



CAROLINA REZENDE PINTO NARCISO

**INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO NA
PRODUÇÃO DE PAINÉIS CIMENTO - MADEIRA**

**LAVRAS - MG
2018**

CAROLINA REZENDE PINTO NARCISO

**INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO NA PRODUÇÃO DE
PAINÉIS CIMENTO – MADEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes
Orientador

**LAVRAS - MG
2018**

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

Narciso, Carolina Rezende Pinto.

Influência do resíduo de minério de ferro na produção de
painéis cimento-madeira / Carolina Rezende Pinto Narciso. - 2018.
78 p. : il.

Orientador(a): Rafael Farinassi Mendes.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Rejeito de mineração. 2. Compósitos. 3. Pinus oocarpa. I.
Mendes, Rafael Farinassi. . II. Título.

CAROLINA REZENDE PINTO NARCISO

**INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO NA PRODUÇÃO DE
PAINÉIS CIMENTO – MADEIRA
INFLUENCE OF IRON ORE RESIDUE IN THE PRODUCTION OF CEMENT-
WOOD PANELS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 15 de Fevereiro de 2018.

Dr. Rafael Farinassi Mendes UFLA

Dr. Lucas Henrique Pedrozo Abreu UFLA

Dra. Tattiane Gomes Costa IFMG

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes
Orientador

**LAVRAS - MG
2018**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, acima de tudo, por ter colocado pessoas tão especiais em meu caminho e por sempre conceder sabedoria em minhas escolhas, coragem para acreditar, força para não desistir e proteção para me amparar.

Aos meus amados pais, Rosa e Celso por toda dedicação, carinho, amor e contribuição para que eu prosseguisse e concluísse meus estudos.

À minha irmã Eliza e ao meu irmão Felipe, por serem tão presentes e me trazerem alegria e amor em nosso convívio diário.

Ao meu namorado, Rafael Furtado Lima, por todo companheirismo, paciência, compreensão e carinho.

Aos amigos de longa data, cujo apoio e amizade estiveram presentes em todos os momentos. Obrigada por entenderem minha ausência nessa fase e obrigada por acreditarem em mim.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais (PPGBiomat) pela oportunidade de realizar o mestrado.

A Capes e FAPEMIG, pela concessão da bolsa de estudos, o que tornou possível a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Rafael Farinassi Mendes pela orientação, amizade e ensinamentos repassados durante este período.

Aos membros da banca de defesa, pelas colaborações, sugestões e avaliação deste trabalho.

Aos amigos de mestrado e funcionários da UEPAM. Em especial: Adriele, Nayra, Lívia, Juliana, Fernanda e Malu pelo companheirismo, ajuda e amizade. E aos queridos Tony, Alan e Matheus por toda ajuda, dedicação e paciência. Obrigada!

E a todos os outros não citados aqui, meus sinceros agradecimentos por suas diretas ou indiretas contribuições para a realização deste trabalho.

RESUMO

Esse trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da utilização do resíduo de mineração sobre as propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e térmicas de painéis cimento-madeira. O delineamento experimental consistiu de cinco tratamentos, sendo avaliadas quatro porcentagens de substituição de cimento Portland pelo resíduo de mineração (0, 10, 20, 30 e 40%). As partículas da madeira de *Pinus oocarpa* foram avaliadas quanto a suas características anatômicas, químicas e físicas e o rejeito de mineração foi avaliado quanto à sua granulometria e composição química. Os painéis foram produzidos com densidade nominal de 1,30 g/cm³; relação madeira: cimento de 1: 2,75; água: cimento de 1,25; taxa de hidratação (água): cimento de 0,25, sendo utilizado o cimento Portland ARI CP-V e 2% de cloreto de cálcio (CaCl₂) como aditivo. O ciclo de prensagem foi de 4 MPa à frio por dez minutos e após esse tempo os painéis foram submetidos ao grampeamento por 24 horas e cura total do cimento de 28 dias. A madeira de pinus e o resíduo de mineração foram avaliados quanto a sua composição química, propriedades físicas e dimensionais. Foram avaliadas as propriedades físicas, químicas, dimensionais, reações do cimento e índice de inibição dos materiais e as propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos painéis cimento-madeira. Foi ainda avaliado o efeito do envelhecimento acelerado dos compósitos. O rejeito de mineração promoveu inibição da cura do cimento, o que afetou de forma direta as propriedades dos painéis cimento-madeira. Não foi observada interação entre o principal componente do rejeito de mineração (SiO₂) com as fases de hidratação da matriz cimentícia, funcionando como elemento de preenchimento de espaços vazios, e contribuindo para a melhoria das propriedades físicas do compósito. Todos os tratamentos avaliados atenderam aos requisitos da norma de comercialização para o MOR e MOE à flexão estática e ligação interna, mesmo após a realização do envelhecimento acelerado. É viável tecnicamente a utilização de 40% de resíduo de mineração para produção de painéis cimento-madeira em escala industrial, fato que pode permitir uma agregação de valores e a destinação adequada do resíduo de mineração.

Palavras-chave: Rejeito de mineração. Compósitos. *Pinus oocarpa*.

ABSTRACT

This paper aims to evaluate the effect of the use of the mining residue on the physical properties, mechanical, microstructural and thermal properties of cement-wood panels. The experimental design consisted of five treatments, being evaluated four percentages of substitution of Portland cement for the mining residue (0, 10, 20, 30 e 40%). *Pinus oocarpa* wood particles were evaluated on their anatomical, chemical and physical characteristics and the mining waste was evaluated on its granulometry and chemical composition. The panels were produced with a nominal density of 1.30 g / cm³; Wood ratio: cement of 1: 2.75; water: cement of 1.25; hydration rate (water): cement of 0,25, with Portland cement ARI CP-V and 2% calcium chloride (CaCl₂) as an additive. The pressing cycle was 4MPa in the cold for ten minutes and after that time the panels were subjected to stapling for 24 hours and total cement cure of 28 days. The pinus wood and the mining residue were evaluated on their chemical composition, physical and dimensional properties. The physical, chemical, dimensional, cement reactions and index of inhibition of the materials and the physical, mechanical and thermal properties of the cement-wood panels were evaluated. As well as the accelerated aging of composites effect. The mining waste promoted inhibition of the cement cure, which directly affected the properties of cement-wood panels. The interaction between the main component of the mining tailings (SiO₂) and the hydration phases of the cementitious matrix, acting as void fillers and contributing to the improvement of the physical properties of the composite was not observed. All treatments evaluated met the requirements of the marketing standard for MOR and MOE to static flexion and internal connection, even after accelerated aging. It is technically feasible to use 40% of mining residue for the production of cement-wood panels on an industrial scale, a fact that may allow the aggregation of values and the adequate disposal of the mining residue.

Keywords: Mining waste. Composites. *Pinus oocarpa*.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1–	Quantidade de material em massa para elaboração dos corpos de prova para ensaio de pozolanicidade.	22
Tabela 2–	Análises de caracterização física do material lignocelulósico.....	24
Tabela 3–	Normas utilizadas para análise da composição química da madeira de pinus.	25
Tabela 4–	Índice de inibição utilizado para classificar a compatibilidade das partículas de madeira com o cimento.....	27
Tabela 5–	Variáveis de produção dos painéis.....	28
Tabela 6–	Plano experimental dos painéis.....	28
Tabela 7–	Ensaio e normas de execução.....	30
Tabela 8–	Propriedades físico-químicas do rejeito de mineração.....	35
Tabela 9–	Composição mineralógica do resíduo de mineração.....	36
Tabela 10–	Dimensões granulométricas do rejeito de mineração.....	37
Tabela 11–	Caracterização morfológica da madeira de pinus.....	39
Tabela 12–	Caracterização física da madeira de pinus.....	40
Tabela 13–	Caracterização química da madeira de pinus.....	41
Tabela 14–	Condutividade térmica, resistência térmica e transmitância térmica obtidas para os painéis cimento-madeira	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1–	(A) Sistema coletor de dados e caixa térmica acoplada para os testes de aptidão; (B) Vista interna da caixa térmica, detalhe das caixas de isopor para armazenar as amostras.	26
Figura 2–	Sequência de produção dos painéis cimento-madeira.	29
Figura 3–	Esquema do equipamento para teste de isolamento térmico.	33
Figura 4–	Porcentagem retida acumulada nas peneiras para o resíduo de mineração.	37
Figura 5–	Porcentagem retida nas peneiras (mm) para o resíduo de mineração.	38
Figura 6–	Resistência a compressão no ensaio de pozolanicidade.	39
Figura 7–	Curva de inibição do cimento+água e dos tratamentos utilizados nos painéis cimento-madeira.	43
Figura 8–	Curva de inibição dos tratamentos utilizados nos painéis cimento-madeira.	43
Figura 9–	Índice de Hidratação dos tratamentos utilizados para produção dos painéis cimento-madeira.	44
Figura 10–	Densidade dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração.	46
Figura 11–	Microscopia eletrônica de varredura dos painéis cimento-madeira do tratamento controle após o envelhecimento acelerado.	47
Figura 12–	Porosidade dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração antes do envelhecimento acelerado.	48
Figura 13–	Microscopia eletrônica de varredura para os painéis cimento-madeira antes do envelhecimento acelerado.	48
Figura 14–	Porosidade dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração após o envelhecimento acelerado.	49
Figura 15–	Análise de DRX para os painéis cimento-madeira com resíduo de mineração, antes e após envelhecimento acelerado.	50
Figura 16–	Microscopia eletrônica de varredura dos painéis cimento-madeira de 40% de resíduo de mineração após o envelhecimento acelerado.	51
Figura 17–	Umidade dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração.	52
Figura 18–	Absorção de água de painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração.	53
Figura 19–	Inchamento em espessura dos painéis cimento-madeira produzido com resíduo de mineração.	54
Figura 20–	Microscopia eletrônica de varredura dos painéis cimento-madeira controle e sem envelhecimento acelerado.	55
Figura 21–	Microscopia eletrônica de varredura dos painéis cimento-madeira com 40% de resíduo de mineração sem envelhecimento acelerado.	56
Figura 22–	Compressão dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração.	57
Figura 23–	Ligação interna dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração, antes e após o envelhecimento acelerado.	58
Figura 24–	Propriedade de Módulo de ruptura à flexão estática dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração, antes e após o envelhecimento acelerado.	60
Figura 25–	Propriedade de Módulo de elasticidade à flexão estática dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração, antes e após o envelhecimento acelerado.	61
Figura 26–	Dureza janka dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração, antes e após o envelhecimento acelerado.	64
Figura 27–	Isolamento térmicos dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração.	65

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1. Resíduo de mineração.....	14
2.1.1. Minério de ferro	14
2.1.2. Rejeito da mineração.....	15
2.2. Painéis cimento-madeira	17
2.2.2. Fatores que afetam a qualidade dos painéis	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1. Obtenção e caracterização do resíduo de mineração	21
3.2. Obtenção e caracterização do material lignocelulósico.....	23
3.2.1. Caracterização morfológica do material lignocelulósico	23
3.2.2. Caracterização física do material lignocelulósico	24
3.2.3. Caracterização química do material lignocelulósico.....	24
3.3. Análise de aptidão	25
3.4. Painéis a base de cimento	27
3.4.1. Plano experimental e produção dos painéis	27
3.5. Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis	29
3.6. Caracterização microestrutural	30
3.7. Envelhecimento acelerado.....	31
3.8. Difração de raios X (DRX).....	31
3.9. Transmissão térmica.....	32
3.10. Análise estatística.....	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1. Caracterização do resíduo de mineração	35
4.1.1. Composição mineralógica.....	35
4.1.2. Caracterização granulométrica	37
4.1.3. Caracterização de superfície específica.....	38
4.2. Caracterização do material lignocelulósico.....	39
4.2.1. Caracterização morfológica.....	39
4.2.2. Caracterização física	40
4.2.3. Caracterização química	41
4.3. Análise de aptidão	42
4.4. Propriedades físicas dos painéis cimento-madeira	45
4.4.1. Densidade aparente, porosidade e umidade	45
4.4.2. Absorção de água e inchamento em espessura.....	52
4.5. Propriedades mecânicas dos painéis cimento-madeira.....	57

4.5.1. Compressão paralela e ligação interna	57
4.5.2. Módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática	59
4.5.3. Dureza janka.....	63
4.6. Transmissão térmica.....	64
5. CONCLUSÕES.....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1. INTRODUÇÃO

Os projetos desenvolvidos na atualidade visam diminuir os impactos ambientais e a redução do consumo exorbitante dos recursos naturais. Ainda assim, com o aumento da população e o crescimento de indústrias ao redor do mundo, a geração de resíduos é bastante relevante.

Associado ao conceito de sustentabilidade, que condiz ao desenvolvimento econômico e material sem agredir o meio ambiente, usando os recursos naturais de forma inteligente e garantindo a qualidade de vida das gerações futuras, cientistas têm buscado alternativas em suas pesquisas para o aproveitamento de resíduos industriais. Sendo primordial a obtenção de alternativas para solucionar questões relacionadas à geração, manuseio e armazenamento de resíduos sólidos. Resíduos oriundos de todos os tipos de indústrias carecem de tratamento adequado em seu manuseio, porém nem sempre ocorre assim e resultam em consequências nocivas e prejudiciais ao meio ambiente e à população.

O reuso ou recuperação desses resíduos além de ajudar nas questões sanitárias e sustentáveis, e na preservação das reservas naturais de matérias-primas, elimina custos com armazenamento, proporcionando economia para as empresas e para o estado podendo inclusive promover a agregação de valor e tornar o produto mais competitivo no cenário econômico (ARRUDA FILHO et al., 2012; DI BARTOLOMEO; SILVA; FONSECA, 2014).

Empresas siderúrgicas, principais consumidoras do minério de ferro, diante da demanda mundial de minério devem se preparar e aumentar sua produção, com garantia de qualidade do produto e buscando o cuidado e a preservação com o ambiente. Porém, existem resíduos que embora inertes, têm significativa ação no solo, demandando, portanto outras destinações com o objetivo de promover uma redução da poluição, tornando de suma importância o entendimento das características desses resíduos e sua destinação adequada.

Segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2012) criado pelo Ministério do Meio Ambiente, a quantificação do volume de resíduos sólidos gerados pela atividade de mineração é difícil devido à complexidade e diversidade das operações e tecnologias utilizadas no processo de extração e beneficiamento. Porém, os resultados mostram que entre 1996-2005, a produção total de rejeitos foi de 2,179 bilhões de toneladas e o minério de ferro foi o principal contribuinte para a geração desses resíduos representando 35,08% da quantidade total. A perspectiva para 2010-2030 é de que o minério de ferro passe a representar 41,38%, num total de 11, 409 bilhões de toneladas de rejeitos gerados.

Esses rejeitos de minas de minério de ferro vêm sendo objeto de estudos em vários lugares do mundo e podem ser usados como matéria-prima de vários produtos industriais destinados para a construção civil, por exemplo, em aplicações da lama do minério de ferro em argamassas, em concreto de alta performance, como substitutos de agregados, na massa de cerâmica, na produção de areia industrial para pré-moldados de concreto, blocos, lajotas para pisos, tijolos e blocos intertravados (NOCITINI, 2011; ARISTIMUNHO; BERTOCINI, 2012; FRANCO et al., 2014; SILVA et al., 2014; JACOBI, 2015; SILVEIRA, 2015).

Dentre os produtos que vem ganhando destaque na construção civil estão os painéis cimento-madeira, os quais são caracterizados basicamente pela mistura de cimento Portland (aglomerante), água, aditivos químicos e partículas de madeira, consolidados a partir de prensagem a frio. A sua utilização vem crescendo no Brasil, apresentando aplicações como paredes divisórias, pisos e forros, devidos suas características de bom isolamento térmico, resistente ao fogo e umidade, versatilidade e rapidez de utilização na obra.

Contudo, até o momento não existem trabalhos avaliando a utilização de resíduo de mineração em painéis cimento-madeira. Sendo assim, esse trabalho objetivou além de permitir uma destinação adequada ao material e agregação de valor ao mesmo, avaliar o efeito da utilização do resíduo de mineração sobre as propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e térmicas de painéis cimento-madeira, identificando as melhores e mais viáveis proporções a serem utilizadas no produto final.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste referencial teórico estão apresentados os conceitos que dão suporte ao foco desta pesquisa sobre compósitos, em especial os painéis cimento-madeira, salientando sua importância no mercado da construção civil, suas características e fatores que afetam sua qualidade; e as diversas aplicações do resíduo de mineração de ferro e a caracterização dos mesmos.

2.1. Resíduo de mineração

2.1.1. Minério de ferro

A indústria da mineração é um dos segmentos produtivos mais importantes para a economia brasileira, e uma das atividades mais antigas e tradicionais do país. A história do Brasil está diretamente ligada com a exploração dos seus recursos minerais, que sempre contribuíram como importantes capitais da economia nacional, estabelecendo parte da ocupação do território e história nacional (FARIAS; COELHO, 2002).

O Minério de Ferro é extraído de uma rocha a partir da qual pode ser obtido o Ferro, que é a matéria-prima essencial para a produção de aço. Os maiores depósitos de minério de ferro no Brasil são constituídos por formações ferríferas denominadas itabiritos compostas de hematita e sílica (QUARESMA, 2001).

No cenário mundial, o Brasil se destaca como grande produtor no mercado de metais, representando 12,8% da produção de minério de ferro de todo o mundo (DNPM, 2014). Nesse contexto, a importância do setor mineral no comércio exterior brasileiro fica evidente quando se constata que do total de matérias-primas e bens intermediários exportados pelo Brasil, 22,4% são bens primários do setor mineral, sendo estas concentradas em minério de ferro (87,7%) (DNPM, 2014). As reservas brasileiras de minério de ferro são exploradas, principalmente, em três estados: Minas Gerais (63,1%), Pará (18%) e Mato Grosso do Sul (17,2%), sendo o Quadrilátero Ferrífero considerado o mais importante complexo de mineração nacional, localizado no estado de Minas Gerais (MATSAMURA, 1999; MAPA, 2006; FREIRE, 2012).

Os processos de mineração (tratamentos) decorrem de suas características físicas, referentes ao tamanho das partículas (granulometria), e químicas, que corresponde aos teores de ferro e outras impurezas associadas ao minério, para obtenção da substância mineral de interesse (ESPÓSITO, 2000; SILVA et al., 2014). Esses processos têm como propósito

regularizar o tamanho dos fragmentos gerados, removerem minerais agregados sem valor econômico e aumentar a qualidade e pureza do produto final (ESPÓSITO, 2000).

2.1.2. Rejeito da mineração

A poluição no mundo começou com o manuseio dos materiais pelo homem na Pré-História e se agravou com a Revolução Industrial, no século XVIII. Hoje, um dos grandes responsáveis pela poluição são os despejos industriais, que são originários de resfriamentos, lavagens, descargas, extrações, impregnações, tratamentos químicos, além de outros (PIRES et al., 2003). No caso específico das mineradoras, o rejeito é proveniente do tratamento do minério de ferro que gera toneladas de resíduos finos que são depositados em barragens de rejeito.

Normalmente, a prática da mineração tem grande geração de materiais estéreis e de resíduos de processamento. Tais materiais são dispostos em pilhas de estéreis e bacias de rejeitos, sendo que as primeiras, no fechamento de mina, podem ser depositadas novamente na cava, para a recomposição ambiental. Os resíduos de concentração, por sua vez, embora inertes, têm composição química e granulometria muito distintas do solo original, demandando outras destinações no sentido de redução de seu impacto sobre o meio ambiente (SILVA et al., 2014).

O volume de resíduos produzidos pode variar de acordo com o tipo e teor de minério extraído e a eficiência do processo de beneficiamento utilizado. Uma empresa de mineração como a Samarco Mineração S.A., aumentou em 9,5 milhões de toneladas de minério de ferro ao ano, em 2014, totalizando 25 milhões de toneladas de resíduos por ano (TOMAZELA, 2015). Com o potencial de crescimento desses resíduos, torna-se de suma importância o entendimento desses resíduos para estabelecer procedimentos necessários para seu manejo e sua destinação ambientalmente adequada.

Esses rejeitos de minério de ferro vêm sendo objeto de estudos em vários lugares do mundo e podem ser usados como matéria-prima de vários produtos industriais. Dentre eles os destinados para a construção civil.

Aristimunho e Bertocini (2012) avaliaram o comportamento mecânico da aplicação da lama de minério de ferro na forma de pó em argamassas de cimento Portland e observaram que existe viabilidade técnica para utilização desse resíduo.

Na China os rejeitos de minas de minério de ferro estão sendo usados, com sucesso, em concretos de ultra-alta eficiência. Os chineses chegaram à conclusão que a lama dos

rejeitos na proporção de 40% melhora as propriedades físicas do concreto aumentando a flexibilidade dos mesmos. Na Nigéria resultados positivos foram obtidos com o uso de 20% de resíduos de minério de ferro misturados ao concreto (JACOBI, 2015).

Franco et al. (2014) ao avaliarem o efeito da utilização do resíduo de minério de ferro como substituto de agregados, como a areia, nas porcentagens de 0,5%, 5%, 10% e 50% concluíram que existe viabilidade do uso, em concreto, de agregados artificiais provenientes da reciclagem de rejeito de mineração, para uso na construção civil.

Nociti (2011) avaliou a adição de rejeito proveniente da mineração de ferro na massa cerâmica, mantendo sua trabalhabilidade e minimizando um problema ambiental. Os resultados demonstraram que a agregação de rejeitos nas quantidades de 5 e 7,5% permitem a fabricação de blocos cerâmicos para vedação, isto é, sem função estrutural.

Silva et al. (2014) estudou o potencial do uso de rejeitos de concentração de minério de ferro como parte do traço de blocos intertravados de concreto (Pavers), em substituição à areia de sílica e para a obtenção da cerâmica com adição dos rejeitos na proporção de 0% e 5% em substituição à argila. Os resultados revelaram que os rejeitos de concentração de minério de ferro mostraram-se como materiais tecnicamente viáveis na substituição de agregados finos e grossos de Pavers e materiais cerâmicos.

A escolha de compósitos a base de cimento nesse projeto, ao invés de outros tipos, como por exemplo, a produção de materiais cerâmicos tradicionais, é que esses materiais cerâmicos necessitam de uma análise constante do tipo de solo a ser usado para obter um produto de qualidade controlada, além ainda da queima dos mesmos em olarias, que gera gases poluentes para a atmosfera, e muitas vezes estão associadas a trabalhos insalubres e a poluição do meio ambiente, com a diferença da ligação no cimento ocorrer em temperaturas ambientes. Além disso, o cimento pode receber incorporações de materiais que tenham função ligante como relatado por muitos estudos. No caso dos resíduos, estes podem ser adicionados à mistura, aproveitando da qualidade de encapsulamento ou envelopamento desses materiais (MAROUN, 2006).

Contudo, observa-se com as pesquisas citadas que o enfoque principal é para a substituição de areia, a qual corresponde por no máximo de 30 a 50% do produto, e não colabora com a redução do custo final do produto, uma vez que a quantidade de cimento é que define a maior parte do custo do material.

Não há nenhum estudo com painéis de cimento em associação com resíduos de mineração e madeira, tão pouco com a substituição do cimento pelo resíduo. Nesse contexto,

além de permitir uma destinação adequada ao resíduo de mineração e agregação de valor ao mesmo, visa obter novos produtos e ainda promover desenvolvimento técnico e científico.

2.2. Painéis cimento-madeira

Os painéis cimento-madeira são caracterizados basicamente pela mistura de cimento Portland (aglomerante hidráulico), água, aditivos químicos e partículas de madeira, consolidados a partir de prensagem a frio. Estes painéis surgiram na Europa, como elemento construtivo, no final da década de 70 (MATOSKI; IWAKIRI, 2007). O painel mineral tem boa aceitação no mercado mundial, pois através da mistura de seus componentes reúnem propriedades desejáveis presentes na madeira e no cimento (COATES, 1994).

O cimento Portland, classificado como aglomerante hidráulico, é um material que em contato com a água entra em processo físico-químico, tornando-se um componente sólido com grande resistência a compressão e resistente a água. A água é utilizada para que ocorram as reações químicas do aglutinante, para dissolver os aditivos e também para permitir a mistura do cimento que irá revestir as partículas de madeira. Os aditivos químicos são empregados com o propósito de diminuir o tempo de cura do cimento, acelerando o desenvolvimento da resistência, enquanto as partículas de madeira são agentes reforçantes da matriz cimentícia.

O termo compósito trata-se de um material formado por dois ou mais constituintes, que possuindo uma fase de reforço, no caso dos painéis de cimento-madeira são as partículas de madeira, envolvidas por uma fase ligante, sendo o cimento, conferindo assim propriedades de resistência e relativamente maiores que os dois materiais isoladamente (MATOSKI; IWAKIRI, 2007). A fase ligante propaga o esforço entre as partículas, mantendo-as protegidas do meio. Enquanto que as partículas, além de aumentarem a resistência, diminuem seu custo e permite na maioria das vezes a redução da densidade e o aumento do isolamento térmico do produto final, algo de grande interesse para o mercado da construção civil. Além das características próprias de cada constituinte, as interações físicas e químicas entre cada elemento modificam o comportamento final do compósito (COSTA; HEBLING; RANDALL, 2006). Entre essas propriedades pode-se citar a resistência à tração e à flexão, rigidez, resistência à fadiga e condutibilidade térmica (ANJOS; GHAVAMI; BARBOSA, 2003).

Segundo Matoski et al. (2013), o uso de painéis cimento-madeira permite agilidade na construção, especialmente quando aplicado de uma maneira modulada em canteiros de

obras. Algumas das muitas vantagens na utilização desse produto como elementos de construção compreendem precisão geométrica, variedade de tamanhos, formas de acabamentos e fácil instalação.

No mercado da construção civil estão os materiais como tijolo e concreto que em determinadas situações podem ser substituídos pelos painéis, obtendo assim, construções mais leves quando incorporados em paredes, divisórias, forros, entre outros (WEI; BUNICHIRO, 2001). De acordo com Kruger et al. (2009), a madeira interfere diretamente nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis, além de contribuir de forma positiva para o isolamento térmico e acústico do ambiente.

2.2.2. Fatores que afetam a qualidade dos painéis

Dentre os principais fatores que influenciam nas propriedades e qualidade final dos painéis cimento-madeira podem-se destacar aqueles que são inerentes à madeira como a espécie, massa específica, pH, umidade, dimensão das partículas, densidade, composição química, entre outros e ao processo produtivo dos painéis, referentes a massa específica do painel, pressão específica e os aditivos usados.

A escolha da matéria-prima é um dos aspectos mais importantes a serem observados para a qualidade do produto final, visto que interage com todas as outras variáveis do processo podendo exercer influências positivas ou negativas da manufatura dos painéis (MENDES et al., 2017).

Para a produção dos painéis cimento-madeira, Latorraca e Iwakiri (2001), ressaltam que as espécies de coníferas são as madeiras mais aplicadas como matéria-prima desses painéis, pois apresentam propriedades, principalmente químicas, compatíveis, que podem ser combinadas com o cimento sem afetar a cura dos painéis. A composição química da madeira é de grande importância na cura e endurecimento do cimento, dado que, alguns elementos químicos podem alterar o tempo de hidratação do cimento e, por consequência, reduzirem as propriedades desse material, principalmente pelo fato de que cada espécie reage de uma maneira com o cimento (MATOSKI, 2005; IWAKIRI; PRATA, 2008).

Os materiais lignocelulósicos apresentam em sua constituição química a lignina, e a celulose, as hemiceluloses e os extrativos. Os extrativos encontrados no material lignocelulósico são os principais responsáveis pela inibição da solidificação do cimento, sendo seus princípios ativos os compostos fenólicos e os carboidratos livres (SIMANTUPANG; SCHWARZ; BROKER, 1978; IWAKIRI; PRATA, 2008), os quais

podem retardar ou até mesmo impedir a pega do cimento, sendo necessário realizar algum processo de compatibilização da madeira com a matriz cimentícia, para diminuir sua influência (CHITTENDEN; HAWKES; HAMILTON, 1975; LATORRACA, 2000; SAVASTANO JUNIOR et al., 2000 citados por FONSECA et al., 2002; IWAKIRI et al., 2012; FERREIRA et al., 2012; ALMEIDA et al., 2013).

Outro fator que interfere na qualidade final dos painéis está relacionado à geometria das partículas (WEBER, 2011). As dimensões das partículas exercem influência sobre o consumo de cimento, pois quanto maior sua superfície específica, maior a quantidade de cimento para envolvê-las e, por consequência, maior quantidade de água usada. Além disso, essa característica envolve também a uma maior homogeneidade do compósito, uma vez que haverá maior quantidade de massa de cimento, sendo que o tamanho pequeno das partículas leva a uma possível redução da densidade e conseqüente redução da resistência. No entanto, maiores proporções de cimento aumentam o custo final do produto, sendo este o componente mais caro da mistura do painel cimento-madeira (MOSLEMI; GARCIA; HOFSTRAND, 1983; MATOSKI, 2005).

As partículas finas e longas derivam um maior índice de esbeltez, e como resultado obtém-se painéis com maior resistência à flexão estática (Módulo de Elasticidade- MOE e Módulo de Ruptura- MOR), ligação interna e arrancamento de parafusos, entretanto para a propriedade física como o inchamento em espessura, essa resistência tende a diminuir com o aumento da densidade. Os painéis produzidos com partículas menores e mais espessas conferem um menor índice de esbeltez e aumentam a resistência à tração perpendicular (ZHOU, 1990; IWAKIRI et al., 2005).

Sawsen et al. (2015) assegura que a baixa estabilidade dimensional característica das partículas lignocelulósicas compromete a durabilidade final do compósito, pelo fato de que, o processo de contração e expansão das partículas com o passar do tempo quebra as ligações na interface partícula/matriz, resultando em espaços vazios e na diminuição das propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios.

Durante o procedimento de manufatura dos painéis cimento-madeira, também são utilizados alguns aditivos, que variam de acordo com a aplicação do produto final. Conforme Neville (1997), o aditivo mais utilizado durante várias décadas foi o cloreto de cálcio (CaCl_2). Provavelmente porque este aditivo é eficiente para aceleração do processo de hidratação dos silicatos de cálcio que trazem acentuada característica ligante e estão diretamente relacionados com a resistência mecânica, principalmente o silicato tricálcio ($(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$) (LATORRACA, 2000).

A pressão aplicada sobre as partículas possui como principal finalidade, a consolidação do colchão na espessura final desejada, o que garante o contato adequado entre as partículas de madeira e o cimento (TRIANOSKI, 2010). O nível de pressão a ser aplicado está relacionado com as seguintes variáveis do processo: área de contato entre as partículas (quanto maior a área, maior será a pressão requerida); densidade do painel (quanto maior a densidade do painel, maior será a pressão necessária para a sua densificação e consolidação até a espessura final) e controle de espessura do painel (uma pressão mínima é necessária para atingir a espessura final desejada do painel) (IWAKIRI et al., 2005).

Entretanto, se houver alguma mudança de um dos fatores durante o processo de formação do painel acarretará a modificação de outras variáveis, ou seja, os parâmetros não devem ser considerados isoladamente durante o processo de produção dos painéis (SILVA et al., 2006). Sendo assim, a associação dos fatores da matéria-prima e do processo irá atuar de forma direta nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis, tornando-se de suma importância o entendimento das características químicas, físicas, mecânicas e anatômicas do material lignocelulósico e sua associação com os fatores de processamento.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Obtenção e caracterização do resíduo de mineração

Para a produção dos painéis cimento-madeira foram utilizados os resíduos de mineração da empresa Samarco S/A. O resíduo de mineração foi caracterizado quanto a sua composição mineralógica. As análises químicas quantitativas foram realizadas no Laboratório químico da Samarco. Foram determinados os teores de Al_2O_3 , Fe e MnO por um espectrômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP- OES). Os teores de ferro foram determinados por dicromatometria. Os teores de SiO_2 foram determinados via ICP-OES para valores menores ou iguais a 7%. Para valores superiores, foram determinados por diferença.

Além dessas, foram avaliadas as propriedades físico-químicas do material a partir de análise realizada no Departamento de Ciência dos Solos - Universidade Federal de Lavras. Foram determinados os teores de K (mg.dm^{-3}), P (mg.dm^{-3}), Na (mg.dm^{-3}), Ca (cmol.dm^{-3}), Mg (cmol.dm^{-3}), Al (cmol.dm^{-3}), Zn (mg.dm^{-3}), Fe (mg.dm^{-3}), Mn (mg.dm^{-3}), Cu (mg.dm^{-3}), B (mg.dm^{-3}), S (mg.dm^{-3}), Fósforo remanescente (mg.L^{-1}), matéria orgânica (dag.kg^{-1}), além da acidez potencial (cmol.dm^{-3}), soma de bases trocáveis (cmol.dm^{-3}), índice de saturação por bases (%), índice de saturação por Alumínio (%), capacidade de troca catiônica a pH 7, capacidade de troca catiônica efetiva, pH e a classificação do material quanto ao teor de argila, silte e areia.

A análise granulométrica da amostra foi realizada no Laboratório do Centro Educacional de Lavras- UNILAVRAS. Foram utilizadas peneiras com as seguintes aberturas: 297 μm , 210 μm , 149 μm , 105 μm , 74 μm , 53 μm , 44 μm e 37 μm . A análise de superfície específica seguiu o método de Blaine sendo obtida por medição de permeâmetro de Blaine e utilizando a densidade do material obtido em análise em picnômetro de hélio, realizada na Universidade Federal de Uberlândia- UFU.

Para o ensaio de pozolanicidade foi utilizada a norma NBR 5752 (ABNT, 2014) para determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias. Para esse ensaio, foram utilizados o cimento CP II F 32, areia normalizada, resíduo de mineração e água, em que foram confeccionadas duas argamassas diferentes (A e B), tendo à argamassa A em sua composição cimento, areia normalizada e água somente e a argamassa B, cimento, areia normalizada, resíduo de mineração e água. Na argamassa B, em que foi feito uso do resíduo de mineração, a mesma foi empregada no

lugar do cimento em uma porcentagem de 25% em massa. As quantidades de matérias utilizadas em cada uma das argamassas apresentam-se na Tabela 1, das quais foram confeccionados 12 corpos de prova para cada argamassa, sendo, portanto, necessários quatro amassamentos com as quantidades descritas.

Tabela 1– Quantidade de material em massa para elaboração dos corpos de prova para ensaio de pozolanicidade.

Material	Massa para mistura (gramas)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento Portland CP II F 32	624	468
Resíduo de mineração	-	156
Água	300	300
Areia normal - fração grossa	468	468
Areia normal - fração média grossa	468	468
Areia normal - fração média fina	468	468
Areia normal - fração fina	468	468

Fonte: Do autor (2018).

O processo de mistura, moldagem, cura e ruptura dos corpos de prova são os mesmos descritos para o ensaio de compressão do cimento Portland, pela norma NBR 7215 (ABNT, 1996), em que as amostras após moldadas permaneceram por 24 horas nos moldes em uma câmara úmida e após esse tempo foram levados para imersão em uma solução de água e cal virgem, até o dia da ruptura dos corpos de prova em uma prensa hidráulica elétrica digital utilizando uma velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s.

O índice de desempenho com cimento Portland, aos 28 dias, foi calculado pela Equação 1:

$$I_{\text{CIMENTO}} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

I_{CIMENTO} - Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias;

f_{cB} - Resistência média aos 28 dias dos corpos de prova da argamassa B;

f_{cA} - Resistência média aos 28 dias dos corpos de prova da argamassa A.

Para que o resíduo de mineração seja classificado como material pozolânico, os resultados do ensaio de pozolanicidade devem estar de acordo com os requisitos estabelecidos na NBR 12653 (ABNT, 2014).

3.2. Obtenção e caracterização do material lignocelulósico

A madeira de *Pinus oocarpa*, com 28 anos de idade, foi proveniente de plantios experimentais no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), na cidade de Lavras-Minas Gerais.

Após as derrubadas das árvores estas foram divididas em toras, as quais foram conduzidas até a Unidade Experimental de Painéis de Madeira (UEPAM) da Universidade Federal de Lavras onde ficaram armazenadas em um tanque contendo água a temperatura de 65°C por 24 horas para promover o cozimento e consequentemente, o “amolecimento” da madeira para facilitar o processo de laminação.

As toras foram seccionadas e depois laminadas em torno laminador obtendo lâminas de 1,5 mm de espessura, que foram posteriormente rasgadas manualmente e processadas em moinho martelo com peneira de 4 mm de abertura para geração das partículas do tipo *sliver*.

O material particulado foi peneirado, através de um conjunto de peneiras sobrepostas, cujas aberturas foram de 12 mesh (superior) 20 mesh (inferior), respectivamente, com o objetivo de separar as partículas conforme suas granulometrias. Dessa forma, as partículas que ficaram retidas na peneira inferior foram destinadas à produção dos painéis e também, à caracterização anatômica e física do material lignocelulósico. Após a classificação, foram armazenadas em sacos plásticos e lacradas até o momento de processamento dos painéis.

3.2.1. Caracterização morfológica do material lignocelulósico

A caracterização anatômica do material lignocelulósico (madeira de pinus) foi realizada conforme recomendações de Muniz e Coradin (1991) e segundo norma Iawa Committe (1989). Na mensuração das partículas lignocelulósicas foram obtidas informações relativas ao seu comprimento e diâmetro da partícula, sendo adotada uma base amostral de 30 medições, as quais foram realizadas utilizando o Software Image J. Foi calculada a razão de aspecto das partículas, sendo obtida pela relação entre comprimento e o diâmetro.

3.2.2. Caracterização física do material lignocelulósico

O material lignocelulósico foi caracterizado quanto à densidade aparente, densidade básica, porosidade aparente e absorção máxima de água. Para isso, foram utilizadas as normas destacadas na Tabela 2.

Tabela 2– Análises de caracterização física do material lignocelulósico.

ANÁLISES	NORMAS
Densidade aparente	AZZINI et al. (1981)
Densidade básica	NBR 11941 (ABNT, 2003)
Porosidade aparente	D 167 (ASTM, 2005)
Absorção máxima de água	D570 (ASTM, 1995)

Fonte: Do autor (2018).

3.2.3. Caracterização química do material lignocelulósico

Para a análise dos constituintes químicos do material lignocelulósico foram feitos testes em quadruplicatas. O material particulado foi peneirado, através de um conjunto de peneiras sobrepostas, cujas aberturas foram de 40 mesh (superior) e 60 mesh (inferior) e as partículas que ficaram retidas na peneira inferior foram destinadas à análise química. O material foi acondicionado na temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $65\pm 5\%$, até a obtenção de massa constante.

Os componentes químicos foram quantificados com base na massa seca do material, portanto, a umidade foi verificada em cada etapa, utilizando a equação 2:

$$U_{bs} = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

U_{bs} : Umidade da amostra base seca (%)

M_u : Massa úmida (g)

M_s : Massa seca (g)

O material lignocelulósico foi caracterizado quimicamente para quantificar o teor de cinzas, extrativos, lignina, holocelulose, celulose e hemicelulose (quantificada pela diferença entre o teor de holocelulose e o teor de celulose). Para isso, foram utilizadas as normas destacadas na Tabela 3.

Tabela 3– Normas utilizadas para análise da composição química do material lignocelulósico.

TEOR	NORMAS
Cinzas	Norma NBR 13999 (ABNT, 2003)
Extrativos	Norma NBR 14853 (ABNT, 2010)
Lignina	Norma NBR 7989 (ABNT, 2010)
Holocelulose	Browning (1963)
Celulose	Kennedy, Phillips e Willians (1987)
Hemicelulose	(Holocelulose – Celulose)

Fonte: Do autor (2018).

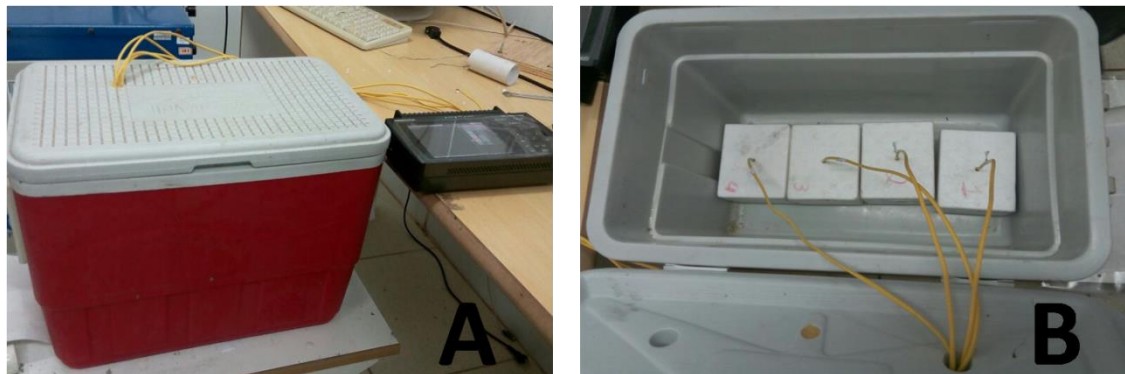
3.3. Análise de aptidão

Alguns métodos têm sido empregados para avaliação da aptidão de materiais para a produção de compósitos a base de cimento. Neste trabalho foi avaliada a evolução da temperatura de hidratação do cimento (termometria), conforme metodologia descrita por Hofstrand et al. (1984). Este ensaio consistiu em mensurar, de forma sistemática, a evolução da temperatura da mistura de madeira de pinus com o cimento e o resíduo de mineração durante certo período de tempo. O monitoramento dessa temperatura de reação é utilizado como parâmetro para se determinar o índice de inibição da “pega” ou endurecimento do cimento.

Para o monitoramento da temperatura foram utilizados cabos termopares do tipo K acoplados em um coletor de dados, onde os dados foram gerados e armazenados. As leituras de temperaturas realizadas em cada cabo conectado foram feitas em intervalos de um minuto, durante um tempo total de 24 horas.

Um sistema hermeticamente fechado foi projetado para colocar a mistura e acoplar o cabo termopar, de modo que o calor obtido da reação exotérmica do cimento não dissipasse no ambiente. Adaptaram-se quatro caixas de isopor no interior da caixa térmica, totalmente isolada por lã de vidro. Cada cabo atravessou a tampa da caixa e foi inserido na amostra dentro das caixas de isopor (Figura 1).

Figura 1– (A) Sistema coletor de dados e caixa térmica acoplada para os testes de aptidão;
(B) Vista interna da caixa térmica, detalhe das caixas de isopor para armazenar as amostras.



Fonte: Do autor (2018).

O resíduo de mineração em diferentes proporções, o cimento, a madeira e a água foram misturados em um béquer, onde o tempo decorrido para a mistura total desses componentes não excedeu cinco minutos, sendo posteriormente transferidos para as caixas de isopor. A seguir, o cabo termopar foi inserido na mistura e então foram fechadas as caixas de isopor. O conjunto já com o cabo conectado foi então colocado dentro da caixa térmica fechada hermeticamente. A partir deste momento o aparelho foi ligado e iniciou-se a aquisição dos dados. Essa análise é de suma importância para determinação da quantidade máxima de utilização de resíduo de mineração sem que venha afetar a cura do cimento.

Os índices de inibição foram calculados de acordo com a equação 3 de Hofstrand et al. (1984), utilizada por Lopes (2004). Esse autor, além do tempo de hidratação, incorpora também na equação a temperatura máxima da mistura de algum tipo de material lignocelulósico - cimento - resíduo - água e cimento - água, além da variação máxima do tempo e da temperatura.

$$I = 100 \times t^2 - \frac{t'^2 \times T'^2}{t^2} - \frac{T^2 \times S'^2}{T'^2} - \frac{S^2}{S'^2} \quad (3)$$

$$S'^2 = \frac{\Delta T'^2}{\Delta t'^2}$$

$$S^2 = \frac{\Delta T^2}{\Delta t^2}$$

Em que: t^2 = tempo para se atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura água-cimento;

t'^2 = tempo para se atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura água-cimento-adição de material;

T^2 = Temperatura máxima atingida pela mistura cimento-água;

T'^2 = Temperatura máxima atingida pela mistura cimento-adição de material;

S^2 = Variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-água;

S'^2 = Variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-adição de material.

Para se classificar a compatibilidade do material adicionado com o cimento foi utilizada a classificação de Okino et al. (2004), conforme citada na Tabela 4.

Tabela 4– Índice de inibição utilizado para classificar a compatibilidade do material lignocelulósico com o cimento.

ÍNDICE DE INIBIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
$I < 10$	Baixa
$10 \leq I < 50$	Intermediária
$50 \leq I \leq 100$	Alta
$I > 100$	Muito alta

Fonte: Okino et al. (2004).

3.4. Painéis a base de cimento

3.4.1. Plano experimental e produção dos painéis

Para a manufatura dos painéis foram utilizadas partículas de madeira de *Pinus oocarpa*, cimento CPV- ARI, a água e aditivo químico cloreto de cálcio (CaCl_2) em relação à massa de cimento, o qual tem como função reduzir o tempo total de pega e endurecimento da mistura.

Após o cálculo da quantidade de partículas de madeira, cimento, água e aditivo foram feitas as pesagens dos materiais equivalentes a três painéis para cada tratamento. Em seguida, os mesmos foram misturados em uma betoneira, seguindo a metodologia aplicada por Latorraca (1996) e Lopes (2004). As variáveis utilizadas para o cálculo de materiais podem ser visualizadas na Tabela 5.

Tabela 5– Variáveis de produção dos painéis.

PARÂMETROS DO PAINEL	VALORES
Relação madeira: cimento	1: 2,5
Relação água: cimento	1: 1,5
Taxa de hidratação: cimento	0,25
Quantidade de aditivo - CaCl ₂	2%
Densidade	1,30 g/cm ³

Fonte: Do autor (2018).

O resíduo de mineração foi utilizado em substituição à quantidade de cimento utilizado para a produção dos painéis. Sendo que para a produção dos painéis foram utilizadas as proporções de 0, 10, 20, 30 e 40%. Na Tabela 6 encontra-se o plano experimental dos painéis.

Tabela 6– Plano experimental dos painéis.

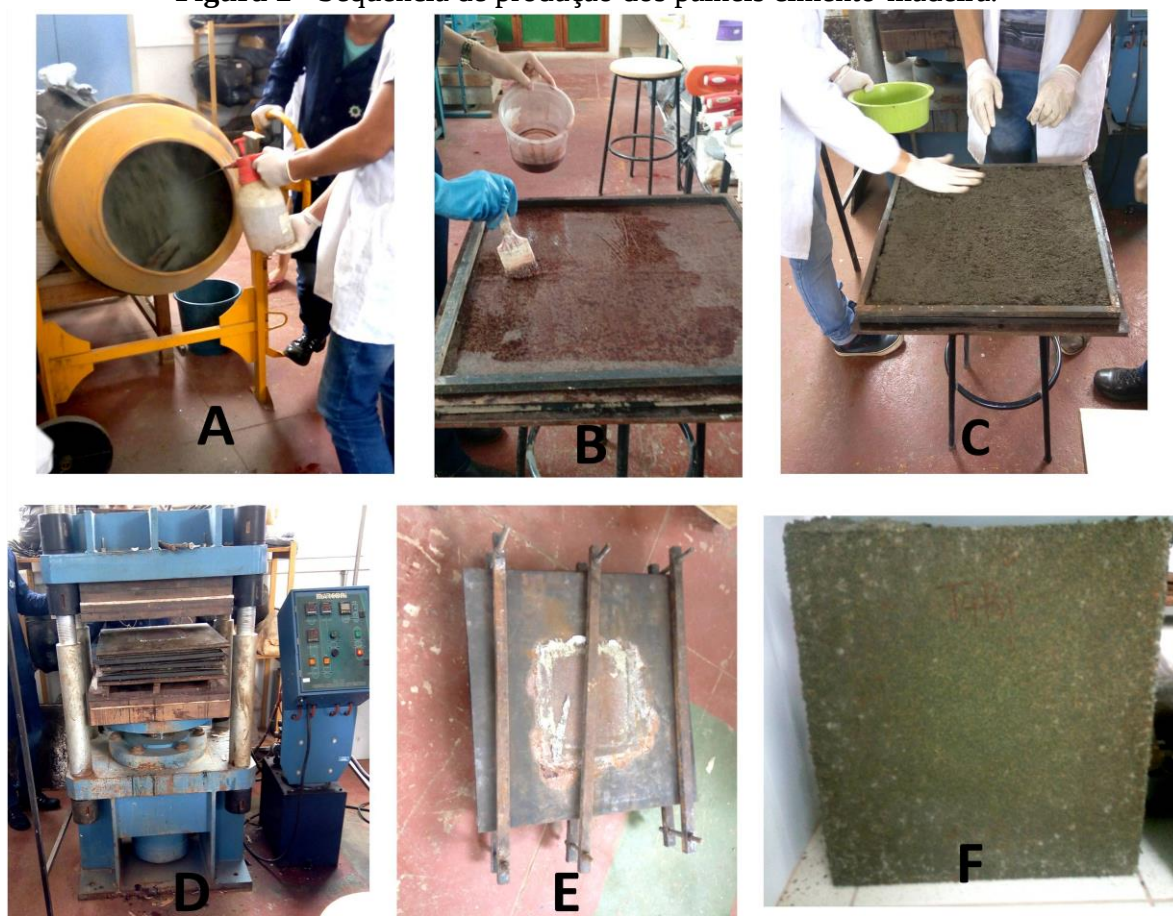
TRATAMENTO	% CIMENTO	% RESÍDUO
T0	100	0
T1	60	40
T2	70	30
T3	80	20
T4	90	10

Fonte: Do autor (2018).

Devidamente pesados, os componentes foram misturados em uma betoneira para serem homogeneizados. Retirada a mistura da betoneira, a massa de cada painel foi devidamente pesada, separada e distribuída aleatoriamente sobre chapas de alumínio untadas com óleo de baixa viscosidade para facilitar a retirada do painel após sua prensagem e grampeamento e com o auxílio de aros de ferro com dimensões de 48 x 48 x 1,5 cm para controlar as dimensões e a espessura dos painéis. Em seguida foi sobreposta outra chapa de alumínio para realizar a etapa de prensagem. O processo foi repetido por três vezes, obtendo assim três painéis por cada prensagem.

A Figura 2 apresenta a sequência de produção dos painéis cimento-madeira.

Figura 2– Sequência de produção dos painéis cimento-madeira.



(A) Mistura dos materiais na betoneira. (B) Aplicação de óleo na placa de alumínio com os delimitadores de espessura. (C) Formação do colchão. (D) Prensagem a frio. (E) Grampeamento por 24 horas. (F) Painel cimento-madeira.

Fonte: Do autor (2018).

A prensa fria, carregada com os três painéis e os aparatos para o grampeamento, foi utilizada para atingir uma pressão de 4 MPa, sendo posteriormente efetuado o grampeamento. Os painéis permaneceram grampeados por 24 horas. Após esse período, os grampos foram retirados e os painéis foram empilhados cuidadosamente, separados por tabiques e acondicionados em câmara de climatização com temperatura de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 3\%$, para garantir secagem uniforme até a cura final por mais 27 dias, totalizando 28 dias necessários para a cura do cimento.

3.5. Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis

Para a determinação das propriedades físicas e mecânicas, os painéis foram ensaiados após atingirem 28 dias de cura. Na Tabela 7 estão descritos os testes e as normas utilizadas neste trabalho para a avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

Tabela 7– Ensaios e normas de execução.

TESTES	METODOLOGIA
Absorção de água após 2h de imersão (AA_2h)	
Absorção de água após 24h de imersão (AA_24h)	
Inchamento em espessura após 2h de imersão (IE_2h)	
Inchamento em espessura após 24h de imersão (IE_24h)	D-1037 (ASTM, 2012)
Densidade aparente	
Umidade	
Compressão Paralela a superfície do painel	
Ligação Interna (LI)	
Porosidade	C- 948 81 (ASTM, 1981)
Flexão estática – Módulo de elasticidade (MOE)	
Flexão estática – Módulo de ruptura (MOR)	DIN-52362 (1982)

Fonte: Do autor (2018).

O processo de retirada dos corpos-de-prova para os painéis produzidos foi realizado com o uso de uma serra circular. Os ensaios foram realizados antes e após envelhecimento acelerado.

3.6. Caracterização microestrutural

Para a caracterização microestrutural dos painéis foi realizada uma avaliação por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras. Os ensaios foram realizados em um equipamento da marca ZEISS, modelo DMS 940.

Tal caracterização foi realizada na superfície de ruptura das placas que foram ensaiadas por flexão estática com o intuito de observar o efeito das adições do rejeito de mineração a conformação da matriz e sobre os ensaios mecânicos e físicos. As análises foram realizadas em corpos de prova antes e após envelhecimento acelerado.

3.7. Envelhecimento acelerado

O envelhecimento acelerado de imersão - secagem (EN 494, 1994) tem por finalidade simular a eventual degradação dos materiais pela exposição prolongada às intempéries naturais. Segundo Silva et al. (2002), o efeito que essa degradação causa no painel, diminui o tempo necessário à obtenção de respostas, que possam contribuir com o desenvolvimento de materiais que sejam mais duráveis ao longo do tempo.

Cada ciclo compreende uma imersão e uma secagem. Os compósitos foram submetidos à imersão completa em água por 170 min (até que os poros capilares sejam preenchidos pela água). Os compósitos foram então aquecidos até 70° C por igual período de 170 min para secagem dos sistemas de poros capilares. Foram realizados seis ciclos de envelhecimento em cada corpo de prova.

O procedimento de imersão-secagem foi desenvolvido com o objetivo de estudar o comportamento do envelhecimento dos compósitos sob os efeitos de intempéries, estimulando o ataque da água alcalina dos poros nas partículas (por exemplo, condições envolvendo repetidas exposições à chuva e raios solares). Após os envelhecimentos os corpos-de-prova foram destinados à caracterização mecânica (ensaios de ligação interna e flexão estática – MOE e MOR), física (porosidade) e microestrutural.

3.8. Difração de raios X (DRX)

Essa técnica de micro análise consiste na identificação de elementos cristalinos presentes nas amostras, caracterizando-se por ser uma análise qualitativa. Foram obtidos difratogramas que permitem identificar as fases cristalinas a partir dos picos. Assim, essa técnica foi empregada com o objetivo de identificar as principais fases cristalinas e comparação entre as amostras para os principais compostos encontrados no cimento Portland hidratado. Foram obtidas várias listagens contendo o ângulo, distância interplanar com a respectiva intensidade dos picos e ainda as intensidades relativas para várias substâncias identificadas pela base de dados “International Centre for Diffraction Data” (ICDD).

As estruturas cristalinas dos compósitos madeira-cimento-resíduo com e sem envelhecimento foram analisadas no laboratório da Embrapa Instrumentação - São Carlos/SP, a partir de padrões de difração, obtidos em um difratômetro de raios- X

Shimadzu de modelo XRD-6000 (Shimadzu, Quioto, Japão). As amostras foram analisadas com ângulo de difração (2θ) de 5° a 45° , usando uma taxa de varredura de $1^\circ \cdot \text{min}^{-1}$.

O preparo das amostras foi feito usando moinho de facas, posteriormente o material foi peneirado, através de um conjunto de peneiras sobrepostas, cujas aberturas foram de 40 mesh (superior) e 60 mesh (inferior) e o material que ficou retido na peneira inferior foi destinado à micro análise de DRX.

3.9. Transmissão térmica

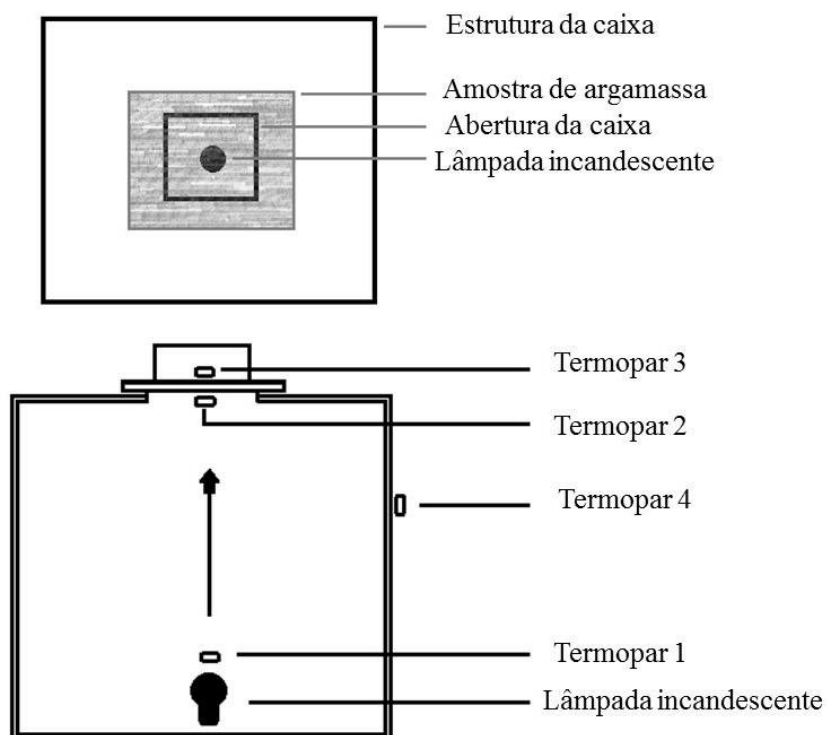
Este ensaio permite determinar o efeito das diferentes percentagens de resíduo de mineração em substituição ao cimento sobre o isolamento térmico dos painéis produzidos.

Para o ensaio de transmissão térmica foi utilizado um equipamento advindo de uma adaptação do método da coluna fracionada modificado descrita por Santos et al. (2011) e avaliado por Bertolini (2014). O equipamento que foi utilizado é composto por painéis de madeira reconstituída e para vedação foram utilizadas placas de isopor de 15 mm de espessura, manta aluminizada do modelo Fresh Premium e fita adesiva aluminizada (CARVALHO, 2012). Para o aquecimento do equipamento utiliza-se uma lâmpada incandescente com temperatura controlável (Figura 3).

Neste método de ensaio, considerando-se as perdas de calor lateral o isolamento é obtido quando a estabilidade é atingida, as temperaturas são registradas por sensores através de um equipamento Data Collector, modelo IM DC 100-01E. Os painéis foram posicionados no equipamento e o ensaio foi realizado simulando a exposição do material à temperatura em torno de 50°C . A razão de aquecimento foi de $1^\circ\text{C}/\text{min}$ e o ciclo de ensaio para cada tratamento é de 3,5 horas.

O ensaio fornece os valores da temperatura na base do padrão (lâmpada incandescente) e temperaturas na base e no topo do corpo-de-prova obtido pelos termopares. O resultado de isolamento térmico do material foi obtido pela diferença do termopar 2 pelo termopar 3 (Figura 3).

Figura 3– Esquema do equipamento para teste de isolamento térmico.



Fonte: VILELA (2016).

Abaixo são descritos as equações 4, 5 e 6 referentes a condutividade térmica, resistência térmica e transmitância térmica, respectivamente.

$$\lambda = \frac{(270 \cdot e)}{\Delta T} \quad (4)$$

$$RT = \frac{e}{\lambda} \quad (5)$$

$$TT = \frac{1}{RT} \quad (6)$$

Em que:

λ = condutividade térmica (W/ (m. °C)

e = espessura do painel (m)

ΔT = variação da Temperatura do painel (°C)

RT = resistência térmica (m².°C/W)

TT = transmitância térmica (W/m².°C)

3.10. Análise estatística

Os experimentos foram analisados obedecendo a um delineamento experimental inteiramente casualizado. Para cada tratamento foram realizadas três repetições, totalizando 15 painéis. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) utilizando o programa Sisvar, e, quando significativa, foi realizada a análise de regressão, a 5% de significância. As propriedades dos painéis foram confrontadas com os valores definidos pelo processo Bison (2017) e Viroc (2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização do resíduo de mineração

4.1.1. Composição mineralógica

Nas Tabelas 8 e 9 estão apresentados os valores das propriedades físico-químicas do resíduo de mineração.

Tabela 8– Propriedades físico-químicas do resíduo de mineração.

Propriedades	Valores
pH	6,8
K (mg/dm ³)	1,87
P (mg/dm ³)	8,66
Na (mg/dm ³)	-
Ca (cmolc/dm ³)	0,1
Mg (cmolc/dm ³)	0,1
Al (cmolc/dm ³)	0,04
H+Al (cmol/dm ³)	0,6
SB (cmolc/dm ³)	0,2
T	0,24
T	0,8
V(%)	25,6
m (%)	16,67
M.O. (dag/kg)	0,2
P-Rem (Mg/L)	56,28
Zn (mg/dm ³)	0,21
Fe (mg/dm ³)	45,93
Mn (mg/dm ³)	8,68
Cu (mg/dm ³)	0,56
B (mg/dm ³)	-
S (mg/dm ³)	-
Classificação do material	Tipo 3 - Textura argilosa
Argila (dag/Kg)	52

Silte (dag/Kg)	16
Areia (dag/Kg)	32

pH em água, KCl e CaCl₂ - Relação 1:2,5; P- Na - K- Fe - Zn- Mn- Cu- Extrator Mehlich 1; Ca - Mg- Al- Extrator: KCl - 1 mol/L; H + Al- Extrator: SMP; SB= Soma de Bases Trocáveis; CTC (t) - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; CTC (T) - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V= Índice de Saturação de Bases; m= Índice de Saturação de Alumínio; Mat. Org. (MO) - Oxidação: Na₂Cr₂O₇ 4N+ H₂SO₄ 10N; P-rem: Fósforo Remanescente; B- Extrator água quente; S - Extrator - Fosfato monocálcio em ácido acético; Solo Tipo 1: Textura Arenosa; Solo Tipo 2: Textura Média; Solo Tipo 3: Textura Argilosa.

Fonte: Do autor (2018).

Tabela 9– Composição mineralógica do resíduo de mineração.

Composição química	TEOR (%)
Fe	13,63
SiO₂	79,60
P	0,011
Al₂O₃	0,20
LOI	0,43

Fe= Ferro; SiO₂=Dióxido de silício; P= Fósforo; Al₂O₃= Óxido de alumínio; LOI= perda na ignição, massa de umidade e material volátil (água + dióxido de carbono).

Fonte: Do autor (2018).

A sílica é um dos compostos químicos mais atrativos e desejáveis em estudos de compósitos a base de cimento. Esse componente em contato com o hidróxido de cálcio (CaOH), liberado pela hidratação do cimento, resulta na formação do silicatos monocálcicos hidratados, que com o passar do tempo dão origem a uma massa firme e resistente. Essa ação provoca reduções consideráveis do tamanho dos poros melhorando significativamente a qualidade da cristalização do cimento, tornando- o mais resistente à compressão, tração e durabilidade. Desse modo, o teor de 79,60% de SiO₂ caracteriza o resíduo de mineração como um componente apto para a fabricação de painéis cimento-madeira, uma vez que o silicatos de cálcio são as principais matérias-primas constituintes do cimento Portland.

A proporção de Fe e Al₂O₃ também se mostraram significativas no resíduo de mineração e também são componentes químicos do cimento, formando o ferro aluminato tetracálcico (C₄AF), podendo, portanto apresentar boa interação com a matriz cimentícia do painel.

4.1.2. Caracterização granulométrica

Os valores referentes às dimensões granulométricas encontradas no resíduo de mineração estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10– Dimensões granulométricas do resíduo de mineração.

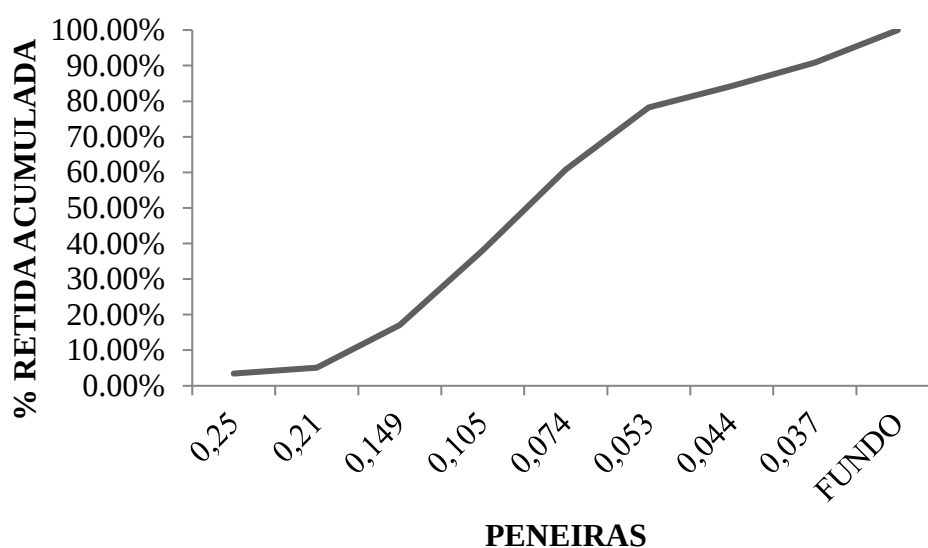
PARTÍCULAS	DIMENSÕES
Tamanho superior	5% + 0, 149mm
Tamanho típico	50% - 0, 064mm

Fonte: Do autor (2018).

A maior dimensão das partículas desse material é de 0,149 mm e 50% das partículas apresentam 0,064 mm. O que caracteriza esse rejeito como um material muito fino. A presença de uma substância muito pequena na formulação do concreto faz com que os vazios sejam preenchidos, deixando o material mais denso e resistente. Além disso, quando pulverizados em partículas muito finas e na presença de água podem vir a reagir com o hidróxido de cálcio do cimento e passam a ajudar na propriedade de ligante hidráulico.

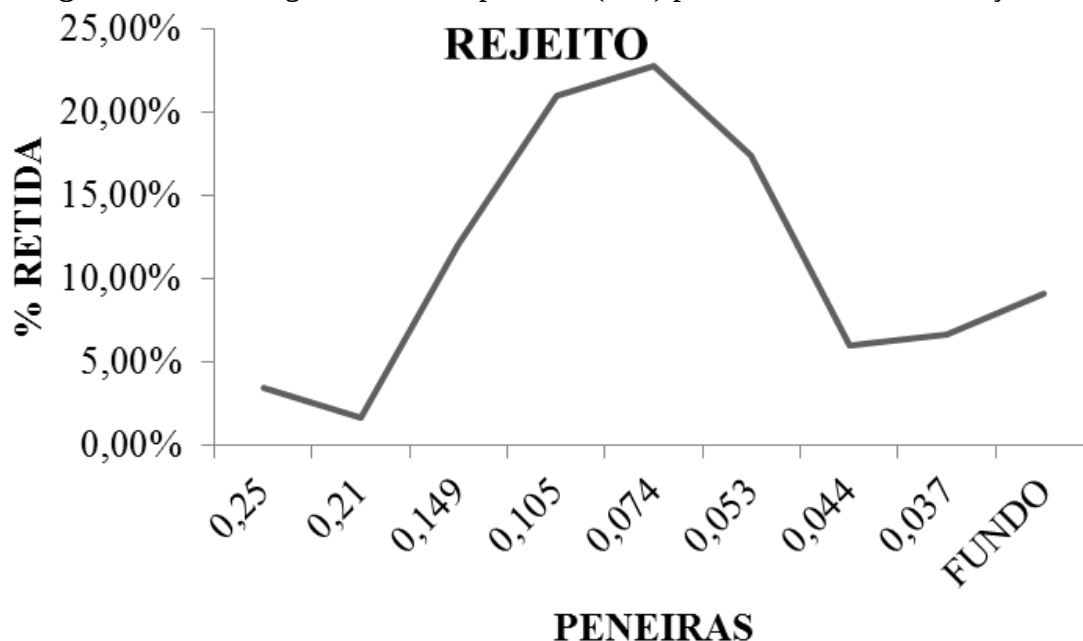
Na Figura 4 e Figura 5 estão apresentadas as curvas granulométricas do resíduo de mineração através das porcentagens retidas acumuladas e porcentagens retidas em cada peneira do ensaio granulométrico.

Figura 4– Porcentagem retida acumulada nas peneiras para o resíduo de mineração.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 5— Porcentagem retida nas peneiras (mm) para o resíduo de mineração.



Fonte: Do autor (2018).

As curvas granulométricas do resíduo de mineração apresentam um módulo de finura de 4,78 mm e dimensões máximas característica, que corresponde à peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa, um valor de 0,25 mm. Já a massa específica, obtida pelo frasco de Chapman do resíduo de mineração foi de 2,703 g/cm³. A maior quantidade de material retido foi verificada na peneira de 0,074 mm, o que mostra que a maior proporção de partículas desse material está representada na fração areia fina (0,2 a 0,05 mm) (SILVA et al., 2014).

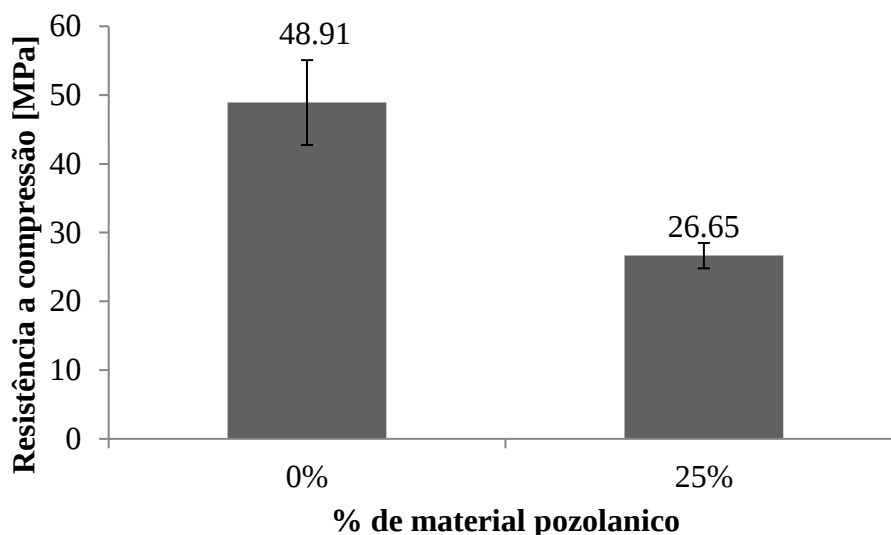
4.1.3. Caracterização de superfície específica

O ensaio de Blaine do resíduo de mineração apresentou o resultado de 1932 ± 58 cm²/g. Demonstrando uma alta área superficial e próxima da área superficial do cimento (1700 cm²/g para o cimento – Castro; Liborio; Pondolfelli, 2011), o que permite uma boa interação nas reações de hidratação do compósito.

O resíduo de mineração não apresentou propriedade de pozolanicidade (Figura 6). O resultado apresentado foi de 54,5% da resistência do material sem 25% de substituição do cimento. De acordo com a norma NBR 12653 (ABNT, 2014), para ser considerado material pozolânico tem que apresentar resistência a compressão acima de 75% do resultado obtido

para o material controle/padrão. Apesar disso, em função da sua dimensão, mesmo que não seja considerado um material pozolânico, pode apresentar boa interação com o cimento.

Figura 6– Resistência a compressão no ensaio de pozolanicidade.



Fonte: Do autor (2018).

4.2. Caracterização do material lignocelulósico

4.2.1. Caracterização morfológica

Os valores referentes à caracterização morfológica do material lignocelulósico estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11– Caracterização morfológica da madeira de pinus.

<i>Pinus oocarpa</i>	Média	Desvio padrão
Comprimento (mm)	3,96	0,65
Espessura (mm)	1,27	0,15
Índice de Esbeltez	3,16	0,68

Fonte: Do autor (2018).

As partículas de pinus que foram classificadas para serem utilizadas nos painéis cimento-madeira apresentaram um comprimento médio de 3,96 mm, sendo o valor máximo de 6,16 mm e valor mínimo de 2,78 mm. Em relação à espessura, as partículas possuem valor médio de 1,27 mm, sendo o valor máximo de 1,6 mm e valor mínimo de 0,96 mm.

O índice de esbeltez é dado pela relação entre o comprimento e a espessura da partícula. Iwakiri et al. (2000) afirmam que as dimensões ótimas das partículas devem estar entre 2 a 20 mm de comprimento e 0,2 a 2,5 mm de largura por 0,3 a 0,9 mm de espessura.

4.2.2. Caracterização física

Os valores encontrados para a densidade básica, densidade aparente e absorção máxima da madeira de pinus estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12– Caracterização física da madeira de pinus.

Característica Física	Média	Desvio
Densidade básica (g/cm ³)	0,295	0,017
Densidade aparente	0,122	0,002
Absorção máxima (%)	500,43	41,84

Fonte: Do autor (2018).

O valor médio para densidade básica encontrada para as partículas de pinus foi de 0,295 g/cm³, valor inferior ao encontrado por Melo et al. (2013) de 0,41 g/cm³ e observado por César et al. (2014), que obtiveram o valor de 0,456 g/cm³ para madeira da mesma espécie.

Essa variabilidade pode ser explicada por diversos fatores, como diferenças de idades entre os indivíduos analisados, procedência, local de origem, espaçamento e taxa de crescimento entre gêneros e espécies e, até mesmo, entre a mesma espécie (VALÉRIO et al., 2008). Além disso, por se tratarem de partículas, este material está cada vez mais desconfigurado e a densidade tende a diminuir cada vez mais. Em geral, quanto menor a granulometria, menor também a densidade aparente, porque não há como estocar água devido a essa redução dos poros, muito diferente da madeira em discos ou cavacos, por exemplo, que absorve água devido a sua estrutura porosa.

De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1985), madeiras com densidade básica inferiores 0,50 g/cm³ são classificadas como de baixa densidade; madeiras com densidade básica no intervalo entre 0,50 e 0,72 g/cm³ são classificadas como de média densidade e madeiras com densidade básica acima de 0,72 g/cm³ são classificadas como de alta densidade. Sendo assim, a madeira da espécie *Pinus oocarpa* apresenta madeira de baixa densidade básica.

As partículas lignocelulósicas, quando incorporadas em compósitos, são responsáveis por conferir leveza ao material (MAGALHÃES; ALMEIDA, 2010) e isto acontece devido ao fato de apresentarem, na maioria das vezes, densidade básica menor do que a matriz. Outra implicação da densidade básica das partículas lignocelulósicas é com relação ao volume, sendo que quanto menor a densidade, maior será o volume de partículas dentro do compósito para a mesma massa, podendo afetar sua qualidade físico-mecânica (IWAKIRI et al., 2005).

Para a característica de absorção máxima de água o valor médio encontrado foi de 500,43%. Esse valor quando confrontado com a absorção máxima encontrada por Agopyan e Savastano Junior (1997) para fibras de *Pinus elliotti* (400%) se mostrou superior. Segundo Savastano Junior (2000), devido à grande porcentagem volumétrica de vazios permeáveis, a absorção de água pelos materiais vegetais é muito alta já nos primeiros instantes de imersão.

4.2.3. Caracterização química

Os valores médios para os componentes químicos das partículas de madeira de *Pinus oocarpa* estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13– Caracterização química da madeira de pinus.

Componentes	Média	Desvio padrão
Cinzas	0,26%	0,05
Extrativos	5,43%	0,22
Lignina	28,62%	0,22
Holocelulose	75,47%	1,08
Celulose	51,86%	0,37
Hemicelulose	23,61%	0,37

Fonte: Do autor (2018).

O componente químico mais importante para o presente estudo é a quantificação do teor de extrativos, uma vez que a presença em grandes quantidades de extrativos pode afetar a cura do cimento e por consequência, afetar a interação entre a partícula de madeira e a matriz cimentícia (CHITTENDEN; HAWKES; HAMILTON, 1975; LATORRACA, 2000; SAVASTANO JUNIOR et al., 2000 citados por FONSECA et al., 2002; IWAKIRI et al.,

2012; FERREIRA et al., 2012; ALMEIDA et al., 2013). Nesse caso, a madeira de pinus apresenta valores relativamente baixos o que é bastante desejável para produção deste tipo de painel.

A madeira é um material higroscópico, sendo capaz de absorver ou perder água para o meio ambiente. Essa característica é explicada pela constituição química da madeira, composta pelos polímeros de celulose, hemiceluloses e lignina. Dentre essas substâncias, a hemicelulose é a mais hidrófila, contribuindo para a variação dimensional da madeira em função da troca de água com o meio (BORGES e QUIRINO, 2004). No caso da madeira de *Pinus oocarpa* utilizada, o valor obtido para hemicelulose se mostrou próximos dos valores normalmente citados em literatura.

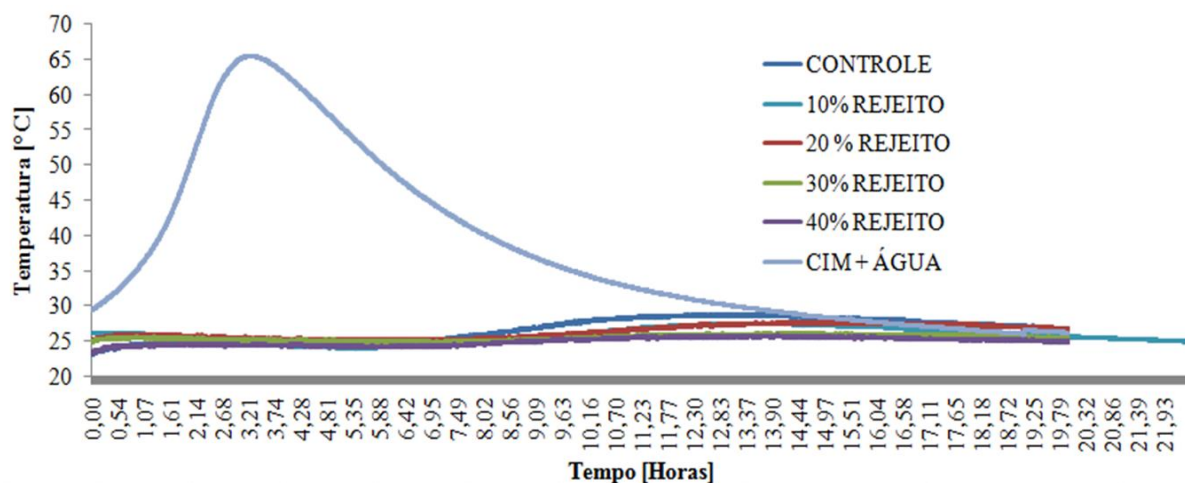
Moraes; Nascimento; Melo (2005), em um diagnóstico dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis da madeira de *Pinus oocarpa* encontraram 59,05% de celulose; 21,22% de hemicelulose; 4,38% de extrativos e 1,26% de cinzas. O conteúdo de celulose, hemicelulose e teor de extrativos encontrados foram semelhantes, enquanto o conteúdo de cinzas foi superior ao valor encontrado neste trabalho.

Em um estudo feito por Teodoro et al. (2015), os autores avaliaram a funcionalidade de painéis MDP produzidos com partículas de bambu e madeira de *Pinus oocarpa*, ao examinarem a composição química da madeira encontraram valores médios para teor de extrativos de 5,20%; lignina de 28,30%; cinzas de 0,40% e holocelulose 66,20%. Esses valores foram condizentes aos encontrados no presente trabalho.

4.3. Análise de aptidão

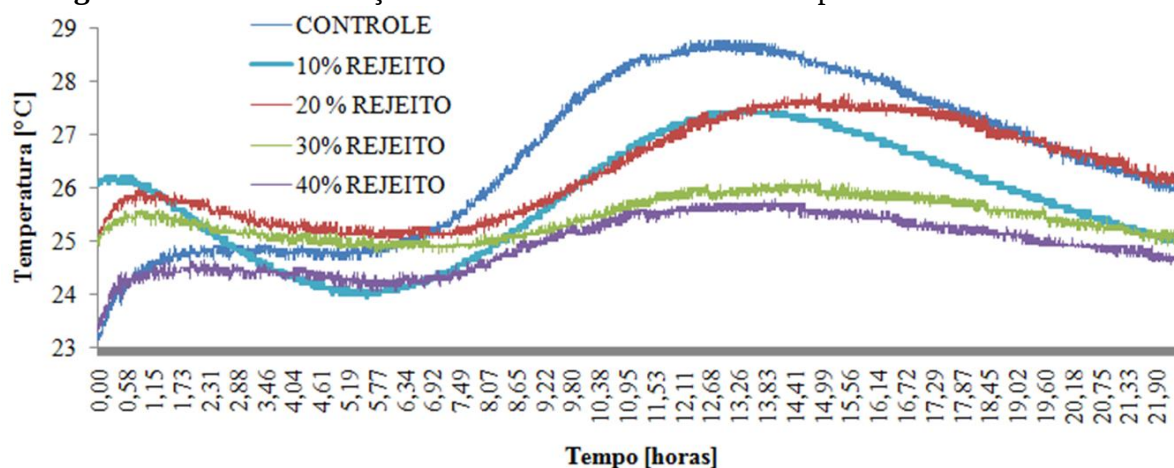
Na Figura 7 e Figura 8 estão apresentadas as curvas obtidas pelo ensaio de inibição da cura do cimento com as partículas de madeira de *Pinus oocarpa* e com a substituição do cimento pelo rejeito de mineração que foram utilizadas na fabricação de painéis cimento-madeira.

Figura 7– Curva de inibição do cimento+água e dos tratamentos utilizados nos painéis cimento-madeira.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 8– Curva de inibição dos tratamentos utilizados nos painéis cimento-madeira.



Fonte: Do autor (2018).

A Figura 7 apresenta a curva de hidratação da pasta de cimento (cimento+água) como parâmetro de comparação para as curvas dos tratamentos, e apresentou uma temperatura máxima de hidratação inicial próxima de 66°C, a qual ocorreu em um tempo de 3 horas de ensaio. Observa-se que a produção dos painéis cimento-madeira (formulação controle) já promove a redução da temperatura máxima de hidratação (28,5°C) e do tempo de cura (12,11 horas), uma vez que é adicionada a madeira de pinus, a qual apresenta retardantes de cura, como os extrativos (Tabela 13).

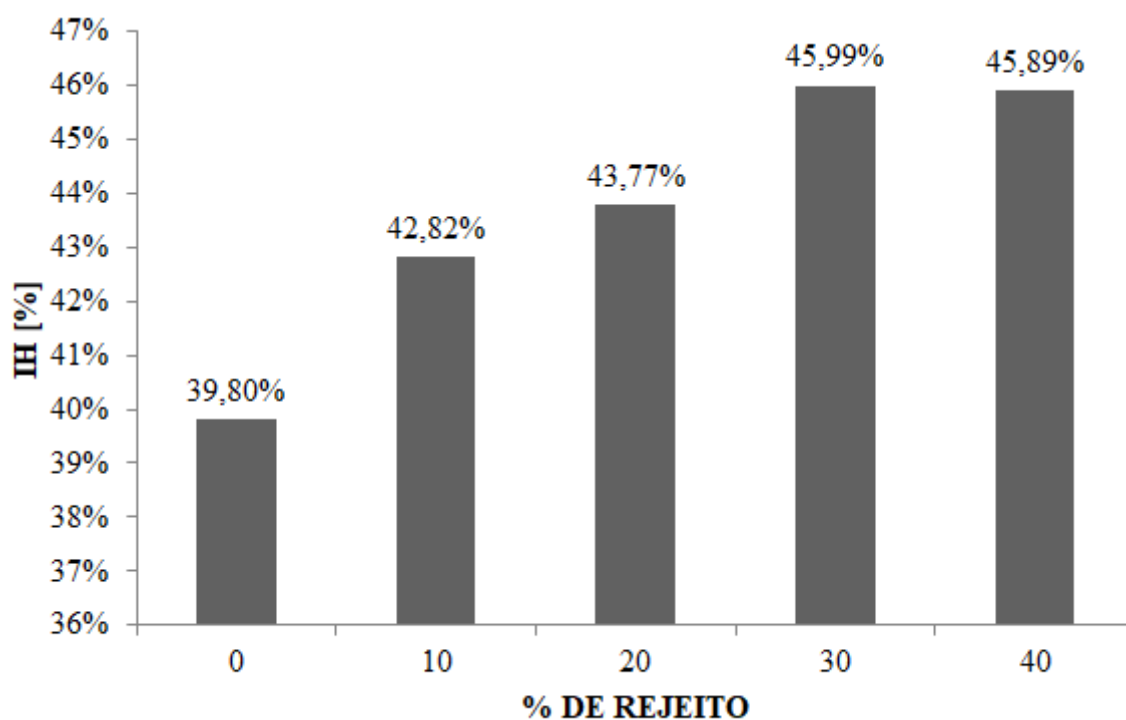
Quando comparado o efeito da substituição do cimento pelo rejeito de mineração na formulação do cimento-madeira observa-se que houve a redução da temperatura de hidratação e o aumento do tempo de cura à medida que houve o aumento da quantidade de

resíduo de mineração (Figura 8). Na porcentagem de 40% de resíduo de mineração a temperatura máxima observada foi de 25,5°C e o tempo de cura de 14 horas.

Sendo assim, a madeira de pinus tem influência na cura do cimento, o que já era esperado devido às características químicas do material e, a presença do resíduo de mineração em substituição ao cimento contribui para certa inibição ao material, o que pode estar relacionado à própria diminuição da quantidade de cimento presente na formulação do material, e o aumento da quantidade da relação madeira cimento (NASSER et al., 2016; MENDES et al., 2017).

Essas curvas foram convertidas em índices de inibição segundo a metodologia proposta por Hofstrand et al. (1984) e os valores obtidos para cada tratamento dos painéis cimento-madeira estão apresentados na Figura 9.

Figura 9– Índice de Hidratação dos tratamentos utilizados para produção dos painéis cimento-madeira.



Fonte: Do autor (2018).

Quanto às porcentagens de resíduo utilizadas na elaboração dos painéis cimento-madeira, a quantidade de 10% de resíduo em substituição ao cimento foi o material que apresentou menor índice de inibição (42,82%) e a quantidade de 30% do resíduo foi o material com o maior índice de inibição (45,99%). O resíduo de mineração apresentou interferência na hidratação inicial do cimento, sendo classificado (Tabela 4) segundo Okino

et al. (2004) como materiais de inibição intermediária. Apesar de se notar aumento da taxa de inibição com o aumento da quantidade de utilização do resíduo, o que está relacionado com a redução da quantidade de cimento em relação a quantidade de madeira (NASSER et al., 2016), observa-se que o tratamento controle e aqueles com utilização de resíduo de mineração apresentaram-se dentro da mesma faixa de inibição do material.

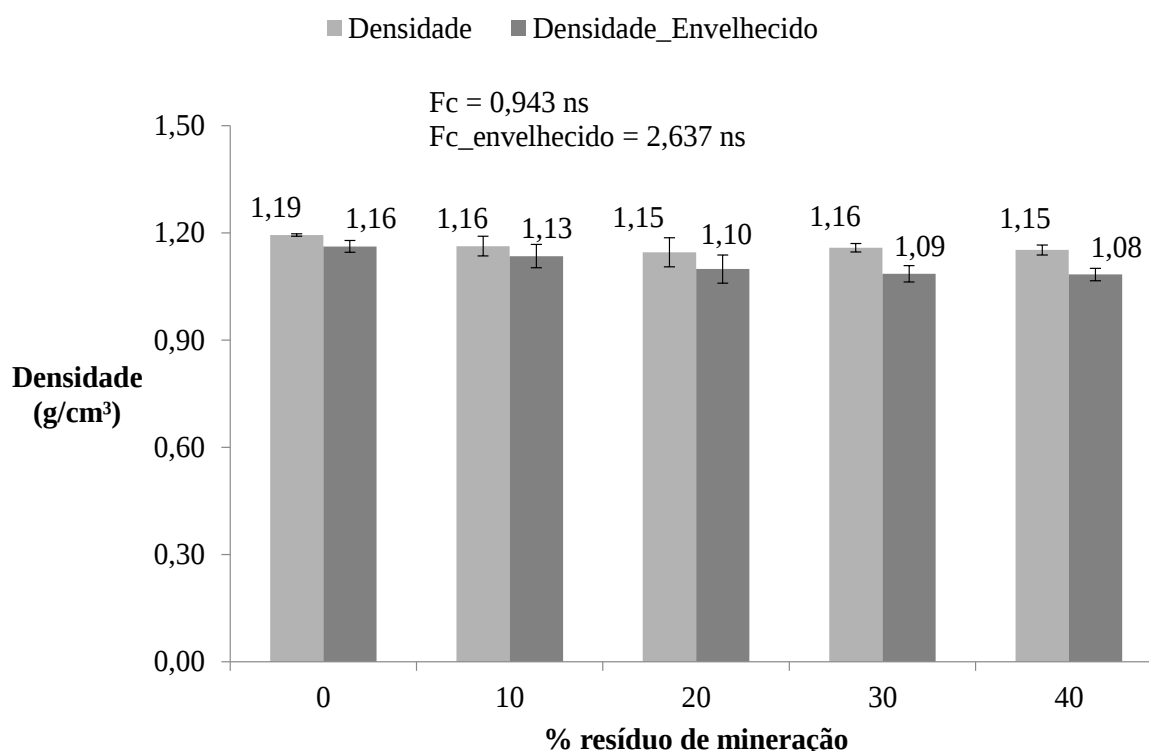
4.4. Propriedades físicas dos painéis cimento-madeira

Para a caracterização física dos painéis cimento-madeira foram realizados os testes de densidade aparente; umidade; porosidade; absorção de água (AA) e inchamento em espessura (IE) após duas e vinte e quatro horas de imersão.

4.4.1. Densidade aparente, porosidade e umidade

Na Figura 10 estão apresentados os valores médios de densidade aparente dos painéis cimento-madeira obtidos para os tratamentos analisados.

Figura 10– Densidade dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração.



NS – Não Significativo a 5%

Fonte: Do autor (2018).

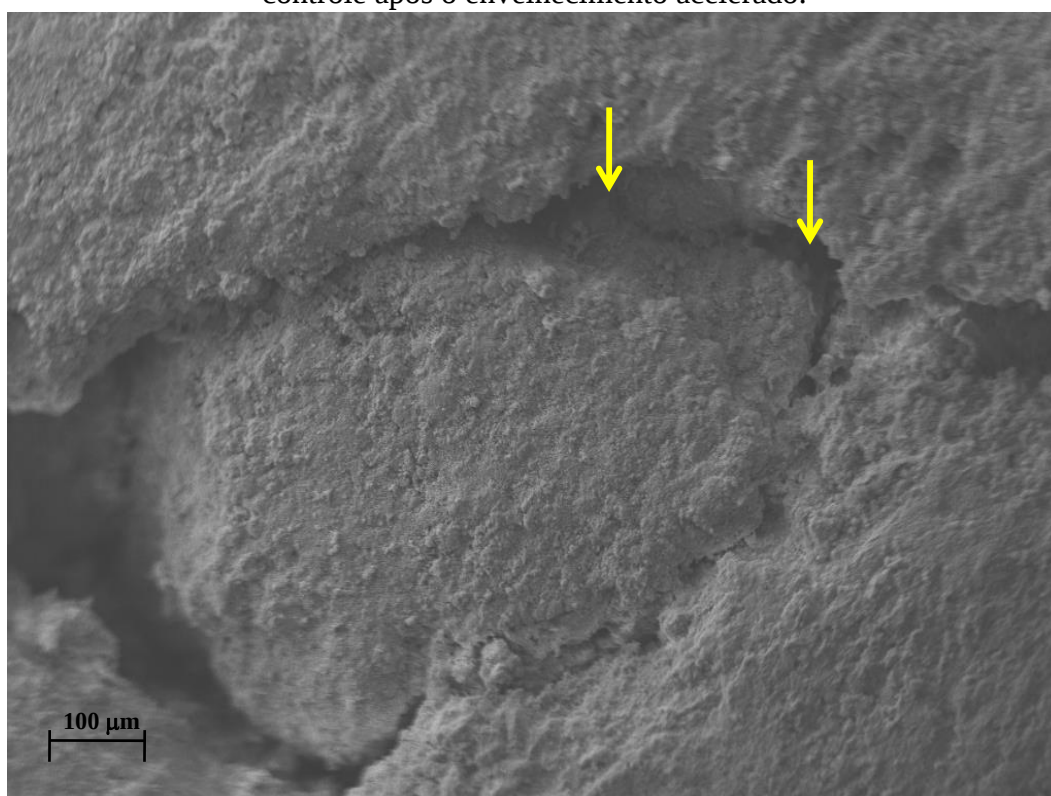
Não houve efeito significativo da porcentagem de resíduo de mineração, em substituição ao cimento, sobre a densidade dos painéis, quando estes foram avaliados antes e após o envelhecimento acelerado. A amplitude dos valores médios encontrados para os painéis antes do envelhecimento acelerado foi de 1,15 g/cm³ a 1,19 g/cm³, o que demonstra a homogeneidade na produção dos painéis entre os tratamentos. Para os painéis cimento-madeira após o envelhecimento acelerado também não houve efeito significativo da substituição de cimento por resíduo de mineração. Os valores médios encontrados variaram entre 1,08 g/cm³ a 1,16 g/cm³.

O processo Bison (2017) determina uma densidade dos painéis de 1,25 g/cm³ $\pm$ 10%. Viroc (2016) e a norma EN323 (2007) determinam o valor de densidade para painéis cimento-madeira de 1,35 $\pm$ 0,05 g/cm³. A norma EN 634-2(2007) determina o valor de densidade para os painéis cimento-madeira de 1,00 g/cm³. Dessa forma os painéis produzidos nesse trabalho se enquadram na faixa de densidade determinado pelo processo Bison (2017) e pela norma EN 634-2 (2007).

Observa-se que houve uma pequena redução dos valores da densidade dos painéis após o envelhecimento acelerado, o que está associado à movimentação dimensional das

partículas com os ciclos de molhagem e secagem e a consequente perda parcial de aderência do material na matriz de cimento e a geração de poros no material (Figura 11) e conforme relatado por FARRAPO et al. (2017).

Figura 11– Microscopia eletrônica de varredura dos painéis cimento-madeira do tratamento controle após o envelhecimento acelerado.

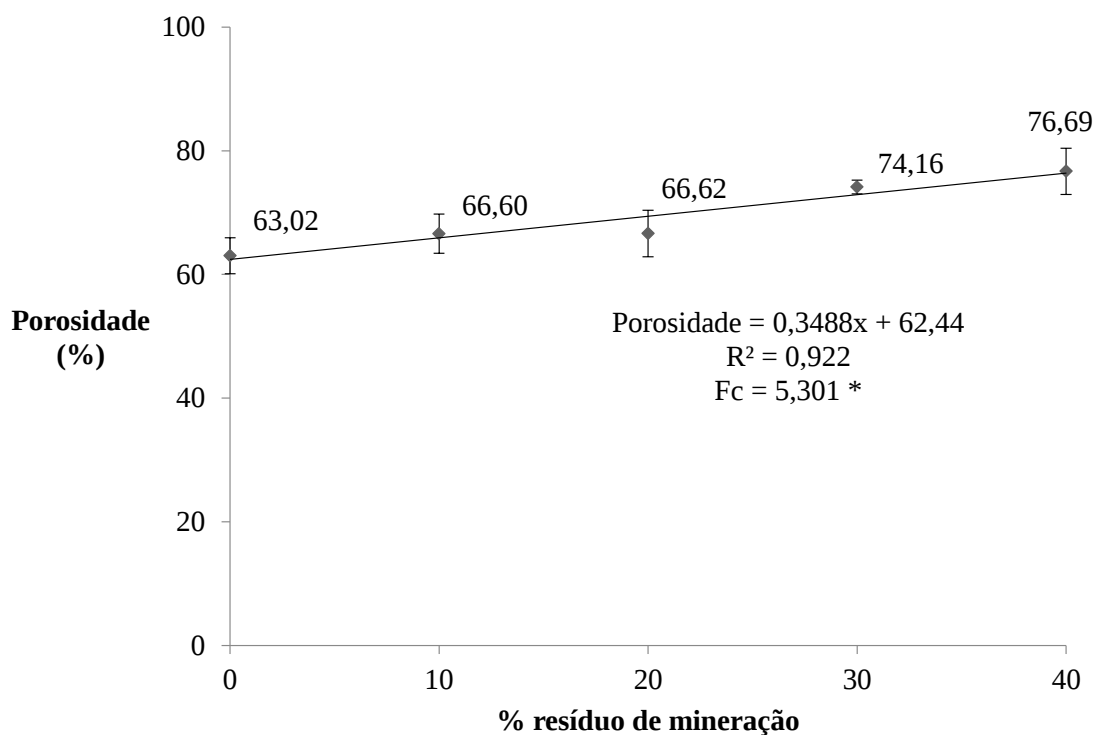


Fonte: Do autor (2018).

Observa-se ainda, que as maiores perdas de densidade foram obtidas para os painéis com a maior porcentagem de utilização de resíduo de mineração (Figura 10). Fato que está associado à propriedade de porosidade dos painéis cimento-madeira antes do envelhecimento acelerado (Figura 12). Observa-se que houve efeito significativo da substituição do cimento por rejeito de mineração sobre a propriedade de porosidade dos painéis sem envelhecimento, com o aumento linear da porosidade dos compósitos à medida que houve o aumento da porcentagem de substituição de cimento. Tal aumento da porosidade se deve a menor hidratação do cimento (Figura 9), em função da substituição pelo resíduo de mineração, e consequente inibição da cristalização das partículas de cimento (SAVASTANO JUNIOR; AGOPYAN, 1999; CHABANNES et al., 2014; ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016). Além ainda do fato de não apresentar efeito de pozolanicidade (Figura 6), e por consequência menor interação com a matriz em função da

diminuição da quantidade de cimento em relação à quantidade de partículas de madeira, deixando a matriz cimentícia com aspecto mais granular e com mais espaços em relação à matriz dos painéis controle (Figura 13).

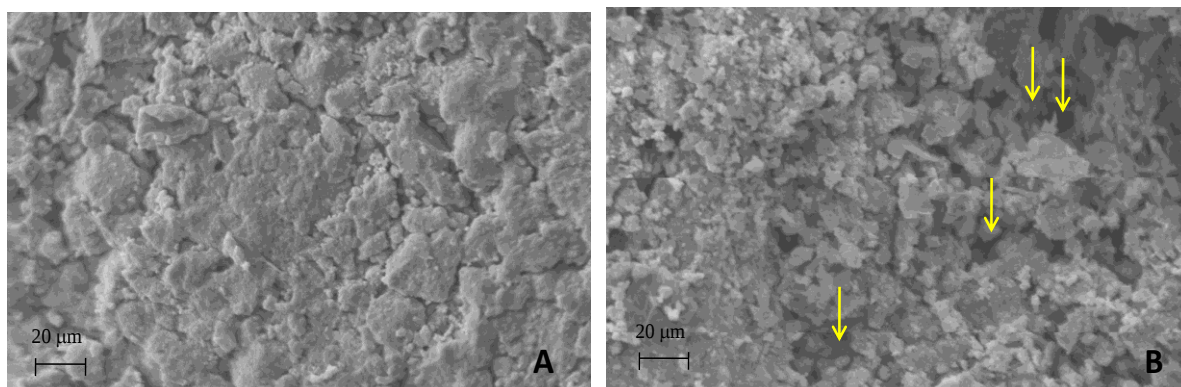
Figura 12– Porosidade dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração antes do envelhecimento acelerado.



*Significativo ao nível de 5% de significância

Fonte: Do autor (2018).

Figura 13– Microscopia eletrônica de varredura para os painéis cimento-madeira antes do envelhecimento acelerado.

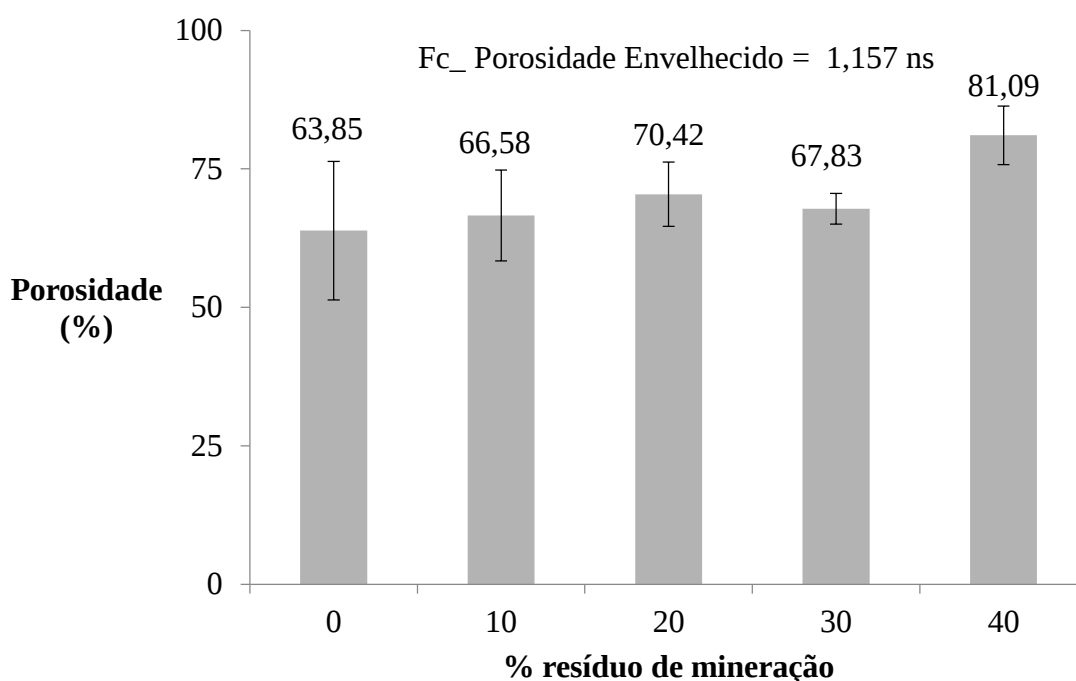


(A) Painéis cimento-madeira controle antes do envelhecimento acelerado; (B) Painéis cimento-madeira com 40% de resíduo de mineração antes do envelhecimento acelerado.

Fonte: Do autor (2018).

Após o envelhecimento acelerado, não houve efeito da porcentagem de substituição do cimento por resíduo de mineração sobre a propriedade de porosidade (Figura 14), o que pode estar associado com a continuação da cura do cimento (MOHR; NANKO; KURTIS, 2005; FARRAPO et al., 2017), apesar de que ainda se observa os maiores valores de porosidade da matriz conforme se aumenta a quantidade de resíduo de mineração, fato associado a menor quantidade de cimento por quantidade de partículas de madeira e o não efeito de pozolanicidade do material utilizado como substituto do cimento.

Figura 14– Porosidade dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração após o envelhecimento acelerado.



NS – Não Significativo ao nível de 5% de significância.

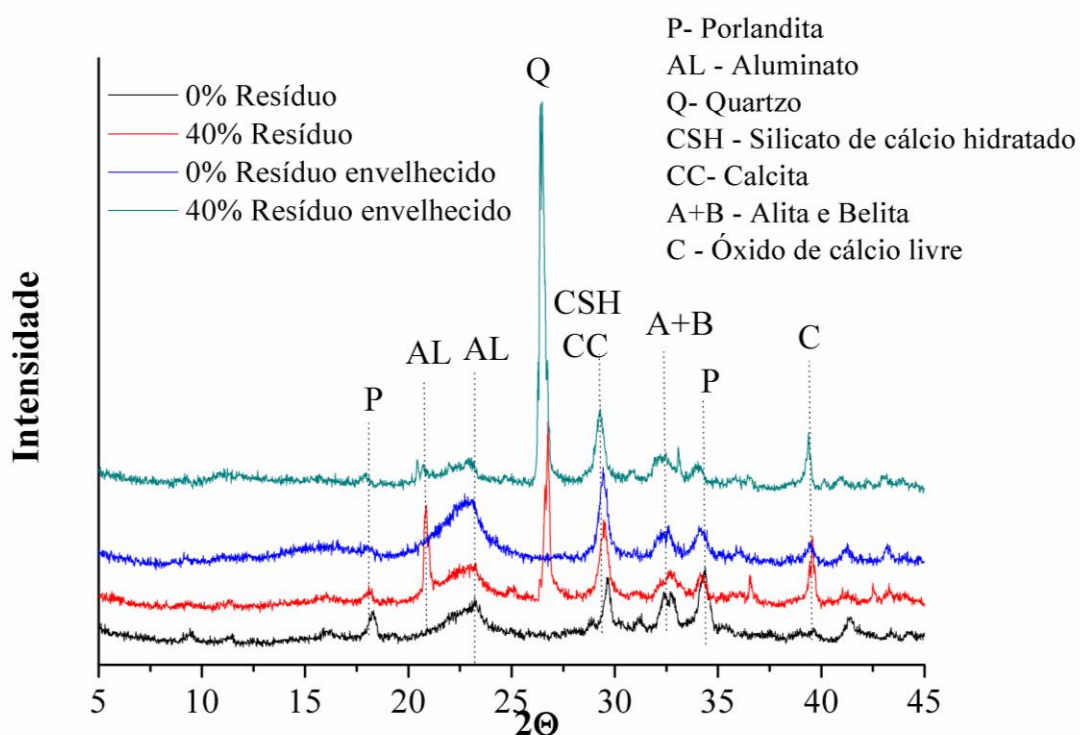
Fonte: Do autor (2018).

A análise de DRX dos painéis cimento-madeira controle e dos painéis produzidos com 40% de resíduo de mineração, antes e após o envelhecimento, pode ser visualizada na Figura 15. Observa-se que a quantidade de portlandita (Ca(OH)_2), dos tratamentos sem resíduo e com resíduo de mineração, diminui com o tempo e se deve a reação dos íons Ca^{2+} livres, liberados no processo de hidratação do cimento, demonstrando a continuação da cura do cimento com a realização dos ciclos de envelhecimento. Ocorreu também a diminuição dos aluminatos (Al_2O_3) dos painéis com resíduos de mineração e o aumento da quantidade de aluminatos hidratados da matriz de cimento, com maior destaque para os painéis sem utilização de resíduo de mineração.

Observa-se ainda que a intensidade do pico de silicato de cálcio hidratado (CSH) sobreposto com o de CaCO_3 aumenta com a idade de hidratação, para ambos os tratamentos, Demonstrando a continuidade da cura dos compósitos. Ao passo que a quantidade de CaO (óxido de cálcio livre) e os silicatos anidros (Alita – C_3S e Belita – C_2S) também diminuem com o envelhecimento do painéis (ROSSIGNOLO, 2005).

O pico de Quartzo (SiO_2) não apresentou redução dos valores, inclusive foi observado certo aumento dos seus valores. Tal elemento é o principal constituinte do resíduo de mineração (Tabela 9), e mediante essa análise aparenta não apresentar interação com a matriz do cimento nessa porcentagem de avaliação de 40%. Apesar de se notar que em porcentagens menores já ocorre a diminuição dos valores de porosidade, como é o caso dos painéis com 30% de resíduo de mineração (Figuras 12 e 14). Sendo assim, com a continuação da cura ocorre uma maior aproximação da matriz com o resíduo de mineração (Figura 16), e o material por apresentar dimensões reduzidas passa a funcionar como certa função de filler, reduzindo a porosidade do compósito, conforme destacado por Heikal et al. (2013) e Abo-El-Enein et al (2015).

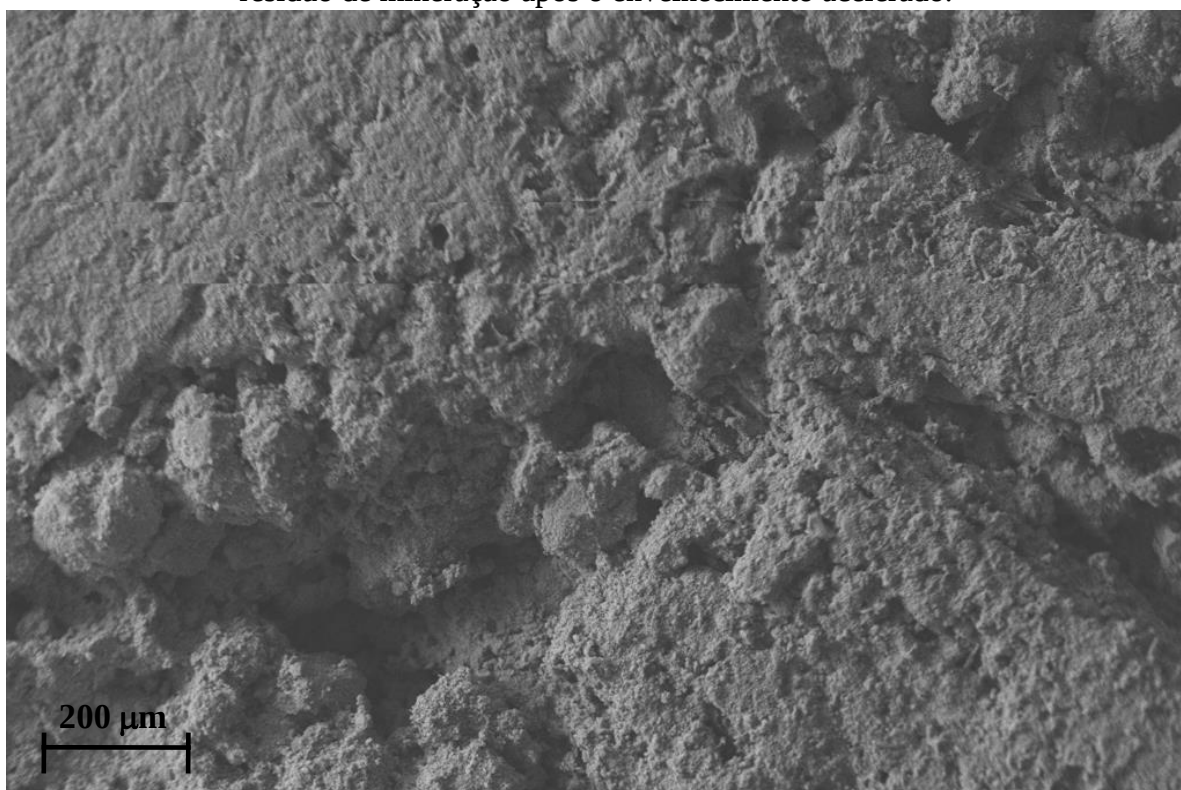
Figura 15– Análise de DRX para os painéis cimento-madeira com resíduo de mineração, antes e após envelhecimento acelerado.



Fonte: Do autor (2018).

Na Figura 16 é possível observar o aspecto menos granular dos componentes de hidratação do cimento, o que comprova a continuação da cura dos painéis de cimento madeira com 40% de resíduo de mineração, contudo as partículas apresentam movimentação e certa perda de aderência com a matriz, o que justifica a redução da densidade do compósito, haja vista sua maior porosidade quando foram realizados os ciclos de envelhecimento.

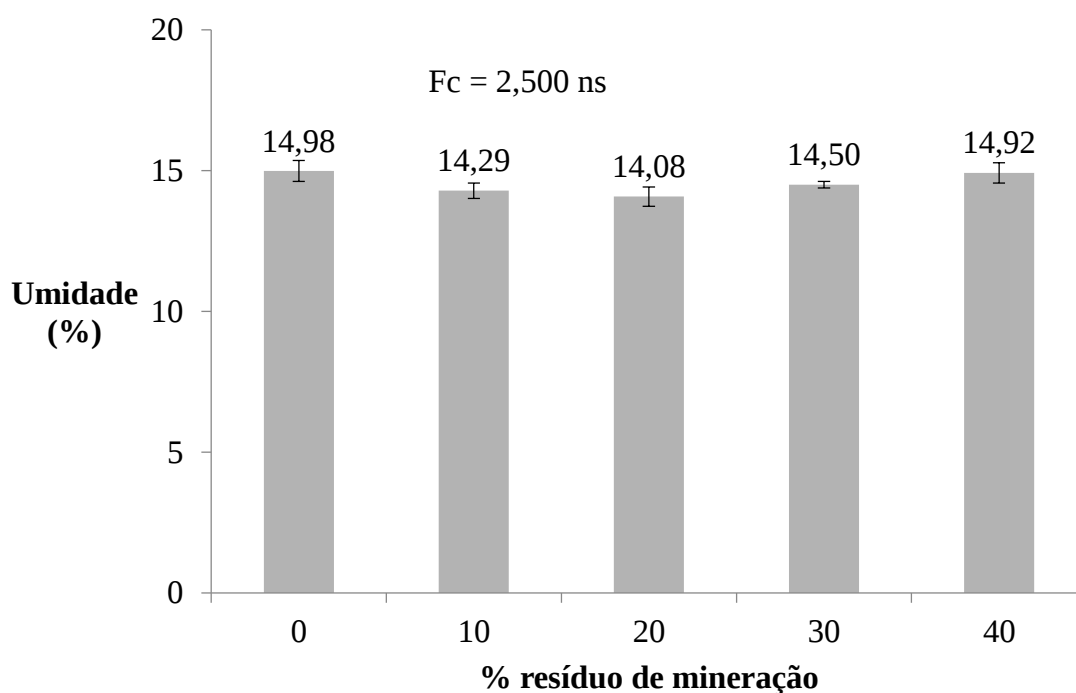
Figura 16– Microscopia eletrônica de varredura dos painéis cimento-madeira de 40% de resíduo de mineração após o envelhecimento acelerado.



Fonte: Do autor (2018).

Na Figura 17 estão apresentados os valores médios de umidade dos painéis cimento-madeira obtidos para os tratamentos analisados. Não houve efeito significativo da porcentagem de resíduo de mineração sobre a umidade de painéis cimento-madeira. Tal resultado se justifica pelo fato da umidade dos painéis serem mais afetada pela proporção de madeira, a qual não foi alterada.

Figura 17– Umidade dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração.



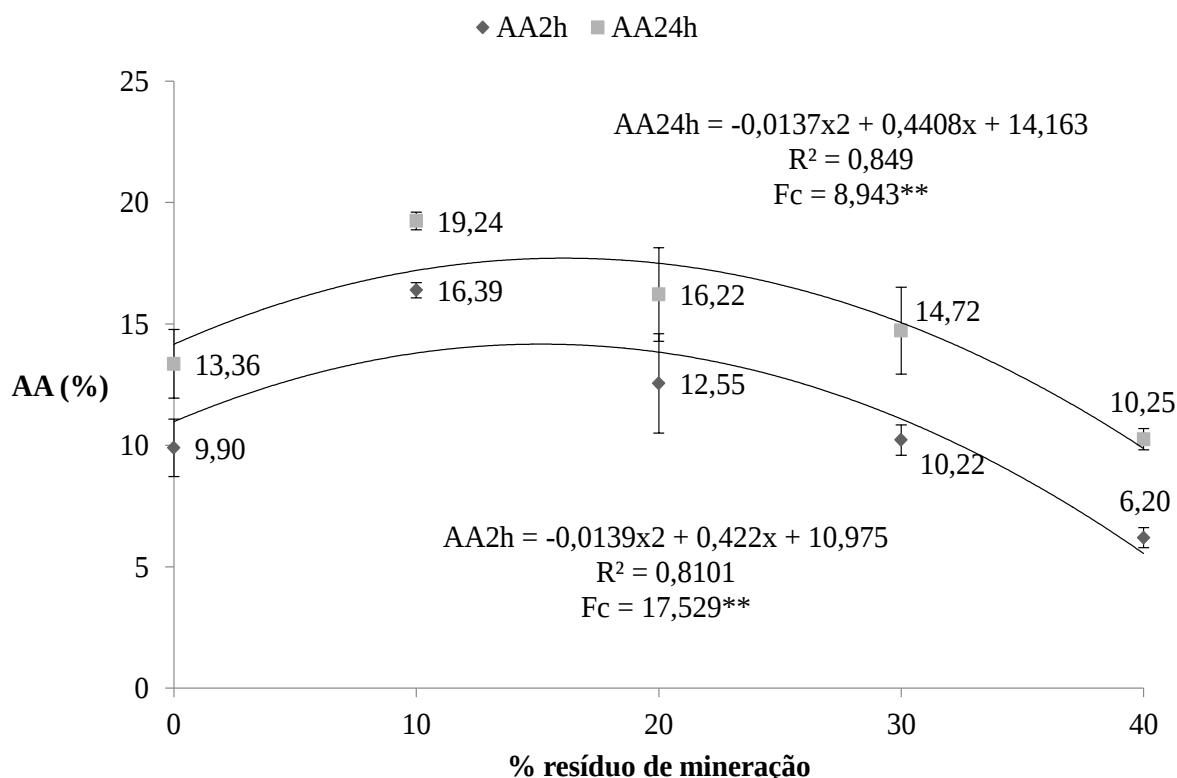
NS – Não Significativo ao nível de 5% de significância.

Fonte: Do autor (2018).

4.4.2. Absorção de água e inchamento em espessura

Os valores médios obtidos para as propriedades de absorção de água após duas horas de imersão (AA2h) e absorção de água após vinte e quatro horas de imersão (AA24h) dos painéis cimento-madeira, para cada tratamento, estão apresentados na Figura 18.

Figura 18– Absorção de água de painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração.



****Significativo ao nível de 1% de significância.**

Fonte: Do autor (2018).

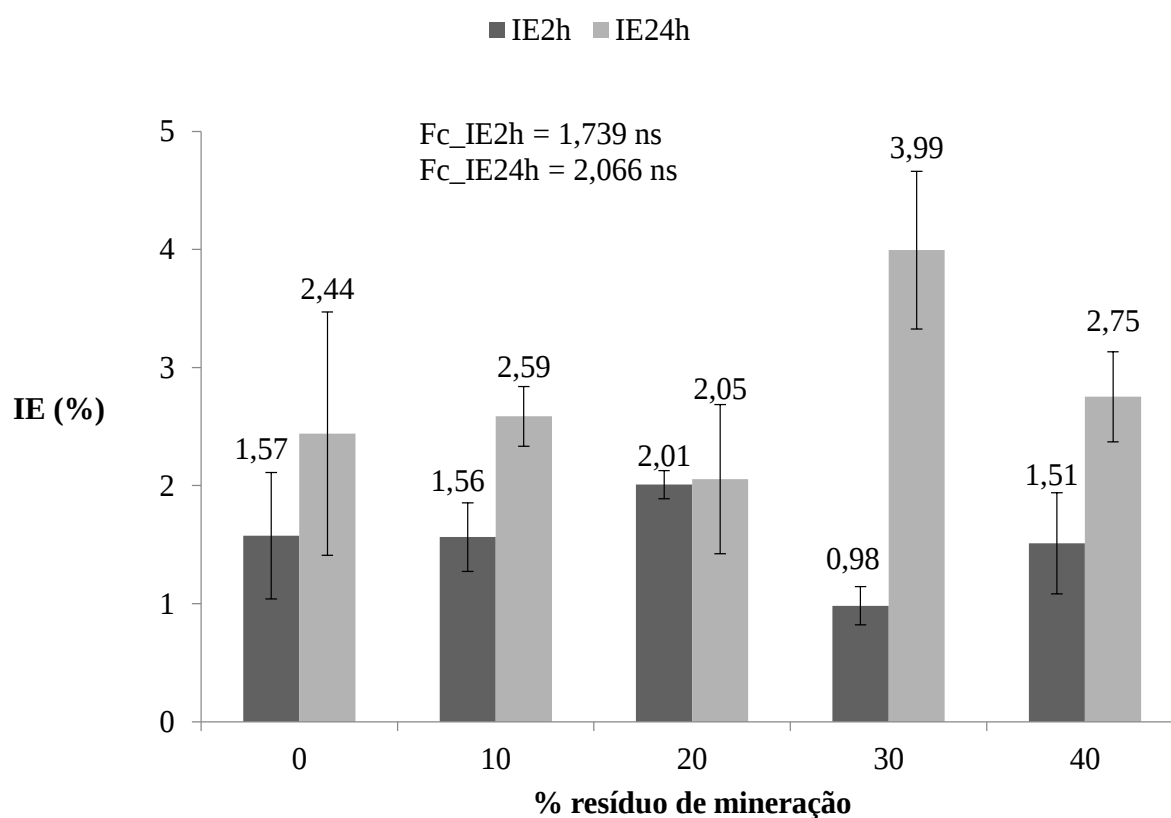
Houve efeito significativo da porcentagem de resíduo de mineração nos painéis cimento-madeira sobre as propriedades de AA2h e AA24h. Para ambas as propriedades se observaram aumento dos valores de absorção de água com a substituição de 10% de cimento, seguido da queda dos valores até a porcentagem de 40%. O melhor resultado para as propriedades de AA2h e AA24h foram obtidos para o tratamento contendo 40% de resíduo de mineração, que apresentou valores médios de 6,20% e 10,25%, respectivamente.

A absorção de água dos painéis cimento- madeira em função do rejeito de mineração pode ser explicada pela relação conjunta entre o aumento do índice de inibição (Figura 9) e as pequenas dimensões do resíduo (Tabela 10 e Figura 5), o que apesar de causar retardamento da cura do cimento, promovendo inclusive o aumento da AA2h e AA24h dos painéis. No entanto, em concentrações maiores resulta em preenchimento dos poros quando colocados em água, o que possivelmente já é resultado da continuação das reações do cimento do material em contato com água (JORGE; PEREIRA; FERREIRA, 2004; GOVIN; PESCHARD; GUYNNET, 2006; GARCIA; DE OLIVEIRA; PANDOLFELLI, 2007;

NOOR et al., 2009; FAN et al., 2012) e apresenta interação com as dimensões reduzidas do resíduo, funcionando como preenchimento dos poros. Assim como também está associada à própria composição química do rejeito de mineração e sua baixa absorção de água (Tabela 9), funcionando como barreira física da penetração da água no interior dos painéis.

Os valores médios obtidos para as propriedades de inchamento em espessura após duas horas de imersão (IE2h) e inchamento em espessura após vinte e quatro horas de imersão (IE24h) dos painéis cimento-madeira, para cada tratamento, estão apresentados na Figura 19.

Figura 19– Inchamento em espessura dos painéis cimento-madeira produzido com resíduo de mineração.



NS – Não Significativo ao nível de 5% de significância.

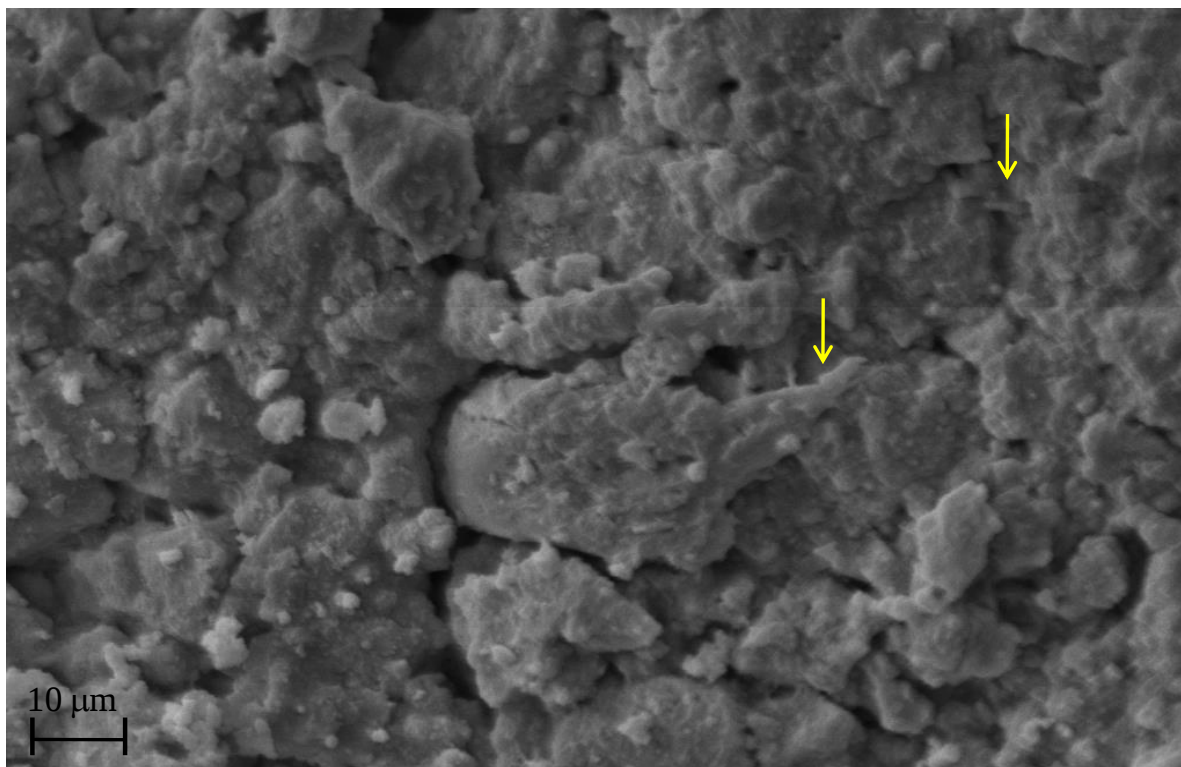
Fonte: Do autor (2018).

De acordo com a análise de regressão não houve efeito significativo da utilização do resíduo de mineração sobre as propriedades de IE2h e IE24h dos painéis cimento-madeira. Os valores médios de IE2h variaram na faixa de 0,98% (30% de resíduo) a 2,01% (20% de resíduo). Para a propriedade IE24h os valores médios variaram entre 2,05% (20% de resíduo) a 3,99% (30% de resíduo).

O inchamento dos painéis cimento madeira se deve a quantidade de madeira e a seu recobrimento adequado pela matriz cimentícia (MOSLEMI; PFISTER, 1987; MENDES et al., 2017). Sendo assim, a substituição de até 40% de cimento pelo rejeito de mineração não influenciou significativamente o recobrimento das partículas, conforme pode ser visualizado nas Figuras 20 e 21, onde se verifica um bom recobrimento das partículas, mesmo com a maior porosidade dos painéis que utilizaram o resíduo de mineração. Outro fator que colaborou para não ser observado o efeito da porcentagem do rejeito sobre as propriedades de inchamento em espessura foi a taxa de absorção de água dos painéis, haja vista que apesar da elevada taxa de absorção de água das partículas de madeira de pinus (Tabela 12), a utilização de 40% de rejeito de mineração promoveu a redução dos valores de absorção de água.

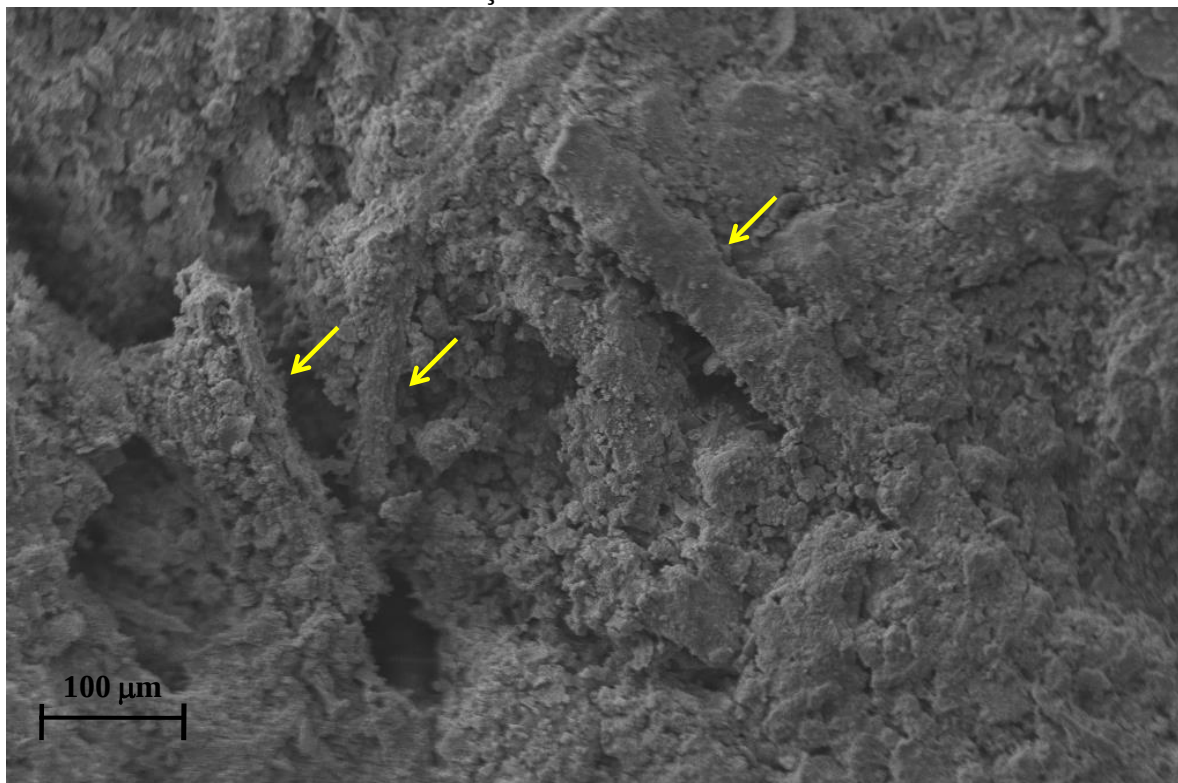
A quantidade adequada de recobrimento das partículas de madeira pela matriz cimentícia também pode ser observada no teste de ligação interna (Figura 23), a qual será discutida posteriormente.

Figura 20– Microscopia eletrônica de varredura dos painéis cimento-madeira controle e sem envelhecimento acelerado.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 21– Microscopia eletrônica de varredura dos painéis cimento-madeira com 40% de resíduo de mineração sem envelhecimento acelerado.



Fonte: Do autor (2018).

Segundo Viroc (2016) e norma EN 634-2 (2007) os painéis comerciais de cimento-madeira devem apresentar no máximo 1,5% de IE24h. Enquanto que de acordo com o processo Bison (2017), os painéis devem apresentar valores de IE2h inferiores a 1,0% e para IE24h inferiores a 1,5%. Apesar da não diferenciação entre os tratamentos, apenas os painéis cimento-madeira com 30% de resíduo de mineração atenderam as normas de comercialização para o IE2h quando comparado com o processo Bison. Nenhum dos tratamentos atenderam aos valores médios das normas de comercialização para o IE24h.

Esse maior inchamento pode estar relacionado com as características das partículas de pinus, as quais apesar de apresentar um adequado índice de esbeltez (Tabela 11), promovendo o efeito de reforço da matriz cimentícia, apresentam uma elevada amplitude de diâmetro e comprimento, o que pode gerar partículas com formatos mais cilíndricos e de maior área superficial, proporcionando maior volume de partículas. O que apesar do seu adequado recobrimento e ligação entre as mesmas, tem maior números de sítios de sorção para ligação da água e movimentação dimensional.

De forma geral, os painéis cimento-madeira produzidos com 40% de resíduo de mineração obtiveram resultados superiores ou semelhantes aos obtidos para os painéis controle, o que demonstra o potencial de uso do resíduo de mineração.

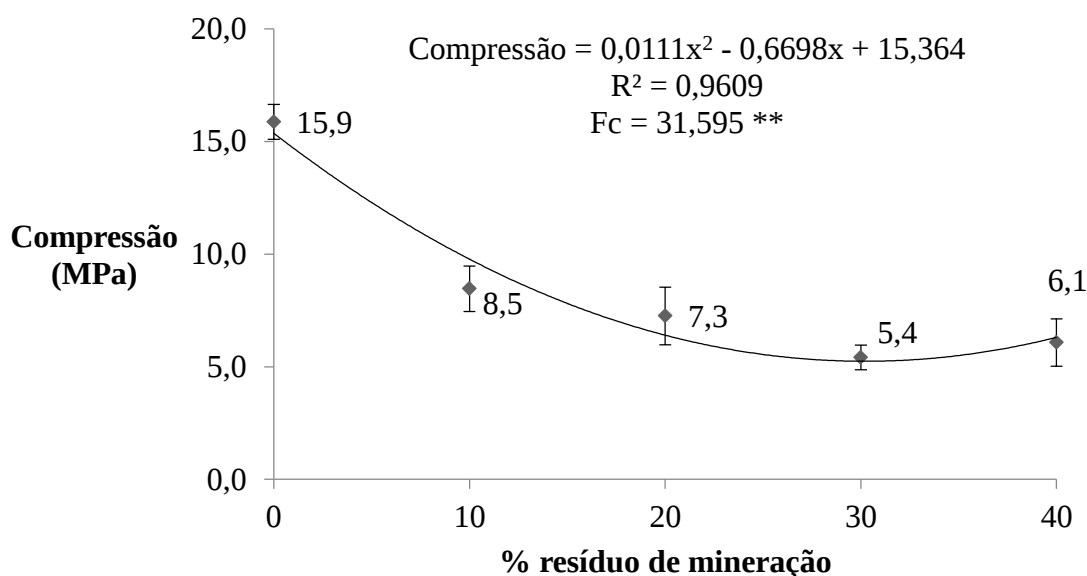
4.5. Propriedades mecânicas dos painéis cimento-madeira

Para a caracterização mecânica dos painéis cimento-madeira foram realizados os ensaios de flexão estática (Módulo de elasticidade e módulo de ruptura), compressão paralela a superfície do painel, ligação interna e dureza janka. Para as propriedades de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática, ligação interna e dureza janka, os ensaios também foram realizados após o envelhecimento acelerado.

4.5.1. Compressão paralela e ligação interna

Os valores médios de compressão paralela (CP) e ligação interna (LI) obtidos para os painéis cimento-madeira podem ser observados nas Figuras 22 e 23, respectivamente.

Figura 22– Compressão dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração.



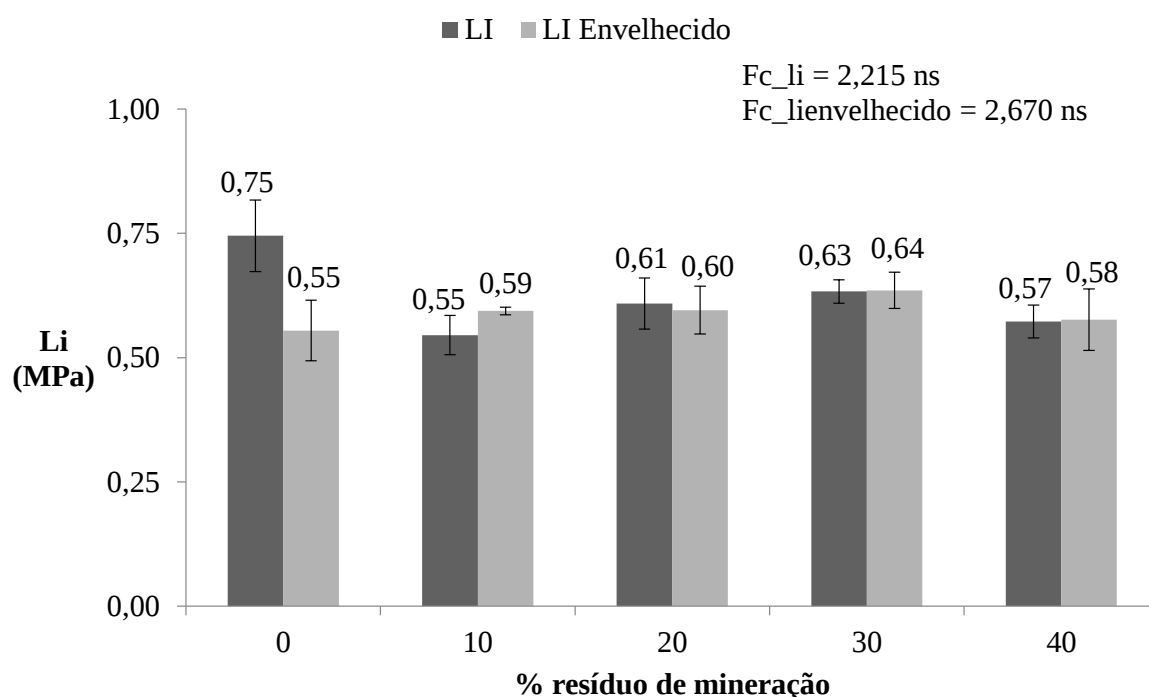
****** Significativo ao nível de 1% de significância.
 Fonte: Do autor (2018).

Observa-se que houve efeito significativo da substituição de cimento pelo rejeito de mineração para a propriedade de compressão. A substituição de 10% de cimento pelo rejeito

de mineração proporcionou redução destacada das propriedades de compressão, sendo essa da ordem de 46,5%. Com o aumento da porcentagem de substituição observa-se que houve redução dos valores, no entanto, de forma mais acentuada e com certa estabilização da perda de resistência quando houve a substituição do cimento de 30 e 40% pelo resíduo de mineração. Essa diminuição dos valores está diretamente associada à redução da quantidade de cimento por unidade de madeira (NASSER et al., 2016) e pela inibição da cura do material ao adicionar o rejeito de mineração (Figura 9).

Não houve efeito significativo da substituição do cimento pelo rejeito de mineração para a propriedade de ligação interna dos painéis cimento-madeira, antes e após o envelhecimento acelerado (Figura 23).

Figura 23– Ligação interna dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração, antes e após o envelhecimento acelerado.



NS – Não Significativo ao nível de 5% de significância.

Fonte: Do autor (2018).

Viroc (2016) e norma EN 634-2 (2007) determinam os valores de 0,50 MPa para ligação interna de painéis cimento-madeira sem envelhecimento. O processo Bison (2017), determina o valor mínimo de ligação interna de 0,40 MPa. A norma EN 634-2 (2007) determina os valores de 0,30 MPa para ligação interna de painéis cimento-madeira após envelhecimento. Sendo assim, todos os tratamentos atenderam as normas de comercialização

quanto a a propriedade de ligação interna antes e após o envelhecimento acelerado. Fato esse que comprova o adequado recobrimento e interação das partículas de pinus na matriz cimentícia.

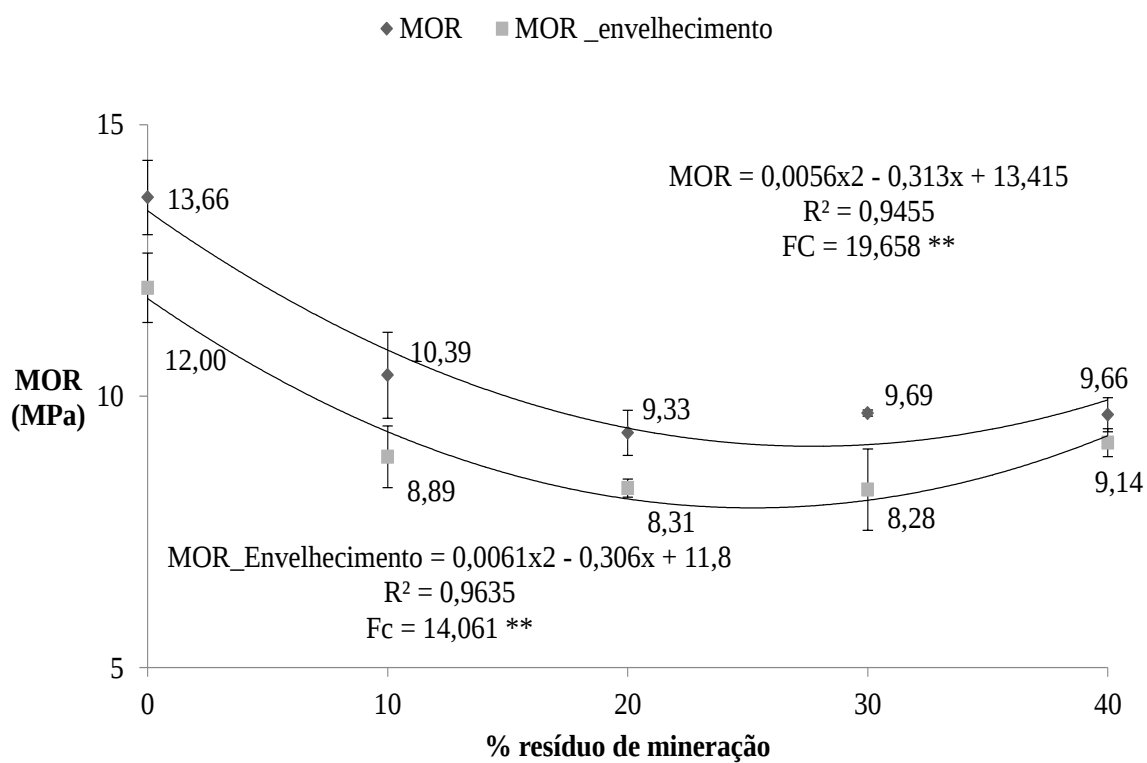
É possível verificar que os painéis produzidos com resíduos de mineração obtiveram tendência de aumento e/ou de manutenção dos valores médios de ligação interna, diferentemente do observado para os painéis controle, o qual obteve queda acentuada após a realização dos ciclos de envelhecimento. Tal fato está associado a continuação da cura da matriz (Figura 15 e 16), e consequentemente da melhora da resistência da matriz, compensado assim o início da perda de aderência da partícula da matriz, em função da movimentação dimensional e da diminuição da densidade dos painéis.

Silva et al. (2006) quando avaliaram painéis cimento-madeira produzidos com madeira de *Eucalyptus urophylla* e a adição de 30% de microssílica notaram que a adição de minerais não afetou significativamente a propriedade de LI. Os autores atribuíram o fato a redução dos poros promovidos distribuição da microssílica, a qual apresenta granulometria reduzida, fato que também pode ter ocorrido com o rejeito de mineração em associação com a matriz de cimento nesse trabalho.

4.5.2. Módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática

Nas Figuras 24 e 25 pode ser observado o efeito da substituição do cimento pelo resíduo de mineração sobre as propriedades de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática, respectivamente.

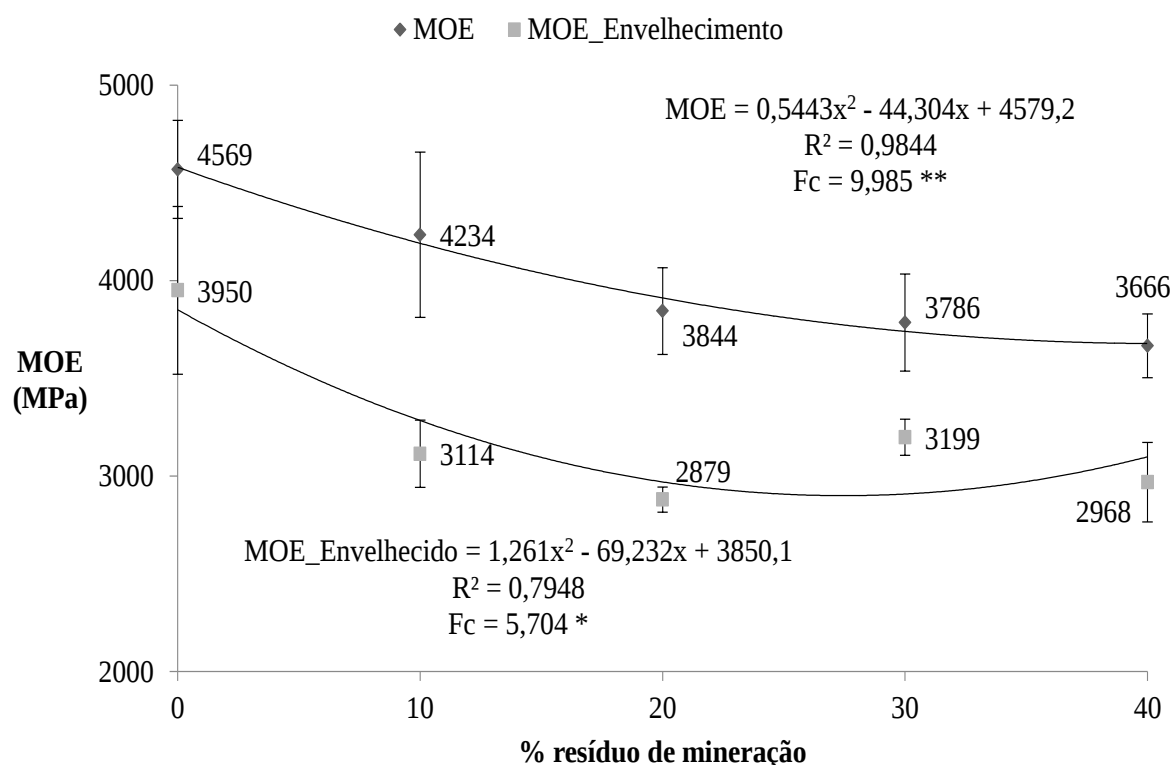
Figura 24– Propriedade de Módulo de ruptura à flexão estática dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração, antes e após o envelhecimento acelerado.



****** Significativo ao nível de 1% de significância.

Fonte: Do autor (2018).

Figura 25– Propriedade de Módulo de elasticidade à flexão estática dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração, antes e após o envelhecimento acelerado.



* Significativo ao nível de 5% de significância. ** Significativo ao nível de 1% de significância.
 Fonte: Do autor (2018).

Houve efeito significativo da porcentagem de substituição de cimento por resíduo de mineração sobre a propriedade de MOR e MOE à flexão estática dos painéis cimento-madeira, antes e após o envelhecimento acelerado. Para o MOR dos compósitos antes e após o envelhecimento acelerado, foi observada redução acentuada dos valores com a substituição de 10% do cimento, seguido de certa estabilização até a porcentagem de 40%. Fato esse associado ao aumento da inibição da cura da matriz, da redução da relação madeira: cimento, a qual apresenta influencia direta sobre as propriedades mecânicas dos painéis (NASSER et al., 2016; MENDES et al., 2017) e da porosidade dos compósitos (Figura 12).

Para o MOE à medida que se aumentou a quantidade de resíduos em substituição ao cimento houve a redução dos valores médios de MOE, com certa estabilização dos valores médios quando avaliadas as porcentagens de 20 a 40%. Observa-se ainda que de forma geral o MOE foi menos afetado que o MOR, fato que se deve a composição química do rejeito, o qual é composto por 79,60% de SiO_2 (Tabela 9), e que de acordo com Strecker et al. (2014)

se deve a elevada rigidez das partícula de sílica e seu adequado fator de empacotamento na matriz de cimento.

Com o envelhecimento houve a redução dos valores médios do painel, demonstrando a perda parcial da aderência do material de reforço (madeira de pinus) na matriz de cimento mediante a movimentação dimensional das partículas (Figuras 11 e 16). Contudo, observa-se que de forma geral a diminuição dos valores das propriedades de flexão com o envelhecimento acelerado, principalmente do MOR, é menos acentuada para os painéis com maior quantidade de resíduo de mineração, fato que este associado à continuidade da cura da matriz (Figura 15) e o preenchimento dos poros com a sílica, o que permite aumento e/ou manutenção da resistência da matriz, conforme observado no ensaio de ligação interna (Figura 23).

Essa redução se deve a movimentação dimensional, a qual ocorre durante os ciclos de molhagem e secagem, mais especificamente durante a secagem, em que a água se dissipa dentro das partículas, causando uma redução de volume e desprendimento da interface com a matriz de cimento (Figura 11). Essa incompatibilidade física, que ocorre devido à movimentação higroscópica diferenciada entre as matrizes cimentícias e o material de reforço vegetal resultam em esforços mecânicos e consequentemente em micro fissuração, o que promove a redução das propriedades de flexão do compósito (PIMENTEL; BERALDO; SAVASTANO JÚNIOR, 2006). Além disso, devido à retirada da água durante a secagem, os íons Ca^{2+} permanecem nas paredes e lúmen das partículas, aumentando a concentração e fazendo com que as partículas se tornem mineralizadas e rígidas (MOHR; NANKO; KURTIS, 2005; CABRAL; NAKANISH; FIORELLI, 2017), associado ainda ao fato do início de degradação das partículas de madeira em função da alcalinidade da matriz de cimento (COUTTS, 2005; CORINALDESI; NARDINOCCHI, 2016; FARRAPO et. al., 2017).

Viroc (2016) e a norma EN 634-2 (2007) determinam os valores de 9,0 MPa para a propriedade de MOR e de 4500 MPa para o MOE classe 1 e de 4000 MPa para o MOE classe 2. O processo Bison (2017), determina o valor mínimo de 9,0 MPa para o MOR e de 3000 MPa para o MOE. Sendo assim, todos os tratamentos atenderam as normas de comercialização quanto a propriedade de MOR antes do envelhecimento acelerado. Após o envelhecimento acelerado apenas os painéis controle e aqueles produzidos com 40% de resíduo de mineração atenderam as normas de comercialização. Para o MOE todos os tratamentos atenderam ao requisito do processo Bison antes do envelhecimento acelerado. Após o envelhecimento acelerado, o tratamento controle e aqueles com 10 e 30% atenderam

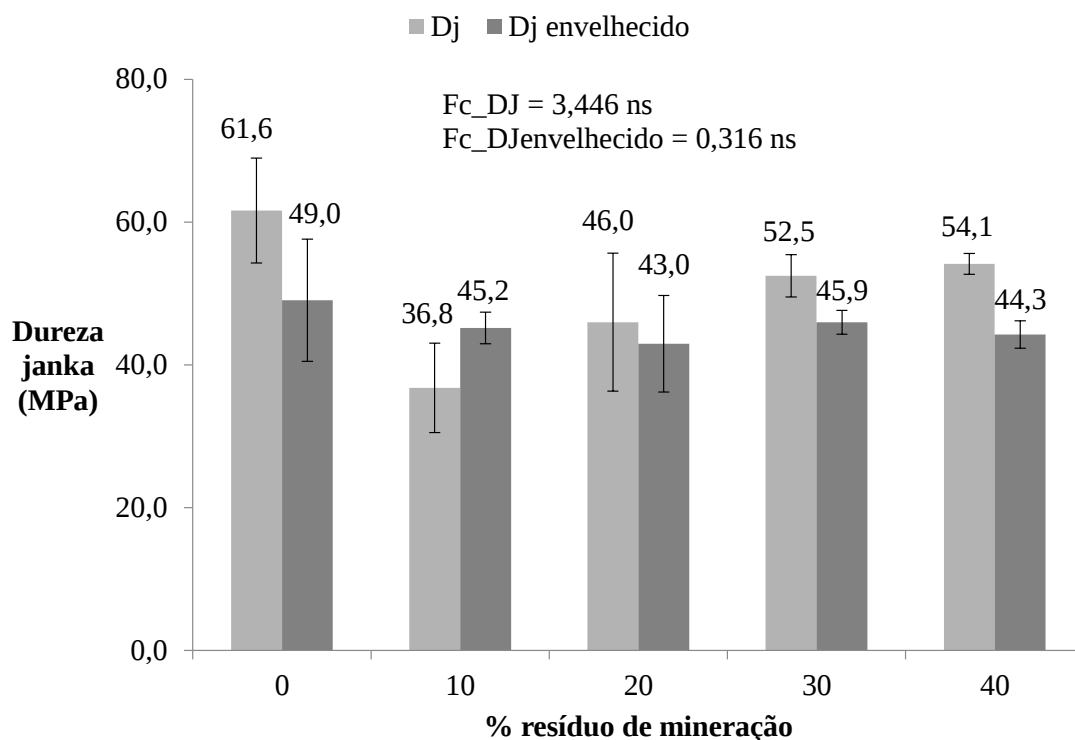
ao requisito, os demais tratamentos ficaram muito próximo do valor estipulado. Quando comparado Viroc (2016) e a norma EN 634-2 (2007), antes do envelhecimento acelerado, o tratamento controle atendeu a classe 1 e o tratamento com 10% de resíduo de mineração atendeu a classe 2, os demais tratamentos não atenderam a norma. Após o envelhecimento, nenhum tratamento atendeu essas duas normas de comercialização.

De forma geral, observa-se que todos os tratamentos utilizados nesse estudo ou atenderam as normas ou ficaram próximas de atender. É importante ressaltar que os painéis comerciais utilizados como comparação apresentam uma maior faixa de densidade, entre 1,3 a 1,4 g/cm³, o que certamente proporciona melhora das propriedades de MOR e MOE (MOSLEMI; PJISTER, 1987; FRYBORT et al., 2008). Sendo assim, para resolver essa situação é indicado um pequeno aumento da densidade dos painéis, possibilitando assim atender a todos os critérios da norma.

4.5.3. Dureza janka

Os resultados das análises estatísticas para a propriedade de dureza janka (Dj) estão apresentados na Figura 26. Não houve efeito significativo da porcentagem de substituição de cimento por rejeito de mineração sobre as propriedades de dureza janka dos painéis cimento-madeira, antes e após o envelhecimento acelerado. Assim como o verificado e discutido para a propriedade de ligação interna, os painéis cimento-madeira com maior quantidade de resíduo apresentaram melhora ou maior manutenção da propriedade após o envelhecimento acelerado. Podendo ser utilizado o resíduo de mineração sem que tenha prejuízo para as propriedades dos painéis.

Figura 26– Dureza janka dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração, antes e após o envelhecimento acelerado.



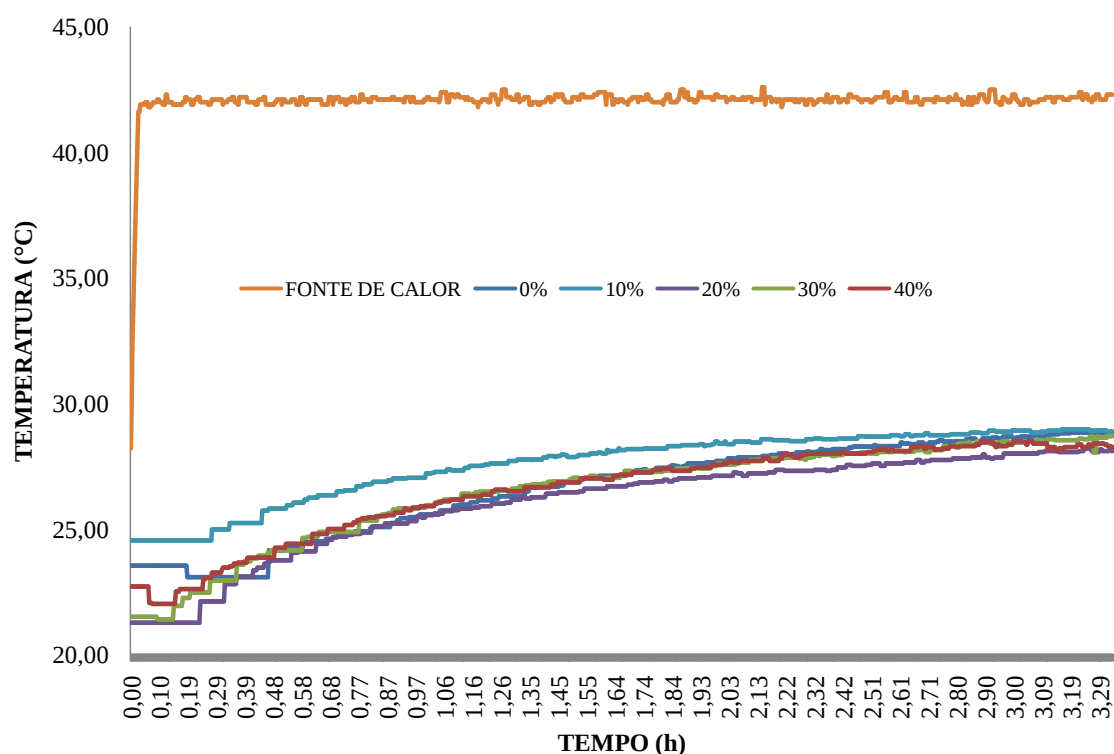
NS – Não Significativo ao nível de 5% de significância.

Fonte: Do autor (2018).

4.6. Transmissão térmica

A Figura 27 apresenta as temperaturas registradas pelos sensores durante o tempo de ensaio de isolamento térmico correspondente aos painéis cimento-madeira com substituição do cimento pelo resíduo de mineração nas porcentagens de 0, 10, 20, 30 e 40%.

Figura 27– Isolamento térmicos dos painéis cimento-madeira produzidos com resíduo de mineração.



Fonte: Do autor (2018).

A Tabela 14 apresenta a condutividade térmica; resistência térmica e transmitância térmica, obtidos para os painéis cimento-madeira produzidos em função da porcentagem de resíduo de mineração.

Tabela 14– Condutividade térmica; resistência térmica e transmitância térmica, obtidas para os painéis cimento-madeira.

TRATAMENTO	ΔT	λ (W/(m.°C))*	RT (m².°C/W)	TT (W/m².°C)
0%	13,68	0,298	0,050	19,896
10%	13,60	0,298	0,050	19,869
20%	14,95	0,271	0,055	18,070
30%	13,90	0,295	0,051	19,667
40%	13,59	0,299	0,050	19,936

ΔT = variação média da temperatura; λ = condutividade térmica; RT= resistência térmica; TT= transmitância térmica.

* NS – Não Significativo ao nível de 5% de significância.

Fonte: Do autor (2018).

Não foi observado efeito significativo da porcentagem de resíduo de mineração em substituição ao cimento para a propriedade de condutividade térmica dos painéis cimento-madeira. Apesar de ser observado aumento da porosidade dos materiais (Figura 12) o que pode estar associado à pequena geometria do resíduo e as diferentes reações e formações dos elementos do cimento (Figura 15), assim como também a própria característica do resíduo adicionado, com elementos de óxidos de ferro e óxidos de alumínio (PARKER et al., 1960; KOBAYASHI; CAN; BAYRAMOGLU, 2003).

De acordo com a Norma EN 12664 (2004) e Bison (2017) a condutividade térmica de painéis cimento-madeira com densidade média de 1,2 a 1,4 g/cm³ deve ser de 0,22 W/m.°C. A condutividade térmica média dos painéis produzidos com resíduo de mineração não atendem as especificações das normas, pois variou na amplitude de 0,271 a 0,299 W/m.°C. Apesar de se mostrar com valores próximos aos exigidos. Sugerem-se modificações nas variáveis de produção tais como densidade e relação madeira cimento, visando à melhoria dessa propriedade.

5. CONCLUSÕES

O resíduo de mineração promoveu inibição da cura do cimento, o que afetou de forma direta as propriedades dos painéis cimento-madeira. Não foi observada interação entre o principal componente do rejeito de mineração (SiO_2) com as fases de hidratação da matriz cimentícia, funcionando como elemento de preenchimento de espaços vazios, e contribuindo para a melhoria das propriedades físicas do compósito.

A utilização do resíduo de mineração não promoveu alterações das propriedades de ligação interna, dureza janka e de condutividade térmica dos painéis. As propriedades de flexão apresentaram redução significativa com a substituição do cimento pelo rejeito de mineração, estando associado a movimentação dimensional das partículas e interação partícula-matriz devido a inibição inicial das reações. Apesar disso, todos os tratamentos avaliados atenderam aos requisitos da norma Bison para o MOR e MOE à flexão estática e ligação interna, mesmo após a realização do envelhecimento acelerado.

Sendo assim, é viável tecnicamente a utilização de 40% de resíduo de mineração para produção de painéis cimento-madeira em escala industrial. Fato que pode permitir uma agregação de valores e a destinação adequada do resíduo de mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABO-EL-ENEIN A. S.; EL-KADY G.; EL-SOKKARY T. M.; GHARIEB M. Physico-mechanical properties of composite cement pastes containing silica fume and fly ash. **HBRC Journal**. v. 11, p. 7–15, 2015.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JUNIOR, H. Uso de materiais alternativos à base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira. In: seminário iberoamericano de materiales fibrorreforzados, 1.; REUNIÓN PROYECTO PIP, 8., Cali. **Anais...** Cali: Universidad del Valle, 1997. p. 23-40

ALMEIDA, A. E. F. S. et al. Improved durability of vegetable *fiber* in forced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 42, n. 2, p. 49-58, Sept. 2013.

ANJOS, M. A. S. dos; GHAVAMI, K.; BARBOSA, N. P. Compósitos à base de cimento reforçados com polpa celulósica de bambu. Parte I: Determinação do teor de reforço ótimo. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiente**, v. 7, n. 2, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. Standard Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete: ASTM **ASTM C948 – 81**. West Conshohocken, PA, 1981.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM D 570-95**: Standard test method for water absorption. Philadelphia, 1995. 4p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM D 167**: Standard Test Method for Apparent and True Specific Gravity and Porosity of Lump Coke. Philadelphia, 2005. 3p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual book of **ASTM: D-1037** - Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles. Materials Philadelphia, 2012.

ARISTIMUNHO, P.B.; BERTOCINI, S.R. Application of iron ore mud in powder form in portland cement presence. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.** V.5 n.2, 153-165, 2012.

ARRUDA FILHO, N.; DANTAS, C.P.; LEAL, A.F.; BARBOSA, N.P.; SILVA, C.G.; ALEXANDRE, M.V. Resistência mecânica de compósitos cimentícios leves utilizando

resíduos industriais e fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 894-902, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland- Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 8 p. dez, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 6 p. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**: papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C. Rio de Janeiro, 4 p. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: madeira - determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 3 p. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**: pasta celulósica e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 6 p. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 4 p. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: materiais pozolânicos- Requisitos. Rio de Janeiro, 6 p. julho, 2014.

AZZINI, A.; SALGADO, A.L.B.; TEIXEIRA, J.P.F. Curva de Maturação da *Crotalaria juncea* L. em função da densidade do caule. **Bragantia**, v. 40, n. 1, p. 1-10, 1981.

BERTOLINI, M. S. **Painéis de resíduos madeireiros e de borracha de pneu associados à espuma poliuretana à base de mamona para a aplicação como composições termoacústicas**. 2014. 256 p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

BISON WOOD-CEMENT BOARD. Technical hand book. **Bison Report**. Berlin, p. 1- 36. 2017.

BORGES, M. L.; QUIRINO, W.F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. **Revista Biomassa e Energia**. Viçosa, v. 1, n. 2, p. 71-73, 2004.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: J. Wiley, 689 p. 1963.

CABRAL, M. R.; NAKANISHI, E. Y.; FIORELLI, J. Evaluation of effect of accelerated carbonation in cement- bagasse panels after cycles of wetting and drying. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 29, Issue 6. June, 2017.

CARVALHO, S. T. M. **Propriedades térmicas do painel aglomerado de bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.)**. 2012. 73 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2012.

CASTRO, A. L. de; LIBORIO, J.B.L. ; PONDOLFELLI, V. C. The influence of cement type on the performance of advanced concretes designed by computing mix proportion technique. **Cerâmica**. v. 57, p. 10- 21, 2011.

CÉSAR, A. A. da S.; MENDES, L. M.; BUFALINO, L.; PROTÁSIO, T. de P.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; MORI, F. A.; MESQUITA, R. G. de A. Análise da qualidade do encolamento de partículas de painéis OSB em condições de laboratório. **Cerne**. v. 20, n. 4, p. 501- 508, 2014.

COATES, G. R. Product application of wood-cement particleboards including applied finishes. In: international inorganic-bonded wood and fiber composite materials conference, Washington. **Proceedings...** Madison: Forest Products Society. v. 1, p. 189-192, 1994.

CORINALDESI, V. NARDINOCCHI, A. A influence of type of fibers on the properties of high performance cement-based composites. **Construction and Building Materials**. v. 107, p. 321-331, 2016.

COSTA C.A. S., HEBLING J., RANDALL R., Human pulp response to resin cements used to bond inlay restorations. **Dental Materials**. v. 22, p. 954–962, 2006.

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.

CHABANNES, M.; BENEZET, J. C. CLERC, L. Use of raw rice husk as natural aggregate in a lightweight insulating concrete: An innovative application. **Construction and Building**, Volume 70, 15 November, pp. 428-438. 2014.

CHITTENDEN, A. E.; HAWKES A. J.; HAMILTON, H. R. Wood cement Systems. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. New Delhi, 20p. 1975.

Di BARTOLOMEO, R.; SILVA., E. P. da; FONSECA, C.C.. Sustentabilidade na organização contemporânea brasileira: uma análise literária sob o planejamento estratégico. **Revista Científica Hermes**. Instituto Paulista de Ensino e Pesquisa Brasil, Brasil. n. 11, pp. 169-189, junio-diciembre, 2014.

DNPM – **Departamento Nacional de Produção Mineral**. Sumário Mineral. v. 34. Brasília, Brasil. 2014. Acesso: 15 de julho de 2017. Disponível em :<<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2014>>.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico**. 363 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2000.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARD. **EN 494**: fibre-cement profiled sheets and fittings for roofing – products specification and test methods. London: British Standards Institution, 5p. 1994.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARD. **EN 12664**: Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Dry and moist products of medium and low thermal resistance. 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 323**: particleboard specifications. Bruxelas, 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 634-2**: particleboard specifications. Bruxelas, 2007. 22 p.

FAN M.; NDIKONTAR M. K.; ZHOU X.; NGAMVENG, J.N. Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. **Construction and Building Materials**. v. 36, p. 135–140, 2012.

FARIAS, C. E. G.; COELHO, J.M. **Mineração e Meio Ambiente no Brasil**. Relatório para CGEE- PNUD 2002/001604. Outubro, 2002.

FARRAPO, C. L. et al. Cellulose Associate with Pet Bottle Waste in Cement Based Composites. **Material Research**. v. 20, n. 5, p. 1380-1387, july, 2017.
FERREIRA, S. R. et al. Effect of sisal fiber hornification on the adhesion with Portland cement matrices. **Matéria (Rio de Janeiro)**. v. 17, n. 2, p. 1024-1034, 2012.

FONSECA, F. O.; LIMA, A. M.; MACEDO, A. N.; TEIXEIRA, M. M. Compósito cimento-madeira com resíduos provenientes da indústria madeireira da região amazônica. In: encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira, 8., 2002, Uberlândia, MG. **Anais**. Uberlândia: UFU, 2002.

FRANCO, L.C.; SANTOS, D.H.; ROSA, P.P.G.; SILVA, G.J.B.; PEIXOTO, R.F. **Aplicação de rejeito de mineração como agregado para a produção de concreto**. Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2014 – 56CBC, pp. 1-15, 2014.

FREIRE, C. B. Utilização de resíduos da exploração do itabirito em pavimentos intertravados. **REDEMAT**. 2012.

FRYBORT, S.; MAURITZ, R.; TEISCHINGER, A.; MULLER, U. Cement bonded composites – a mechanical review. **Bioresources**. v. 3, ed. 2, p. 602- 626, 2008.

GARCIA J. R.; DE OLIVEIRA I. R. ; PANDOLFELLI V.C. hidration process and the mechanisms of retarding and accelerating the setting time of calcium aluminate cement. **Cerâmica**. v. 53, p. 42- 56, 2007.

GOVIN A.; PESCHARD, A.; GUYONNET R. Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood. **Cement & Concrete Composites**. v. 28, p. 12–20, 2006.

HEIKAL A. M.; ABD EL ALEEM B. S.; MORSI, M. W. Characteristics of blended cements containing nano-silica. **HBRC Journal**. v. 9, p. 243–255, 2013.

HOFSTRAND, A. D.; MOLESMI, A. A.; GARCIA, J. F. Curing characteristics of particles from nine northern Rocky Mountain species mixed with Portland cement. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 2, p. 57-61, Feb. 1984.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMY (IAWA). List of microscopic features for wood identification. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 10, n. 3, 226p. 1989.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS- IPT. **Madeira: o que é e como pode ser processada e utilizada**. São Paulo, 1985.189 p. (Boletim ABPM, 36).

IWAKIRI, R., CUNHA, A. B.da, ALBUQUERQUE, C. E. C., GORNIK, E., MENDES, L. M. Resíduos de serrarias na produção de painéis de madeira aglomerada de eucalipto, **Revista Cerne**, Lavras v.1 n. 1 2000.

IWAKIRI, S. et al. Produção de painéis aglomerados de alta densificação com uso de resina melanina-ureia-formaldeído. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 4, p. 323-328, out./dez. 2005.

IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Utilização da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* na produção de painéis de cimento-madeira. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 68-74, jan./mar. 2008.

IWAKIRI, S. et al. **Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* “Paricá” e *Cecropia hololeuca* “Embaúba” para produção de painéis cimento-madeira.** 2012.

JACOBI, P. **Lama da samarco: somente um desastre ou uma oportunidade econômica**, 2015. Acesso: 28 de fevereiro, 2017. LINK
<[HTTP://WWW.GEOLOGO.COM.BR/MAINLINK.ASP?VAIPARA=SAMARCO%20DE SASTRE%20OU%20UMA%20OPORTUNIDADE%20ECON%C3%B4MICA](http://www.geologo.com.br/mainlink.asp?vaipara=samarco%20de%20sastre%20ou%20uma%20oportunidade%20econ%C3%B4mica)>.

JORGE F. C.; PEREIRA C.; FERREIRA J. M. F. Wood-cement composites: a review. **Holz Roh Werkst.** v. 62, p. 370–377, 2004.

KENNEDY, F.; PHILLIPS, G. O.; WILLIAMS, E. P. A. Wood and cellulose: industrial utilization, biotechnology, structure and properties, ellishor wood. **Chichester: E. Horwood**, 1130 p. 1987.

KOBYA, M.; CAN, O. T.; BAYRAMOGLU, M. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. **Journal of Hazardous Materials.** p. 163–178. Gebze, Turkey. 2003.

KRÜGER, E. L. et al. Thermal analysis of wood-cement panels: heat flux and indoor temperature measurements in test cells. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 23, n. 6, p. 2299-2305, June 2009.

LATORRACA, J.V.F. **Estudo da viabilidade do uso da espécie *Eucalyptus dunnii* na manufatura de painéis de madeira-cimento.** 94 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

LATORRACA, J. V. F. ***Eucalyptus spp.* Na produção de painéis de cimento-madeira.** 2000. 191f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

LATORRACA, J. V. F.; IWAKIRI, S. Efeito da cura a vapor sobre as propriedades mecânicas de painéis de cimento-madeira. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 84-93, jan./dez. 2001.

LOPES, Y. L. V. **Utilização da madeira e cascas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na produção de painéis cimento-madeira**. 2004. 60f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

MAGALHÃES, A. C. T. V.; ALMEIDA, J. G. O uso da mucilagem de cacto em pastas de gesso: efeitos na absorção de água e na resistência à flexão estática. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 139-151, jan./mar. 2010.

MAPA, P. S. - **Rota de processo para o underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrador da Samarco Mineração S.A.** Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas, 172 p. 2006.

MAROUN C. A. Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos: Guia de Procedimento passo a passo. 2. ed. Rio de Janeiro: **Gma**, 2006.

MATOSKI, A. **Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira**. 202 f. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)–Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2005.

MATOSKI, A.; IWAKIRI, S. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de painéis de cimento-madeira utilizando farinha de madeira com granulometria controlada. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 2, p. 149-158, maio/ago. 2007.

MATOSKI, A. et al. Influence of accelerating admixtures in wood-cement panels: characteristics and properties. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 35, n. 4, p. 655-660, Oct./Dec. 2013.

MATSUMURA, M. S. **Avaliação e estudo das emissões de metais pesados pela Barragem de Santarém (Samarco Mineração S. A.) no sistema hídrico da Região de Ouro Preto e Mariana**. 113 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1999.

MELO, R.R.; SILVESTRE, R.; OLIVEIRA, T. M.; PEDROSA, T. D. Variação radial e longitudinal da densidade básica da madeira de *Pinus elliotti* engelm, com diferentes idades. **Ciência da madeira (Braz. J. Wood. Sci.)**. Pelotas, v. 4, n. 01, p. 83- 92, maio, 2013.

MENDES, R. F.; VILELA, A. P.; FARRAPO, C. L.; MENDES, J. F.; D. TONOLI, G. H.; MENDES, L. M. Lignocellulosic residues in cement-bonded panels. **Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites**. 1ed.: Elsevier, 2017, v. 1, p. 3-16.

MOHR, B. J.; NANKO, H.; KURTIS, K. E. Durability of kraft pulp fiber–cement composites to wet/dry cycling. *Cement & Concrete Composites* 27, 2005, pp. 435–448.

MORAES, S.A.L.; NASCIMENTO, E.A.; MELO, D.C. Análise da madeira de *Pinus oocarpa* parte I – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Rev. Árvore**, Viçosa -MG. 2005. p. 461-470.

MOSLEMI A. A.; GARCIA, J.F.; HOFSTRAND, A.D. Effect of various treatments and additives on wood-Portland cement water systems. **Wood and Fiber science**, v. 15, n.2, p. 164-176, USA; 1983.

MOSLEMI, A.A.; PFISTER, S. The influence of cement/ wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood- cement composite panels. **Wood and Fiber Science**. v. 19, ed. 2, pp. 165- 175, 1987.

MUÑIZ, G. I. B.; CORADIN, V. R. Normas de procedimentos em estudo de anatomia da madeira: I-Angiospermae, II-Gimnospermae. **Brasília: Laboratório de Produtos Florestais, Série Técnica**, v. 15, 1991.

NASSER, R. A.; AL-MEFARREJ, H. A. Evaluation of using midribs of date palm fronds as a raw material for wood-cement composite panels industry in Saudi Arabia. **Agricultural Engineering Research Journal**, v.1, p.43-50, 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2.ed. São Paulo: Pini, 1997.

NOCITI, D. M. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas**. 2011. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2011.

NOOR, A.R. A.; RAZALI, A.K.; IZBAN, K.; RAHIM, S.; ABDUL, A.M. Hydration performance of cement-bonded wood composites: compatibility assessment of six pioneer forest species. **Borneo Science**. v. 25, September, 2009.

NORMEN FÜR HOLZFASERPLATEN SPANPLATTEN SPERRHOLZ. **DIN 52362**. Testing of wood chipboards bending test, determination of bending strength. Berlin, p. 39-40. 1982.

ONUAGULUCHI, O.; BANTHIA, N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. **Cement and Concrete Composites**. v. 68, p. 96-108, april, 2016.

OKINO, E.Y.A.; SOUZA, M.R.; SANTANA, M.A.E; ALVES, M.V.; SOUZA, M.E.; TEIXEIRA, D.E. Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 6, p. 729-734, 2004.

PARKER, W. J.; JENKINS, R. J.; BUTLER, C. P.; ABBOTT, G. L. Flash method of detennining thennal diffusivity, heat capacity, and thennal conductivity. **Journal of applied physics**. v. 32. n. 9 september. California, september, 1960.

PIMENTEL, L.L.; BERALDO, A. L.; SAVASTANO JUNIOR, H. Durability of cellulose-cement composites modified by polymer. **Eng. Agrícola**. v. 26, n. 2. Jaboticabal, may/aug. 2006.

PIRES, J. M. M.; LENA, J. C.; MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S. Potencial poluidor de resíduo sólido da Samarco Mineração: estudo de caso da barragem de Germano. **Rev. Árvore**, vol.27 n.3, p. 393-397, 2003.

PNRS - **PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**. Ministério do Meio Ambiente. Versão pós Audiências e Consulta Pública para Conselhos Nacionais Brasília, fevereiro de 2012.

QUARESMA, L.F. **Balanco Mineral Brasileiro 2001: Minério de Ferro**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral. 2001. Acesso em: 07 de julho de 2017. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-ferro>>.

ROSSIGNOLO J. A. Avaliação da Porosidade e do Teor de CH de Pastas de Cimento Portland com Sílica Ativa e Látex SBR. **Revista Matéria**, v. 10, n. 3, pp. 437 – 442, 2005.

SANTOS, R. C. et al. Utilização de resíduos da madeira de candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) Macleish) na produção de painéis aglomerados com adição de PET. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 149-158, jan./mar. 2011.

SAVASTANO JR., H.; AGOPYAN, V. Transition zone studies of vegetable fibre cement paste composites. **Cement & Concrete Composites**, v. 21, n. 1, p. 49-57, 1999.

SAVASTANO JUNIOR, H.. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal:** reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo. 144p. Tese (Concurso de livre - docência) – Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SILVA, A. N. da; VIDAURRE G. B.; ROCHA J. das D. de S.; LATORRACA, J. V. de F. Biomassa vegetal para uso em chapas de cimento-madeira. **Revista Universidade Rural**. v.22, n2, (Suplemento), p. 199-20, 2002.

SILVA, G. A. et al. Efeito de algumas variáveis de processamento nas propriedades físicas de painéis de madeira de partículas alongadas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 1, p. 51-60, 2006.

SILVA, F. L.; ARAÚJO, F. G. S. ; CASTRO, C. G. ; MENDES, J. J. ; VON KRÜGER, F. L. . Recycling of Concentration Tailings of Iron Ore for the Production of Concrete Block (Pavers). **Materials Science Forum**. v. 775-776, p. 631-634, 2014.

SILVEIRA, M. D. **Utilização de resíduos de mineração na construção civil**. Universidade Federal de Minas Gerais- Departamento de Engenharia de Materiais e Construção/ Curso de especialização em Construção Civil. Belo Horizonte, janeiro, 2015.

SAWSEN, C. et al. Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of cement composite. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 79, p. 229-235, Mar. 2015.

SIMATUPANG, M. H.; SCHWARZ, G. H.; BROKER, F. W. Small scale plants for the manufacture of mineral-bonded wood composites. In: EIGHT WORLD FORESTRY CONGRESS, 1978, Indonésia. **Special paper**. Indonésia: [s.n.], 1978.

STRECKER K.; SILVA C. A.; PANZERA T. H. Fabrication and characterization of cement based composite materials with styrofoam inclusions. **Cerâmica**. v. 60, p. 310-315, 2014.

TEODORO, R.; RAABE, J.; SILVA, D. W.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; DENZIN TONOLI, G. H. Functionally graded MDP panels using bamboo particles. **Key Engineering Materials**, v. 668, p. 39-47, 2015

TOMAZELA, J. M. **Samarco passou a acumular mais rejeitos em 2014 nas barragens rompidas**. 2015. Acesso: 20 de julho, 2017. Disponível em:

<http://www.estadao.com.br/noticias/geral,samarco-passou-a-acumular-mais-rejeitos-em-2014-nas-barragens-rompidas,1792688>.

VALÉRIO, A.F.; WATZLAWICK, L.F.; SANTOS, R.T.; SILVESTRE, R.; KOEHLER, H.S. Determinação da densidade básica da madeira de peroba (*Aspidosperma polineuron* Muell. Arg.) ao longo do fuste. **Caatinga**, v.21, n.3, p 54-58, 2008.

VILELA, A. P. **Utilização da borracha de pneu para produção de painéis MDP e cimento-madeira**. Lavras: UFLA, 104 p., 2016.

VIROC. **Características Viroc**. 2016. Lisboa. Disponível em: <http://www.viroc.pt/ResourcesUser/Nova_Gama_Viroc/Viroc_Fichas_de_Produto_PT_EN_FR.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2018.

WEBER, C. **Estudo sobre viabilidade de uso de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados**. Paraná: UFPR. 2011.

TRIANOSKI, R. Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada. 260 f. **Universidade Federal do Paraná**. Curitiba, 2010.

WEI, Y. M.; BUNICHIRO, T. Effects of five additive materials on mechanical and dimensional properties of wood cement-bonded boards. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 47, n. 6, p. 437-444, Dec. 2001.

ZHOW, D. A. Study of oriented structural board made from hybrid poplar. Physical and mechanical properties of OSB. **Holz Als Roh Und Werkstoff**, Berlin, v. 48, n. 7/8, p. 293-296, Aug. 1990.