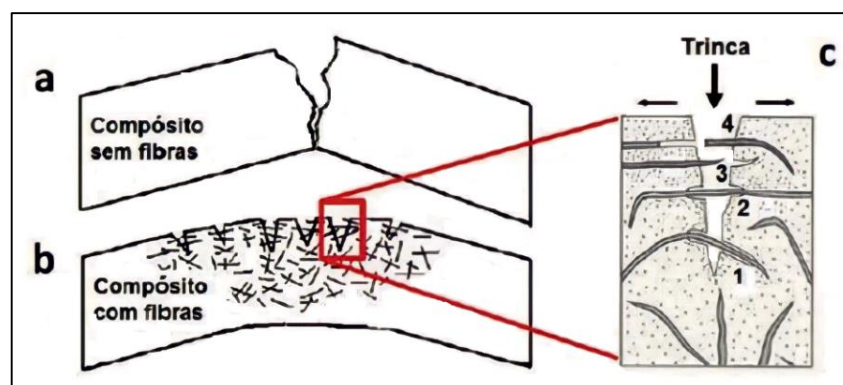
Conforme os dados mais recentes da Market Reports World (2023), o fibrocimento emerge como um produto de alcance global, com uma capacidade de produção anual alcançando a marca de 2,5 milhões de toneladas. Essa produção robusta se traduz em um valor financeiro anual estimado em aproximadamente US\$ 17.713,2 milhões, evidenciando a significativa presença e demanda por esse material na indústria mundial. O relatório financeiro

da Eternit, sobre o exercício do quarto trimestre de 2022, revela que o volume total de telhas de fibrocimento vendido atingiu cerca de 647 mil toneladas, considerando o período de agosto a dezembro, com uma queda de 9% em relação ao desempenho notável registrado em 2021. Vale ressaltar que este último ano foi caracterizado por um desempenho excepcional na indústria de materiais de construção.

Até o ano de 2007 a principal fibra utilizada para a fabricação de fibrocimento era a fibra de amianto, de origem mineral natural, válido das suas propriedades físico-químicas desejáveis (IKAI, et. al., 2010, SHAH; PORTER; VOLLRATH, 2014). Todavia, a fibra foi proibida em vários lugares do mundo, inclusive no Brasil pelo Supremo Tribunal Federal (STF) devido os riscos nocivos à saúde humana (inicialmente com a Lei n. 9.055/1995) (BRASIL, 1995), necessitando desenvolver novas tecnologias para produtos alternativos que possam oferecer características semelhantes de reforço, com menor impacto à saúde humana e ao meio ambiente (ARDANUY, et al., 2015; SANTOS, et al., 2015).

A Figura 1 representa os efeitos da adição de fibras em compósitos a base de cimento Portland no comportamento de flexão. Na Figura 1.a é possível observar um compósito sem fibras após a ruptura e na Figura 1.b um compósito com fibras após a ruptura. A Figura 1.c representa a interação da fibra com a matriz e o caminhamento da trinca através do compósito, mostrando alguns comportamentos da fibra na matriz. A indicação 1 mostra o deslocamento da fibra com a matriz através do compósito, na indicação 2 podemos observar a interceptação da fibra, já na indicação 3 se dá o arrancamento da fibra, conhecido como *pull-out*, na qual a fibra se separa do compósito. Já na representação 4 é possível observar que ocorre o rompimento da fibra devido à flexão sofrida (COUTTS, et al. 2005).

Figura 1 - Comportamento à flexão de um compósito reforçado com fibras.



Fonte: Coutts (2005).

O compósito sem fibras (Figura 1.a), mostra o comportamento mecânico frágil, onde não há reforço. Em contrapartida na Figura 1.b mostra o compósito com fibras, as quais possibilitam o surgimento de mecanismos de tenacificação, promovendo um comportamento mecânico pseudoplástico do compósito, aumentando a resistência mecânica e absorção de energia, com a distribuição de microfissuras ao longo do material (COUTTS, 2005).

A Figura 1.c, exemplifica o processo de trincas, as fibras tendem a ajudar na distribuição de tensões de aderências. Se essas tensões de aderências forem menores que a resistência a fibra, pode haver um descolamento na fibra na matriz, proveniente da ruptura das ligações de hidrogênio na sua interface, apresentado na Figura 1.c [1 e 2]. O arrancamento (*pull-out*) ocorre na Figura 1.c [3], onde acontece o processo de rompimento das ligações de hidrogênio, que resulta em maior tenacidade ao compósito devido ao consumo de energia para fraturar completamente o material. Acontece a ruptura da fibra na Figura 1.c [4], proveniente das fracas ligações físicas e químicas entre a fibra e matriz, resultando na redução de tenacidade do material (COUTTS, 2005). Vale ressaltar que a água desempenha um papel importante no escorregamento das fibras na matriz, fazendo com que as ligações de hidrogênio entre a fibra e a matriz se tornem mais fracas, uma vez que há inserção de moléculas de água entre os grupos hidroxílicos na interface (COUTTS, 2005; ROSSETTO, 2007).

A excelência da interação fibra/matriz se dá na Figura 1.c [1] e na Figura 1.c [2], mostrando a interação de um compósito de fibrocimento, na qual as fibras não se rompem e nem sofrem o arrancamento (*pull-out*), comportamento e interação esperada de um reforço na matriz cimentícia. Essa interação do compósito com as fibras é de extrema importância para alcançar propriedades e características expressivas em termos de parâmetros como resistência à tração e módulos específicos. Essa interação fortalece o material, contribuindo para o desempenho mecânico desejado e para a obtenção de propriedades otimizadas (CALLISTER, 2016).

Vale ressaltar que as fibras não impedem diretamente a formação de fissuras nos compósitos, mas desempenham um papel essencial ao possibilitar o aumento da resistência à tração e ao controlar a propagação das fissuras. Em compósitos que não contêm fibras, a abertura progressiva de uma fenda inicial pode resultar no colapso da matriz. No entanto, nos compósitos que incorporam fibras, a ocorrência e a expansão das fissuras são retardadas. A ruptura do material torna-se um processo mais gradual devido à presença de pontes de transferência formadas pelas fibras, as quais absorvem parte das fissuras durante esse processo, como observado por Ferreira et al. (2017).

3.1.1 Interface fibra/matriz

De acordo com Izquierdo (2011), a interface fibra/matriz é a responsável pelo trabalho de transferências de esforços entre a matriz e o reforço. Alguns parâmetros são importantes para essa interação, como por exemplo o comprimento da fibra, a orientação, quantidade de fibras e a concentração. Quando diferentes tipos de fibras são adicionados à matriz de cimento, podem ocorrer interações físicas e químicas entre as fibras e a pasta de cimento, essas interações podem afetar a dispersão, o alinhamento e a aderência das fibras na matriz. Conforme observado por Li et al. (2008), uma interação inadequada entre a fibra e a matriz resulta em uma interface vulnerável, tornando-se a região mais suscetível a falhas. Essa falha compromete a eficácia do reforço no compósito devido à transferência ineficiente de esforços na interface fibra/matriz. Assim, a estrutura interna dos compósitos e sua interação, especialmente a aderência entre fibra e matriz, exercem uma influência significativa no desempenho e na durabilidade do material (SAVASTANO JR, 1994).

A otimização da aderência pode ser efetivamente alcançada através do aprimoramento do desempenho na zona de transição, onde as fibras entram em contato direto com a matriz de cimento. Essa melhoria visa promover uma colaboração mais eficaz entre as duas fases, fortalecendo a interação entre as fibras e a matriz para maximizar a coesão e a eficiência do compósito. Para a melhoria do desempenho tanto na aderência quanto na zona de transição, diversos fatores críticos podem ser destacados, tais como a morfologia e rugosidade das fibras, sua absorção e porosidade, a incorporação de aditivos químicos e a aplicação de tratamento superficial (SAVASTANO JR, 2000).

A presença de portlandita, conhecida como hidróxido de cálcio, na matriz pode ter efeitos adversos na aderência fibra/matriz, especialmente no contexto da matriz de cimento Portland. Em quantidades substanciais, a portlandita pode induzir variações dimensionais nas fibras vegetais devido à perda de água durante o processo de moldagem. Esse fenômeno resulta na concentração de portlandita na zona de transição, aumentando o risco de descolamento na interface fibra-matriz. Por outro lado, fibras sintéticas ou minerais, devido à sua resistência a variações dimensionais, não estão sujeitas a essas flutuações, contribuindo para uma interação mais estável na interface fibra/matriz. A compreensão aprofundada desses efeitos desempenha um papel crucial no desenvolvimento de compósitos, sendo essencial para a otimização das propriedades mecânicas e o aprimoramento da durabilidade do material (SAVASTANO JR, 2000).

3.1.2 Parâmetros de interação fibra/matriz

O comprimento da fibra influencia diretamente nas características mecânicas de um compósito e é considerado um fator preponderante na ruptura do compósito. É necessário um comprimento mínimo, chamado comprimento crítico, para que haja uma ancoragem da fibra na matriz, essa ancoragem pode ser otimizada empregando-se fibras de superfície rugosa, com maiores relações de aspecto e isentas de impurezas na superfície, pois a presença de fibras lisas pode diminuir a aderência fibra/matriz (CALLISTER, 2016). Para que a fibra permaneça inserida na matriz cimentícia (como exemplificado na Fig1.c) esse comprimento deve atender o parâmetro de ser menor ou igual a tensão limite relacionada ao comprimento da fibra, ou seja, o comprimento limite para uma dada tensão superficial aplicada, caso contrário, a fibra será extraída da matriz (ARAÚJO, C. T. F, 2005; YAZICI, 2007). As fibras podem apresentar diferentes dimensões, tanto em comprimento quanto em espessura, abrangendo desde a escala nano até a macrométrica. As fibras longas e médias com comprimento superior a 400 μm , geralmente têm uma habilidade maior de se entrelaçar entre si, o que ajuda na distribuição das tensões no material, conforme mencionado por Peruzzi (2002). Em contrapartida, fibras curtas, com um comprimento médio de cerca de 50 μm , têm a tendência de se dispersar de maneira mais uniforme dentro da matriz, auxiliando na retenção da água de amassamento na mistura (SIQUEIRA 2006).

A orientação da fibra no compósito apresenta influência significativa sobre a resistência à flexão e outras propriedades como compressão, cisalhamento e tração do compósito, pois age diretamente como agente transferidor de tensões (BERNARDI, 2003). Segundo Callister (2008) é possível haver três tipos de orientação: fibras contínuas e alinhadas, onde as propriedades mecânicas são altamente anisotrópicas, na direção do alinhamento, o reforço e a resistência são máximos; perpendicular ao alinhamento; fibras descontínuas e alinhadas, onde é possível atingir resistência e rigidez significativas na direção longitudinal; e fibras descontínuas com orientação aleatória, onde apesar de algumas limitações na eficiência do reforço, as propriedades são isotrópicas. As fibras descontínuas com orientação aleatória tem sido objeto de estudo por autores que avaliaram as propriedades de matrizes com adição de microfibras (HILLES et. Al., 2019; OJHA et al., 2022;)

Em relação a quantidade de fibras na matriz quanto maior teor de fibras, maior será a interceptação de microfissuras, melhorando os fatores de tenacidade, resistência e de tensão máxima. Por outro lado, com o aumento da quantidade de fibras, ocorre a redução da trabalhabilidade da mistura, maior absorção de água e acréscimo da área superficial de

molhagem, podendo causar problemas de homogeneidade (IZQUIERDO, 2011). Além de ser comum acontecer com algumas fibras longas o aumento na quantidade de agrupamento, causando uma alta concentração de fibras em um determinado local e áreas com excesso de matriz, reduzindo a eficiência do compósito (ROWELL, 1997).

3.2 Fibra natural vegetal

Segundo Bernardi (2003) e Mano (2015), define-se uma fibra natural como um corpo flexível de formato cilíndrico, apresentando um alto comprimento em relação ao diâmetro. Brandt (2008) complementa essa definição afirmando que as fibras vegetais são um recurso natural e estão disponíveis em todo o planeta, podendo ser divididas em fibras minerais, animais e vegetais.

A origem das fibras vegetais vem das plantas vasculares e podem ser classificadas quanto a sua origem como fibras madeireiras e não madeireiras. A utilização e aplicação destas, como reforço em compósitos, depende da disponibilidade, do custo e das propriedades inerentes a cada fibra. Já a capacidade de reforço depende do tipo da fibra, da quantidade usada, da sua geometria (relação comprimento x espessura), da sua dispersão e distribuição na matriz cimentícia, da sua resistência e da capacidade de aderência à matriz (ARDANUY et al., 2015). De acordo com Agopyan (1991), as fibras vegetais dividem-se em fibras de baixo e alto módulo de elasticidade. Aquelas com baixo módulo destacam-se por apresentarem maior resistência ao impacto, conferindo ao compósito uma notável capacidade de absorção de choques e, conseqüentemente, um aumento em sua tenacidade, em aplicações onde o material está sujeito a forças súbitas ou impactos, conferindo-lhe uma maior durabilidade e resistência a danos. Já as fibras de alto módulo contribuem para aprimorar a resistência à tração do compósito, fortalecendo sua estrutura e proporcionando maior rigidez.

Existem vários tipos de fibras vegetais, as madeireiras e as não madeireiras, nas quais são testadas como reforço em compósitos de fibrocimento, no intuito de substituir as propriedades da fibra de amianto. Dentre as diversas fibras analisadas, destaca-se as fibras madeireiras como sendo a mais utilizada nos últimos anos (ARDANUY et al. 2015; NEVES JR. et al. 2019). A fibra vegetal madeireira mais utilizada e consolidada na indústria de fibrocimento são as fibras de celulose obtidas a partir das madeiras de pinus e do eucalipto, que proporcionam fibras com comprimentos de ordem de 1,0 a 2,5 mm (COUTTS, 2005; TONOLI et. al., 2010).

A utilização destas fibras vegetais como reforço em compósitos cimentícios é motivada pela disponibilidade de recursos naturais na área específica da sua aplicação. Diversas fibras têm sido exploradas nesses estudos, tais como polpa de celulose, cânhamo, sisal, bambu, juta, entre outras, como destacado por Tonoli et al. (2010a).

3.3 Fibra de Pinus

A fibra celulósica de pinus é obtida a partir de espécies de árvores coníferas e possui um comprimento que varia entre 2 e 5 milímetros, sendo classificada como fibra longa. Essa fibra é amplamente empregada na produção de papéis que requerem alta resistência, desempenhando um papel crucial nas camadas internas de produtos como papel cartão, papel de embalagem e papel jornal (ABRAF, 2023).

A plantação de pinus no Brasil abrange aproximadamente 1,8 milhão de hectares e é predominantemente encontrada na Região Sul do país, representando 84,6% da área total. Essa preferência regional é atribuída às condições climáticas propícias para o cultivo de pinus, bem como à proximidade dos principais centros de processamento dessa madeira. Um indicador significativo do impacto econômico e da demanda crescente por essa matéria-prima é o notável aumento na produção de toras de madeira de pinus destinadas à fabricação de papel e celulose. De acordo com dados do IBGE em 2022, observou-se um impressionante crescimento de 276,5% nesse setor entre os anos de 2019 e 2020, destacando a sua relevância na indústria de papel, que busca constantemente fontes sustentáveis e eficientes para suprir a crescente demanda por produtos de papel de alta qualidade.

Ao considerar essa ascensão na produção, é essencial conectar esse cenário ao processo de fabricação de celulose kraft, processo mais usual para a produção de pasta de papel (GONÇALVES, 2014), com aproximadamente 80% da produção total. A origem da palavra "kraft" tem sua origem na palavra alemã que significa "força" conforme destacado por Quina et al. (2020), ganha relevância no contexto da indústria de papel, representando um método essencial na polpação química.

A celulose kraft é obtida por meio de uma polpação que envolve a utilização de uma solução alcalina, comumente uma mistura de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio. Esse método, conhecido por sua eficiência na remoção da lignina da madeira, destaca-se como um processo essencial na produção de celulose de alta qualidade (FARIAS, 2015). Dessa forma, a fibra celulósica de pinus, ao passar pelo processo de polpação kraft, contribui para a produção de celulose resistente e versátil. Esse ciclo integrado, desde o cultivo de pinus até a obtenção

da celulose kraft, evidencia a importância estratégica dessa matéria-prima na indústria de papel, fornecendo produtos que atendem não apenas aos requisitos de resistência, mas também às crescentes demandas por sustentabilidade na produção de papel.

Pesquisadores vêm investigando possibilidades para o uso da fibra celulósica de pinus e papel kraft em produtos de fibrocimentos, apontando vantagens de resistência, desempenho, entre outros.

Sacon, Menochelli e Ratnieks (1994), mostraram que a fibra de Pinus, por ser uma fibra longa, aumenta a resistência ao rasgo, e que a resistência à tração e fraturamento se mantêm correlacionadas ao longo da variação da mistura.

Morton et al. (2010) investigaram o desempenho das fibras de Pinus em produtos de fibrocimento pelo processo kraft. Os resultados indicaram que os compósitos de fibrocimento apresentaram um desempenho notável quando curados ao ar (envelhecidos naturalmente) e autoclavados, superando outras fibras de madeira macia frequentemente utilizadas em aplicações de fibrocimento.

Claramunt et al. (2011) compararam compósitos de fibrocimento reforçados com fibras de polpa kraft de Pinus sp. e fibras de algodão. Embora as fibras de algodão tenham mostrado melhor resistência individual em ensaios de tração, os compósitos com polpa de Pinus sp. apresentaram desempenho superior. Esse resultado foi atribuído à maior proporção entre comprimento e diâmetro das fibras de Pinus sp. (19% maior do que as fibras de algodão), destacando a influência crucial da geometria das fibras no desempenho dos compósitos.

Morais et al., (2022) adicionaram fibras celulósicas, provenientes do reaproveitamento de embalagens de papel Kraft de cimento Portland, e avaliaram seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas do compósito e concluíram com resultados satisfatórios no traço de adição de 0,5 de fibras celulósicas de papel kraft de cimento Portland.

3.4 Fibras de amianto

O amianto é o nome genérico de um grupo minerais de silicatos fibrosos presentes na natureza (rios, lagos, jazidas e nas águas do subsolo), encontrado no meio ambiente em forma de rocha, de onde é extraída as fibras, conhecido também como asbesto, referente a palavra grega indestrutível (AGUDO, 2001; ETERNIT, 2009).

A incorporação da fibra de amianto no mercado brasileiro destacou-se principalmente na produção de materiais de fibrocimento, uma composição de cimento e fibras de amianto, com uma presença significativa na indústria por décadas em escala global. Entretanto, é

importante destacar que as fibras de amianto, devido à sua natureza fina, podem ser liberadas no ambiente durante o processo de abrasão ao longo do tempo. A inalação dessas fibras, especialmente quando utilizadas em telhas e durante o processo de extração, está associada a diversos problemas pulmonares, tais como fibrose pulmonar, asbestose, câncer, entre outros (IKAI, 2010; JUNIRO; AGOPYAN, JOHN, 2004; PIRES, 2017).

Em 2006, a “World Health Organization” (WHO), afirmou que 90 mil pessoas morram por ano em decorrência à essa exposição e que 125 milhões de pessoas foram expostas ao amianto em seu local de trabalho. De acordo com Crisotila Brasil, (2009) a sua produção na última década chegou a 200.000 ton/ano e contabilizou cerca de 10.000 trabalhadores contaminados na atividade de mineração, sendo que 98% deste consumo é voltado para materiais de fibrocimento.

Até 2007, a fibra predominante empregada na produção de fibrocimento era o amianto, uma fibra de origem mineral natural escolhida devido às suas propriedades físico-químicas desejáveis. Contudo, a fibra de amianto foi proibida em diversos países, incluindo o Brasil, por decisão do Supremo Tribunal Federal (STF) em virtude dos riscos prejudiciais à saúde humana, inicialmente abordados pela Lei nº 3.055/1995. Esse cenário demandou a exploração de novas tecnologias para o desenvolvimento de produtos alternativos (ARDANUY, et al., 2015; SANTOS, et al., 2015).

Com isso, vieram as alternativas para produtos de fibrocimento sem amianto, encontrando-se no mercado alguns substitutos da fibra, entre eles silicato de cálcio, fibra de carbono, fibra de vidro, fibra de celulose, fibra cerâmica, fibra de aço e algumas fibras orgânicas tais como aramida, polietileno, polipropileno e politetrafluoretileno (MARQUES et al., 2016). Consequente, de acordo com Dias (2009), 74% dos produtos que são fabricados no Brasil, sem utilizar o amianto como reforço, apresentam resistência mecânica satisfatória, estanqueidade, tenacidade com valor maior que a encontrada nos produtos com amianto, porém, ocorre frequentemente o surgimento de fissuração de borda (AKERS, 2010).

Nesse sentido, Dias, Savastano e John (2010), concluíram que é necessário buscar novas tecnologias para produção de fibrocimento sem amianto. E que de acordo com Silva (2022), existe a necessidade de encontrar fibras alternativas de baixo custo após essa proibição.

Diversos pesquisadores e indústrias estão trabalhando no desenvolvimento de fibras alternativas que possam substituir o amianto sem comprometer o desempenho dos materiais. Essas fibras alternativas têm como objetivo oferecer propriedades similares ao amianto, mas sem os riscos à saúde associados. Ressaltando pesquisas com a utilização de fibras vegetais e sintéticas, em substituição às fibras de amianto como reforço em fibrocimento (COUTTS, R.

S. P., 1988, 2005; SAVASTANO JUNIOR, H, 2000; SIQUEIRA, J. E. L, 2006; TONOLI G.H.D, 2006; PIZZOL, 2013; SANTOS; TEIXEIRA; SAVASTANO JUNIOR, 2017; LEMOS, A. M.; FRENDEBERG, F. C, 2019).

3.5 Cimento Portland

O cimento Portland foi criado na Inglaterra em 1834, com sua produção industrial iniciada em 1850, por definição, é um material inorgânico de baixa granulometria e que quando misturado com água forma uma pasta, que posteriormente endurece devido as reações químicas e o processo de hidratação, mantendo sua resistência e estabilidade, não se decompondo mesmo quando é imposto a nova ação da água (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002; MEHTA E MONTEIRO, 2014). Sua produção envolve a pulverização de clínqueres, compostos por silicatos de cálcio hidráulicos e cristalinos, juntamente com pequenas adições de sulfato de cálcio e calcário durante o processo de moagem (MEHTA E MONTEIRO, 2014). Esse método de fabricação confere ao Cimento Portland suas propriedades únicas, essenciais para diversas aplicações na construção civil.

3.5.1 Tipos de cimento Portland

A incorporação de diferentes materiais na formulação do cimento exerce uma influência direta nas suas propriedades, tanto em seu estado fresco quanto endurecido. Isso resulta na existência de uma variedade de tipos de cimento, cada um com composições e características distintas. Dentre os mais comuns, destacam-se o Cimento Portland Comum, Cimento Portland Composto, Cimento Portland de Alto Forno, Cimento Portland Pozolânico e Cimento Portland A.R.I, conforme discutido por Mehta e Monteiro (2014).

No mercado nacional, são oferecidos onze tipos fundamentais de Cimento Portland, conforme estabelecido na Tabela 1. Esta tabela apresenta os tipos de cimento, suas respectivas nomenclaturas e os percentuais em massa, conforme as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): NBR 5732:1991, NBR 5733:1991, NBR 5735:1991 e NBR 11578:1991. Essas normas desempenham um papel crucial ao regulamentar as características e composições dos diversos tipos de cimento disponíveis no mercado brasileiro, garantindo padrões de qualidade e desempenho.

Tabela 1 - Classificação do cimento Portland.

| Nome técnico do cimento Portland | Classes | Componentes (%) | | | |
|-------------------------------------|------------|------------------|---------|----------|----------------|
| | | Clínquer + Gesso | Escória | Pozolana | Filer Calcário |
| (CP I) Comum | 25; 32; 40 | 100 | 0 | - | - |
| (CP I-S) Comum com adição | 25; 32; 40 | 99 - 95 | 1 - 5 | 1 - 5 | 1 - 5 |
| (CP II E) Composto com Escória | 25; 32; 40 | 94 - 56 | 6 - 34 | 0 | 0 - 10 |
| (CP II Z) Composto com Pozolana | 25; 32; 40 | 94 - 76 | 0 | 6 - 14 | 0 - 10 |
| (CP II F) Composto com Filer | 25; 32; 40 | 94 - 90 | 0 | 0 | 6 - 10 |
| (CP III) Alto Forno | 25; 32; 40 | 65 - 25 | 36 - 70 | 0 | 0 - 5 |
| (CP IV) Pozolânico | 25; 32 | 85 - 45 | 0 | 15 - 50 | 0 - 5 |
| (CP V-ARI) Alta Resistência Inicial | - | 100 - 95 | 0 | 0 | 0 - 5 |
| (RS) Resistente a Sulfatos | 25; 32; 40 | - | - | - | - |
| (BC) Baixo Calor de Hidratação | 25; 32; 40 | - | - | - | - |
| (BPC) Branco Estrutural | 25; 32; 40 | - | - | - | - |

Fonte: (ABNT NBR 5732:1991; 5733:1991; 5735:1991; 11578:1991).

O cimento Portland comum é denominado CP I ou CP I-S (sem ou com adição, respectivamente). A norma brasileira exige que a sigla seja acompanhada de um número que representa a resistência à compressão aos 28 dias de idade, em MPa (NBR 5732, 1991).

O Cimento Portland tipo II é um cimento composto por adições e mais resistente ao ataque de sulfatos. O tipo do CP II denominado em função da adição (CP II-E, com escória; CP II-Z, com pozolana; e CP II-F, com filer). E, além de ser indicado para praticamente todas as fases de uma obra, o seu custo e disponibilidade o torna muito popular.

O Cimento Portland de alto forno, conhecido como CP III, contém a adição de 35 a 70% de escória, e por isso apresenta boa resistência inicial e final, além de maior durabilidade em ambientes agressivos.

O denominado Cimento Portland pozolânico (CP IV) apresenta de 15 a 50% de material pozolânico em sua composição, apresenta baixo calor de hidratação, baixa porosidade e gera um produto mais resistente a longo prazo quando comparado com cimentos comuns, especialmente em ambientes com altos teores de sulfatos ou riscos de reação álcali-agregado.

Já o Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI), que assim como o CP I, não apresenta adições, apresenta uma dosagem diferente na produção do clínquer. A vantagem deste produto é a velocidade em que a resistência máxima à compressão é alcançada, atingindo elevada resistência após apenas 7 dias da hidratação, sendo utilizado em pré-fabricados e concretos especiais.

O cimento Resistente a Sulfato (CP RS) é projetado para resistir a ambientes com altos teores de sulfatos, que podem ser encontrados no solo ou na água. Apresenta variação do CPV

com adições de escória de alto-forno e/ou material pozolânico, que conferem maior resistência aos ataques de sulfatos. Esse tipo de cimento é especialmente utilizado em obras de saneamento, como estações de tratamento de água e esgoto, fundações em solos com alta concentração de sulfatos e estruturas expostas a ambientes agressivos.

O cimento de Baixo Calor de Hidratação (CP BC) é uma versão do CP I com composição química especial para reduzir a liberação de calor durante a hidratação, ajudando a minimizar o risco de fissuras térmicas, mantendo a integridade estrutural do concreto. É utilizado em grandes estruturas, como barragens, fundações de concreto maciço e construções de concreto de grande volume.

O Cimento Portland Branco de Baixo Calor de Hidratação com Alta Resistência Inicial (CPB) é uma variação do (CP BC) com adição de componentes que conferem alta resistência inicial, produzido a partir de matérias-primas selecionadas, resultando em um cimento de cor branca. É utilizado principalmente em obras que requerem resistência inicial elevada e controle de temperatura

3.5.2 Química do cimento Portland

O cimento é produzido através da reação química entre dois componentes primários: calcário, que é essencialmente carbonato de cálcio, e argila, que consiste em silicatos de alumínio e ferro. Esse composto é reconhecido como um ligante hidráulico, no qual os óxidos são extraídos para o processo de hidratação.

Inicialmente, o carbonato de cálcio (CaCO_3) passa por um processo de aquecimento em altas temperaturas, resultando na formação de cal (CaO) e liberação de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera. Da argila, são extraídos os óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O . O material resultante dessa combinação é então submetido a fornos com temperaturas superiores a 1450°C , um procedimento conhecido como clinquerização. Durante a clinquerização, ocorrem diversas reações físicas e químicas. O calor intenso desencadeia transformações no material até que ele esfrie e se aglomere em partículas chamadas de clínquer, que podem variar de 2 a 20 mm de diâmetro (MEHTA E MONTEIRO, 2014; KIHARA E CENTURIONE, 2005; CALLISTER E RETHWISCH, 2012).

Por fim, o clínquer é moído com a adição de sulfato de cálcio e outros aditivos como pozolana e cinzas volantes (CASTRO, 2021). Os compostos formados no processo de produção do clínquer e que constituem o cimento Portland são: silicato tricálcico (alita), silicato dicálcico (belita), aluminato tricálcico (aluminato) e o ferroaluminato tetracálcico (ferrita) (TAYLOR,

1990). A composição e a simbologia dos compostos constituintes do cimento Portland seguem apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição Química do cimento Portland.

| Óxido | Abreviação | Compostos | Abreviação |
|--------------------------------|------------|--|--|
| CaO | C | 3 CaO. SiO ₂ | C ₃ S |
| SiO ₂ | S | 2 CaO. SiO ₂ | C ₂ S |
| Al ₂ O ₃ | A | 3CaO. Al ₂ O ₃ | C ₃ A |
| Fe ₂ O ₃ | F | 4 CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃ | C ₄ AF |
| MgO | M | 4 CaO. 3Al ₂ O ₃ . SO ₃ | C ₄ A ₃ S |
| SO ₃ | S | 3 CaO. 2SiO ₂ . 3H ₂ O | C ₃ S ₂ H ₃ |
| H ₂ O | H | CaSO ₄ 2H ₂ O | C _s H ₂ |

Fonte: Mehta & Monteiro (2014).

3.5.3 Hidratação do Cimento Portland

A hidratação do cimento resulta no fenômeno de pega, devido a reação química, que acontece quando a água reage com os compostos presentes no cimento, resultando no endurecimento do material. O principal componente do cimento é o clínquer, que é produzido pela calcinação do calcário e da argila em altas temperaturas em altas temperaturas (aproximadamente 1450°C) em um forno de cimento. O clínquer contém compostos como os aluminatos (C₃A e C₄AF), os silicatos (C₃S e C₂S), que são os principais responsáveis pela hidratação do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Mehta & Monteiro (2014), os aluminatos (C₃A e C₄AF), reagem rapidamente com a água, formando etringitas (C₆ASH₃₂), um dos produtos de hidratação importantes na reação do cimento, pois contribui para o desenvolvimento de resistência inicial e ajuda a controlar o processo de pega.

A hidratação dos silicatos de cálcio, C₃S (alita) e C₂S (belita) ocorre horas após o início da hidratação do cimento e resulta em silicatos de cálcio hidratados C-S-H de composição química variada e hidróxido de cálcio (CH), cristais prismáticos, que vão ocupar os espaços da água e das partículas em dissolução. Esses silicatos e aluminatos hidratados começam a criar ligações entre as partículas levando ao endurecimento progressivo do material. Os silicatos de cálcio hidratados são um componente crucial na pasta de cimento e desempenham um papel fundamental na resistência e durabilidade do material ao longo do tempo e representam de 50 a 60% do volume total de sólidos presentes na pasta de cimento. Porém, o CH, também

conhecido como Portlandita, que constitui de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta de cimento hidratada, possui pouca contribuição à resistência se comparada ao C-S-H e é prejudicial a resistência química do cimento Portland (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

3.6 Fíler Calcário

O fíler calcário é um material amplamente utilizado na indústria, consistindo em partículas finamente moídas de calcário. Sua função primordial é aprimorar as propriedades mecânicas e características dos materiais compostos. O calcário, é uma rocha sedimentar composta principalmente de carbonato de cálcio (CaCO_3). A formação do calcário é um processo que se estende ao longo de milhões de anos por meio da deposição de sedimentos marinhos que incorporam conchas, esqueletos e resíduos de organismos calcários. Ao longo do processo, esses sedimentos sofrem compactação e consolidação, resultando na formação da rocha calcária (NEVILLE, 1997; DUARTE, 2013).

3.6.1 Química do Fíler Calcário

A química do fíler calcário está principalmente relacionada à sua composição mineralógica, que é predominantemente composta por carbonato de cálcio (CaCO_3), assim como o calcário convencional. O carbonato de cálcio presente no fíler calcário é um composto inorgânico que contém íons de cálcio (Ca^{2+}) e íons de carbonato (CO_3^{2-}). Esses íons estão ligados por ligações iônicas na estrutura cristalina do mineral (NEVILLE, 1997).

Além disso, a presença do fíler calcário em certos materiais pode afetar propriedades químicas e físicas. Por exemplo, quando utilizado em concretos, o fíler calcário pode interagir com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) produzido durante o processo de hidratação do cimento. Essa interação forma produtos como o carbonato de cálcio e hidróxido de cálcio, contribuindo para a formação de uma matriz sólida e melhorando a durabilidade e resistência do concreto (NEVILLE, 1997). A incorporação de calcário como substituto parcial do cimento Portland tem o efeito de criar espaços adicionais entre as partículas, favorecendo a formação das fases hidratadas originadas a partir do clínquer. Além de desempenhar essa função, a introdução de calcário desempenha um papel crucial no gerenciamento da retração e prevenção de fissuras nos produtos resultantes. Adicionalmente, na indústria de produtos à base de fibrocimento, o uso do calcário é frequente como estratégia para reduzir os custos associados às matérias-primas utilizadas (SCRIVENER; JUILLAND; MONTEIRO, 2015; URREA- CEFERINO, 2016).

3.7 Resíduo de lã de vidro (RLV)

O RLV origina-se do processo de fabricação e do descarte de produtos feitos de lã de vidro, um importante material mineral usado em setores industriais, devido suas características tais como: isolamento térmico e acústico, geralmente comercializado em rolos e painéis, atualmente na Europa são produzidas 800.000 toneladas desse resíduo por ano (LEMOUGNA, 2020). A partir de então, o RLV consiste em um resíduo composto de microfibras de vidro entrelaçadas e aglutinadas por uma resina sintética, resultando em uma aparência que pode variar do tom esverdeado ao amarelado (FERREIRA, 2023).

De acordo com Yap et al. (2021), 2,5 mil/ton de resíduos de lã mineral são gerados anualmente nos países da União Europeia, apresentando resultados de 30% de RLV desse total. Dessa forma, este material é descartado, geralmente em aterros quando estas propriedades são perdidas, acarretando prejuízos ao meio ambiente, uma vez que este requer grande volume de espaço para ser armazenado gerando assim, o RLV (BORGES, 2007, MARMORET, 2009; TSUKAMOTO, 2014, VIEIRA, 2016, YAP, 2021). O RLV, atualmente, é considerado um resíduo não perigoso e não inerte de acordo com a ABNT NBR 10004 (2004). Este resíduo também foi reclassificado em 2001, pela International Agency for Research on Cancer (IARC), como um produto não cancerígeno para os seres humanos, ao contrário das lãs cerâmicas e de amianto (LIPWORTH, 2009).

A reutilização do RLV da indústria siderúrgica e de equipamentos eletrônicos, permite a sua transformação em matérias-primas alternativas para a produção de novos materiais, resultando em um melhor aproveitamento dos recursos materiais ou energéticos. O RLV exhibe microestruturas específicas, apresentando tamanhos de grão pequenos com orientação aleatória e a presença de quantidades variáveis de características residuais da fase amorfa. Essas propriedades únicas permitem a obtenção de materiais com propriedades distintas em comparação com as cerâmicas produzidas por métodos tradicionais, conforme observado por Kniess (2001).

Conforme apresentado por Fontes (2014), o RLV possui composição química em óxido de acordo com a Tabela 3, a análise revela que a composição química do RLV é predominantemente constituída por Fe_2O_3 e SiO_2 . É relevante destacar que, por ser um resíduo, sua composição química pode apresentar variações, confrontando os valores obtidos por Alves (2008), que analisou o material comercial.

Tabela 3 - Composição química (FRX) do RLV e da Lã de vidro comercial.

| Material | Óxidos (%) | | | | | | | |
|--|------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|----------|-------------------|------------------|-----------|
| | SiO ₂ | AL ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | CaO | Na ₂ O | TiO ₂ | Outros* |
| RLV Fonte: Fontes (2014) | 24 | 7,3 | 35,4 | 1,3 | 24 | 1,5 | 3,4 | - |
| Lã de Vidro Comercial Fonte: Alves (2008) | 34,0-73,0 | 2,9-14,5 | 0,3-4,0 | 3,0-5,5 | 6,0-22,0 | - | 0,1-0,8 | 12,0-15,4 |

Fonte: Fontes (2014) e Alves (2008).

Nos últimos anos diversos pesquisadores vêm apontando possibilidades para o reaproveitamento do RLV, desde sua aplicação como matéria-prima para a produção de materiais cerâmicos porosos, adição em concreto a base de cimento Portland, entre outros.

Na investigação de Borges (2007) ele utilizou o RLV incorporado à matriz de concreto avaliando os efeitos da adição de resíduos nas propriedades físicas e mecânicas do concreto por meio de testes de resistência à compressão, resistência à flexão, abatimento e módulo de elasticidade. O autor concluiu que a adição de resíduo vítreo ao ligante melhorou a trabalhabilidade e a resistência média à compressão simples foi inferior à do concreto de referência.

Neves (2015), analisou a viabilidade técnica do RLV na produção de materiais vitrocerâmicos. A autora observou que devido as propriedades constitucionais o RLV apresentou resultados favoráveis na utilização do resíduo.

Defáveri (2016), avaliou a atividade pozolânica dos resíduos de lã de rocha, fibra de vidro e RLV. O autor observou que o RLV tem uma média/alta pozolanicidade, logo aparentando uma opção de material pozolânico para emprego com cimento Portland.

Defáveri (2019), em outro estudo, aplicou rejeito de minério de ferro contendo RLV para a produção de geopolímeros. O autor obteve resultados satisfatórios e finalizou concluindo que o RLV funcionou como um material precursor complementar à reação de geopolimerização.

Lemougna (2021), é viável o emprego de RLV, combinado a rejeitos de espodumênio, como matéria-prima para a produção de materiais cerâmicos porosos. O autor observou através das propriedades mecânicas que a adição de RLV foi benéfica e pode ser adequada para produzir cerâmicas porosas com propriedades interessantes.

Ainda em 2021, Lemougna, estudou o efeito da resina orgânica do resíduo de lã de vidro e da temperatura de cura na síntese e nas propriedades de pastas álcali-ativadas e confirmou o potencial de valorização dos resíduos de lã de vidro para a produção de materiais de construção.

Adeiran (2021), investigou a viabilidade de incorporar lã de vidro como agente fundente na produção de produtos cerâmicos à base de argila e resíduos preparados em diferentes temperaturas, concluindo que a incorporação foi benéfica para a densificação da microestrutura e propriedades mecânicas de aproximadamente 700 °C.

Ferreira (2023), avaliou os efeitos de vários teores de adição e da variação do fator de forma de microfibras de RLV moído na resistência mecânica de argamassas convencionais de cimento Portland, concluindo que é viável a obtenção de matrizes de argamassas de cimento Portland com adição de teores significativos de RLV e que possuam resistências iguais ou superiores aos traços convencionais utilizados usualmente na construção civil.

3.8 Processo de Hatschek

Ludwig Hatschek, um engenheiro austríaco, desenvolveu o processo de produção de fibrocimento no final do século XIX. Esse processo foi baseado no método utilizado na produção de papel, conhecido como o "Processo Hatschek". A partir de então, esse processo tem sido submetido a constantes aperfeiçoamentos em busca de um desempenho melhor, além de atender às demandas do mercado e às regulamentações ambientais e de saúde e segurança, sem afetar seu princípio básico: a filtração de uma suspensão bem diluída de cimento por um cilindro rotativo, para melhorar seu desempenho e atender a requisitos específicos (TONOLI, 2009). O processo Hatschek envolve a produção de chapas de fibrocimento por meio da combinação de cimento, água, fibras e outros aditivos. As máquinas utilizadas no processo Hatschek produzem o fibrocimento com um nível de homogeneidade adequado para a produção de telhas onduladas e placas planas (DIAS; SAVASTANO JÚNIOR, JOHN, 2010). De acordo com Ikai (2010), o método Hatschek é o mais empregado para a produção de fibrocimento, com quase 85% dos produtos de fibrocimento vendidos no mundo.

Na pesquisa de Tonoli (2009), o autor expõe como o processo consiste, decorrendo a partir de superposição de finas lâminas feitas de uma suspensão de cimento, fibras, aditivos minerais e água. Essas lâminas finas de fibrocimento são obtidas pela retenção dos sólidos durante a filtração, são transferidas e acumuladas em uma prensa cilíndrica, até adquirir a espessura desejada. Esse processo permite a produção de placas de fibrocimento com diversas aplicações na construção civil, como telhas, painéis de fachada, tubos e outros produtos. Essas

placas de fibrocimento são comerciais e consideradas materiais compósitos, pois são compostas por uma matriz de cimento, adições minerais e fibras que atuam como reforço. A matriz, composta principalmente de cimento e adições minerais, envolve as fibras, resultando em uma combinação que confere não apenas resistência, mas também outras propriedades mecânicas ao material (KUDER e SHAH, 2010; MARTINS, 2018).

Fontenelle (2012) cita algumas características fornecidas pelas indústrias do Brasil que aplicam o método Hatschek. As placas são disponibilizadas no mercado com uma largura média de 1,2m e um comprimento de 2,40m, podendo alcançar até 3,0m, com espessuras de 6mm, 8mm, 10mm e 12mm. A densidade varia entre 1,4 a 1,7g/cm³, e a absorção de água é aproximadamente de 30%, embora esse valor possa variar de acordo com cada fabricante, no qual é responsável por apresentar as características físicas e mecânicas, bem como a classificação das placas de acordo com a norma ABNT NBR 15498:2016. A identificação das placas de fibrocimento segue essa regulamentação, onde são categorizadas em duas classes, A e B, contendo mais quatro subdivisões de acordo com a resistência a tração na flexão (ver Tabela 4). Placas de classe A, são placas indicadas para ambientes internos e/ou ambientes externos, porém protegidas da insolação direta e intempéries. Para se encaixar na classe B as placas devem ser destinadas para uso em ambientes externos, expostas à insolação direta, calor, umidade e chuvas. Esses padrões e classificações permitem aos consumidores avaliar e selecionar as placas de fibrocimento de acordo com suas necessidades específicas e garantem um entendimento claro das características e propriedades do material que estão adquirindo.

Tabela 4 -Requisitos de resistência à flexão.

| Categoria | Classe A | Classe B |
|-----------|----------|----------|
| 1 | - | 4 |
| 2 | 4 | 7 |
| 3 | 7 | 10 |
| 4 | 13 | 16 |
| 5 | 18 | 22 |

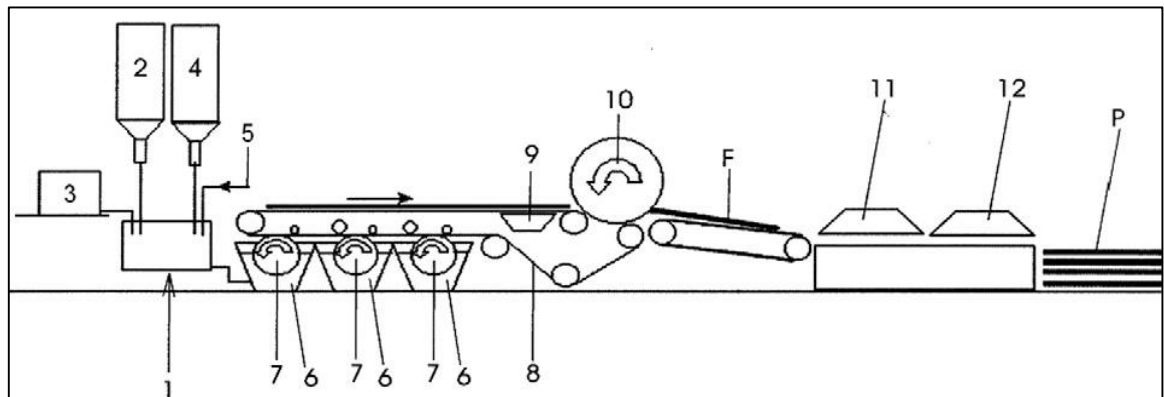
Resistência em MPa.

Fonte: (ABNT NBR 15498: 2016).

Na Figura 2, estão enumerados em sequência os estágios do processo em 12 etapas até o produto final. Na etapa 1 acontece a mistura da proporção adequada dos materiais sólidos com a água, em uma baixa concentração de sólidos (10-15% da massa total), na representação

2 é inserido o cimento, na etapa 3 as fibras celulósicas e/ou sintéticas são adicionadas, logo em seguida na etapa 4 o calcário agrícola moído e outros aditivos minerais são adicionados. A representação 6 e 7 são tanques com cilindros rotativos, onde o material sólido é retido. Em seguida a etapa 8 retrata da esteira de feltro que remove o material do cilindro, formando uma lâmina fresca de fibrocimento. Continuando o processo a etapa 9 se dá ao vácuo, no qual é aplicado para remover a água da lâmina antes de ser transferida para a prensa cilíndrica. Logo em seguida acontece a sobreposição das lâminas, representada pela etapa 10. Na etapa 11 é feito os cortes dos compósitos que é transferido para a etapa 12 onde é conformada em moldes ondulados ou em painéis planos. Por fim, após todo o processo, se resulta no produto final (P).

Figura 2 - Representação esquemática do processo Hatschek.



Fonte: Dias, Savastano Júnior e John (2010).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Neste estudo, foram empregados os seguintes materiais: Cimento Portland CPV - ARI, fíler calcário, fibras de papel Kraft de Pinus, resíduo de lã de vidro (RLV) e água.

Como aglomerante, foi utilizado o cimento Portland CPV – ARI, tipo de cimento empregado na indústria de fibrocimento. O fíler calcário utilizado consiste em 95% de carbonato de cálcio (CaCO_3).

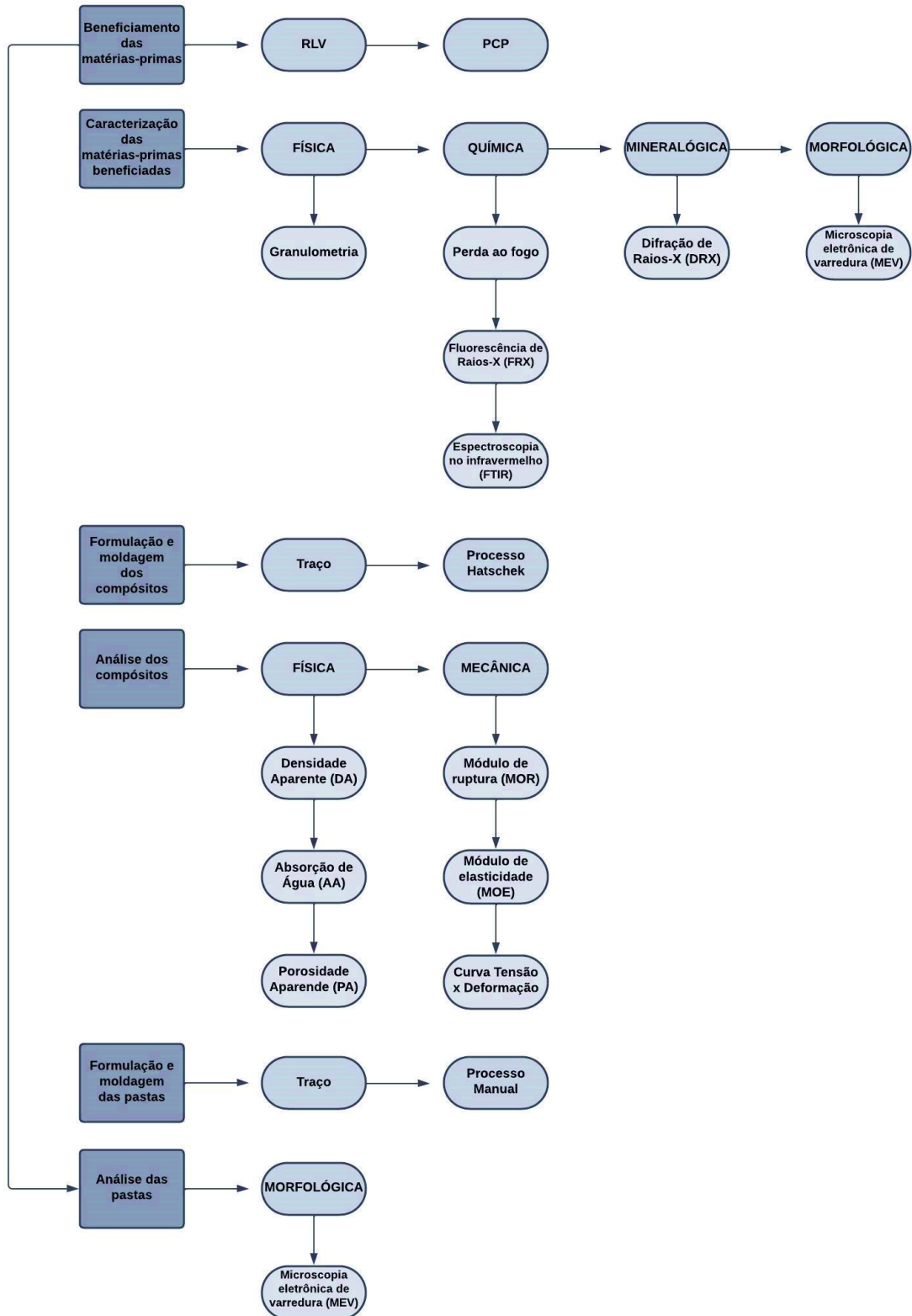
As fibras de papel Kraft de Pinus utilizadas foram fornecidas pela empresa Klabin e provenientes da linha de produção de papel Kraft, localizada em Betim, Minas Gerais, Brasil. Essas fibras são de origem 100% virgem, obtidas a partir da madeira de Pinus, e não foram submetidas a qualquer processo de branqueamento.

O Resíduo de lã de vidro foi fornecido pela mineradora Cia. Vale do Rio Doce, especificamente do Complexo de Tubarão, localizado na Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil, onde produzem aproximadamente 3 mil toneladas de resíduos por mês, e 12% ainda não possuem uma forma de reciclagem.

4.2 Métodos

O programa experimental adotado neste trabalho consistiu em seis etapas sequenciais, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 3. Primeiramente, realizou-se o processo de beneficiamento do RLV e da PCP. Em seguida, na segunda etapa, o RLV e o PCP foram submetidos a uma caracterização, envolvendo análises físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas. A terceira etapa apresentou a formulação e moldagem dos compósitos utilizando cimento Portland, Fíler calcário, PCP e RLV. Posteriormente, na quarta etapa, os compósitos foram submetidos a análises físicas e mecânicas. A quinta etapa abrangeu a formulação e moldagem das pastas utilizando o cimento Portland, PCP e RLV. Por fim, a última etapa compreendeu as análises microestruturais das pastas, incluindo a caracterização morfológica do material.

Figura 3 - Fluxograma do programa experimental.



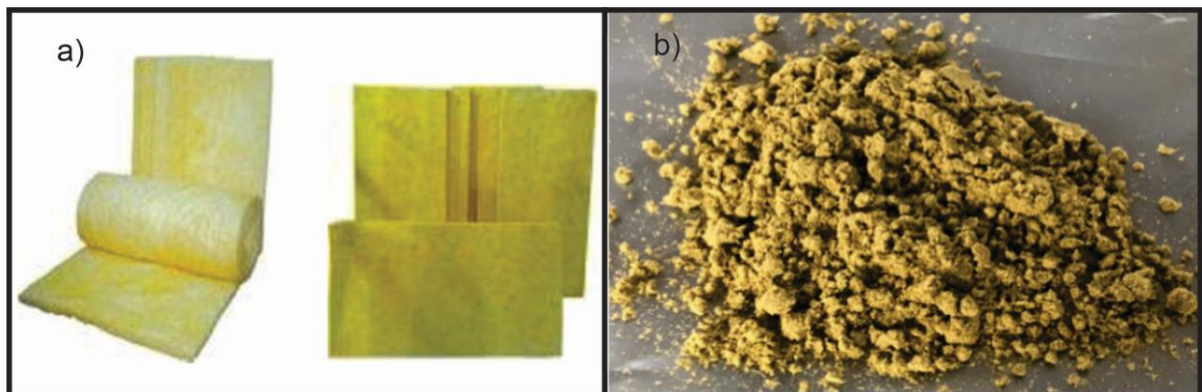
Fonte: Da autora (2023).

4.2.1 Beneficiamento das matérias-primas

A primeira etapa deste estudo consiste no beneficiamento das matérias-primas utilizadas, (RLV e PCP). A seguir, será apresentada uma descrição mais detalhada dos materiais antes e depois do processo de beneficiamento.

Na Figura 4.a), é possível observar a lã de vidro comercializada na forma de rolos e painéis, como é comumente encontrada no mercado. Para o beneficiamento do RLV, foi adotada a metodologia descrita por Defáveri (2016), visando obter partículas com tamanho inferior a 45 μm , segundo recomendação da ABNT NBR 12653: 2012. O RLV passou por um processo de secagem em estufa a 110°C por 24 horas e, em seguida, foi submetido à moagem em um moinho horizontal de bolas (MARCONI), utilizando-se 35 esferas de aço inoxidável com 32 mm de diâmetro, durante 30 min, com uma carga de 500 g de RLV. Por fim, o RLV beneficiado foi peneirado através de uma peneira com abertura de 325 meshes (45 μm). O resultado desse beneficiamento está apresentado na Figura 4.b).

Figura 4 – Amostra de a) lã de vidro comercializada, e b) RLV beneficiado

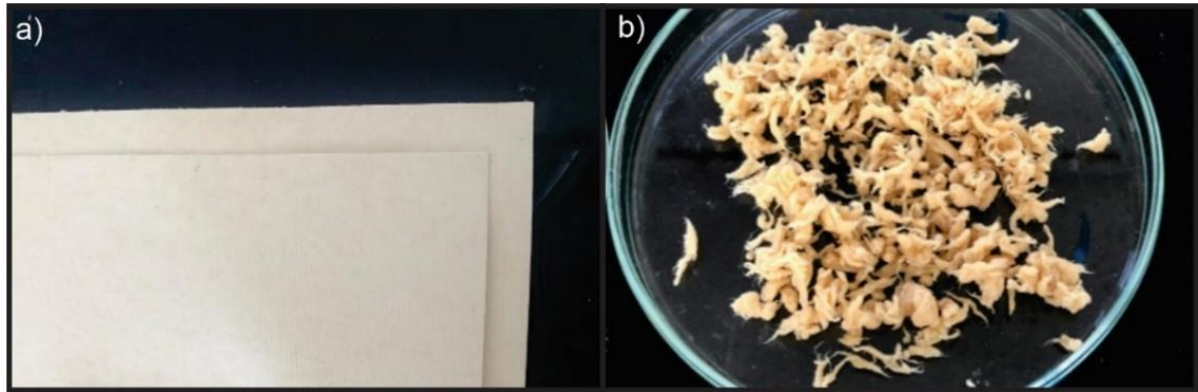


Fonte: a) Vieira (2016) e b) da autora (2023).

A Figura 5 apresenta a folha de papel de Pinus comercializada antes e depois do beneficiamento. Na Figura 5.a), é apresentada a folha de Pinus comumente comercializada pela Klabin. A metodologia adotada para o beneficiamento dessa folha de papel de Pinus teve como objetivo obter a polpa celulósica de Pinus (PCP). O processo de beneficiamento iniciou-se com o corte da folha de papel de Pinus para facilitar as etapas subsequentes (WISKY, 2015). Em seguida, a folha de papel de Pinus foi imersa em água por um período de 24 h. Após esse tempo, o material foi submetido a um liquidificador industrial por 10 min, visando promover a desintegração da fibra de papel. Posteriormente, parte da água foi retirada e as polpas resultantes

foram colocadas em um misturador elétrico, onde foram agitadas por mais 10 min. Ao final desse processo, obteve-se a polpa de celulose finalizada, como ilustrado na Figura 5.b).

Figura 5 – Amostra de a) folha de papel Pinus comercializada, e b) PCP beneficiado



Fonte: Da autora (2023).

4.2.2 Caracterização das matérias-primas

Na segunda etapa, o RLV e PCP foram caracterizados (física, química, mineralógica e morfológicamente). A caracterização física realizada incluiu o ensaio de granulometria por peneiramento para verificar a quantidade de RLV passante na peneira 45 μm . Na caracterização química, foram realizados os ensaios de perda ao fogo (PF), fluorescência de raios-X (FRX), espectroscopia de infravermelho (FTIR), afim de obter informações do teor de cinzas, realizar a análise qualitativa e identificar as bandas e características das ligações químicas. A caracterização mineralógica foi feita através da difração de raios X (DRX), para identificar as fases cristalinas. E por último, a caracterização morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV), oferecendo imagens de alta resolução das superfícies das amostras.

4.2.2.1 Análise Física

A granulometria do RLV beneficiado foi determinada através de peneiramento, seguindo os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR NM ISO 3310-1: 2017. A amostra de RLV seca foi colocada nas séries de peneiras com aberturas de malha de 100 μm , 53 μm , 45 μm , 38 μm e 25 μm .

4.2.2.2 Análise Química

Inicialmente foi determinado o teor de cinzas que identifica a quantidade de material inorgânico presente na amostra. A amostra de PCP e de RLV foi pesada em balança analítica com o peso de 2,0 g e colocados em cadinhos de porcelana. Em seguida as amostras foram levadas ao forno mufla e incineradas a $525^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ por 60 min na amostra de PCP e na amostra de RLV, incineradas a $1050^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ por 60 min. Por fim, as amostras foram pesadas em balança analítica e o teor de cinzas foi calculado empregando a Equação 1 (NRB 13999, 2003).

(1)

$$\text{PF (\%)} = \frac{M_s - M_q}{M_s} \times 100$$

Onde: PF é a perda ao fogo (%); M_s é a massa dos corpos de prova seco (g); e M_q é a massa dos corpos de prova após queima (g).

Foi realizada a análise por fluorescência de raios-X (FRX) na amostra de RLV utilizando o equipamento modelo Rayny EDX 720 Shimadzu. Por fim, a análise de espectroscopia de infravermelho (FTIR) foi executada no RLV e na PCP, após o beneficiamento, utilizando o aparelho FTS 3000 MX com varredura no modo transmissão no intervalo de 4000cm^{-1} a 600cm^{-1} , resolução de 2cm^{-1} e 100 scans por medida, utilizando pastilha de KBr.

4.2.2.3 Análise mineralógica

A análise de difração de raios X (DRX) foi executada no RLV e na PCP, após o beneficiamento, utilizando o aparelho Bruker D2 Phaser, utilizando fonte de radiação $\text{CuK}\alpha$ ($1,542\text{ \AA}$), operando com tensão de 40Kv e corrente de 30 mA com radiação de $\text{Cu K}\alpha$; de 2 a 70° ângulo $2(\theta)$; passo de $0,02^{\circ}$ e tempo de passo de 5 segundos. A análise e refinamento dos resultados foi executada utilizando software X'Pert High Score Plus Panalytical, utilizando banco de dados cristalográfico COD (Crystallography Open Database).

4.2.2.4 Análise morfológica

A análise morfológica foi determinada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), nas amostras de RLV e PCP após o beneficiamento, utilizando o microscópio UH-RESOLUTION. As amostras foram previamente recobertas com ouro e coladas no porta-amostra com fibra de carbono. O MEV foi operado sob uma tensão de aceleração entre 15 e 20 kV e uma distância de trabalho de aproximadamente 30 mm.

4.2.3 Formulação e moldagem dos compósitos

Na terceira etapa, os compósitos à base de cimento Portland, RLV e PCP, foram produzidos utilizando o método Hatschek, o traço empregado no trabalho segue apresentado na Tabela 5 (em massa).

O RLV foi empregado como substituição nas proporções de referência (0%) e variações de 1%, 2%, 6%, 8% e 25%, em relação à massa do compósito. Além disso, foi adotada uma relação água/cimento de 0,32 para todas as amostras.

Tabela 5 - Traço dos compósitos.

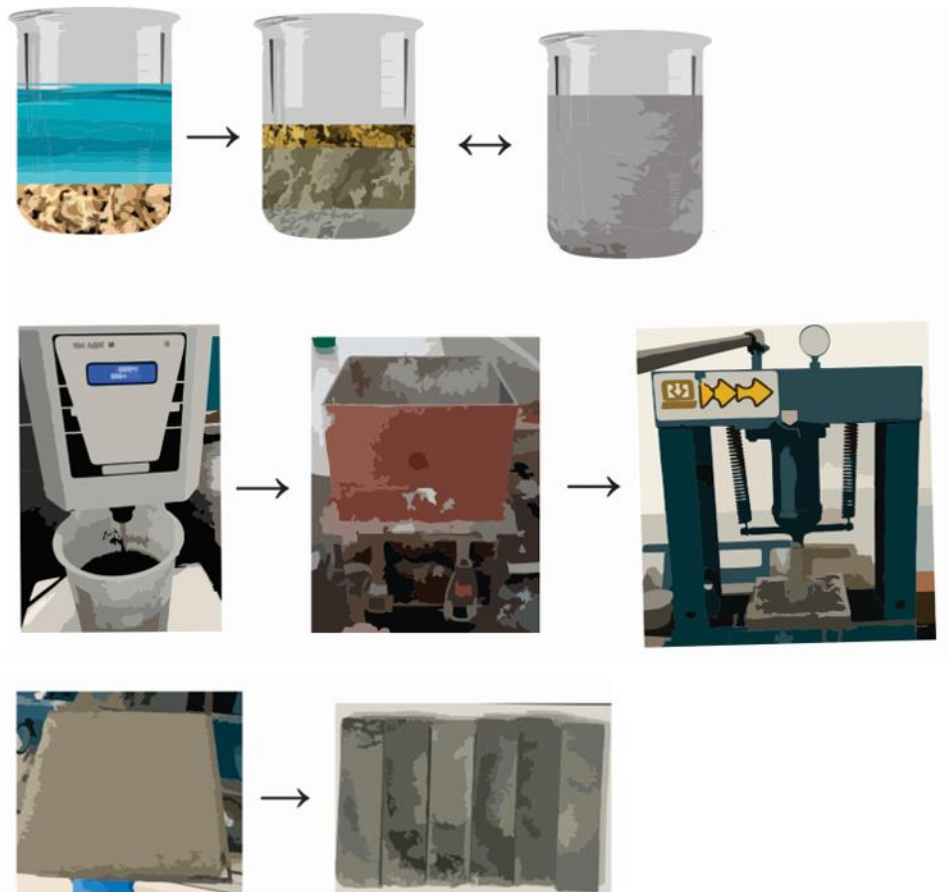
| Tratamento | CPV (massa) | Fíler Calcário (massa) | PCP (massa) | RLV (massa) |
|------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|
| REF | 222,75 | 90,75 | 16,5 | 0 |
| RLV 1% | 221,1 | 89,1 | 16,5 | 3,3 |
| RLV 2% | 219,45 | 87,45 | 16,5 | 6,6 |
| RLV 6% | 212,85 | 80,85 | 16,5 | 19,8 |
| RLV 8% | 209,55 | 77,55 | 16,5 | 26,4 |
| RLV 25% | 181,5 | 49,5 | 16,5 | 82,5 |

Fonte: Da autora (2023).

A Figura 6 mostra o esquema para confecção dos compósitos. Primeiro foi feita uma mistura manual de água e PCP em um recipiente plástico. O RLV, CPV e calcário foram misturados manualmente em um recipiente separado durante 2 min até a completa homogeneização. Logo foi feita a mistura manual em um recipiente com todos os materiais (água, PCP, RLV, CPV e calcário). Após a homogeneização prévia a argamassa foi misturada em um agitador mecânico de alto torque com uma velocidade de 400 Rpm e tempo de mistura

de 10 min. Em seguida a argamassa foi levada à máquina de simulação do processo Hatschek, com uma folha de papel filtro para a produção da placa por drenagem a vácuo e posteriormente submetidos à prensagem de 10 t na máquina de prensa hidráulica. As argamassas foram retiradas em forma de placas, com 50 x 60 x 5cm (comprimento, largura e espessura), em sacos plásticos em temperatura ambiente da cidade de Lavras-MG, de $(20 \pm 5^\circ\text{C})$ e livre da exposição ao sol. Após o processo de endurecimento, as placas foram retiradas dos sacos plásticos e cortadas em uma makita de mesa para se obter as dimensões desejadas de aproximadamente 50 x 200 x 5cm (comprimento, largura e espessura).

Figura 6 - Esquema de moldagem dos compósitos.



Fonte: Da autora (2023).

4.2.4 Análises dos compósitos

Na quarta etapa, os compósitos foram submetidos à análise físicas e mecânicas. Para a avaliação das propriedades físicas, foi realizado o ensaio de absorção de água, com o objetivo de avaliar o comportamento do compósito em relação à sua capacidade de absorção de água,

densidade aparente e porosidade aparente. Já para a análise das propriedades mecânicas, foram realizados ensaios de tração na flexão, com o intuito de avaliar a resistência e a rigidez do material.

4.2.4.1 Análise de propriedades físicas

As propriedades físicas analisadas neste estudo foram: Absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e porosidade aparente (PA). As análises físicas foram determinadas em corpos de prova imersos em água por 24 h, 3 corpos de prova para cada traço. Posteriormente, foram determinadas as massas imersas (M_i) e úmida (M_u), em seguida foram levadas a estufa a 100°C por 24 h para determinar a massa seca (M_s) (ASTM C 948-81, 1981). A absorção de água, a densidade aparente e a porosidade aparente foram determinados empregando a Equação 2, Equação 3 e Equação 4, respectivamente.

(2)

$$AA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100$$

(3)

$$DA (\text{g/cm}^3) = \frac{M_s}{M_u - M_i} \times \rho$$

(4)

$$PA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100$$

Onde: AA é a absorção aparente (%); DA é a densidade aparente (g/cm^3); PA é a porosidade aparente (%); M_u é a massa dos corpos de prova saturado com água (g); M_s é a massa dos corpos de prova após-secagem (g); e M_i é a massa dos corpos de prova imerso em água (g).

4.2.4.2 Análise de propriedades mecânicas

Os compósitos foram submetidos a ensaios de tração na flexão, conduzidos em uma prensa universal equipada com uma célula de carga de 2 kN. Adotou-se uma configuração de três pontos de apoio, com um vão de 160 mm, seguindo a metodologia estabelecida pela ABNT

NBR 7222:2011. O protocolo de teste envolveu uma taxa de carregamento de 1 kN/s. Para cada formulação, foram empregadas três amostras distintas, as quais foram ensaiadas em períodos de 7, 28 e 90 dias para avaliação da evolução temporal das propriedades mecânicas. O ambiente experimental foi mantido sob controle de temperatura, sendo fixado em 18°C.

4.2.5 Formulação e moldagem das pastas

Na quinta etapa, para a realização das análises microestruturais, foram formuladas e moldadas 6 pastas empregando o RLV como adição, nas proporções de 1, 2, 6, 8%, e como substituição de 25% nas idades de 7, 28 e 90 dias, de acordo com cada traço da Tabela 6. As pastas serão caracterizadas por FTIR e MEV, empregando a mesma configuração adotada para a caracterização das matérias-primas.

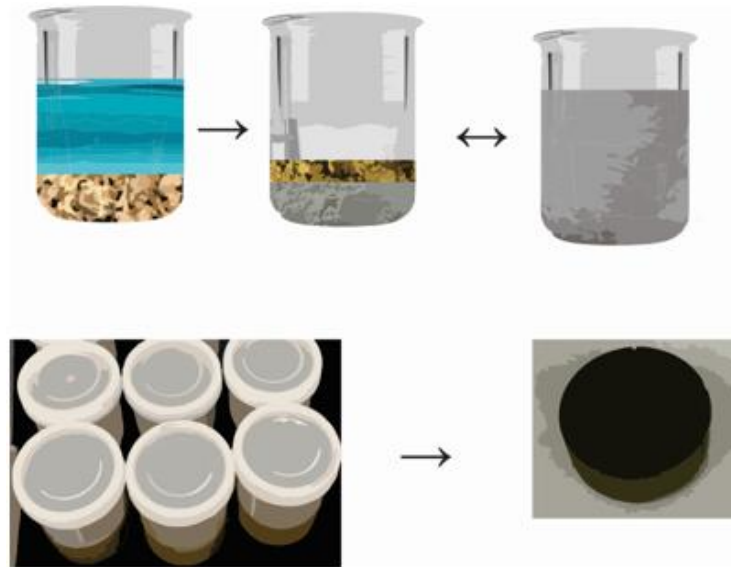
Tabela 6 - Traço das pastas

| Tratamento | CPV (massa) | PCP (massa) | RLV (massa) |
|------------|----------------|----------------|----------------|
| REF | 47,5 | 2,5 | 0 |
| RLV 1% | 47 | 2,5 | 0,5 |
| RLV 2% | 46,5 | 2,5 | 1 |
| RLV 6% | 44,5 | 2,5 | 3 |
| RLV 8% | 43,5 | 2,5 | 4 |
| RLV 25% | 35 | 2,5 | 12,5 |

Fonte: Da autora (2023).

A Figura 7 mostra o esquema para confecção das pastas. Para a confecção das pastas primeiro o RLV foi manualmente homogeneizado com o CPV por 2 min em recipiente plástico. Em um outro recipiente a PCP e a água foram homogeneizadas manualmente por 2 min. Após a mistura prévia dos materiais, a pasta de cimento e as fibras saturadas foram manualmente homogeneizadas por 5 min. Finalmente, as amostras foram lacradas, em potes de plástico de modo a evitar a carbonatação excessiva.

Figura 7 – Esquema de moldagem das pastas.



Fonte: Da autora (2023).

4.2.6 Análise microestrutural das pastas

Na sexta etapa, foi realizada a caracterização química e morfológica das pastas. O preparo das amostras envolveu a interrupção da hidratação com acetona nas idades de 7, 28 e 90 dias. Após a interrupção da hidratação, a pasta foi triturada e posteriormente passada em uma peneira com abertura de malha de 325 meshs. A caracterização química foi realizada utilizando o ensaio de FTIR, empregando a mesma configuração adotada para a caracterização das matérias-primas, que permitiu identificar as bandas e características das ligações químicas presentes nas amostras aos 7, 28 e 90 dias. A caracterização morfológica foi realizada utilizando o ensaio de MEV, empregando a mesma configuração adotada para a caracterização das matérias-primas, com o objetivo de analisar a microestrutura, identificando a interação entre as fibras/ matriz.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em seguida serão apresentados os resultados das análises de caracterização das matérias-primas (física, química, mineralógica e morfológica), análises dos compósitos (física e mecânica) e análises das pastas (morfológica).

5.1 Análise das matérias-primas

5.1.1 Análise física

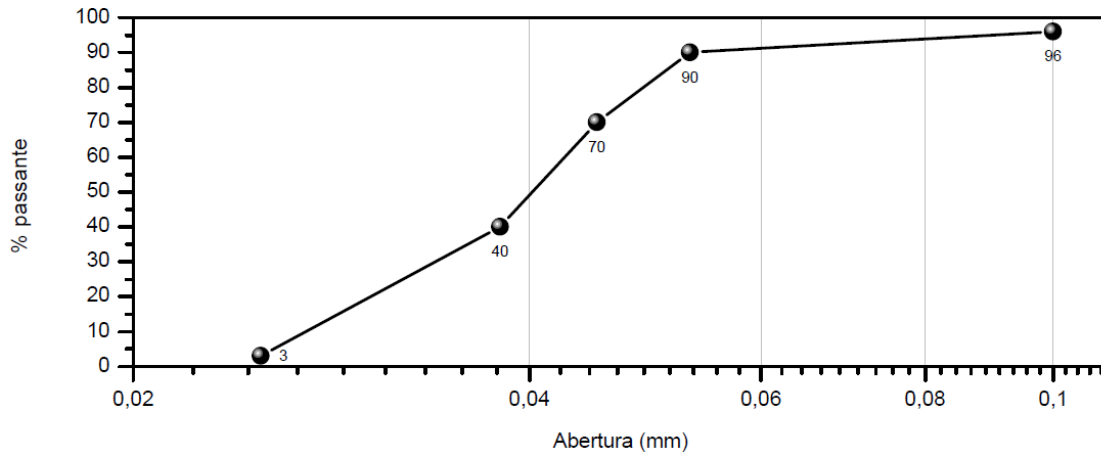
Os resultados obtidos pela granulometria por peneiramento do RLV seguem apresentados na Figura 8. Os parâmetros D10, D50 e D90 indicam os diâmetros abaixo dos quais se encontram 10%, 50% e 90% das partículas, obtendo valores de RLV de 25, 38, 53 μm , respectivamente, obtidos de acordo com a norma NBR NM 248, sugerindo uma distribuição granulométrica predominantemente fina. A curva granulométrica apresentou que 70% das partículas possuem tamanho inferior a 45 μm . Esses resultados estão em conformidade com estudos anteriores apresentados por Defáveri (2016).

A granulometria desempenha um papel fundamental no comportamento do compósito, sendo que uma granulometria fina propicia uma interação mais significativa com a matriz cimentícia. Essa maior área de contato favorece uma adesão mais eficaz entre as partículas de reforço e a matriz, resultando em melhorias nas propriedades mecânicas do compósito. Além disso, a granulometria fina influencia a reatividade das partículas, desempenhando um papel crucial na reação química entre os componentes e, por conseguinte, na formação da matriz. Estes aspectos ressaltam a importância do controle preciso da granulometria para otimizar a interação entre os materiais constituintes e, conseqüentemente, aprimorar as características finais do compósito cimentício (COUTINHO, 1999).

O peneiramento, embora seja uma técnica amplamente utilizada para determinar a granulometria de materiais, apresenta algumas limitações que podem afetar a precisão da análise, podendo não ser ideal para analisar materiais com partículas irregulares de tamanhos e orientações distintas. Isso ocorre porque as partículas finas têm maior probabilidade de se aglomerar, dificultando a separação adequada. Além disso, algumas partículas podem se orientar de forma perpendicular à malha da peneira, resultando na retenção dessas partículas e prejudicando a precisão da análise granulométrica.

Dependendo das características específicas do material em estudo, outras técnicas, como análise por laser ou difração a laser, podem ser consideradas para complementar ou substituir o peneiramento, proporcionando resultados mais precisos em determinadas situações.

Figura 8 - Distribuição granulométrica do RLV.



Fonte: Da autora (2023).

A distribuição granulométrica da PCP não foi especificamente avaliada, pois, conforme classificação de Siqueira (2006), a PCP é reconhecida como uma fibra longa. Fibras longas, por sua natureza, têm o potencial de oferecer reforço estrutural significativo ao compósito, proporcionando melhorias notáveis nas propriedades de tração e flexão. A incorporação de fibras longas no compósito não apenas contribui para sua resistência, mas ao se entrelaçarem na matriz, também pode conferir-lhe tenacidade, proporcionando uma maior capacidade de absorver energia e tornando o material mais resiliente em condições de carga.

Ao realizar a hibridização do RLV e da PCP em uma matriz cimentícia, levando em consideração as granulometrias distintas de cada material, busca-se potencializar as qualidades específicas de cada componente para aprimorar as propriedades do compósito. O RLV, com sua granulometria baixa, tem o potencial de preencher os espaços interligando as microfibras na matriz cimentícia. Isso não apenas contribui para melhorar a coesão, promovendo uma distribuição mais homogênea dos materiais, mas também pode otimizar a interação entre o RLV e a matriz, aproveitando sua maior área superficial. Por outro lado, as fibras longas da PCP, reconhecidas por seu caráter estrutural, oferecem o reforço posteriormente ao compósito. Sua presença pode aprimorar as propriedades mecânicas, como tração e flexão, conferindo resistência e tenacidade adicionais ao material final.

A combinação desses elementos, cuidadosamente ajustada em termos de proporções e distribuição na matriz, visa criar um compósito sinérgico. Ao integrar o RLV à matriz, prevê-se que desempenhe um papel crucial no tratamento de fissuras iniciais. Sua capacidade de preencher espaços e melhorar a coesão na matriz cimentícia pode contribuir significativamente para a mitigação, prevenção e reforço de fissuras iniciais no material compósito. Enquanto a PCP espera-se oferecer reforço posterior. Essa abordagem híbrida busca otimizar as propriedades finais do compósito cimentício, criando um material que se beneficia tanto da granulometria fina quanto das fibras longas para atender a requisitos específicos de desempenho.

5.1.2 Análise química

A tabela 7 apresenta os resultados de PF e os principais elementos químicos das amostras do RLV. O RLV apresentou um alto teor de Si, teores médios de Al, Ca e Fe, baixos teores de S e Ti e valores abaixo de 1% de K e Mn, considerado em outros. Esses teores encontrados, condizem com os compostos presentes no clínquer do cimento Portland e materiais pozolânicos. As pozolanas são geralmente caracterizadas pela presença predominante de dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3), sendo esses seus principais componentes. Outros elementos e compostos químicos estão frequentemente presentes em quantidades menores, como óxidos de ferro (Fe_2O_3) e óxidos de potássio (K_2O), como observado por Taylor (1997). Essa composição química distinta confere às pozolanas propriedades específicas que as tornam valiosas na formulação de compósitos cimentícios. Sugere-se que o RLV possua características promissoras como pozolana, conforme indicado nos resultados obtidos por Defáveri (2016), no qual o autor concluiu que o RLV exibe uma pozolanicidade de média a alta, enriquecendo a matriz do cimento. Essa constatação aponta para um notável potencial de contribuição para o aprimoramento das propriedades físicas e mecânicas do cimento.

Por outro lado, ao comparar os resultados da análise por Fluorescência de Raios-X (FRX) com os dados do material comercial, conforme descrito por Alves (2008), é notável a ausência de Mg e o elevado teor de Fe na amostra. A presença significativa de Fe sugere uma possível contaminação devido ao ambiente no qual o RLV foi exposto no complexo industrial, como indicado por Defáveri (2016).

O RLV e o PCP apresentaram perda ao fogo de 2,9 % e 89%, respectivamente. A perda de massa ocorre principalmente devido à volatilização de compostos orgânicos, no qual

afeta diretamente o material quando adicionado à matriz de cimento durante a mistura e hidratação (BORGES, 2007). A menor perda ao fogo do RLV, em comparação com a PCP, pode ser interpretada como um indicativo de uma menor quantidade de compostos orgânicos voláteis no RLV. Essa diferença pode ter implicações positivas para o compósito cimentício. A variação dimensional resultante da liberação de gases e vapores durante o processo de hidratação pode afetar diretamente as propriedades mecânicas, porosidade e resistência do cimento. A presença de uma menor quantidade de compostos orgânicos voláteis no RLV pode contribuir para minimizar tais efeitos indesejados, preservando a integridade estrutural e melhorando o desempenho global do compósito (CANOVAS et al. 1990).

Tabela 7 - Resultados da Análise de FRX (Fonte: AUTOR, 2023).

| Material | Óxidos (%) | | | | | | | | PF (%) | |
|--|------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|----------|-------------------|------------------|-----------|--------|-----|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | CaO | Na ₂ O | TiO ₂ | Outros* | RLV | PCP |
| RLV | 43,7 | 17,6 | 12 | - | 19,7 | - | 2,6 | 2,9 | 2,9 | 89 |
| Lã de Vidro Comercial Fonte: Alves (2008) | 34,0-73,0 | 2,9-14,5 | 0,3-4,0 | 3,0-5,5 | 6,0-22,0 | - | 0,1-0,8 | 12,0-15,4 | - | - |

*Elementos inferiores a 1%

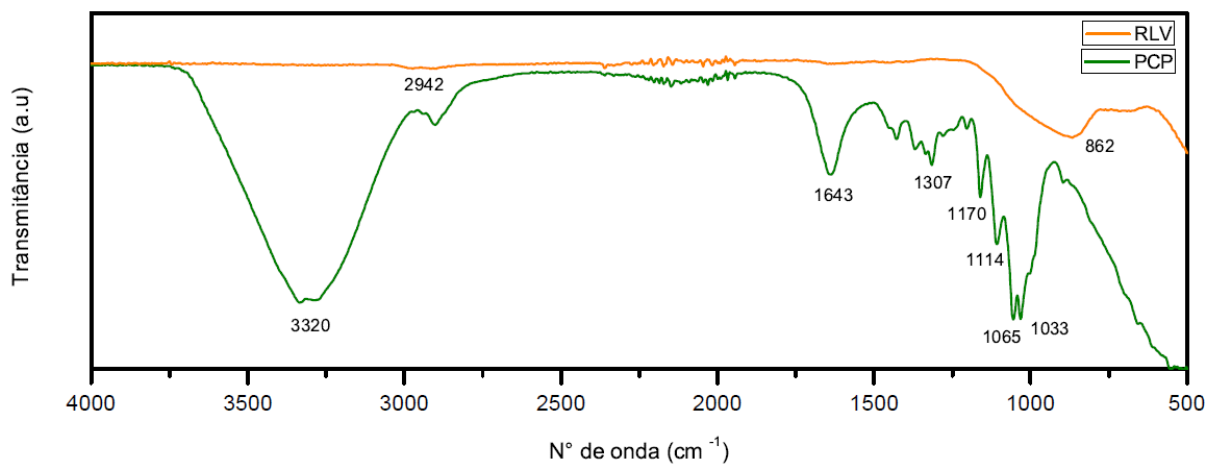
Fonte: Da autora (2023).

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) do RLV e da PCP é apresentado na Figura 9. O RLV apresenta uma banda principal, em 862 cm⁻¹ relacionada com o alongamento assimétrico Si–O–T (T = Si ou Al), indicando um silicato desordenado, em acordo com os resultados apresentados por Pavlin (2021), condizendo com os resultados obtidos por FRX, apontando um alto teor de Si no material. A presença de silicato desordenado é relevante no contexto de compósitos cimentícios, pois pode contribuir para a formação de ligações químicas adicionais na matriz cimentícia. Essas ligações químicas adicionais podem fortalecer a interface entre o RLV e a matriz, melhorando assim a resistência do concreto. A capacidade do silicato desordenado de interagir e se ligar à matriz cimentícia é crucial para otimizar as propriedades mecânicas e estruturais do compósito final.

Já a PCP apresenta cinco bandas principais, 2942, 2952, 1643, 1065 e 1033 cm⁻¹, onde são atribuídas aos grupos funcionais característicos dos poliflavonóides (YAZAK e HILLIS 1977), enquanto as bandas menores, 1307, 1170 e 1114 cm⁻¹ foram atribuídas ao modo de respiração do anel aromático e deformação do CH fora do plano, com dois átomos de hidrogênio livres adjacentes, respectivamente, indicando a presença proeminente da estrutura procianidina (PC) (FOO, 1981), ou seja, grupos de estiramento metálicos simétricos presentes nos espectros

de todos os componentes da PCP, mas principalmente no espectro para a celulose (POLETO, 2012). Essas informações indicam que a PCP possui uma composição complexa, incluindo poliflavonóides e procianidinas, além da celulose. Esses componentes podem contribuir de maneiras distintas para as propriedades do compósito cimentício. Os poliflavonóides, por exemplo, são conhecidos por suas propriedades antioxidantes e podem desempenhar um papel na resistência a agentes oxidativos. Por outro lado, a presença de celulose e procianidina sugere a contribuição para a estrutura e resistência mecânica do compósito.

Figura 9 - FTIR do RLV e da PCP.



Fonte: Da autora (2023).

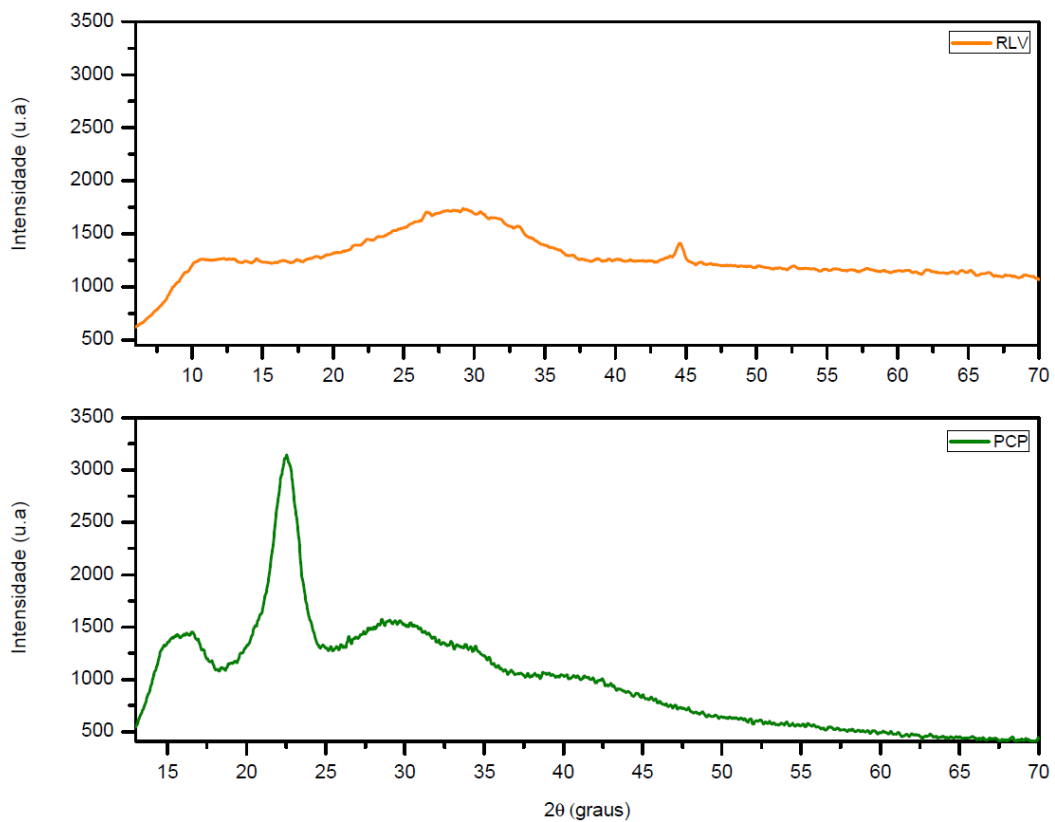
5.1.3 Análise mineralógica

A Figura 10 mostra o difratograma de raios-X (DRX) obtidos para a amostra de RLV e PCP. O RLV, apresenta estrutura inteiramente amorfa, em acordo com os resultados apresentados por Kniess (2001), Evangelista (2012), Defáveri (2016) e Caetano (2020), nos quais também foram identificadas somente estrutura amorfas. Com base nos resultados da análise da composição química elementar obtidos por FRX, é possível afirmar que os elementos estão em estado amorfo. A estrutura amorfa do RLV pode ser benéfica, pois a ausência de uma organização cristalina regular pode contribuir para melhorar as propriedades mecânicas, durabilidade e reatividade do cimento, oferecendo maior disponibilidade de ligações químicas e área superficial, o que pode resultar em um cimento com maior resistência, e capacidade de reação com os componentes do concreto, conseqüentemente, uma maior durabilidade e desempenho geral do material. Já a descrição de um silicato desordenado indicado no espectro de FTIR é condizente com a estrutura amorfa do RLV, na qual significa que o material não

possui uma organização cristalina regular, a falta de ordem estrutural indica que o RLV é composto de partículas desordenadas.

A PCP apresenta dois principais picos de difração, indicativo de um material semicristalino. O primeiro ocorre entre 2θ de 16° , associado à celulose do tipo 1, uma das principais componentes da parede celular da madeira. A celulose do tipo 1 é conhecida por ser uma forma mais amorfa de celulose. O segundo ocorre em 2θ igual a 23° , correspondendo à celulose cristalina (BESBES et al., 2011; KLEMM et al., 2005; TEIXEIRA et al., 2010). Esses padrões semicristalinos, com um pico largo amorfo e outro pico mais agudo e intenso, são consistentes com a natureza estrutural da PCP, conforme também indicado pelo espectro de FTIR. A presença de celulose cristalina sugere uma organização mais ordenada em parte da estrutura da PCP, o que pode contribuir para suas propriedades de reforço estrutural no compósito cimentício. A presença dessas duas formas de celulose pode influenciar as propriedades mecânicas e estruturais do compósito final, proporcionando uma sinergia entre os componentes para otimizar o desempenho global do material.

Figura 10 - Difratoograma de Raios X do RLV e da PCP.



Fonte: Da autora (2023).

5.1.4 Análise morfológica

As micrografias de MEV da PCP e RLV após o beneficiamento seguem apresentadas na Figura 11. O RLV, mostrado pela Figura 11.a, revela uma morfologia distintiva caracterizada por formas cilíndricas, variabilidade nos tamanhos e espessuras das fibras, além da presença de partículas irregulares e angulosas. Essas características são consistentes com as conclusões de estudos anteriores conduzidos por Defáveri (2016) e Pavlin (2021). A morfologia cilíndrica das fibras sugere que o RLV possui uma estrutura fibrosa, o que é uma característica fundamental para materiais que atuam como reforços em compósitos cimentícios. A diversidade nos tamanhos e espessuras das fibras destaca a natureza variada do RLV, o que pode influenciar positivamente as propriedades do compósito. A presença de partículas irregulares e angulosas também pode contribuir para uma maior ancoragem mecânica na matriz cimentícia, melhorando a adesão entre as fibras e a matriz. É possível verificar nas imagens obtidas pelo MEV que o RLV é uma fibra com comprimento menor que 50 μm e diâmetro inferior a 5 μm , atendendo ao critério de fibra curta, conforme citado por Siqueira (2006).

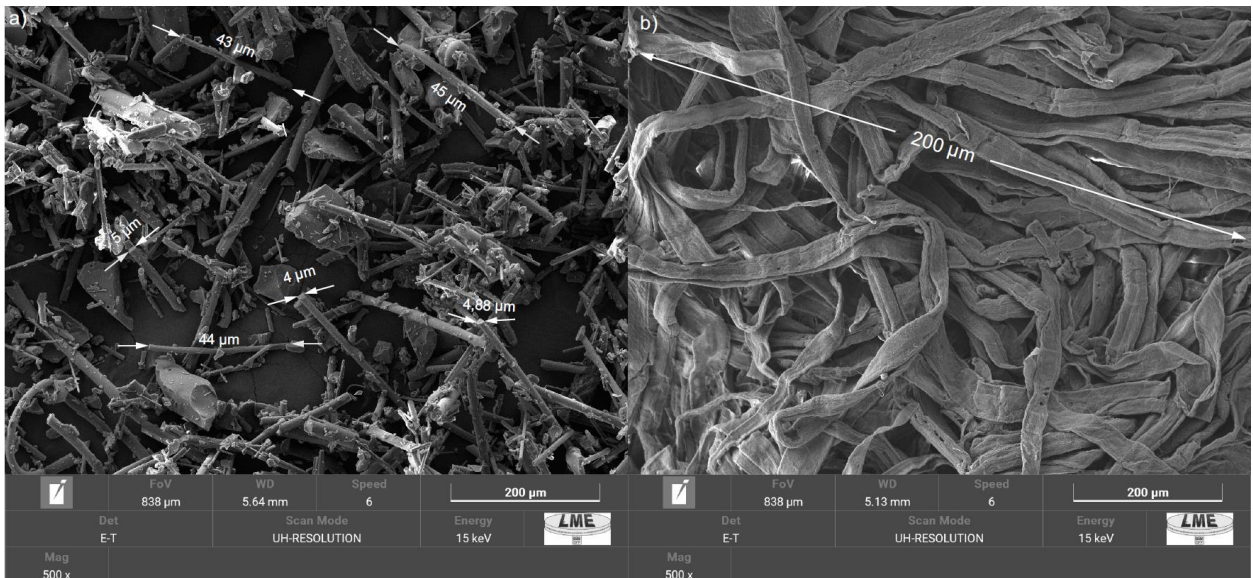
Fibras curtas são conhecidas por oferecer vantagens específicas em compósitos cimentícios, pois tem a capacidade de preencher eficientemente os espaços na matriz cimentícia podendo promover uma distribuição homogênea dos reforços. Isso não apenas contribui para melhorar a coesão, mas também otimiza a interação entre as fibras curtas e a matriz, aproveitando sua maior área superficial. Além disso, a presença de formas irregulares e angulosas nas fibras pode promover uma ancoragem mecânica mais eficaz na matriz, melhorando ainda mais as propriedades mecânicas do compósito. A variedade de tamanhos e espessuras nas fibras também pode contribuir para uma distribuição mais uniforme dos reforços, resultando em propriedades aprimoradas do compósito cimentício.

Na Figura 11.b é possível verificar que a PCP exibe uma morfologia caracterizada por formas achatadas e longas, com tamanhos e espessuras visualmente semelhantes. Conforme destacado por Siqueira (2006), fibras que apresentam comprimentos superiores a 400 μm são designadas como fibras longas. Assim, a análise das características da PCP, realizada por meio do MEV revela comprimentos superiores a 400 μm , confirmando que a PCP atende aos critérios estabelecidos para ser classificada como uma fibra longa.

A forma achatada das fibras de PCP pode ter implicações significativas na capacidade dessas fibras de fornecer reforço estrutural ao compósito cimentício. Fibras longas, como as da PCP, são conhecidas por contribuir de maneira expressiva para as propriedades de tração e flexão do material. A sua presença pode oferecer resistência adicional ao compósito,

melhorando a tenacidade e a capacidade de absorção de energia, características cruciais em aplicações estruturais. A uniformidade nos tamanhos e espessuras das fibras de PCP é um aspecto positivo, pois promove uma distribuição homogênea dos reforços na matriz cimentícia. Isso pode resultar em uma resposta mecânica mais consistente do compósito, contribuindo para propriedades mais previsíveis e controláveis.

Figura 11 - MEV a) do RLV e b) da PCP.



Fonte: Da autora (2023).

5.2 Análises dos compósitos

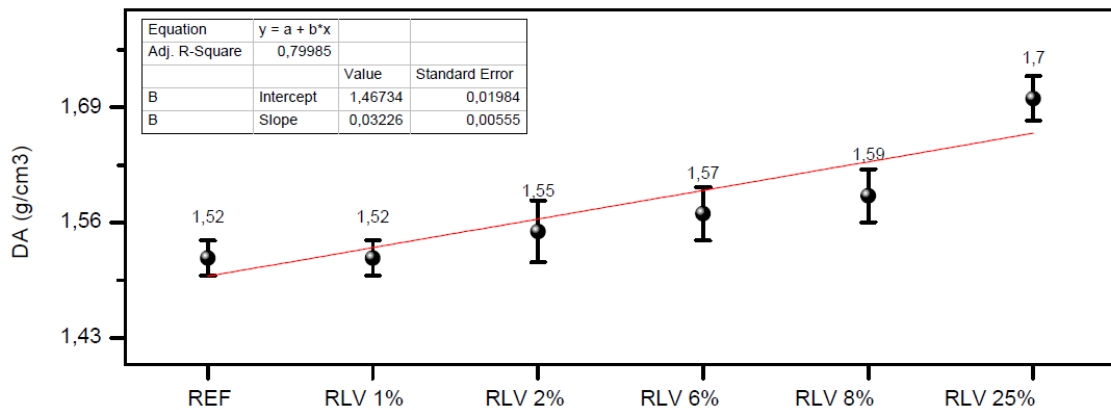
5.2.1 Análise físicas

A densidade aparente dos compósitos segue apresentada na Figura 12. É possível observar que à medida em que se aumenta os teores de RLV, os valores de densidade apresentaram um acréscimo de até 12%, variando de 1,52 a 1,70 g/cm³. Este resultado pode ser explicado por uma possível diferença de porosidade do compósito. O aumento na densidade está diretamente relacionado a uma maior quantidade de material sólido na composição, o que, por sua vez, pode resultar em melhorias nas propriedades mecânicas, como uma maior resistência à tração. Essa observação sugere que a adição controlada de RLV está contribuindo para a formação de uma matriz mais compacta e menos porosa, o que é vantajoso para a resistência e a durabilidade do compósito.

Os resultados obtidos estão em concordância com a faixa de densidade estipulada pela indústria, conforme mencionado por Fontenelle (2012), que varia de 1,40 a 1,70 g/cm³. Essa

conformidade com os padrões da indústria fortalece a viabilidade desses compósitos para diversas aplicações, destacando a capacidade de ajustar as características do material por meio da variação dos teores de RLV. Essa flexibilidade na formulação pode ser uma vantagem significativa para atender a requisitos específicos de desempenho em diferentes contextos de aplicação.

Figura 12 - Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão para a propriedade de Densidade Aparente (DA) dos compósitos.



Fonte: Da autora (2023).

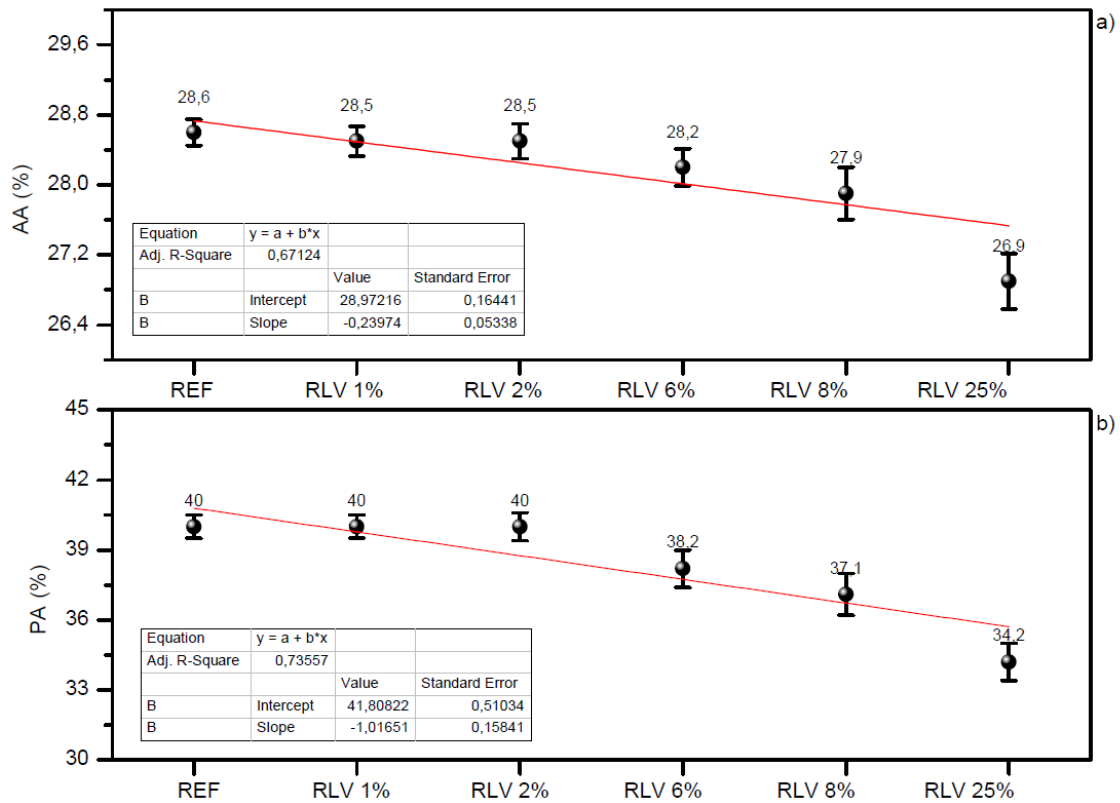
A Figura 13 apresenta a absorção de água e porosidade dos compósitos. É possível observar que a medida em que se aumentava os teores de RLV, os valores de absorção de água apresentaram um decréscimo de até 5,94% (Figura 13.a). Já na Figura 13.b é possível perceber que à medida em que se aumentava os teores de RLV, os valores de porosidade apresentaram um decréscimo de até 14,5%. Os resultados de absorção de água podem estar associados ao resultado de densidade aparente, pois compósitos mais densos terão menos espaços vazios, fazendo com que a absorção de água dos compósitos consequentemente seja menor. Os resultados de porosidade, em virtude de sua fina granulometria, revelam a capacidade do material em reagir com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, originando produtos de reação que eficazmente preenchem os espaços vazios na matriz. Essa reação desempenha um papel crucial ao favorecer a maior densificação do cimento, resultando na significativa redução da quantidade de espaços porosos e, por conseguinte, na minimização da porosidade do material final. Esses resultados podem estar associados à perda ao fogo do material, indicando um impacto positivo no compósito.

Os resultados atendem ao critério normatizado de 37% para absorção de água em fibrocimento, conforme estabelecido pela (ABNT NBR 12800:1993), e estão em conformidade

com a faixa de absorção de água estipulada pela indústria, conforme citado por Fontenelle (2012), de aproximadamente 30%.

A satisfação desse critério normativo e a conformidade com as referências da indústria são indicativos positivos da qualidade do compósito. A absorção de água desempenha um papel crucial na avaliação de materiais de construção, sendo essencial que esses se mantenham dentro dos limites estabelecidos por normas e padrões da indústria. Esta conformidade é fundamental para assegurar não apenas a durabilidade, mas também o desempenho a longo prazo do material, garantindo sua integridade estrutural e resistência ao longo do tempo.

Figura 13 – Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão para a propriedade de a) Absorção de Água (AA) e b) Porosidade Aparente (PA) dos compósitos.



Fonte: Da autora (2023).

5.2.2 Análise das propriedades mecânicas

A Figura 14 apresenta os resultados obtidos de resistência a tração na flexão ao 7, 28 e 90 dias. Os compósitos de referência apresentaram um valor de módulo de ruptura de 7,1, 7,2 e 6,3 Mpa respectivamente, enquanto que as amostras com RLV nas porcentagens de (1, 2, 6, 8 e 25%) apresentaram um valor entre 6,4 e 12,0 Mpa. É possível notar que com a adição de RLV

ocorreu um aumento na resistência a tração na flexão, atingindo valores de 58% comparado à referência.

Ao comparar as diferentes idades dos compósitos, nota-se que a amostra de referência, conforme esperado, registrou uma redução de 14% na resistência à flexão aos 90 dias. Inicialmente, a resistência estava em 7,1 Mpa, aos 7 dias, 7,2 Mpa aos 28 e, posteriormente, aos 90 dias, diminuiu para 6,3 Mpa. Essa diminuição pode ser atribuída à mineralização das fibras vegetais, conforme discutido por Mohr, Biernacki e Kurtis (2007). A mineralização das fibras vegetais ao longo do tempo pode ter contribuído para a redução da resistência à flexão, evidenciando uma resposta natural ao envelhecimento do compósito.

Da mesma forma, as amostras com RLV (1, 2, 6, 8 e 25%), também apresentaram redução da resistência a flexão ao decorrer dos dias, com reduções de até 25%. Com resistência a tração na flexão máxima geral aos 7 dias de 12 Mpa, caindo para 10,5 Mpa aos 28 dias e aos 90 dias para 8 Mpa de resistência a tração na flexão máxima geral. Essa redução progressiva na resistência à flexão pode ser atribuída à mineralização que ocorre no ambiente alcalino da matriz de cimento durante o processo de hidratação do cimento. O ambiente alcalino pode afetar as propriedades mecânicas das fibras e materiais presentes, resultando em uma diminuição gradual na resistência à flexão ao longo do período de observação.

Ao analisar os compósitos de referência em comparação com os compósitos contendo RLV, destaca-se que os compósitos de RLV apresentaram resultados superiores de resistência à tração na flexão em todas as idades e teores, sugerindo um potencial significativo de reforço.

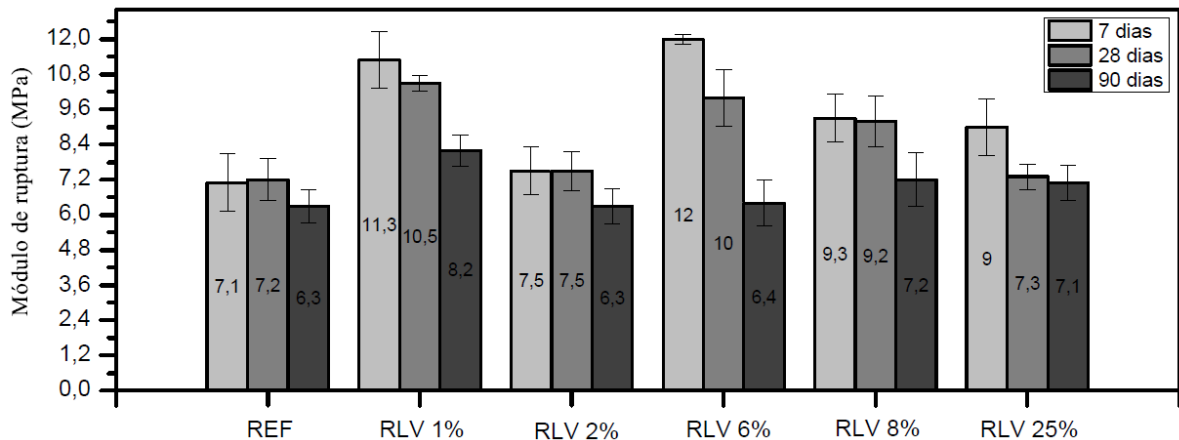
A granulação fina do RLV, caracterizada por fibras curtas, proporciona uma interação mais eficaz com a matriz cimentícia quando comparada com os compósitos de REF, composta apenas por PCP (fibras longas). Esse arranjo resulta em melhorias nos resultados de reforço da resistência à tração na flexão aos 7, 28 e 90 dias, evidenciado nas micrografias obtidas por MEV na Figura 12.a) e 12.b). Além disso, a adição de materiais pozolânicos, como potencialmente no caso do RLV, conforme mencionado por Defáveri, 2016, desencadeia uma série de efeitos benéficos. Em primeiro lugar, contribui para uma maior disponibilidade de ligações químicas e área superficial na matriz cimentícia, favorecendo a formação de um compósito com maior resistência mecânica.

Além disso, a reação entre o RLV e os componentes do cimento induz a formação de uma matriz mais densa e menos porosa, conforme indicado nos resultados obtidos. Essa formação de matriz densa está diretamente associada à redução da presença de espaços vazios nos compósitos, resultando em menor absorção de água e porosidade. Esses fatores contribuem significativamente para o aumento da resistência do material. A redução da porosidade é

particularmente relevante, pois os espaços porosos representam pontos de fraqueza na matriz, e uma menor porosidade está associada a uma melhoria na resistência mecânica global. Essa combinação de efeitos ressalta o potencial do RLV como um agente eficaz para reforçar compósitos cimentícios.

Os resultados de MOR, estão em acordo com a literatura, conforme relatado no estudo de Silva (2002) que investigou compósitos reforçados com fibra de celulose e os valores de MOR obtidos foram comparáveis à referência (REF). Similarmente, o estudo conduzido por Pereira (2021), que analisou o efeito da carbonatação acelerada em compósitos contendo resíduo de quartzo e fibras de coco, revelou resultados de Módulo de Ruptura situados na faixa de 8 a 11 MPa. De modo geral os fibrocimentos com RLV (1, 2, 6, 8 e 25%) foram classificados como de categoria 3 pela norma NBR 15.498 (ABNT, 2007), que considera para essa categoria fibrocimentos com MOR entre 7 a 13 MPa.

Figura 14 – Módulo de ruptura dos compósitos submetidos a diferentes tratamentos em 7, 28 e 90 dias.



Fonte: Da autora (2023).

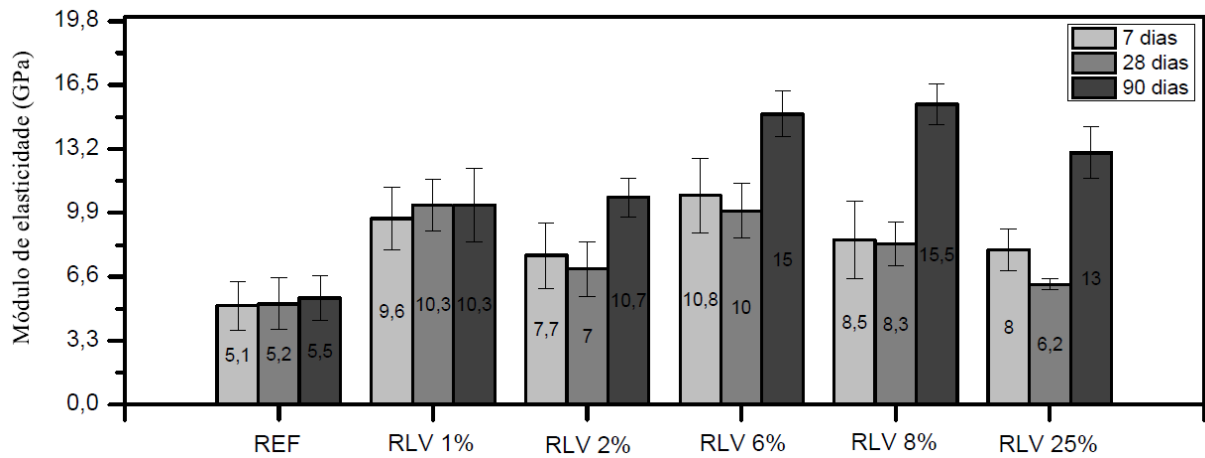
A Figura 15 apresenta os resultados obtidos de rigidez na tração na flexão ao 7, 28 e 90 dias. Os compósitos de referência apresentaram um valor de módulo de elasticidade (MOE) de 5,1, 5,2 e 5,5 Gpa, respectivamente, enquanto que a amostras com RLV apresentaram um valor de entre 6,1 e 15,5 Gpa. É possível notar que com a adição de RLV ocorreu um aumento da rigidez do material, dobrando os valores comparado à referência.

Comparando as idades é possível observar que a amostra de referência, teve um leve aumento de elasticidade a flexão aos 90 dias, isso possivelmente pode estar relacionado ao processo de cura do cimento, com o passar do tempo, o cimento continua a hidratar e ganhar

resistência, o que pode resultar em um aumento gradual da rigidez do material. Da mesma forma, as amostras com RLV apresentaram aumento de elasticidade de 7 a 90 dias, ficando entre 6,1 a 15,5 GPa, podendo ser atribuída à cura, conseqüentemente, levando a um aumento no MOE em comparação com as amostras de 7 dias. Essa melhoria pode estar correlacionada à menor perda ao fogo do RLV em comparação com a da PCP, o que pode resultar em uma melhor interface fibra/matriz durante o processo de hidratação da matriz cimentícia, levando a uma matriz mais densa e menos porosa, contribuindo para um material mais rígido e com maior capacidade de resistir à deformação.

Os resultados de MOE estão em acordo com a literatura, conforme relatado no estudo de Cavalcante (2009) que reforçou compósitos de cimento com propileno e obteve MOR em referência de aproximadamente 5 GPa, e no estudo de Pereira (2021), que abordou o efeito da carbonatação acelerada em compósitos com resíduo de quartzo e fibras de coco, os resultados demonstraram valores de MOE na faixa de 5750,28 a 65996,09 MPa.

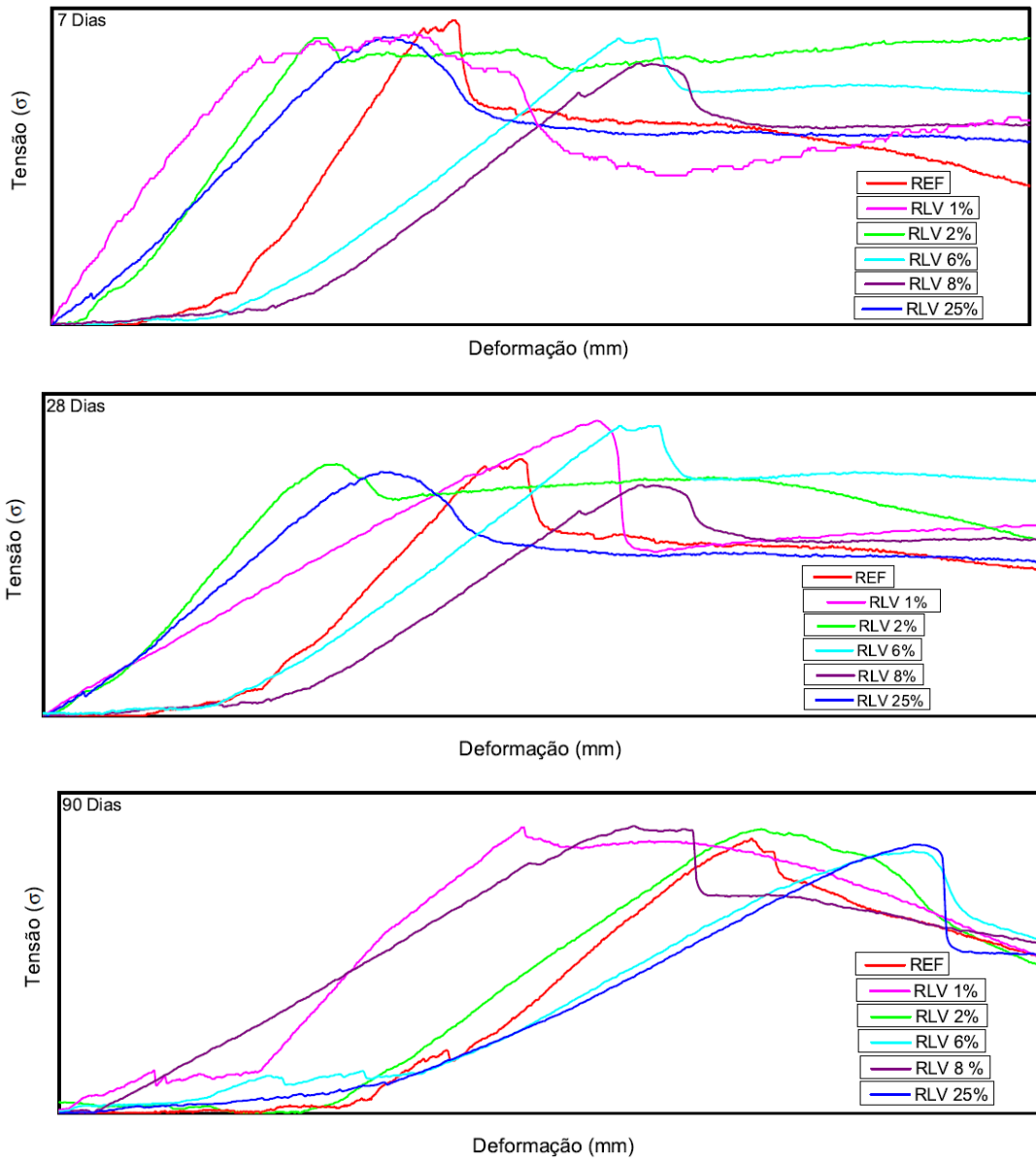
Figura 15 – Módulo de elasticidade dos compósitos submetidos a diferentes tratamentos em 7, 28 e 90 dias.



Fonte: Da autora (2023).

A Figura 16, a seguir, apresenta as curvas de Tensão x Deformação para compósitos de REF e RLV (1%, 2%, 6%, 8%, e 25%) nas idades de 7, 28 e 90 dias. Essas curvas oferecem uma análise detalhada do comportamento mecânico dos materiais, estabelecendo uma correlação com os resultados de Resistência à Ruptura (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE).

Figura 16 - Curvas de Tensão x Deformação para compósitos de REF e RLV (1%, 2%, 6%, 8%, e 25%) nas idades de 7, 28 e 90 dias.



Fonte: Da autora (2023).

Nos compósitos de REF, a curva de Tensão x Deformação segue um padrão típico de compósitos cimentícios reforçados com fibras longas, com uma fase de deformação plástica pós-pico, indicando uma maior capacidade do material de absorver energia mesmo após o pico de tensão ter sido atingido. A área sob a curva reflete a energia absorvida pelo material durante o teste, indicando a capacidade de absorver deformações sem falha catastrófica.

Ao analisar o contexto geral dos compósitos reforçados com RLV (1, 2, 6, 8, e 25%), notamos variações significativas nas curvas de Tensão x Deformação em comparação com os compósitos de REF. O aumento gradual da resistência à tração na flexão ao longo dos dias é

refletido nas curvas, evidenciando o impacto positivo do RLV nas propriedades mecânicas. Especificamente, as curvas dos compósitos com RLV (1, 2, 6, 8, e 25%) nas idades de 28 e 90 dias mostram uma maior rigidez, correlacionando-se diretamente com os resultados de MOE.

A curva de Tensão x Deformação para 1% de RLV revela um aumento gradual na MOE ao longo do período de avaliação. Aos 28 e 90 dias, observa-se uma rigidez significativamente maior, indicada por uma região de escoamento mais prolongada e uma deformação máxima mais elevada. Esses resultados sugerem que mesmo uma adição modesta de 1% de RLV exerce uma influência positiva nas propriedades mecânicas, contribuindo para a formação de uma matriz mais resistente e robusta.

O compósito com 2% de RLV exibe um comportamento semelhante ao de 1%, com um aumento progressivo na resistência à tração na flexão, evidenciando a eficácia contínua do RLV como agente de reforço. A elevação da rigidez nas etapas avançadas de maturação, especialmente aos 28 e 90 dias, indica uma resposta favorável ao processo de mineralização e formação de matriz mais densa.

A incorporação de 6% de RLV demonstra uma influência mais significativa nas propriedades mecânicas. A resistência à tração na flexão aumenta significativamente, evidenciando a contribuição significativa do RLV como agente reforçador. A curva mostra uma maior capacidade de suportar cargas antes da falha, indicando um melhor desempenho estrutural.

O compósito com 25% de RLV exibe a mais alta resistência à tração na flexão. Entretanto, é importante notar que, em alguns casos, teores muito elevados podem apresentar diminuições nas propriedades mecânicas devido a possíveis aglomerações. Aos 90 dias, a curva sugere uma estabilização na resistência, indicando um possível ponto ótimo em termos de teor de RLV.

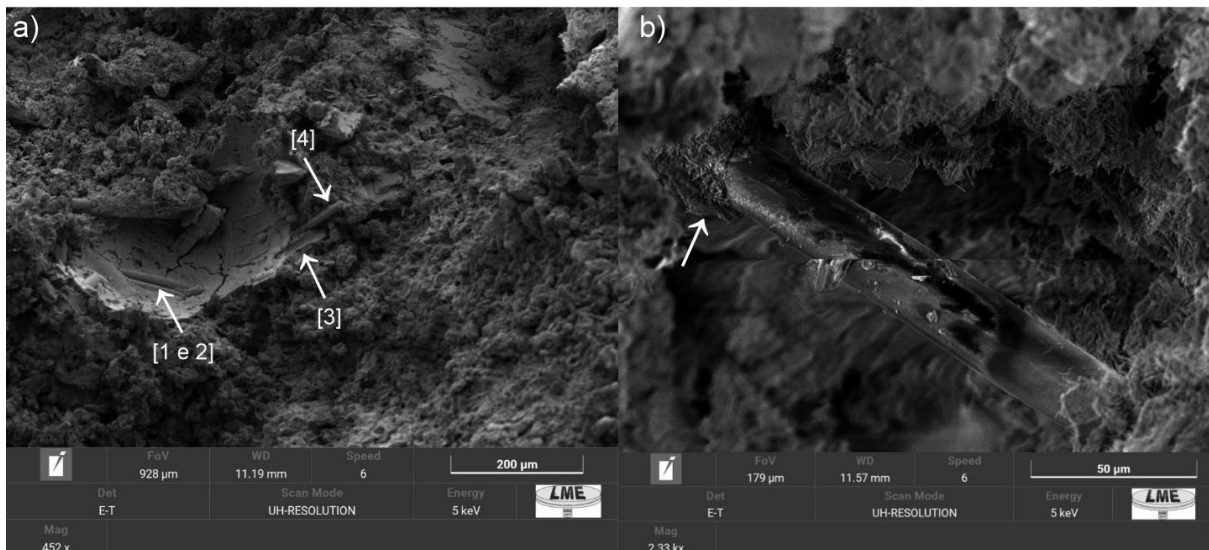
A relação entre as curvas de Tensão x Deformação e os parâmetros mecânicos é notável, pois a ascensão nas curvas, especialmente para os compósitos com RLV, está alinhada com os valores crescentes de MOR e MOE. A maior resistência dos compósitos com RLV é evidenciada por uma região de escoamento mais prolongada e uma deformação máxima mais elevada, indicando uma maior capacidade de suportar cargas antes da falha. A influência da granulação fina do RLV e seus efeitos pozolânicos na formação de uma matriz mais densa e menos porosa é claramente refletida nas curvas de Tensão x Deformação. A resistência superior dos compósitos com RLV é especialmente notável nas fases posteriores de maturação, sugerindo uma maior eficácia do RLV como agente de reforço ao longo do tempo.

5.3 Análise microestrutural da pasta

5.3.1 Análise morfológica

A Figura 19 exibe as análises microestruturais referentes à interação entre a fibra e a matriz. Na Figura 19.a, é evidenciado um ponto específico do compósito RLV 25% aos 90 dias, enfatizando a interação na zona de transição entre a microfibras de RLV e a matriz. A Figura 19.b mostra uma análise mais aprofundada dessa interação, proporcionando detalhes adicionais sobre a interação entre a fibra/matriz.

Figura 17 - Interação fibra/matriz, [1 e 2] Interceptação; [3] *Pull-out*; [4] Rompimento.



Fonte: Da autora (2023).

Ao correlacionar a Figura 20.a com a Figura 1.c no capítulo 3.1 desse estudo, podemos fazer algumas observações. Na indicação [1 e 2] é possível observar a interceptação da microfibras em conjunto com a matriz ao longo do compósito. Isso sugere uma boa adesão entre o RLV e a matriz, indicando que a microfibras está sendo envolvida pela matriz de forma adequada, aumentando a área de contato e melhorando a transferência de forças, permitindo uma transferência eficiente de cargas entre os materiais. A indicação [3], mostra o fenômeno conhecido como arrancamento da fibra, ou *pull-out*. Nessa situação, a microfibras deslizou-se completamente da matriz, indicando uma adesão insuficiente entre os materiais, podendo ser resultado de uma fraca adesão. Na região [4], é possível observar o rompimento da microfibras devido à flexão sofrida. Isso indica que a fibra não foi capaz de resistir às forças aplicadas, levando à sua falha.

Através da análise detalhada da Figura 13.b, é possível observar com maior nitidez a interação entre o resíduo e a matriz. Podemos visualizar, indicado pela seta branca, que a matriz envolve as microfibras, fortalecendo-as e proporcionando uma maior coesão estrutural. Essa observação evidencia uma interação positiva entre o resíduo e a matriz, contribuindo para o reforço e a integridade do material compósito. Essa interação é uma das principais razões pelas quais houve um aumento significativo na resistência à tração (MOR) e na rigidez (MOE) do compósito com a adição de RLV. A mineralização das fibras do RLV durante o processo de cura ou hidratação da matriz cimentícia resulta em uma interface fibra/matriz mais eficiente, o que melhora as propriedades mecânicas do material. Além disso, a formação de uma matriz mais densa e menos porosa, como indicado pelos resultados de densidade e porosidade, também pode ser correlacionada com a observação da Figura 13.b. A interação entre o RLV e a matriz cimentícia pode levar a uma melhor compactação do material, preenchendo os espaços vazios e reduzindo a porosidade.

6 CONCLUSÕES

Por meio dos resultados encontrados é possível concluir que o RLV é composto por elevado teor de sílica (Si) e teores médios de alumínio (Al), cálcio (Ca) e ferro (Fe), essa composição condiz com compostos presentes no clínquer do cimento Portland e materiais pozolânicos, sugerindo que o RLV pode apresentar características promissoras como pozolana, enriquecendo a matriz do cimento e potencialmente contribuindo para a melhoria de suas propriedades físicas e mecânicas. O RLV tem estrutura amorfa e granulometria fina, o que permite melhor interação com a matriz cimentícia. Sua adição aumentou a densidade do material e reduziu a absorção de água e porosidade dos compósitos, resultados no qual estão diretamente relacionados à menor perda ao fogo do RLV e granulometria fina o que promove uma melhor interface fibra/matriz durante o processo de hidratação da matriz cimentícia. As análises mecânicas dos compósitos evidenciaram um aumento significativo na resistência à tração na flexão (MOR) e no módulo de elasticidade (MOE) com a adição de RLV na matriz cimentícia. Essa melhoria está correlacionada à interação positiva entre o RLV e a matriz, fortalecendo as microfibras e proporcionando maior coesão estrutural. A reação do RLV com os componentes do cimento contribuiu para uma matriz mais densa e menos porosa, o que também influenciou no aumento da resistência mecânica. A análise morfológica das micrografias de microscopia eletrônica de varredura (MEV) evidenciou a interação entre o RLV e a matriz cimentícia, demonstrando uma adesão adequada entre os materiais, o que é essencial para o reforço e as propriedades mecânicas do compósito. Essa interação fortalece as microfibras, proporcionando maior coesão estrutural e contribuindo para o aumento da resistência mecânica e rigidez do material. Finalmente, o uso de RLV como matéria-prima alternativa pode produzir compósitos de base tecnológica, com desempenho superior ao convencional, gerando ainda ganhos ambientais, ou seja, redução de consumo de matéria-prima, bem como redução no uso de aterros.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar o efeito de diferentes tratamentos térmicos na composição e nas propriedades físicas e mecânicas do RLV, visando otimizar sua utilização como adição ao cimento;
- Avaliar a durabilidade e a resistência do compósito de cimento com RLV em condições ambientais agressivas;
- Realizar estudos de vida útil do compósito com RLV para entender como suas propriedades evoluem ao longo do tempo e identificar possíveis problemas de desempenho a longo prazo;
- Explorar a possibilidade de combinar o RLV com outros materiais reciclados ou resíduos industriais, visando criar compósitos de cimento com características ainda mais vantajosas do ponto de vista ambiental;
- Realizar estudos de análise do ciclo de vida do compósito de cimento com RLV, comparando-o com o cimento convencional, a fim de avaliar seus impactos ambientais e identificar oportunidades de melhorias no processo de produção e utilização.

REFERÊNCIAS

ADEDIRAN, A. et al. Reciclagem de lã de vidro como fundente na produção de cerâmica à base de argila e resíduos. *Journal of Cleaner Production*, v. 289, 2021, p. 125673. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125673>>.

ADEDIRAN, A.; LEMOUGNA, P. N.; YLINIEMI, J.; TANSKANEN, P.; KINNUNEN, P.; RONING, J.; ILLIKAINEN, M. Recycling glass wool as a fluxing agent in the production of clay- and waste-based ceramics. *Journal of Cleaner Production*, v. 289, 2021, p. 125673. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125673>>.

AGOPYAN, Vahan. Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais. 1991. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

AGUDO, A.; GONZÁLEZ, C. A. Exposição ao amianto e seus efeitos na saúde. *Arco Prev Riscos Trabalhistas*, 2001;2:55–7.

AKER, S.A.S. Cracking in fibre cement products. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 2, p. 202-207, 2010.

ALMEIDA, F. N.; ARAÚJO JUNIOR, I. T.; ANDRADE, W. G. Study on the market and competitiveness of fibre-cement composite products reinforced with sisal and other vegetable fibres. Paraíba Empresa Brasileira de Consultoria e Projetos Ltda, 2007. 71 p.

ALVES, J.O. Processo de reciclagem da escória de aciaria e do resíduo de corte de granito visando a produção de lã mineral. Dissertação de mestrado. REDEMTA/UFOP. Ouro Preto, 2008.

AQUINO, R.; COELI, M.; MARTINS, P. Desenvolvimento de compósitos de fibras de piaçava da espécie *attalea funifera* mart e matriz de resina poliéster. 2003.

ARAÚJO, C. T. F. Estudo do comportamento de juntas de argamassa reforçadas com fibras de polipropileno. 2005. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2005.

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and Building Materials*, v. 79, 2015, p. 115–128.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5732:1991. Amianto crisotila - Determinação de fibras. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733:1991. Amianto anfíbolio - Determinação de fibras. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5735:1991. Amianto anfíbolio - Método de extração de fibras. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578:1991. Resíduos sólidos - Amostragem. Rio de Janeiro, 1991.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5732:1991. Amianto crisotila - Determinação de fibras. Rio de Janeiro, 1991.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15498:2016. Resíduos sólidos - Terminologia. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653:2012. Agregados - Preparo e determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM ISO 3310-1:2017. Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação - Parte 1: Peneiras de ensaio de tecido metálico. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222:2011. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12800:1993. Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento Portland. Boletim Técnico – BT 106. São Paulo, ABCP, 2002, 27p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS ABRAF. Anuário estatístico da ABRAF 2013 ano base 2012. Brasília: [s.n.], 2013. 148 p. Disponível em: <www.abraflor.org.br/estatisticas.asp>

AZIZ, M. A.; PARAMASIVAM, P.; LEE, S. L. Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, v. 3, n. 2, p. 123–132, 1981.

B.H.W.S. de Jong, G.E. Brown, Polymerization of silicate and aluminate tetrahedra in glasses, melts and aqueous solutions—II. The network modifying effects of Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Li^+ , H^+ , OH^- , F^- , Cl^- , H_2O , CO_2 and H_3O^+ on silicate polymers. *Geochem. Cosmochim. Acta* 44 (1980) 1627–1642.

BENTUR, A.; MINDESS, S. Introduction. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, p. 21–30, 1990.

BERNARDI, S. T. Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçados com fibra de Aramida Kevlar. 2003, p. 164. Dissertação (mestrado) Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BETIOLI, A. Degradação De Fibras De Pet Em Materiais À Base De Cimento Portland. *Journal of Chemical Information and Modeling*, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.

BORGES, P.R. Utilização de resíduos de lã de vidro em fabricação de concreto. 2007. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.

BRAGA, M.; BRITO, J.; VEIGA, R. Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. *Construction and Building Materials*, v. 36, p. 960-968, 2012.

BRANDT, A. M. Fibre reinforced cement-base (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composites and Structures*, v. 86, p. 3 – 9, 2008.

CAETANO, MARINA ALTOÉ. Avaliação de matrizes obtidas pela álcali-ativação do rejeito de barragem de minério de ferro aditivado com resíduo de lã de vidro. 2020. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

CALLISTER Jr., William D.; RETHWISCH, David G. *Ciência e Engenharia de Materiais*. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CALLISTER Jr., William D.; RETHWISCH, David G. *Ciência e Engenharia de Materiais*. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CALLISTER Jr., William D.; RETHWISCH, David G. *Ciência e Engenharia de Materiais*. 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CANOVAS, M. E., KAWICHE, G. M. and SELVA, N. H. Possible ways of preventing deterioration of vegetable fibers in cement mortars. 2 nd Int. Symp. Vegetable Plants and Their Use as Building Materials. RILEM, Proceedings n.7, Chapman & Hall, London, 1990.

CARPANEZZI, A. A.; PEREIRA, J. C. D.; CARVALHO, P. E. R.; REIS, A.; VIEIRA, A. R. R.; ROTTA, E.; STURION, J. A.; RAUEN, M. J.; SILVEIRA, R. A. Zoneamento ecológico para plantios florestais no estado de Santa Catarina. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Florestas, Curitiba, 1988.

CASTRO, V. G. Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro [online]. Mossoró: EdUFERSA, 2021, 127 p. ISBN: 978-65-87108-26-1.

CLARAMUNT, J.; ARDANUY, M.; GARCÍA-HORTAL, J. A.; DIAS, R.; FILHO, T. Cement & Concrete Composites The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 5, p. 586–595, 2011.

COELHO, T.P.P. avaliação do efeito de agentes hidrofugantes nas características de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto. 2019 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de São Carlos Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. São Carlos, SP.

COELHO, T. C.C. Efeitos do envelhecimento natural no desempenho térmico de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto. 2017.189f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil área de Construção). Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2017

COUTINHO, J. S Agregados para argamassas e betões. *Materiais de Construção Civil 1*, (1999).

COUTTS, R. S. P. A review of Australian research into natural fibre cement composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, n. 5, p. 518–526, 2005.

COUTTS, R. S. P. Wood fibre reinforced cement composites. In: SWAMY, R. N. (ed.). *Natural fibre reinforced cement and concrete*. Glasgow: Blackie, 1988.

CRUZ, A.A.F. Estudo sobre a utilização do resíduo da queima da biomassa em argamassas. 2002. 99 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, Santa Catarina.

RISOTILA BRASIL. Disponível em <http://www.crisotilabrasil.org.br>

DEFAVERI, K. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de lã de rocha, fibra de vidro e lã de vidro. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG.

DEFÁVERI, K.C.S; SANTOS, L.F; FRANCO J.M; PEIXOTO R.A.F; BRIGOLINI, G.J, Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: a study of mechanical and microstructural properties, *Construct. Build. Mater.* 220 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.181>.

DEFÁVERI, K.C.S; SANTOS, L.F; FRANCO J.M; PEIXOTO R.A.F; BRIGOLINI, G.J, Glass wool residue: a potential supplementary cementitious material, *ACI Mater. J.* 116 (2018) 43–49, <https://doi.org/10.14359/51716679>.

DEFÁVERI, K.C.S; SANTOS, L.F; FRANCO J.M; PEIXOTO R.A.F; BRIGOLINI, G.J, Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: A study of mechanical and microstructural properties. *Construction and Building Materials*, 220, 375–385. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.05.181

DIAS, C. M. R.; SAVASTANO, H.; JOHN, V. M. Exploring the potential of functionally graded materials concept for the development of fiber cement. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 2, p. 140–146, 2010.

DUARTE, João Batista. Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por pó de pedra em concreto de cimento Portland. 2013. 89 f. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

ETERNIT. Disponível em <http://www.etsnit.com.br/corporativo/historia/index.php>

EMBRAPA. Disponível em <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/pinus/perguntas-e-respostas>

EVANGELISTA, N. Estudo da utilização dos resíduos industriais de lã cerâmica e lã de vidro em argamassas e concreto. 2011. 186 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto.

EVANGELISTA, N.; TENÓRIO, J.; OLIVEIRA, J. Pozolanicidade dos resíduos industriais, lã de vidro e lã cerâmica. Revista Escola de Minas. V. 65, p.79-85. 2012

FARIAS I. S. et al Polpação organosolv aplicada a fibras de resíduos lignocelulósicos. Repositório UFS – Universidade Federal de Sergipe. Sergipe, PB, v. 1, p 1-8, 23 out. 2015.

FERREIRA M. H. D. C., Influência do fator de forma e teor de adição de microfibras de resíduo de lã de vidro na resistência de argamassas de cimento Portland. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas -UFOP, Ouro Preto - MG, 2023.

FERREIRA, J. A. M.; COSTA, J. D. M.; REIS, P. N. B. Static and fatigue behaviour of glass-fibre-reinforced polypropylene composites. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, v. 31, n. 1, p. 67–74, 1999.

FERREIRA, S. R. SILVA, F. A. LIMA, P. R. L. TOLEDO FILHO, R. D. Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. Artigo. Construction & Building Materials. Vol. 139, 2017.

FONTES, W. C.; DUTRA, M. B.; OKADA, E. M.; SILVA, G. J. B.; PEIXOTO, R. A. F., Argamassas com resíduos de lã de vidro e lã de rocha pós-processados. In: Congresso Brasileiro do Concreto. Natal. 2012.

FONTENELLE, J. H. Sistema de fixação e juntas em vedações verticais constituídas por placas cimentícias: Estado da arte, desenvolvimento de um sistema e avaliação experimental. 2012. 219 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

FOO LY (1981) Proanthocyanidins: gross chemical structures by infrared spectra. *Phytochem* 20:1397–1402

GARBALINSKA,H; WYGOCKA, A. Incorporation of fine concretes aggregates in mortar. *Construction and buildings materials*, 51, 258-266. 2014.

HANNANT. Fibre Cements and Fibre Concretes Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites Proceedings of RILEM. v. 50, p. 99620, 1978.

HEINRICKS, H.; BERKENKAMP, R.; LEMPFER, K.; FERCHLAND, H.-J. Global 39 Tecnologia para o desenvolvimento de telhas de fibrocimento – CIM-CEL review of technologies and markets for building materials. In: *INORGANICBONDED WOOD AND FIBER COMPOSITE MATERIALS*, 7., Sun Valley, 2000. Proceedings... Moscow, University of Idaho, 2000. 12 p. /SHS Report/

HIDALGO, A.; PETIT, S.; DOMINGO, C.; ALONSO, C.; ANDRADE, C. Microstructural characterization of leaching effects in cement pastes due to neutralisation of their alkaline nature: Part I: portland cement pastes. *Cem. Concr. Res.*, v. 37, n. 1, 2007, p. 63–70.

HILLES, M. M.; ZIARA, M. M. Mechanical behavior of high strength concrete reinforced with glass fiber. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, v. 22, n. 3, p. 920–928, 1 jun. 2019.

IKAI, S. et al. Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 2, p. 171–180, 2010. Investigation of mechanical properties of fiber-cement board reinforced with cellulosic fibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 570, n. 1, 2019.

ISOVER SAINT-GOBAIN. Ficha de informação de segurança de produto químico - Lã de Vidro. 4 p. São Paulo. 2012.

IZQUIERDO, I. S. Uso da fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural. 2011, p. 128. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – UFSCAR, São Carlos, 2011.

JUNIRO, H. S.; AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Tecnologia para o desenvolvimento de telhas de fibrocimento – CIM-CEL. v. 6, n. 1984, p. 14–39, 2004.

KABIR, M. M. et al. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*, v. 43, n. 7, p. 2883–2892, 2012.

KHEDARI, J.; WATSANASATHAPORN, P.; HIRUNLABH, J. Development of fibre-based soil-cement block with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, n. 1, p. 111–116, 2005.

KIHARA, Y. CENTURIONE, S. L. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. Capítulo 10 – O cimento Portland. 1ª ed. São Paulo: IBRACON, 2005. P. 295 – 322

KNIESS, C.T. Obtenção de materiais vitro-cerâmicos a partir de cinzas pesadas de carvão mineral. Florianópolis, SC, Fev, 2001. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina.

KUDER, K. G.; SHAH, S. P. Processing of high-performance fiber-reinforced cement-based composites. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 2, p. 181–186, 2010.

LALINDE, L. F.; MELLADO, A. applied sciences Durability of Glass Fiber Reinforced Cement (GRC) Containing a High Proportion of Pozzolans, 2022.

LAMEIRA, R.M. Contribuição ao estudo das propriedades dos materiais cimentícios reforçados com fibras de vidro, 2007.

LEI DE 1 DE JUNHO DE 1995. Lei No 9.055, De 1 De Junho De 1995. p. 1–2, 1995.

LEMOS, A. M.; FRENDEBERG, F. C.. Estudo da utilização de fibra de coco em vigas de concreto. *Engineering Sciences*, v.7, n.2, p.1-8, 2019. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-305>

LEMOUGNA, N.P.; ADEDIRAN, A., YLINIEMI J., LUUKKONEN T., ILLIKAINEN M., Effect of organic resin in glass wool waste and curing temperature on the synthesis and properties of alkali-activated pastes, *Materials & Design*, Volume 212, 2021, 110287, ISSN 0264-1275, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110287>.

LEMOUGNA, N.P.; ADEDIRAN, A., YLINIEMI J., LUUKKONEN T., ILLIKAINEN M., Synthesis and characterization of porous ceramics from spodumene tailings and waste glass wool, *Ceramics International*, Volume 47, Issue 23, 2021, Pages 33286-33297, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.231>.

LI, Y.; HU, C.; YU, Y. Interfacial studies of sisal fiber reinforced high density polyethylene (HDPE) composites. *Composites: Part A*, v.39, p.570-579, 2008.

LIMA, P. R.; TOLEDO FILHO, R. D.; NAGAHAMA, K. J.; FAIRBAIRN, E. M. Caracterização mecânica de laminados cimentícios esbeltos reforçados com fibras de sisal. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 6, p. 644-651, 2007.

LIMA, D.; ZULANAS, C. Use of Contaminated Sludge in Concrete. *Procedia Engineering*, v. 145, n. 480, p. 1201–1208, 2016.

LIPWORTH, L. et al. Occupational exposure to rock wool and glass wool and risk of cancers of the lung and the head and neck: a systematic review and meta-analysis. *Journal of occupational and environmental medicine*, v. 51, n. 9, p. 1075–1067, 2009.

MACVICAR, R.; MATUANA, L. M.; BALATINECZ, J. J. Aging mechanisms in cellulose fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 21, n. 3, p. 189–196, 1999.

MANO, E. B; MENDES, L. C. *Introdução a Polimeros*. 2ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda. 2015.

MARIA, R.; KALIL, L. Avaliação pós-ocupação e eficácia social: estudo de caso comparativo de habitações de interesse social autoconstruídas na modalidade cooperativa autogestionária e na modalidade promoção pública municipal. *Ambiente Construído*, v. 4, n. 1, p. 37–53, 2008.

MARMORET, L. et al. Hydric, morphological and thermo-physical characterization of glass wools: From macroscopic to microscopic approach. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 10, p. 3214–3219, 2009.

MARTINS, J. F. A. Análise do desempenho térmico de placas à base de óxido de magnésio aplicadas no sistema Light Steel Frame. 2018. p. 157. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. v. 1

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Microestrutura do Concreto: Microestrutura, Propriedades e materiais*. 1994. Disponível em: https://tuxdoc.com/download/concreto-microestrutura-propriedades-e-materias-mehta-e-paulo-monteiro-2-ed-2008_pdf

MOHR, B. J.; BIERNACKI, J. J.; KURTIS, K. E. Supplementary Cementitious Materials For Mitigating Degradation of Kraft Pulp FiberCement Composites. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 11, p. 1531-1543, 2007.

MENDES, A. P. L. Efeito da adição de fibras sintéticas e naturais nas propriedades físicas e mecânicas de argamassas autonivelantes com metacaulinita. 2019. 131f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

MORAIS, C; CRUZ, W; MORAIS , M; LOUZADA, R; MENDES, P; Reinforcement of mortars with kraft paper fibers reuse of cement packaging. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.8, n.3, p.21566-21582, mar.,2022.

MORTON, J.H.; COOKE, T.; AKERS, S.A.S. Performance of slash pine fibers in fiber cement products. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 2, p. 165-170, 2010.

NEVILLE, Adam M. *Propriedades do Concreto*. 2.ed. São Paulo: Pini, 1997.

NEVES, DANIELE DRUMOND. Reaproveitamento do resíduo de lã de vidro oriundo da logística reversa de refrigeradores na obtenção de vitrocrystalinas do sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória.

NEVES JR., A.; FERREIRA, S. R.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R.; DWECKE, J. Effect of early age curing carbonation on the mechanical properties and durability of high initial strength Portland cement and lime-pozolan composites reinforced with long sisal fibres. *Composites Part B*, v. 163, p. 351–362, 2019.

OJHA, P. N. et al. Mechanical and durability properties of cement mortar and concrete reinforced with glass micro fibre. *Research on Engineering Structures and Materials*, v. 8, n. 2, p. 265–281, 1 jun. 2022.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). Elimination of Asbestos-Related Disease. Geneva, Switzerland: WHO; 2006. Disponível em: <http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_OEH_06.03_eng.pdf>

PAVLIN M., HORVAT B., ČEŠNOVAR M., DUCMAN V., The preparation and characterization of low-temperature foams based on the alkali activation of waste stone wool, *Ceramics International*, Volume 48, Issue 12, 2022, Pages 17668-17681, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.03.037>.

PAVLIN, M. et al. Machine Translated by Google *Cerâmica Internacional, Avaliação mecânica , microestrutural e mineralógica de resíduos de vidro e lã de rocha álcali-ativados*. v. 47, p. 15102–15113, 2021.

PEREIRA, TAMIRES GALVÃO TAVARES. Efeito da carbonatação acelerada em compósitos de fibrocimento extrudados com resíduo de quartzito e fibras de coco. 2021. Tese (Doutorado

em Engenharia de Biomateriais, linha de pesquisa em Compósitos Lignocelulósicos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil.

PERUZZI, A, P. Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland Modificada com látex e adição de sílica ativa. São Carlos, 2002. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Escola de São Carlos, São Carlos, 2002.

PESCAROLO, A.; SILVA, S. H. L. da.; PINTO, M. C. C.; COSTA, M. do R. de M. M. da. A influência de microfibras de celulose no estado fresco de argamassas. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 22, n. 1, p. 179-190, jan./mar. 2022. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000100586>

PIRES, FC. O perigo do amianto: consequências causadas à saúde humana através da exposição ocupacional. Monografia (Graduação em Química). Faculdade de Educação e Meio Ambiente, FAEMA. Rondônia, Ariquemes. 2017.

PIZZOL, V. D. Carbonatação acelerada nova tecnologia de cura para fibrocimento sem amianto. p. 60, 2013.

POLETTO, MATHEUS; ZATTERA, ADEMIR J.; FORTE, MARIA M.C.; SANTANA, RUTH M.C. Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size. *Bioresource Technology*, v. 109, p. 148-153, 2012.

QIAN, X. et al. Fiber alignment and property direction dependency of FRC extrudate. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 10, p. 1575–1581, 2003.

QUEIROZ, R. S., da SILVA, A. P. V., BROEGA, A. C. L., & SOUTO, A. P. G. V. New Brazilian pineapple leaf fibers for textile application: cottonization and dyeing performance. *S Applied Sciences*, 2(1), 72, 2020.

RICCETTI, C.; SOUZA, R. B. DE. EFEITO DO ENVELHECIMENTO NATURAL NO. p. 3–4, 2017.

ROSSETTO, H. L. Contribuições para a ciência e engenharia dos materiais cimentícios: processamento, durabilidade e resistência mecânica. São Carlos, 2007, 124 f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

ROWELL, R.M.; SANADI, A.R.; CAULFIELD, D. F.; JACOBSON, R. E. Utilization of natural fibers in plastic composites: problems and opportunities. In: Lignocellulosic – Plastics Composites. São Paulo: USP/UNESP, p. 23-51, 1997.

SACON, V.; MENOCELLI, S.; RATNIEKS, E. Misturas de polpas brasileiras com o eucalipto. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. São Paulo. ABTCP, 1994. p. 463-473.

SANDIN, G., ROOS, S., JOHANSON, M. Environmental impact of textile fibers – what we know and what we don't know: Fiber Bible part 2. Göteborg, p. 98, 2019.

SANTOS, S. F.; TEIXEIRA, R. S.; SAVASTANO JUNIOR, H. Interfacial transition zone between lignocellulosic fiber and matrix in cement-based composites. London: Woodhead Publishing, 2017.

SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M. Avanços no entendimento da hidratação do cimento Portland. Pesquisa de Cimento e Concreto, v. 78, p. 38-56, 2015

SAVASTANO JUNIOR, H. Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para construção de baixo custo. São Paulo, 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SHIMIZU, J. Y.; SEBBENN, A. M. Espécies de Pinus na silvicultura brasileira. In: Pinus na silvicultura brasileira. Colombo: Embrapa Florestas, 2008.

SIQUEIRA, J. E. L. Utilização de fibras naturais e sintéticas em argamassas de revestimento de alvenaria: estudo comparativo de desempenho. Florianópolis, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SILVA, ALUIZIO CALDAS. Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

TAYLOR, H. F. W. Cement chemistry. Academic Press, v. 20, n. 4, p. 335, 1990.

TAYLOR, H. F. W. Cement Chemistry. London: Thomas Telford Publishing, 1997.

TOLÊDO ROMILDO D., F. D. et al. Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. Cement and Concrete Composites, v. 25, n. 2, p. 185–196, 2003.

TONOLI, G. H. D.; RODRIGUES FILHO, U. P.; SAVASTANO, H.; et al. Cellulose modified fibres in cement based composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 40, n. 12, p. 2046–2053, 2009. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.09.016>>.

TONOLI, G. H. D. Fibras curtas de Eucalipto para novas tecnologias em fibrocimento. 2009. 148 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

TONOLI, G. H. D.; FUENTE, E.; MONTE, C.; et al. Effect of fibre morphology on flocculation of fibre–cement suspensions. Cement and Concrete Research, v. 39, n. 11, p. 1017–1022, 2009.

TONOLI, G. H. D.; SANTOS, S. F.; JOAQUIM, A. P.; SAVASTANO JR, H. Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. Construction and Building Materials, v. 24, n. 2, p. 193-201, 2010a.

TONOLI, G. H. D.; JOAQUIM, A. P.; ARSÈNE, M.-A.; BILBA, K.; SAVASTANO, H. Performance and Durability of Cement Based Composites Reinforced with Refined Sisal Pulp. Materials and Manufacturing Processes, v. 22, n. 2, p. 149–156, 2007.

TONOLI, G. H. D.; SANTOS, S. F.; JOAQUIM, A. P.; SAVASTANO, H. Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 2, p. 193–201, 2010.

TONOLI, G. H. D et al., “Influence of the initial moisture content on the carbonation degree and performance of fiber-cement composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 215, no. 1, pp. 22–29, 2019.

TSUKAMOTO, M. et al. Evaluation of the tensile strength of polypropylene-based composites containing glass wool. *Materials Letters*, v. 132, p. 267–269, 2014.

VIEIRA, P. L. C. Reaproveitamento do resíduo de lã de vidro na produção de argamassa. *Dissertação de Mestrado—Vitória: Instituto Federal do Espírito Santo*, 2016.

WISKY, SILVA. DANILLO. Propriedades físico-mecânicas de fibrocimento reforçado com fibras de eucalipto tratadas termicamente. 2015. Número de páginas. *Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG*, 2015.

WEI, J.; MEYER, C. Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. *Cement and Concrete Research*, v. 73, p. 1–16, 2015.

WRIGHT, J. A.; WESSELS, A. Laboratory scale pulping of *Pinus pseudostrobus*, *Pinus maximinoi* e *Pinus patula*. *IPEF Internacional*, Piracicaba, v. 2, n. 2, p. 39-44, 1992.

Y. XIAO, AC LASAGA, Ab initio estudos mecânicos quânticos da cinética e mecanismos de dissolução de silicato: $H^+(H_3O^+)$ catálise, *Geochem. Cosmochim Acta* 58 (1994) 5379–5400, [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90237-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90237-2)

YAP, Z. S. et al. Waste mineral wool and its opportunities—a review. *Materials (Basel)*, 1 out. 2021.

Yazaki Y, Hillis WE (1977) Polyphenolic extractives of *Pinus radiata* bark. *Holzforschung* 31:20–25

YAZICI, Ş.; INAN, G.; TABAK, V. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, v. 21, n. 6, p. 1250–1253, jun. 2007.