



LAÉRCIO MESQUITA JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE COMPÓSITOS À
BASE DE GESSO COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE PNEU E
PARTÍCULAS DE MADEIRA DE *Eucalyptus grandis***

**LAVRAS - MG
2018**

LAÉRCIO MESQUITA JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE COMPÓSITOS À BASE DE GESSO COM
ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE PNEU E PARTÍCULAS DE MADEIRA DE *Eucalyptus
grandis***

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.

Orientador
Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo
Coorientador
Prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira

**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).**

Júnior, Laércio Mesquita.

Desenvolvimento e análise de compósitos à base de gesso com
adição de resíduos de pneu e partículas de madeira de *Eucalyptus
grandis* / Laércio Mesquita Júnior. - 2018.

76 p.

Orientador(a): Giovanni Francisco Rabelo.

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

Bibliografia.

1. Compósitos de gesso. 2. Gesso-madeira. 3. Resíduos de
pneu. I. Rabelo, Giovanni Francisco. . II. Título.

LAÉRCIO MESQUITA JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE COMPÓSITOS À BASE DE GESSO COM
ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE PNEU E PARTÍCULAS DE MADEIRA DE *Eucalyptus
grandis***

**DEVELOPMENT AND EVALUATION OF COMPOSITES OF GYPSUM MATRIX
WITH ADDED WOOD TIRE AND WOOD PARTICLES OF *Eucalyptus grandis***

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 13 de março de 2018.

Profa. Dra. Luciana Barbosa de Abreu UFLA

Prof. Dr. David Cardoso Dourado UNIFESSPA

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo
Orientador
Prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira
Coorientador

**LAVRAS - MG
2018**

*Aos meus pais,
Laércio Mesquita e Maria Aparecida de Oliveira Mesquita,
pelo amor, confiança, ensinamentos e dedicação.
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por todo incentivo e atenção.

A toda minha família: Paulo César, Lucas, Ana Paula, Francesca, Janaína, Neto, Mariana, Maria Paula, João Pedro, Laura, Rafael e Felipe, pelo incentivo nos momentos difíceis.

Ao professor Dr. Giovanni Francisco Rabelo, pela orientação, confiança, paciência e amizade.

Ao coorientador, Dr. Saulo Rocha Ferreira, pelas colaborações, sugestões, apoio, paciência e amizade.

À professora, Dra. Luciana Barbosa de Abreu, pela disposição, incentivo e colaborações.

Ao professor, Dr. José Benedito Guimaraes Júnior, pela amizade, colaborações e ajuda nos trabalhos.

À minha namorada Bruna, pela compreensão, paciência e ajuda nas correções.

Ao Tony, Douglas, Luciana, Grazielle, a todos os membros do Núcleo de Estudos em Painéis de Madeira e aos demais amigos da pós-graduação e da graduação da UFLA, pela ajuda nos trabalhos desenvolvidos, momentos de descontração, paciência e companheirismo.

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

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutura da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Ao Centro Universitário de Lavras, por ceder o Laboratório Multidisciplinar de Materiais de Construção para complementação dos estudos desenvolvidos neste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, pela oportunidade de cursar o mestrado e à Capes, pela concessão da bolsa, o que tornou possível a realização deste trabalho.

*“A diferença entre o possível e o impossível
está na vontade humana”.*
(Louis Paster).

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar a influência da adição de partículas de pneu e partículas de *Eucalyptus grandis* nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Os compósitos com resíduos de pneu foram produzidos com adição de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de borracha moída e 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de cinzas que são coletadas, após a queima das partículas de borracha, para a produção de energia. Eles foram separados em dois grupos, cinzas, coletadas após a queimação e cinzas peneiradas que foram moídas e peneiradas. As partículas de *Eucalyptus grandis* foram utilizadas para produzir painéis de gesso-madeira e cimento-madeira, a fim de se comparar suas propriedades. Em relação aos compósitos com resíduos de pneu, as amostras com 10% de cinzas que não foram peneiradas apresentaram menor condutividade térmica. Os testes de flexão e compressão foram realizados de acordo com EN 13279-2, 2006. Todos os compósitos apresentaram menor comportamento mecânico em relação à referência. Os valores de compressão e flexão obtidos, a partir de compósitos de gesso de pneus, atingiram os valores mínimos estabelecidos pela norma EN 13279-1, 2008. Os tratamentos com 2,5% e 5% de borracha moída apresentaram os melhores valores de resistência à tração, menor densidade do que a referência e, também, menor módulo de elasticidade. Em relação aos painéis, os resultados indicaram que não apresentaram diferenças estatísticas significativas na densidade, em absorção de água e inchamento em espessura, ambos após 2h e 24h de imersão em água, módulo de elasticidade para flexão e compressão paralela. Os painéis de cimento-madeira obtiveram maiores valores em retenção de umidade, módulo de ruptura para ensaio de flexão estática e ligação interna.

Palavras-chave: Compósitos de gesso. Gesso-madeira. Resíduos de pneu.

ABSTRACT

The objective in this study was to evaluate the influence of the tire particles addition and *Eucalyptus grandis* particles on physical, mechanical and thermal properties. The composites with waste tires were produced with the addition of 0%, 5%, 10%, 15% and 20% of ground rubber and 0%, 2.5%, 5%, 7.5% and 10% of ash that are collected after rubber particles burning for energy production. They were separated in two groups, ash, collected after burning and sifted ashes that were crushed and sieved. *Eucalyptus grandis* particles were used to product gypsum-wood and cement-wood panels, in order to compare their properties. Regarding to composites with waste tires, the samples with 10% of ashes that were not sifted have a lower thermal conductivity. The flexural and compression tests were performed according to EN 13279-2, 2006. All the composites showed lower mechanical behavior in relation to the reference. The compression and flexural values obtained from tire gypsum composite reached the minimum values established by standard EN 13279-1, 2008. The treatments with 2.5% and 5% of ground rubber presented the best values of tensile strength, lower density than reference and also lower modulus of elasticity. In relation to the panels, the results indicated that there are no significant statistical differences in density, water absorption and swelling in thickness, both after 2h and 24h of water immersion, elasticity modulus for flexion and parallel compression. The cement-wood panels obtained higher values in moisture retention, modulus of rupture for static bending test and internal bonding.

Keywords: Gypsum composites. Gypsum-wood. Waste tires.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção nacional de pneumáticos em milhões de unidades.....	18
Figura 2 - Incêndio em depósito de pneus em Lavras-MG.....	19
Figura 3 - Esquema de ensaio de tração indireta por compressão diametral.	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição dos materiais utilizados nos pneus de passeio e carga.	18
---	----

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	12
1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	Objetivos gerais	14
2.2	Objetivos específicos.....	14
3	JUSTIFICATIVA.....	15
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
4.1	Resíduos Sólidos	16
4.2	Resíduos de Pneu.....	17
4.3	Resíduos de Madeira	19
4.4	Materiais compósitos	20
4.4.1	Ensaio de tração indireta.....	22
4.4.2	Conforto térmico	23
4.4.3	Estudos de compósitos de matriz de gesso	24
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	26
	REFERÊNCIAS	27
	SEGUNDA PARTE - ARTIGOS	32
	ARTIGO 1 - Compósitos à base de cimento e gesso reforçados com partículas de madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	32
	ARTIGO 2 - Experimental investigation of thermal conductivity and mechanical behavior of gypsum plaster composites reinforced with tire waste particles.....	45
	ARTIGO 3 - Study of tensile strength of gypsum composites with addition of wastes tire	60

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos está ganhando importância significativa pela elevada quantidade de subprodutos gerada durante o processo industrial. A eliminação desses subprodutos é, muitas vezes, realizada de forma inadequada, pois os aterros sanitários, ainda comumente utilizados, não resolvem totalmente o problema, uma vez que podem contribuir significativamente para o aumento da poluição ambiental (SIDDIQUE, 2014).

Entretanto, visando aliar a questão ambiental ao processo de produção, têm-se buscado possibilidades que permitam agregar valor aos resíduos industriais gerados. Neste sentido, a produção de materiais de construção, mediante a reutilização de rejeitos, surge como uma alternativa (ARULRAJAH et al., 2014; MUTUK; MESCI, 2014).

Apesar do crescente volume de resíduos ter impulsionado a busca por novas alternativas de produtos, visando à aplicação de compósitos para a construção civil e, apesar do grande potencial de aproveitamento, sua utilização em escala comercial é bastante reduzida (CASSILHA; CASAGRANDE JUNIOR; SILVA, 2011).

Na atualidade, um dos graves problemas ambientais são os pneus inservíveis, pois pelo rápido desenvolvimento e crescimento da indústria automobilística são gerados anualmente milhões de toneladas de resíduos de pneu (PRESTI, 2013; SHU; HUANG, 2014; ZHU et al., 2015). A geração e acumulação de resíduos de pneus são um dos problemas ambientais mais sérios no âmbito mundial. Seu armazenamento e a sua eliminação tornaram-se uma preocupação urgente do ponto de vista ambiental, pois todos os anos milhares de pneus usados são descartados e incorretamente destinados em muitos países (AOUDIA et al., 2017)

Por outro lado, ainda tem-se como grande contribuinte, para degradação ambiental, a geração de energia. Nos setores residencial e comercial, o sistema de ar condicionado leva a maior parcela do consumo total de energia para atender a necessidade de conforto térmico. Ao abordar o problema, o isolamento térmico é um sistema eficiente para utilizar a energia fornecendo o conforto térmico desejado pelas suas características sustentáveis (ADITYAA et al., 2017).

Como contribuinte para degradação ambiental, também, temos a indústria de beneficiamento de madeira que gera uma grande quantidade de lixo, especialmente, nas indústrias de processamento primário. Como os locais de moagem são, muitas vezes, localizados longe dos principais centros de consumo e por falta de regulação e controle, em

muitos países, os resíduos são geralmente inadequadamente descartados (GARCEZ et al., 2017).

Diante do exposto, é imprescindível que se busque a utilização de tecnologias alternativas, que priorizem a racionalização do emprego de materiais e a sustentabilidade como forma de exploração (BERNHOEFT; GUSMÃO; TAVARES, 2011). Um dos materiais com maior crescimento de seu uso na construção civil é o gesso, pois é barato e resistente, de fácil fabricação e possui muitos benefícios para ambiência, uma vez que é um bom regulador térmico (MEDINA; BARBERO-BARRERA, 2017).

Este trabalho visou avaliar a utilização de resíduos de pneus em compósitos de gesso como matéria-prima para construção civil, objetivando melhor conforto térmico e atendimento das exigências físicas e mecânicas exigidas pela norma, além de analisar a possibilidade da utilização do gesso como aglutinante em placas de cimento/madeira.

O presente trabalho foi estruturado na forma de artigo, em que se encontrarão os detalhes da metodologia e também das revisões bibliográficas pertinentes. Entretanto se faz necessária uma revisão geral sobre os aspectos referentes aos resíduos que foram utilizados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

O objetivo principal desta pesquisa experimental é o desenvolvimento e caracterização de compósitos à base de gesso com resíduos de pneus (borracha triturada, cinza e cinza peneirada) e partículas de *Eucalyptus grandis*.

2.2 Objetivos específicos

1. Avaliar a influência do beneficiamento da cinza do resíduo de pneu sobre as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos à base de gesso.
2. Estudar a influência do tipo de resíduo (forma, dimensão e tratamento) nas propriedades físico-mecânicas e térmicas, em compósitos à base de gesso.
3. Investigar, física e mecanicamente compósitos de gesso-madeira e cimento-madeira, utilizando partículas de *Eucalyptus grandis*, a fim de se analisar a possível substituição do cimento pelo gesso como aglutinante e a redução do tempo de cura.

3 JUSTIFICATIVA

Pesquisas relacionadas à utilização de materiais de construção, produzidos com diferentes tipos e composições, aplicados à construção civil, têm sido desenvolvidas empregando resíduos industriais. Entretanto poucos estudos foram realizados com resíduos de pneu em compósitos de gesso.

Tendo em vista as necessidades da construção civil e a busca por técnicas e materiais mais sustentáveis, este trabalho buscou a inserção de resíduos em compósitos à base de gesso, um material da construção civil que vem sendo empregado de forma crescente. Este estudo visa atender o mercado de construção civil, em geral, o qual poderá estar interessado em fazer modificações nos resíduos adicionados, para confeccionar compósitos à base de gesso, visando à otimização de recursos energéticos, associados às melhores propriedades térmicas, densidade e tempo de cura.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Resíduos Sólidos

Produzidos em todos os estágios das atividades humanas, os resíduos variam em função das práticas de consumo e dos métodos de produção tanto em termos de composição como de volume (NOGUEIRA; LORA, 2002).

Resíduos nos estados sólido e semissólido resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2004).

Em todo o planeta, a quantidade crescente de resíduos agrícolas e industriais aumenta as preocupações, em relação à poluição ambiental, por ameaça de intoxicação aos seres humanos e animais, bem como a contaminação de plantas (BAHRAMI et al., 2016).

Referindo-se à atividade industrial, podemos destacar que os impactos ambientais ocorrem em várias etapas. Primeiro, no ciclo produtivo, em que os recursos naturais são transformados em matérias-primas e energia, temos a geração de impactos na forma de desmatamento, emissões de gases poluentes decorrentes da extração do recurso utilizado, erosão de solos, entre outros. Segunda etapa, quando as matérias-primas e energia são utilizadas como insumos na produção, o que resultará no produto final e emissão de rejeitos industriais como fumaça, resíduos sólidos e líquidos. Mesmo após o processo produtivo, deve-se considerar que, após o consumo do produto, é descartado e torna-se resíduo (LUSTOSA; CANEPA; YOUNG, 2010).

A indústria automobilística é um exemplo clássico de como ocorrem essas etapas, pois, no ciclo produtivo, não é uma das mais poluidoras, mas como um todo é um dos setores com maior potencial de poluição, já que o processo de degradação ambiental não se encerra com o fim do processo produtivo. Veículos automotores são um dos grandes geradores da poluição do ar em razão da queima de combustíveis, de carcaças de veículos inutilizados e produzem uma imensa quantidade de pneus inservíveis, o que gera um dos grandes problemas ambientais da atualidade (BARCELLOS; OLIVEIRA; CARVALHO, 2009).

O Brasil é um dos maiores produtores de veículos do mundo, segundo Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores – ANFAVEA (2017), a produção nacional foi de 2.699.167 unidades. Esses dados tornam o país um grande gerador de resíduos nesses segmentos (ORTH; BALDIN; ZANOTELLI, 2014).

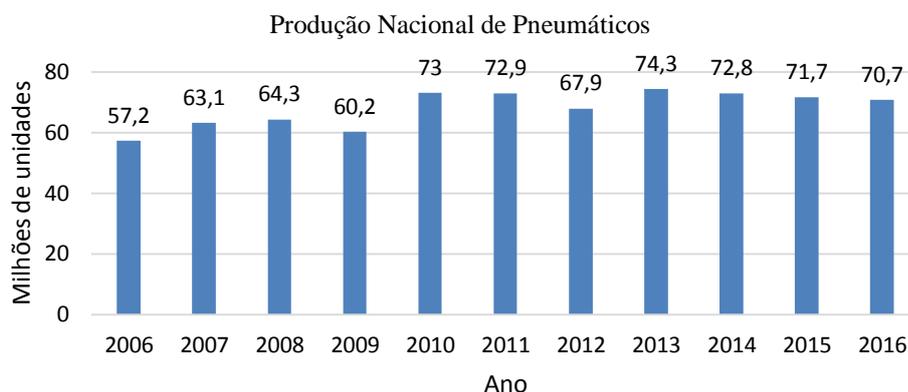
Outra atividade industrial que também é responsável por gerar grandes quantidades de resíduos no Brasil é a indústria madeireira. Adicionalmente, a utilização da madeira, no meio urbano, por meio da construção civil, descarte de embalagens e poda da arborização urbana, acaba gerando um volume expressivo de resíduos de madeira dos pequenos aos grandes centros urbanos do país. Tal fato é um problema, à medida que apenas uma parcela do volume de resíduos de madeira gerados tem atualmente algum aproveitamento econômico, social e/ou ambiental (WIECHETECK, 2009).

4.2 Resíduos de Pneu

Componente imprescindível ao funcionamento dos veículos, o pneu passou por muitas etapas desde sua origem, no século XIX, até atingir a tecnologia atual. Muitos experimentos iniciados pelo americano Charles Goodyear, por volta de 1830, confirmaram acidentalmente que a borracha cozida a altas temperaturas com enxofre mantinha suas condições de elasticidade no frio ou no calor (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS, CÂMARAS DE AR E CAMELBACK - SINPEC, 2017).

No mercado mundial, o Brasil é o sétimo país na categoria de pneus para automóveis e o quinto em pneus para caminhões, ônibus e caminhonetes, de acordo com SINPEC (Sindicato Nacional da Indústria de Pneumáticos). Observa-se, na Figura 1, a venda de pneus no Brasil nos últimos 10 anos. Esses dados confirmam a importância da indústria de pneumáticos, para a economia do país, uma vez que, segundo dados da Confederação Nacional do Transporte – CNT (2017), 60% das cargas transportadas no Brasil foram por meio rodoviário. Com isso, mesmo com a produção nacional de veículos em queda, a produção de pneumáticos se manteve estável. Essa situação também gera um gigantesco número de resíduos e, atualmente, o descarte de pneus inservíveis vem se tornando um grave problema ambiental (PACHECO-TORGAL; DING; JALALI, 2012).

Figura 1 - Produção nacional de pneumáticos em milhões de unidades.



Fonte: ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS - ANIP (2017) – modificado.

Segundo Freitas (2007), o elastômero, utilizado na confecção do pneu, pode ser natural, sintético ou misto. A borracha natural oferece a propriedade elástica, enquanto a borracha sintética proporciona a estabilidade térmica. É possível utilizar aditivos para melhorar algumas propriedades do pneu, como o negro de fumo, sendo um incorporador que aumenta a resistência mecânica. Como se pode verificar na Tabela 1, a borracha natural representa entre 30% e 40% do peso de um pneu de caminhão e entre 15% e 20% de um pneu de carro de passeio. Os fabricantes de pneu consomem cerca de 70% da produção mundial de borracha natural, que apresenta várias qualidades: maleabilidade, grande resistência mecânica e térmica e aderência em todos os tipos de solo, pois quanto maiores as exigências do pneu maior a quantidade de borracha natural adicionada (FARIA, 2015).

Tabela 1 - Composição dos materiais utilizados nos pneus de passeio e carga.

Materiais	Pneu de automóvel (%)	Pneu de carga (%)
Borracha natural	14	27
Borracha sintética	27	14
Negro de fumo	28	28
Aço	14-15	14-15
Tecidos, aceleradores, entre outros	16-17	16-17

Fonte: Adaptado de Logarinhos e Tenório (2008).

Os problemas ambientais estão relacionados à instalação de grandes depósitos de pneus inservíveis, que ocupam grandes áreas e ficam sujeitos à queima. Em virtude de sua composição química, pneus são combustíveis e queimam a altas temperaturas, produzindo grandes quantidades de fumaça negra e óleos que penetram e contaminam solos e lençóis

d'água. Na Figura 2, pode-se observar a ocorrência de um incêndio em depósito de pneus no município de Lavras-MG (SEGRE; OSTERTAG; MONTEIRO, 2006). Além disso, esses depósitos são igualmente danosos por se constituírem em criadouros de mosquitos, que podem transmitir dengue, febre amarela e muitas outras (ESPINOSA; TENORIO; LAGARINHOS, 2015).

Figura 2 - Incêndio em depósito de pneus em Lavras-MG.



Fonte: Jornal de Lavras (2014).

Para evitar esses problemas, foram desenvolvidas tecnologias para eliminação de resíduos de pneus, e diversas pesquisas são realizadas para aprimorar métodos de reciclagem e também para agregar valor ao resíduo (SHU; HUANG, 2014).

Sendo assim, os métodos de reciclagem mais utilizados, para diminuir esse problema, são o recapeamento de pneus dos quais se retira o que sobrou da banda de rodagem com a utilização de um torno e adiciona-se outra banda, esse método gera um volume grande de partículas de borracha. Existem estudos de sua utilização na construção civil e também outro processo muito utilizado é a queima de pneus inservíveis para a produção de energia e este método tem a cinza como resíduo para o qual são escassos os estudos que visam a seu aproveitamento (XIAOWEI et al., 2017).

4.3 Resíduos de Madeira

A indústria madeireira no Brasil é uma das mais importantes, pois gera grandes benefícios econômicos, sociais e ambientais. Em 2015, a receita bruta totalizou R\$ 69 bilhões,

o que representa 6% do Produto Interno Bruto (PIB), (INSTITUTO BRASILEIRO DE ÁRVORES - IBA, 2015). O gênero *Eucalyptus* é o que possui maior área plantada, sendo 76,6% da área total (INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTIAS - IPEF, 2013). Com mais de 700 espécies, o gênero *Eucalyptus* foi uma excelente alternativa, para indústrias florestais no Brasil, principalmente, por sua adaptabilidade às condições ambientais, crescimento rápido e alta produtividade (RAMOS et al., 2011).

Resíduos gerados pelas indústrias da madeira devem ser descartados, adequadamente, uma vez que a eliminação inadequada pode levar a danos ambientais e a problemas econômicos para as próprias empresas, em decorrência de aplicação de multas por órgãos fiscalizadores. Muitos estudos usam os resíduos das indústrias da madeira como matéria-prima, para a fabricação de compósitos, como painéis à base de madeira, placas de cimento, madeira plástica e também para a fabricação de fertilizantes por meio da compostagem, reduzindo, assim, os problemas de geração de resíduos (RONQUIM et al., 2014).

Painéis de cimento-madeira são fabricados, a partir da mistura de partículas de madeira, um aglutinante mineral (cimento ou gesso), água e aditivos químicos (MENDES et al., 2011). Possuem sua aplicação destinada, principalmente, à construção civil, sendo muito utilizados nos países da Europa e no Japão, em função de suas características adequadas para uso estrutural (IWAKIRI; PRATA, 2008).

Um dos problemas encontrados que afeta diretamente a produção de painéis de cimento-madeira é a composição química da madeira, a qual varia, principalmente, em função da espécie utilizada, interferindo no processo de cura e endurecimento do cimento. Segundo Simatupang, Schwarz e Broker (1978), os extrativos presentes na madeira são os principais responsáveis pela inibição da solidificação do cimento e, segundo Beraldo et al. (2002), a presença de açúcares e extrativos solúveis em água ou álcali retarda o tempo de pega do cimento.

4.4 Materiais compósitos

Nos dias atuais, há uma crescente preocupação com o meio ambiente e ganha destaque o conceito de “desenvolvimento sustentável”, que decorre de uma eficiente utilização de recursos naturais e de novas tecnologias ecológicas, que poderia ser alcançada pela diminuição do consumo de matérias-primas, juntamente com o aumento da reciclagem de resíduos (DEBSKA; LICHOLAI, 2015; MO et al., 2016). Vale ressaltar que a indústria da construção civil é responsável por elevada exploração de matéria-prima pela extração de

agregados e outros materiais. Nesse cenário, é necessário que se busque a utilização de tecnologias alternativas, que priorizem a racionalização da utilização dos materiais e a sustentabilidade como forma de exploração (BERNHOEFT; GUSMÃO; TAVARES, 2011).

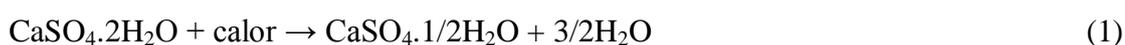
Materiais compósitos consistem em um sistema de duas ou mais fases em escala macroscópica, apresentando propriedades e desempenho mecânicos superiores aos dos materiais originalmente constituintes. Uma das fases normalmente é rígida e resistente, chamada de reforço, enquanto a outra é menos rígida e mais fraca, conhecida como matriz. Os reforços estão imersos na matriz e têm como função suportar os carregamentos transmitidos por ela. A matriz, por sua vez, tem como papel transferir a tensão para os reforços e mantê-los unidos (SILVA; CAVALCANTI, 2016).

A fase matriz do compósito pode ser constituída de materiais poliméricos (termoplásticos: polietileno, poliestireno, nylons, policarbonato, poliacetatos e termofixas: epóxis, poliésteres, fenóis, ureias, silicone, poliamidas.), metálicos (alumínio e titânio) e cerâmicos (cimento, gesso, argila, vidro). Matrizes cerâmicas não apresentam deformação plástica e sua resistência ao impacto é reduzida, isto é, apresentam baixa tenacidade (BRANDÃO, 2015).

Os produtos de gesso são cada vez mais utilizados, por causa de sua simplicidade, eficiência e baixo consumo de energia em sua produção em relação a outros aglutinantes. Além disso, os produtos baseados em aglomerados de gesso têm baixa condutividade térmica, sonora, baixa densidade, bom comportamento mecânico, baixo índice de combustão, possuem a capacidade de absorver o excesso de umidade do ar e liberá-lo, quando estiver mais baixo, contribuindo para um microclima favorável nas instalações. No entanto a principal desvantagem do gesso é a perda significativa de resistência mecânica em um ambiente úmido (SILVA, 2013). Considerando-se essa desvantagem, produtos à base de gesso podem ser empregados, como revestimento de alvenarias, blocos para execução de divisórias, painéis acartonados para forros e divisórias e ornamentos pré-moldados.

O gesso é obtido da calcinação da gipsita (sulfato de cálcio di-hidratado: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) em um processo seco com temperaturas variando entre 125 °C e 180 °C (BORRACHERO et al., 2008; GARTNER, 2009). Contém, aproximadamente, 21% de água na sua composição e $\frac{1}{4}$ dessa água ($\frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) está fortemente combinada e os restantes $\frac{3}{4}$ têm ligações fracas ($1 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$), (TORGAL; JALALI, 2008).

Produção do gesso a partir da calcinação da gipsita mostrado na Equação 1:



Os gessos utilizados no Brasil apresentam uma composição típica formada por água livre, água combinada, anidrido sulfúrico (SO_3), óxido de cálcio (CaO) e também anidrido carbônico (CO_2), resíduo Insolúvel (RI) + anidrido silícico (SiO_2), óxidos de ferro e Alumínio ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$) e óxido de magnésio (MgO) em baixos teores (JOHN; CINCOTTO, 2007).

Atualmente, várias pesquisas vêm sendo realizadas utilizando o gesso como matriz, na produção de compósitos, incorporando diversos tipos de materiais como reforço. A introdução desses materiais, na matriz frágil do gesso endurecido, traz melhorias em suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas.

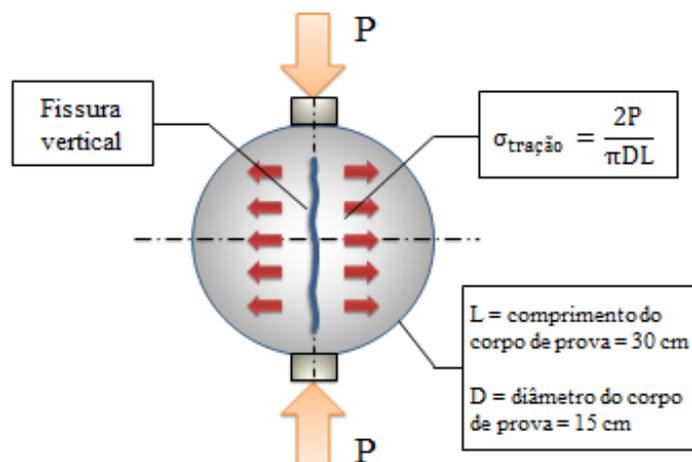
4.4.1 Ensaio de tração indireta

Os componentes de gesso são amplamente utilizados em edifícios em todo o mundo. No entanto estudos são muito limitados na literatura sobre as propriedades mecânicas de seus compósitos, principalmente, em relação à resistência a tração (PETRONE; MAGLIULO; MANFREDI, 2017).

O estudo das propriedades mecânicas dos sólidos é fundamental para avaliar o uso de um material para o propósito designado. Em geral, a resistência à tração de um material é determinada pelo teste de tração uniaxial. No entanto, no caso de materiais frágeis, este teste é considerado como incorreto por dispersão de resultados, excentricidade de carga, dificuldades de aperto, maior sensibilidade a desalinhamentos e defeitos de posição. Para resolver este problema, desenvolveu-se um teste de compressão diametral que mede indiretamente a resistência à tração e está sendo usado atualmente para simplificar (REDDY et al., 2017). De acordo com Quinn e Swab (2017), o teste de compressão diametral é um método útil para determinar a resistência à tração de materiais cerâmicos.

A Figura 3 apresenta esquema de ensaio de tração indireta por compressão diametral.

Figura 3 - Esquema de ensaio de tração indireta por compressão diametral.



Fonte: Do autor (2018).

O teste de compressão diametral é muito simples. Um disco circular é diametralmente comprimido, ao longo do seu diâmetro, gerando assim um esforço de tração máximo perpendicular à direção de carregamento na região média da amostra (Figura 3). A força (σ) é calculada, usando a Equação 2, em que P é a carga de fratura, D é o diâmetro do disco e L é a espessura do disco de comprimento (SWAB et al., 2011).

$$\sigma = \frac{(2 \times P)}{(\pi \times D \times L)} \quad (2)$$

4.4.2 Conforto térmico

Uma das propriedades dos compósitos que mais está sendo estudada na atualidade é a propriedade térmica, em consequência de crescente procura por materiais com baixa condutividade térmica para se obter maior isolamento térmico e melhor conforto. Para os seres humanos, o conforto térmico é um dos principais aspectos relacionados ao conceito geral de conforto e suas implicações, nas atividades cotidianas, são muitas e, para obtê-lo são considerados vários fatores como: eficiência energética, impacto ambiental e economia (DEAR et al., 2013). A produção de energia é um dos fatores com maior impacto ambiental, sendo o consumo de energia, em edificações, com o intuito de manter o conforto térmico, um dos maiores vilões (SANTIN; ITARD; VISSCHER, 2009), pelo fato de as edificações serem uma componente-chave do ambiente de vida, em que o conforto térmico deve ser garantido

(YANG; WANG, 2012). Relacionado a esses aspectos, muitos estudos foram realizados, globalmente, no campo do conforto térmico, para aperfeiçoar o uso de energia (RUPPA; VÁSQUEZ; LAMBERTS, 2015). O princípio do isolamento térmico e a instalação adequada de isolamento, usando materiais com eficiência energética, reduziram perda ou o ganho de calor, o que levaria à redução do consumo da energia como resultado (ADITYAA et al., 2017).

4.4.3 Estudos de compósitos de matriz de gesso

Rivero, Báez e Justo García Navarro (2014) estudaram a utilização de resíduos de borracha de pneu, em diversas granulometrias em compósitos à base de gesso, obtendo compósitos com resistência mecânica adequada e menor densidade, concluindo que é possível formar um novo compósito.

Pinto et al. (2016) avaliaram a utilização de partículas de borracha de pneu em compósitos de gesso, demonstrando uma boa aderência entre a borracha e o gesso, incentivando a produção do compósito de menor densidade e resistência mecânica compatível.

Morales-Conde, Rodrigues-Liñan e Pedreño-Rojas (2016) pesquisaram a utilização de partículas de madeira em compósitos de gesso, concluindo que o compósito apresenta diminuição de sua resistência mecânica, mas diminuição da condutividade térmica.

Serna et al. (2012) analisaram a adição de borracha em gesso e demonstraram que há um aumento da retenção de água com a adição das partículas nos compósitos, houve diminuição da resistência mecânica, não mostrando diferença significativa nas porcentagens de adição.

Medina e Barbero-Barrera (2017) produziram compósitos de gesso com adição de grafite e polipropileno e ambos os compósitos obtiveram aumento da resistência mecânica.

Bicer e Kar (2017) avaliaram compósitos de gesso com adição de poliestireno expandido, verificando diminuição da condutividade térmica, resistência à compressão e à tração e densidade. Concluiu-se que tais compósitos podem ser utilizados em ambientes internos.

Analisando o tempo de cura de compósitos de gesso com a adição de borracha natural, Ngamsurat et al. (2011) encontraram uma diminuição de até 90%.

Existem poucos estudos de compósitos de gesso com adição de cinzas sobre a resistência à tração e condutividade térmica e, também, faltam estudos comparativos entre os compósitos de gesso e cimento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foram produzidos corpos de prova de gesso com adição de resíduos de pneus e partículas de madeira, visando à sua aplicação na construção civil, agregando valor aos resíduos industriais e redução de impactos ambientais.

Os resultados demonstraram viabilidade do uso desses resíduos, vez que os corpos de prova analisados atenderam, em sua maioria, as exigências das normas.

No que se refere ao conforto térmico, observou-se redução da temperatura pela adição de resíduos de borracha de pneus, assim como aumento da resistência à tração desses materiais. Além disso, observou-se menor tempo de cura, ao se utilizar o gesso-madeira para produção de placas, quando comparado com as placas de cimento-madeira.

REFERÊNCIAS

- ADITYAA, L. et al. A review on insulation materials for energy conservation in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Belfast, v.73, p.1352–1365, 2017.
- AOUDIA, K. et al. Recycling of waste tire rubber: Microwave devulcanization and incorporation in a thermoset resin. **Waste Management**, Elmsford, v. 60, p. 471-485, 2017.
- ARULRAJAH, A. A. et al. Properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 58, p. 245-257, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**. Classificação de resíduos – Especificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. **ANIP em números, 2016**. Disponível em: <<http://www.anip.com.br/?cont=conteudo>>. Acesso em: 2 nov. 2017.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/a-anfavea.html>>. Acesso em: 23 nov. 2017.
- BAHRAMI, A. et al. Development of metal-matrix composites from industrial/agricultural waste materials and their derivatives, critical reviews. **Environmental Science and Technology**, Easton, v. 46, p. 2, 2016.
- BARCELLOS, F. C.; OLIVEIRA, J. C.; CARVALHO, P. G. M. Investimento ambiental em indústrias sujas e intensivas em recursos naturais e energia. **Revista Iberoamericana de Economia Ecológica**, Rio de Janeiro, v. 12, p. 33-50, 2009. Disponível em: <http://www.redibec.org/IVO/rev12_03.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2018.
- BERALDO, A. L. et al. Compósitos à base de resíduos vegetais e cimento Portland. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2002. 1 CD-ROM.
- BERNHOEFT, L. F.; GUSMÃO, A. D.; TAVARES, Y. V. P. Influência da adição de resíduo de gesso no calor de hidratação da argamassa de revestimento interno. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 189-199, 2011.
- BICER, A.; KAR, F. Thermal and mechanical properties of gypsum plaster mixed with expanded polystyrene and tragacanth. **Thermal Science and Engineering Progress**, Whitley Bay, v. 1, p. 59–65, 2017.
- BORRACHERO, M. V. The use of thermogravimetric analysis technique for the characterization of construction material. The gypsum case. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Dordrecht, v. 91, n. 2, p. 503-509, 2008.
- BRANDÃO, C. B. **Propriedades físicas, mecânicas e térmicas de argamassa de revestimento com adição de resíduo de pneu**. 2015. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

CASSILHA, A. C.; CASAGRANDE JUNIOR, E. F.; SILVA, M. C. Energia e o ensino da engenharia na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR: desafios para se alcançar a sustentabilidade. **Revista Educação & Tecnologia**, Curitiba, p. 50-57, 2011.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/estudo/transporte-rodoviario-desempenho>>. Acesso em: 2 nov. 2017.

DEAR, R. J. et al. Progress in thermal comfort research over the last twenty years. **Indoor Air**, Copenhagen, v. 23, p. 442–461, 2013.

DEBSKA, B.; LICHOLAI, L. The selected mechanical properties of epoxy mortar containing PET waste. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 94, p. 579-588, 2015.

ESPINOSA, D. C. R.; TENORIO, J. A. S.; LAGARINHOS, C. A. F. **Gerenciamento dos pneus inservíveis no Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 13., 2015, Natal. Anais... São Carlos: ABPOL, 2015. v. 1, p.1-5.

FARIA, J. S. **Incorporação e resíduo pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha**. 2015. 125 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2015.

FREITAS, C. **Estudo do desempenho mecânico de concreto com adição de partículas de borracha para aplicação como material de reparo em superfícies hidráulicas**. 2007. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

GARCEZ, M. et al. Assessment of mix proportions for developing lightweight cementitious composites whit wood wastes. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 41 n. 1, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622017000100103>. Acesso em: 22 dez. 2017.

GARTNER, E. M. Cohesion and expansion in polycrystalline solids formed by hydration reactions. The case of gypsum plasters. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 39, n. 4, p. 289-295, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ÁRVORES. **Anuário estatístico Iba 2015** . Disponível em: <http://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/anuario-iba_2015.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2017.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTIAS. **ABRAF statistical yearbook 2013**. Disponível em: <<http://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/anuario-ABRAF13-BR.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2017.

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

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Gesso de construção civil. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 727-760.

JORNAL DE LAVRAS. 2014. <Disponível em: <<http://www.jornaldelavras.com.br/index.php?p=10&tc=4&c=8511&catn=7>>. Acesso em: 10 out. 2017.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S. Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. **Polímeros**, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 106–118, 2008.

LUSTOSA, M. C. J.; CANEPA, E. M.; YOUNG, C. E. F. Política ambiental. In: MAY, P. H. (Org.). **Economia do meio ambiente: teoria e prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. p. 163-179.

MEDINA, N. F.; BARBERO-BARRERA, M. M. Mechanical and physical enhancement of gypsum composites through a synergic work of polypropylene fiber and recycled isostatic graphite filler. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 131, p. 165–177, 2017.

MENDES, R. F. et al. Qualidade de painéis aglomerados homogêneos produzidos com a madeira de clones de *Eucalyptus urophylla*. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 329-336, 2011.

MO, K. H. et al. Assessing some durability properties of sustainable lightweight oil palm shell concrete incorporating slag and manufactured sand. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 112, p. 763-770, 2016.

MORALES-CONDE, M. J.; RODRÍGUEZ-LIÑÁN, C.; PEDREÑO-ROJAS, M. A. Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 114, p. 6–14, 2016.

MUTUK, T.; MESCI, B. Analysis of mechanical properties of cement containing boron waste and rice husk ash using full factorial design. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 69, p. 128-132, 2014.

NGAMSURAT, S. et al. Curing characteristics of natural rubber filled with Gypsum. **Energy Procedia**, Malardalen, v. 9, p. 452- 458, 2011.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. **Wood energy: principles and applications núcleo de excelência em geração termoeletrica distribuída**. Itajubá: Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2002.

ORTH, C. M.; BALDIN, N.; ZANOTELLI, C. T. Solid waste generation in the production process of an automobile industry: a contribution to its reduction. **Gestão Produção**, São Carlos, v. 21, n. 2, p. 447-460, 2014.

PACHECO-TORGAL, F.; DING, Y.; JALALI, S. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): an overview. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 30, p. 714-724, 2012.

PETRONE, C.; MAGLIULO, G.; MANFREDI, G. Mechanical properties of plasterboards: experimental tests and statistical analysis. **Thermal Science and Engineering Progress**, Whitley Bay, v. 1, p. 59–65, 2017.

PINTO, N. A. et al. Evaluation of the matrix of plaster with incorporation of rubber tires for use in construction. **Revista Tecnológica**, Maringá, v. 25, n. 1, p. 103-117, 2016.

PRESTI, D. L. Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: a literature review. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 49, p. 863-881, 2013.

QUINN, G. D.; SWAB, J. Fracture Toughness of Glasses as Measured by SCF ar SEPB Methods. **Journal of the European Ceramic Society**, Oxford, v. 37, n. 14, p. 4243-4257, 2017.

RAMOS, L. M. A. et al. Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de Eucalyptus grandis W. Hill Ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 92, p. 411-418, 2011.

REDDY, S. et al. Strength evaluation of flake and spheroidal graphite cast irons using diametral compression test. **Journal of Materials Research and Technology**, Rio de Janeiro, n. 6, v. 1, p. 96-100, 2017.

RIVERO, A., J.; BÁEZ, A. G.; NAVARRO, J. G. New composite gypsum plaster: ground waste rubber coming from pipe foam insulation. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 55, p. 146-152, 2014.

RONQUIM, R. M. et al. Physical and mechanical properties of wood-cement composite with lignocellulosic grading waste variation. **International Journal of Composite Materials**, Rosemead, v. 4, p. 2, p. 69-72, 2014.

RUPPA, R. F.; VÁSQUEZ, N. G.; LAMBERTS, R. A review of human thermal comfort in the built environment. **Energy and Building**, Lausanne, v. 105, p. 178-205, 2015.

SANTIN, O. G.; ITARD, L.; VISSCHER, H. The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 41, p. 1223-1232, 2009.

SEGRE, N.; OSTERTAG, V.; MONTEIRO, P. J. M. Effect of tire rubber particles on crack propagation in cement paste. **Materials Research**, Pittsburgh, v. 9, n. 3, p. 311-320, 2006.

SERNA, A. et al. Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres, **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 35, p. 633-41, 2012.

SHU, X.; HUANG, B. Recycling of waste tire rubber in asphalt and Portland cement concrete: an overview. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 67, p. 217-224, 2014.

SIDDIQUE, R. Utilization of industrial by-products in concrete. **Procedia Engineering**, Oxford, v. 95, p. 335-347, 2014.

SILVA, A. O.; CAVALCANTE, M. A. A. Avaliação da resistência de materiais compósitos reforçados por fibras unidirecionais empregando modelos de micromecânica. In: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 37., 2016, Brasília. **Proceedings...** Brasília: ABMEC, 2016.

SILVA, L. M. C. C., **Material compósito à base de gesso reforçado com fibras**. 2013. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho Escola de Engenharia, Azurem, 2013.

SIMATUPANG, M. H.; SCHWARZ, G. H.; BROKER, F. W., Small scale plants for the manufacture of mineral-bonded wood composites. In: WORLD FORESTRY CONGRESS, 8., 1978, Indonésia. **Proceedings...** Indonésia: [s. n.], 1978.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS, CÂMARAS DE AR E CAMELBACK. **História do pneu**. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/sinpec/sobre-o-sinpec/quem-somos/>>. Acesso em: 22 dez. 2017.

SWAB, J. J. et al. Analysis of the diametral compression method for determining the tensile strength of transparent magnesium aluminate spinel. **International Journal of Fracture**, Alphen Aan Den Rijn, v. 172, p. 187–192, 2011.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **O gesso na construção civil**. Barbudo: Tecminho, 2008.

WIECHETECK, M. **Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos**. Curitiba, 2009. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao_10012011033501.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2017.

XIAOWEI, C. et al. Crumb waste tire rubber surface modification by plasmopolymerization of ethanol and its application on oil-well cement. **Applied Surface Science**, New York, v. 409, p. 325-342, 2017.

YANG, R.; WANG, L. Multi-objective optimization for decision-making of energy and comfort management in building automation and control. **Sustainable Cities and Society**, Montréal, v. 2, n. 1, p. 1–7, 2012.

ZHU, J. The situation and development trend of tire recycling industry. **China Tire Resource Recycle**, Beijing, v. 3, p. 12–17, 2015.

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

ARTIGO 1

COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO E GESSO REFORÇADOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*

Artigo redigido conforme normas da Revista Ciência da Madeira

RESUMO: O objetivo do trabalho foi produzir e avaliar física e mecanicamente compósitos de gesso-madeira e cimento-madeira utilizando partículas de *Eucalyptus grandis*, afim de se analisar a possível substituição do cimento pelo gesso como aglutinante, visando reduzir o tempo de cura. Foi utilizado o gesso em pó comercial e partículas de madeira de *Eucalyptus grandis*, obtidas por moagem em moinho de martelos. Os painéis foram produzidos em moldes metálicos, com dimensões de 25 x 25 x 1,5 cm (LxLxA), densidade nominal de 1,2 g.cm⁻³ e uma proporção de 1:2,75 (madeira:gesso) e água-gesso de 1:0,4. Painéis de referência foram produzidos utilizando o cimento Portland CP V-ARI como aglutinante. Foi utilizado cloreto de cálcio (CaCl²) como catalisador para acelerar a hidratação. Os resultados indicaram que os painéis não apresentaram diferenças estatísticas significativas na densidade, em absorção de água e inchamento em espessura ambos após 2h e 24h de imersão em água, módulo de elasticidade para flexão e compressão paralela. Os painéis de cimento-madeira obtiveram maiores valores em retenção de umidade, módulo de ruptura para ensaio de flexão estática e ligação interna. Esses resultados demonstram que a utilização do gesso como aglutinante pode ser viável, sendo necessários mais estudos sobre a perda de resistência mecânica do gesso em contato com a umidade.

Palavras-chave: Painel gesso/madeira, Propriedades físico-mecânicas, Análise química.

COMPOSITES BASED ON CEMENT AND PLASTER REINFORCED WITH WOOD PARTICLES OF *Eucalyptus grandis*

ABSTRACT: The objective of this study was to produce and evaluate physically and mechanically composites of plaster-wood and cement-wood using particles of *Eucalyptus grandis*, in order to analyze the possible replacement of the cement by the gypsum as a binder, in order to reduce the cure time. The panels were produced in metal molds with dimensions of 25 x 25 x 1,5 cm (LxLxA), nominal density of 1,2 g. cm⁻³ and a ratio of 1:2,75 (wood: plaster) and water-plaster of 1:0,4. Reference panels were produced using the CP V-ARI Portland

cement as a binder. Calcium chloride (CaCl_2) was used as the catalyst to accelerate hydration. The results indicated that the panels did not show significant statistical differences in density, water absorption and swelling in thickness both after 2h and 24h of immersion in water, modulus of elasticity for flexion and parallel compression. The cement-wood panels obtained higher values in moisture retention, modulus of rupture for static bending test and internal bonding. These results demonstrate that the use of gypsum as a binder may be feasible and further studies on the loss of mechanical resistance of gypsum in contact with moisture are required.

Keywords: Panel gypsum/wood, Physical-mechanical properties, Chemical analysis.

1. INTRODUÇÃO

Os painéis de cimento-madeira são fabricados a partir da mistura de partículas de madeira, um aglutinante mineral (cimento ou gesso), água e aditivos químicos (MENDES et al., 2011), com aplicação voltada a construção civil, principalmente na Europa e no Japão, em função de suas características adequadas para uso estrutural (IWAKIRI; PRATA, 2008).

Tais painéis são produzidos atualmente, quase que em sua totalidade, com as madeiras de Pinus (BERTOLINI et al., 2014; CASTRO E IWAKIRI, 2014; GARCEZ et al., 2016; VILLAS-BÔAS et al., 2017) e de Eucalipto (CASTRO et al., 2014; GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2016; IWAKIRI et al., 2013; MENDES et al., 2011; MESQUITA et al., 2015; RIOS et al., 2015).

Apesar de sua larga aceitação e utilização em mercados exigentes, como a Europa e a Ásia, esse tipo de painel ainda não está inserido comercialmente no mercado brasileiro (MENDES et al., 2011). Segundo CASTRO et al. (2014), O interesse por esse material deve-se principalmente às suas propriedades como isolantes térmicos, virtualmente incombustíveis, à resistência ao ataque de agentes biodegradadores, à alta estabilidade dimensional e à fácil trabalhabilidade.

Segundo Marra (1992), a relação com base no peso entre a madeira e o cimento mais empregada, inclusive industrialmente, é de 1:2,75. A madeira e o cimento são os principais componentes que formam a estrutura dos painéis cimento-madeira. Outras relações, maiores ou menores têm sido testadas, porém à medida que se aumenta a proporção de madeira em relação ao cimento, o tempo de cura dos painéis torna-se mais prolongado (LATORRACA; IWAKIRI, 2005).

Um dos problemas encontrados que afeta diretamente a produção de painéis de cimento-madeira é a composição química da madeira, a qual varia principalmente em função

da espécie utilizada, influenciando no processo de cura e endurecimento do cimento. Segundo Simantupang et al. (1978), os extrativos presentes na madeira são os principais responsáveis pela inibição da solidificação do cimento, e segundo Beraldo et al. (2002), a presença de açúcares e extrativos solúveis em água ou álcali, retarda o tempo de pega do cimento.

Por outro lado, o gesso é um material de construção importante para aplicações em interiores, pois é barato e de fácil utilização. As placas de gesso apresentam boas propriedades, principalmente em termos de isolamento térmico e atendendo os padrões de segurança contra incêndio (SCHUG et al., 2017). Uma outra vantagem do gesso, é que seu endurecimento ou cura devido a hidratação do sulfato de cálcio hemi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) ocorre em 3 dias (JOHN; CINCOTTO, 2007). Contudo compósitos à base de gesso apresentam grande perda de resistência mecânica em contato com umidade, sendo indicado seu uso apenas em ambientes internos (PACHON-RODRIGUEZ et al., 2011).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis de cimento-madeira e gesso-madeira utilizando partículas de *Eucalyptus grandis* e analisar a possível substituição do cimento pelo gesso como aglutinante, afim de reduzir o tempo de cura.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas nesta pesquisa 4 clones de *Eucalyptus grandis* com vinte e oito anos de idade, oriundos de um plantio na Universidade Federal de Lavras – UFLA (Lavras, Minas Gerais). Para a formação dos painéis, utilizou-se como aglutinantes minerais o gesso em pó, o cimento Portland CP V-ARI de alta resistência inicial e o cloreto de cálcio como acelerador de cura do cimento.

Selecionadas e abatidas três árvores por clone de *Eucalyptus grandis*, em seguida, retirados discos nas porções: base, 25%, 50%, 75% e topo, de acordo com a altura do fuste de cada árvore. Para posterior determinação da densidade básica da madeira, utilizou-se da norma NBR 11941 (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2003). Foi também determinada a razão de compactação dos painéis, obtida pela densidade dos painéis sobre a densidade da madeira. Determinou-se o teor de extrativos totais de acordo com a norma NBR 14853 (ABNT, 2010); o teor de lignina insolúvel, de acordo com a norma NBR 7989 (ABNT, 2010); o teor de cinzas, de acordo com a norma NBR 13999 (ABNT, 2017), e o teor de holocelulose, obtido de acordo com o procedimento descrito por Browning (1963).

Após a coleta do *Eucalyptus grandis*, as toras foram acondicionadas imersas em um tanque à temperatura de 80 °C por 24 horas para amolecimento da madeira, em seguida

laminadas em um torno laminador para geração das lâminas, secas à temperatura de 105 °C até massa constante. Posteriormente as lâminas de eucalipto foram trituradas em um moinho martelo, para a geração das partículas do tipo *sliver*, sendo estas submetidas a peneiramento mecânico. As partículas usadas na produção dos painéis foram aquelas que passaram pela peneira de 1,83 mm e ficaram retidas na de 1,69 mm.

O delineamento experimental constituiu-se de dois tratamentos. Foi adotado delineamento inteiramente casualizado, sendo produzidos três painéis para o tratamento cimento-madeira e três painéis de gesso-madeira, totalizando 6 painéis de aglutinante-madeira de dimensões 48 x 48 x 1,5 cm (comprimento, largura e espessura, respectivamente).

Na Tabela 1 a seguir, são apresentadas as características da produção dos painéis.

Tabela 1. Características da produção dos painéis.

Table 1. Production characteristics of the panels.

	TOTAL
Volume do Pannel (cm ³)	937,5
Relação madeira:aglutinante (kg:kg)	1:2,75
Relação água:aglutinante	1:0,4
Aditivo químico (%)	4
Massa específica nominal do pannel (cm ³)	1,2 g

Após a pesagem de cada componente, estes foram misturados em uma betoneira para obtenção de massa homogênea. Retirada da betoneira, a massa de cada painel foi devidamente separada e distribuída aleatoriamente na caixa formadora do colchão, com as dimensões de 48 x 48 cm, untada com óleo diesel para facilitar a retirada do painel após sua prensagem e grampeamento. Após o carregamento dos painéis, a prensa foi fechada com pressão específica de 4 MPa e temperatura ambiente, realizando-se em seguida o grampeamento dos painéis, ao qual permaneceram por um período de 24 horas. Após esse período, os grampos foram retirados e os painéis foram acondicionados em câmara climatizada à temperatura de 20 ± 2 °C e umidade relativa de 65 ± 3 % durante 28 dias, sendo então realizados os ensaios das propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

O processo de obtenção dos corpos de prova foi realizado com auxílio de uma serra circular. Foram retirados de cada painel, dois corpos de prova para absorção de água e inchamento em espessura, seis corpos de prova para ligação interna, quatro corpos de prova para compressão paralela e quatro corpos de prova para flexão estática. As dimensões dos corpos de prova e as normas utilizadas estão representadas na Tabela 2.

Foram realizados os seguintes testes físicos: densidade do painel, absorção de água (AA) após 2 e 24 horas e inchamento em espessura (IE) após 2 e 24 horas. Os testes

mecânicos realizados foram: ligação interna, módulo de elasticidade à flexão estática (MOE) e módulo de ruptura à flexão estática (MOR).

Tabela 2. Dimensões dos corpos de prova e normas utilizadas para os testes físico-mecânicos.
Table 2. Dimensions of the specimens and standards used for physical mechanical testing.

Propriedade avaliada	Norma utilizada	Dimensões dos corpos de prova
Densidade		5 x 5 cm
Absorção de água 2 e 24 horas	ASTM 1037 (2016)	15 x 15 cm
Inchamento em espessura 2 e 24 horas		
Ligação interna	ASTM 1037 (2016)	5 x 5 cm
Compressão paralela	ASTM 1037 (2016)	25 x 10 cm
Módulo de elasticidade à flexão estática	DIN 52362 (1982)	25 x 5 cm
Módulo de ruptura à flexão estática		

Para avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis aglutinante-madeira produzidos, os dados foram submetidos à análise de variância e o teste de média de Scott-Knott, a 5% de significância. Os dados foram avaliados estatisticamente com o uso do software Sisvar.

Foram utilizados também, como base para comparação dos resultados, os valores mínimos das propriedades mecânicas de painéis comerciais, estabelecidos pelo processo Bison (BISON WOOD-CEMENT BOARD, 1978).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3, estão apresentados os valores médios da densidade básica, teor de extrativos totais, lignina insolúvel, holocelulose e cinzas da madeira.

Tabela 3. Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Table 3. Characterization of *Eucalyptus grandis* wood.

Tratamento	Densidade básica (g.cm ⁻³)	Extrativos (%)	Lignina (%)	Holocelulose (%)	Cinzas (%)
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,61 ^(0,30)	6,12 ^(0,54)	28,02 ^(1,24)	65,68 ^(0,90)	0,18 ^(0,02)

Valores entre parênteses representam o desvio padrão

A densidade básica obtida para o *Eucalyptus grandis* foi de 0,61 g.cm⁻³. Este valor influencia na quantidade de partícula empregada na formação do painel, pois está diretamente

relacionado ao seu peso. Madeiras com densidades mais elevadas resultam em um baixo grau de compactação e como consequência geram um painel de baixa qualidade (SILVA et al., 2005). Sorfa e Bongers (1982), destacam que além da composição do painel, a densidade apresenta alta influência na resistência de compósitos cimento-madeira.

Os valores de densidade são idênticos aos obtidos por Iwakiri et al. (2008), que, estudando diferentes espécies de eucalipto, obteve valores médios de $0,60 \text{ g.cm}^{-3}$ para *Eucalyptus grandis*.

O valor de extrativos totais alcançados foi de 6,12%. Mori et al. (2007) encontraram para a madeira de *Eucalyptus grandis* um valor médio de 4% de extrativos totais. Verifica-se que o resultado obtido é similar ao encontrado ao da literatura.

Os extrativos totais são de extrema importância, pois, de acordo com Iwakiri et al. (2005), a capacidade de solidificação do cimento na presença da madeira é determinada pela composição química da mesma, sendo que os extrativos são os principais responsáveis pela inibição da solidificação do cimento. Isso implica influências diretas nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis cimento-madeira. A presença de maiores quantidades de minerais e alguns extrativos apolares podem resultar no bloqueio de grupos químicos reativos para a adesão com adesivos polares, afetando, assim, a qualidade da colagem e o desempenho mecânico das chapas reconstituídas (NDAZI et al., 2007).

Na Tabela 4, estão apresentados os valores médios da densidade do painel, assim como a razão de compactação dos painéis produzidos.

Tabela 4. Valores médios da densidade do painel, e razão de compactação dos painéis produzidos.

Table 4. Mean values of panel density, and compaction ratio of panels produced.

Painel	Densidade do painel (g.cm^{-3})	Razão de compactação
Gesso/Madeira	1,11 ^(0,04) A	1,81 ^(0,03) A
Cimento/Madeira	1,10 ^(0,07) A	1,80 ^(0,04) A

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-knott a 5% de significância. Valores entre parênteses representam o desvio padrão.

O valor médio de densidade básica a 12% de umidade da madeira de *Eucalyptus grandis* utilizada nessa pesquisa foi $0,61 \text{ g.cm}^{-3}$. Com relação às densidades médias obtidas para os painéis, estas foram um pouco inferiores em comparação às densidades nominais de $1,20 \text{ g.cm}^{-3}$ estabelecida no delineamento experimental. Tais diferenças podem ser atribuídas sobretudo às condições operacionais relacionadas à perda de materiais durante a formação do colchão e prensagem dos painéis, além do retorno em espessura do painel após a sua retirada

da prensa. Esses fatores influenciam diretamente na redução da densidade do painel em função da redução no peso de partículas do colchão e aumento da espessura e volume do painel.

Com relação a razão de compactação, pode-se observar que esta não apresentou variação. Segundo Scatolino et al. (2017), a baixa densidade das partículas é um dos fatores fundamentais para utilização de materiais lignocelulósicos na produção de painéis reconstituídos, com isso uma maior razão de compactação pode resultar em melhores propriedades mecânicas.

Na Tabela 5, estão apresentados os valores médios de absorção de água e inchamento em espessura, ambos após 2 e 24 horas de imersão em água.

Tabela 5. Absorção de água e inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão em água.

Table 5. Water absorption and thickness swelling after 2 and 24 hours immersion.

Painel	Absorção de água 2h (%)	Absorção de água 24h (%)	Inchamento em espessura 2h (%)	Inchamento em espessura 24h (%)
Gesso-madeira	21,88 ^(2,67) A	26,67 ^(4,10) A	1,83 ^(1,53) A	2,67 ^(0,79) A
Cimento-madeira	20,43 ^(0,86) A	21,88 ^(1,00) A	1,37 ^(0,68) A	2,10 ^(0,79) A

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-knott a 5% de significância. Valores entre parênteses representam o desvio padrão.

Com relação à absorção de água e inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão em água, não houve diferenças estatísticas entre os tratamentos. Iwakiri; Prata (2008), ao avaliarem as propriedades de painéis minerais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* encontraram valores inferiores aos obtidos neste trabalho, com valor de absorção de água em 24 horas de 15,15%, e inchamento em espessura em 24 horas de 2,26%. Os valores médios de absorção de água após 24 horas obtidos nesse estudo para painéis cimento-madeira estão dentro da faixa de 15,69% a 22,22%, encontrados por Latorraca (2000) para quatro espécies de eucalipto; já para inchamento em espessura, os valores médios obtidos para os painéis gesso-madeira estão um pouco acima da faixa de 1,64 a 2,12%. Cabe ressaltar que os painéis de *Eucalyptus grandis* produzidos apresentaram valores médios próximos aos encontrados na literatura e do valor referencial máximo de 1,8% do processo Bison (BISON WOOD-CEMENT BOARD, 1978).

Na Tabela 6, estão apresentados os valores médios de módulo de elasticidade e módulo de ruptura para ensaio de flexão simples, compressão paralela e ligação interna.

Tabela 6. Módulos de elasticidade (MOE), ruptura (MOR), compressão e ligação interna.
Table 6. Modulus of elasticity (MOE), rupture (MOR), compressive strength and internal bond.

Painel	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Compressão (MPa)	Ligação Interna (MPa)
Gesso-madeira	4329,78 ^(1618,94) A	6,08 ^(3,23) A	5,44 ^(1,11) A	0,53 ^(0,09) A
Cimento-madeira	6706,06 ^(2516,76) A	14,39 ^(4,12) B	4,70 ^(1,08) A	0,80 ^(0,11) B

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-knott a 5% de significância. Valores entre parênteses representam o desvio padrão.

Os resultados de MOE apresentados acima, demonstram que os painéis produzidos com madeira de *Eucalyptus grandis* apresentaram valores médios estatisticamente iguais em comparação aos tratamentos realizados. Cabe destacar ainda que, em termos de médias absolutas, os painéis de *Eucalyptus grandis* produzidos com cimento apresentaram a maior média entre os tratamentos. Na comparação com os valores mencionados na literatura, os valores médios de MOE obtidos para os tratamentos com madeira de *Eucalyptus grandis* foram superiores em relação ao valor mínimo referencial do processo Bison (BISON WOOD-CEMENT BOARD, 1978), que é de 2,94 GPa. Os resultados foram também satisfatórios em comparação aos valores encontrados por Iwakiri; Prata (2008), para painéis produzidos com madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*, cujas médias variaram na faixa de 0,98 a 4,78 GPa.

Os valores médios de MOR, apresentados na Tabela 6, indicam que há diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos. Guimarães et al. (2015), estudando a utilização da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* na produção de painéis cimento-madeira, obtiveram valores para MOR entre 15 e 19 MPa e, portanto, superiores aos encontrados neste trabalho.

O valor mínimo estabelecido, para MOR pelo processo Bison (BISON WOOD-CEMENT BOARD, 1978) é de 8,92 MPa, dessa forma, os painéis gesso-madeira avaliados apresentaram valores inferiores ao mínimo prescrito por este processo. Os resultados também foram inferiores em comparação aos valores obtidos por Iwakiri; Prata (2008), para painéis produzidos com madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*, cujas médias variaram na faixa de 3,53 a 9,90 MPa.

Os resultados apresentados indicam que a resistência à compressão paralela dos painéis gesso-madeira confeccionados foi estatisticamente igual aos painéis cimento-madeira. Santos et al. (2008) trabalhando com resíduos da madeira de *Eremanthus erythropappus* para produção de painéis cimento-madeira obteve valores médios 7,28 MPa de resistência à

compressão paralela dos painéis, ou seja, os resultados encontrados neste trabalho encontram-se próximos aos encontrados na literatura.

De acordo com os resultados observados para ligação interna, pode-se constatar que os painéis produzidos com cimento-madeira apresentaram valor médio de ligação interna estatisticamente maior em relação aos painéis gesso-madeira. O valor médio de 0,53 e 0,80 MPa para os painéis de gesso-madeira e cimento-madeira, respectivamente, foram superiores ao valor mínimo requerido pelo processo Bison (BISON WOOD-CEMENT BOARD, 1978) que é de 0,39 MPa.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

Com relação às propriedades físicas, os painéis de gesso-madeira mostram valores estatisticamente iguais aos de cimento-madeira;

Na flexão estática, os materiais estudados se mostram iguais (homogêneos) apenas no módulo de elasticidade (MOE), sendo que no módulo de ruptura (MOR) o painel cimento-madeira apresentou valor superior ao painel gesso-madeira, uma vez que o painel gesso-madeira não se enquadrava nas exigências mínimas do processo de Bison Wood-Cement board (1978);

Para ligação interna, todos os painéis se adequam aos requisitos mínimos descritos no processo de Bison Wood-Cement board (1978), porém os painéis de cimento-madeira apresentaram maior valor médio;

Para compressão paralela os resultados foram estatisticamente iguais e próximos aos valores encontrados na literatura.

Diante dos resultados obtidos, é viável a utilização do gesso como aglutinante em painéis minerais, porém se faz necessário o seu emprego em ambiente interno, sem contato com a água.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing Materials. **ASTM D-1037-12**: Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA; 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11941**: Madeira – Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro; 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; 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7989**: Pasta celulósica e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro; 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14853**: Madeira: determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro; 2010.

BERALDO, A. L.; ARRUDA, A. C. de; STANCATO, A. C.; SAMPAIO, C. A. P.; FERNANDES FILHO, O. P.; LEONEL, V. M. Compósitos à base de resíduos vegetais e cimento Portland. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2002. CD-ROM.

BISON WOOD-CEMENT BOARD. **Bison-report**. [S.l.],1978. 10 p.

GUIMARÃES, J. C. O.; LIMA, J. T. C.; NUNES, J. S.; LISBOA, F. J. N.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Eficiência do tratamento de partículas de madeira de eucalipto do híbrido de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus camaldulensis* para produção de painéis minerais. **Enciclopédia biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.11, n.21; p.949, 2015.

IWAKIRI, S.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; PRATA, J. G.; COSTA, A. C. B. Utilização de madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* para produção de painéis de partículas orientadas – osb. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 2, p. 265-270, abr.-jun., 2008.

IWAKIRI, S.; KEINERT JUNIOR, S.; ALBUQUERQUE, C. E. C. de; LATORRACA, J. V. de F.; MENDES, L. M. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: Ajir, 2005. v. 1, 247 p.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Gesso de construção civil. Isaia, G. C **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. IBRACON 727-760, 2007

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

LATORRACA, J. V. F.; IWAKIRI, S. Painéis de cimento-madeira. In: IWAKIRI, S. (Ed.). **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. p. 229-254.

MARRA, A. A. **Technology of wood bonding: principles and practice**. New York: V. N. Reinhold, 1992. 453 p.

MORI, F. A.; LOPES, Y. L. V.; MENDES, L. M.; LATORRACA, J. V. F. Estudo da compatibilidade entre a madeira e as cascas de *eucalyptus grandis* e cimento Portland. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 3, p. 257-264, jul-set, 2007.

NDAZI, B. S.; KARLSSON, S.; TESHAI, J. V.; NYAHUMWA, C. W. Chemical and physical modifications of rice husks for use as composite panels. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.38, n. 33, p.925-935, 2007.

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

PACHON-RODRIGUEZ E.A.; GUILLON E.; HOUVENAGHEL G.; COLOMBANI J. ; Pressure solution as origin of the humid creep of a mineral material, **Phys. Rev. E Stat. Nonlinear Soft Matter Phys.** 84 (2011).

SANTOS, R. C.; MENDES, L. M.; MORI, F. A.; MENDES, R. F. Aproveitamento de resíduos da madeira de candeia (*Eremanthus erythropappus*) para produção de painéis cimento-madeira. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 241-250, jul./set. 2008.

SCATOLINO, M. V.; COSTA, A. O.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; PROTÁSIO, T. P.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Eucalyptus wood and coffee parchment for particleboard production: physical and mechanical properties. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 2, p. 139-146, 2017.doi: 10.1590/1413-70542017412038616

SCHUG, B.; MANDEL, K.; SCHOTTNER, G.; SHMELIOV, A.; NICOLOSI, V.;BAESE, R.; PIETSCHMANN, B.; BIEBL, M.; SEXTL, G.; A mechanism to explain the creep behavior of gypsum plaster. **Cement and Concrete Research** v.98, p.122–12, 2017.

SILVA, G. C.; LATORRACA, J. V. F.; TEIXEIRA, D. E.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Produção do compósito madeira e casca de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake e cimento Portland. *Scientia forestalis*, n. 68, p.59-67, ago. 2005.

SIMATUPANG, M. H.; SCHWARZ, G. H.; BROKER, F. W. Small scale plants for the manufacture of mineral-bonded wood composites. In: WORLD FORESTRY CONGRESS, 8., 1978, Indonésia. **Proceedings...** Indonésia, 1978.

SORFA, P.; BONGERS, J. **Wood-cement composite building units: part 1**. Pretoria: National Timber Research Institute, 24 p, 1982.

Bertolini MS, Nascimento MF, Christoforo AL, Lahr FAR. Painéis de partículas provenientes de rejeitos de *Pinus* sp. tratado com preservante CCA e resina derivada de biomassa. *Revista Árvore* 2014; 38(2): 339-346.

Castro V, Araújo RD, Parchen C, Iwakiri S. Evaluation of pretreatment effects of *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage wood on the compatibility degree with Portland cement. *Revista Árvore* 2014; 38 (5): 935-942.

Castro V, Iwakiri S. Influência de diferentes níveis de acetilação nas propriedades físico-mecânicas de aglomerados e painéis madeira-cimento. *Cerne* 2014; 20(4): 535-540.

Garcez MR, Santos T, Garcez EO, Gatto DA. Propriedades físicas de compósitos cimento-madeira com serragem de *Pinuselliottii* tratada. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)* 2016; 7(2):70-80.

Villas-Bôas BT, Parchen CFA, Iwakiri S, Prata JG, Costa MRMM. Different effects assessment of dosages water/limer in the compressive strength of wood-cement composites. *Revista Matéria* 2017; 22(1): s. p.

Guimarães Júnior JB, Mendes RF, Guimarães IL, Lisboa FN, Protásio TP, Mendes LM. Qualidade de painéis OSB (Oriented Strand Board) produzidos com a madeira de clones de *Eucalyptus urophylla*. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)* 2016; 7(3): 163-169.

Iwakiri S, Trianoski R, Cunha AB, Prata JG, Hara M, Bila NF, Luis RCG, Araújo RD. Propriedades tecnológicas de painéis cimento-madeira produzidos com partículas de eucalipto. *Revista de Ciências Agroveterinárias* 2013; 14(3):217-223.

Mendes LM, Loschi FAP, Paula LER, Mendes RF, Guimarães Júnior JB, Mori FA. Potencial de utilização da madeira de clones de *Eucalyptusurophylla* na produção de painéis cimento-madeira. *Cerne* 2011; 17(1):69-75.

Mesquita RGA, Mendes LM, Mendes RF, Tonoli GHD, Marconcini JM. Inclusão de feixes de sisal na produção de painéis MDP de eucalipto. *ScientiaForestalis* 2015; 43(10):75-82.

Rios PD, Vieira HC, Stupp AM, Kniess DDC, Borba MH, Cunha AB. Avaliação física e mecânica de painéis reconstituídos compostos por partículas de galhos secos de *Araucariaangustifolia* (Bertol.) Kuntze e madeira de *Eucalyptusgrandis* Hill exMaiden. *ScientiaForestalis* 2015; 43(106):283-289.

CASTRO, V. G.; BRAZ, R. L.; AZAMBUJA, R. F.; LOIOLA, P. L.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M. PAINÉIS CIMENTO-MADEIRA DE *Eucalyptus saligna* COM DIFERENTES ADITIVOS QUÍMICOS E MÉTODOS DE FORMAÇÃO. *FLORESTA*, Curitiba, PR, v. 45, n. 2, p. 349 - 360, abr. / jun. 2015. DOI: 10.5380/rf.v45i2.35765

ARTIGO 2**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL CONDUCTIVITY AND MECHANICAL BEHAVIOR OF GYPSUM PLASTER COMPOSITES REINFORCED WITH TIRE WASTE PARTICLES**

Artigo submetido conforme normas da Revista Key Engineering Materials

Laércio Mesquita Júnior ^{a*}, Tony Matheus Carvalho Eugênio ^a, Luciana Silva Villela ^a, Saulo Rocha Ferreira ^a, Giovanni Francisco Rabelo ^a

^a Federal University of Lavras-UFLA; laerciomjr@gmail.com, tonymmatce@gmail.com, luciana.ville@gmail.com, saulo.ferreira@ufla.br, rabelo@deg.ufla.br

* Corresponding member

Abstract: The present study aims to evaluate the influence of tire waste particles on thermal conductivity and mechanical properties of gypsum plasters composites. Tire waste was obtained from tire recycling industry presenting small particles with a nominal length of 1,5 mm. A commercial gypsum plaster was used to develop a matrix. A ratio of 1:0.45 (plaster: water) was applied. Composites were developed with raw and treated tires waste. Tires particles treatments was performed by incineration process. Ashes after incineration were divided in two groups. One group was used with after incineration and other was sieved to obtain a maximum particle size of 75 um. Three different composites were developed with different amount of tires waste. Regarding the ground rubber 0%, 5%, 10%, 15% and 20% of waste was applied in partial replacement of gypsum in volume. Regarding the incinerated tire waste 0%, 2.5%, 5%, 7.5% and 10% of ashes was used in partial replacement of gypsum in volume. Thermal conductivity was evaluated according to Eugênio (2016) procedure. The results indicate that samples with 10% of ashes that was not sifted presents a lower thermal conductivity. Bending and compression tests were performed according to EN 13279-2, 2006. All composites presented lower mechanical behavior in comparison to reference. The compressive and flexural values obtained from tire waste gypsum plaster composites reached the minimum values established by the standard EN 13279-1, 2008.

Keywords: *tire waste, thermal conductivity, gypsum plaster.*

1. Introduction

The elimination and stocking of used tires have become an urgent global preoccupation from the environmental point of view. In fact, every year, hundreds of used tires are generated and accumulated in the entire world (AUDIA et al., 2017). Tires wastes are virtually non-degradable and take up landfill spaces (WENG and CHANG, 2001). If not properly disposed, waste tires may accumulate water, and subsequently could cause the spread of mosquito-borne diseases (CHANG, 2008). Often tire fires occur and cause serious air, water, and soil pollutions (FAN et al., 2005).

Nowadays, concerns with the environment and the concept of sustainable development stems from the efficient use of natural resources and of new green technologies, which could be achieved by reducing the consumption of raw materials, along with increased waste recycling (DEBSKA and LICHOLAI, 2015; MO et al., 2016).

On the other side, maintaining thermal comfort for humans is one of the main aspects related to the general concept of comfort. The implications of thermal comfort in human activities are increasingly considered in several contexts such as: energy efficiency, environmental impact and economy (DEAR et al, 2013). A considerable amount of energy is consumed worldwide to generate thermal comfort, and an exponentially increasing number of research studies on thermal comfort have been seen in recent years (RUPPA et al., 2015).

The principle of thermal insulation is proper insulation installation, using energy-efficient materials that would reduce heat loss or heat gain, which leads to reduced energy cost as a result. (ADITYAA et al, 2017). The construction industry is responsible for high exploitation of raw material on earth through the extraction of aggregates, binders and other materials. In this scenario, it is necessary to seek the use of alternative technologies, which prioritize the rationalization of the use of materials and sustainability as a form of exploitation (BERNHOEFT, 2011). According to Rivero et al (2014), ground rubber is suitable for its incorporation in composite gypsum, could achieve to obtain a new lightweight product for building construction Serna et al. (2012) analyzed the addition of rubber from recycled tires to gypsum plaster, obtained satisfactory results.

The present work has as objective to evaluate the mechanical and thermal behavior of plaster composites with tire waste.

2. Material and Methods

The tire waste used in the present study was divided and processed in three different ways. All waste was obtained by the tire recovery industry Bkerp, and processed in the UEPAM (Experimental Unit of Production of Wood Panels) located in the Federal University of Lavras (UFLA). The first waste, denominated “tire waste particles” was used without any processing, presenting a nominal size of 1.5 mm (see figure 1a). The second, named “Tire ash”, was used without sieving. The material presented a nominal size of 1,15 mm (see figure 1b). The Third was the material obtained from incineration of the raw waste, named “Sieved ash”. The product from the incineration was then sieved to a maximum size of 200 mesh (75 μm) (see figure 1c). This procedure was performed according EUGENIO (2016)

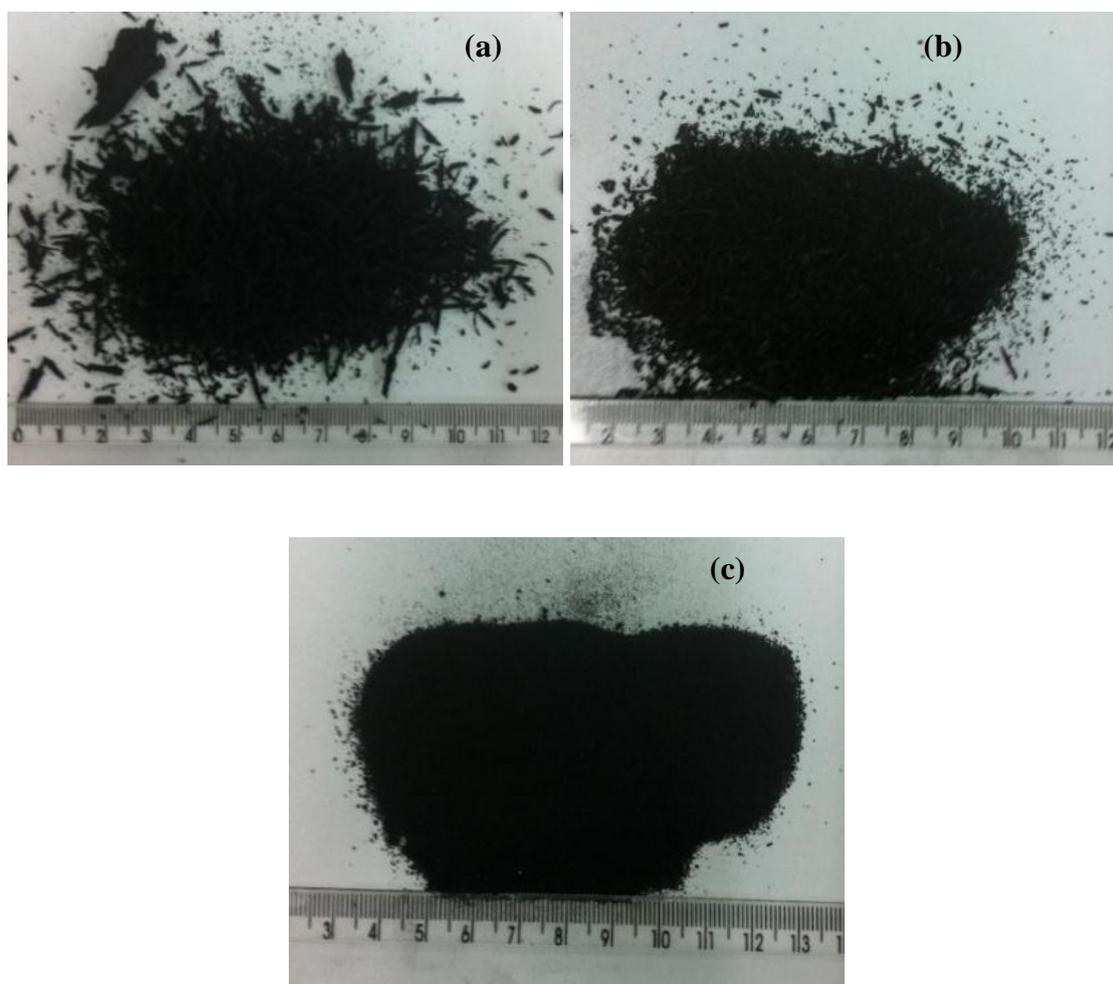


Figure 1: Image of Raw material, named “tire waste particles (a); “Tire ash” (b) and “sieved ash” with a maximum size of 200 mesh (c)

The incineration process was performed in an equipment in which the particles were placed in an enclosed container, coupled to the filter base and structured so as to prevent the release of noxious gases or particulates without treatment to the external environment, directing all the smoke to pass through the gas scrubber at UEPAM-UFLA.

Granulometric curve of the tire rubber particles and the ash in the natural state was performed in accordance with the specifications of NBR NM 248 (2003). To the absolute specific mass test of tire rubber particles and natural ash, the chapman vial according to NBR norm NM 52 (2009a) was adapted. Ethyl alcohol was used instead of water due to its high density. (LINTZ et al., 2010). The determination of the unit mass of the rubber was performed according to the requirements of NBR NM 45 (2006).

The used matrix presented a mix design of 1:0.39 until 0.45 (gypsum: water/plaster). A commercial gypsum from União company was used (40 kg/bag).

The variation of the water/plaster was determined according to the procedure described in standard EN 13279-2 (2004). For each proportion (see Table 1), a different amount of water was added to keep a workability based in a spread (flow table) between 160mm and 170mm.

The mixtures were produced in a room with variable temperature ($21 \pm 5^{\circ}\text{C}$) using a becker with capacity of 5 dm^3 . The mixing procedure is described as follow. All dry components were homogenized in the becker. The water was added and mixed for 2 minutes. To mold the compression, tensile and cylindrical and prismatic molds were developed.

The percentages of gypsum replacement by residues were based on previously studies (AL-AKHRAS, N. M., and SMADI M. M,2004; GANJIAN et al, 2009; MOUSTAFA and ELGAWADY, 2015). The amount of gypsum was replaced by: 0%, 5%, 10%, 15 % and 20% by volume per ground rubber and 0%, 2.5%, 5%, 7.5% and 10% by volume by ash and sieved ash.

In total, 50 different specimens were developed. Table 2 displays the amount of materials for each mix design.

The three points of bending and compressive tests were performed in an electromechanical testing machine Arotec, with a load cell of 6kN. To each test 4 specimens were used. The tests were performed at 7 days age. The curing process after casting was after production and placed 24 hours in the oven at 40°C , three specimens were tested for flexion. Specimens with a dimension of 160 mm x 40 mm x 40 mm were placed in the bending test setup with a span of 100 mm. The test was performed with a rate of $50 \pm 10 \text{ N/s}$, according to EN 13279-2 (2004).

After the flexural tests, the fractured specimens were sawed in cube-shaped specimens with a 40 mm side. The compression test was performed with a rate of 400 ± 200 N/s, according to EN 13279-1 (2008).

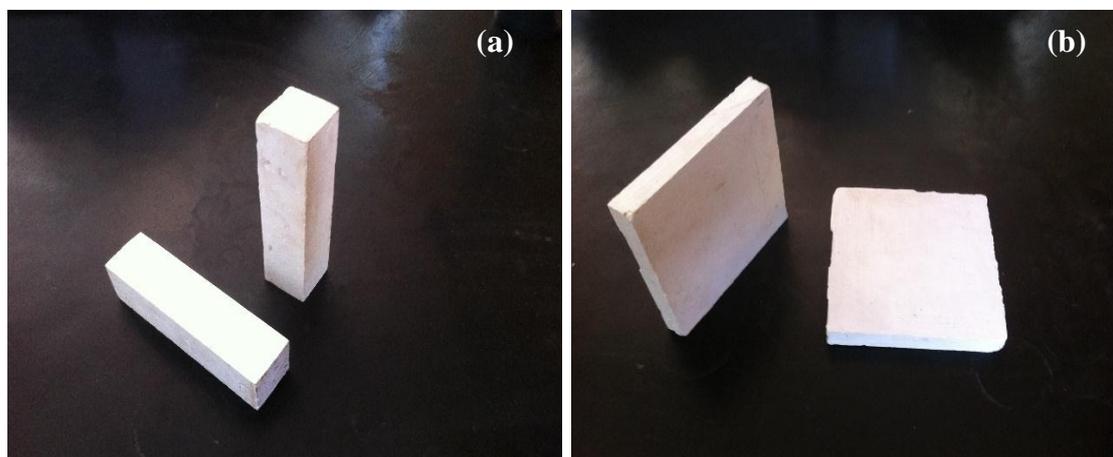


Figure 4: Specimens for bending and compressive tests(40 x 40 x 160mm) (a) and specimens for the thermal conductivity tests(150 x 150 x 20mm) (b)

Apparent density was measured according adapted methodology from Brazilian standard NBR 13280 (2005).

Thermal conductivity test was performed according to previous works (SILVA, 2010; EUGENIO, 2016). The heating of the specimens was monitored until a stabilization of the temperature and of the annotated values, the face exposed to the radiation of the lamp and the other side. Thermal conductivity was calculated multiplying the height of the specimens by the incident radiation and dividing by the temperature difference. The incident radiation was measure by Instrutherm Mes100 solar power meter (EUGENIO, 2016). Three samples of 150 x 150 x 20 mm dimensions were made for the composites with the highest and lowest concentrations of each residue after 7 days of their production and were placed at 40 ° C 24 hours before the test

The interface between the tire waste and the matrix was investigated using an SEM Hitachi TM3000. The microscope was operated under an accelerating voltage of 15kV. A pre-coating with a thin layer of approximately 20 nm of gold was done to make the fiber conductive and suitable for analysis.

3. Results and discussion

The granulometric curves of the tire ashes is presented in Figure 4 and 5. According the results it was observed a fines modulus of 3.34 and 2.25 to Ground Rubber and ash, respectively (see table 1).

Table 1: Grain size and fines modulus of ground rubber.

Materials	Fines modulus	Grain size(mm)
Ground Rubber	3.62	4.75
Ash	2.25	2.36

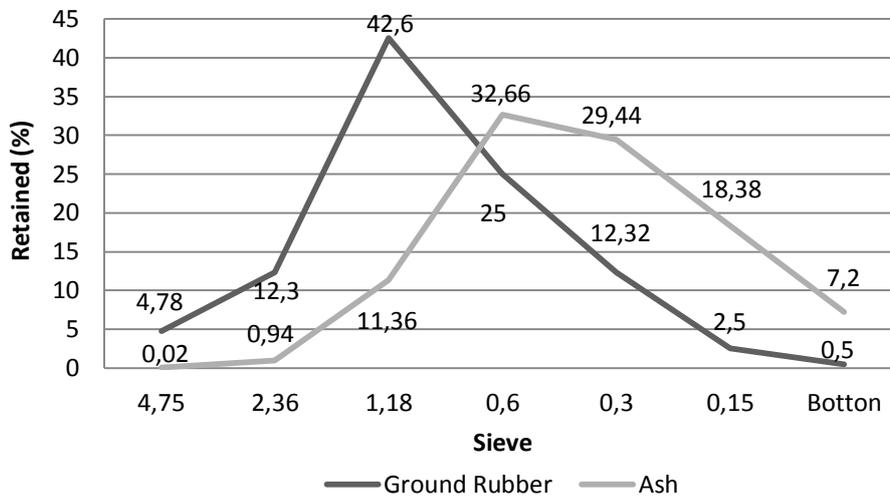


Figure 4: Percentage retained in sieves for ground rubber and ash.

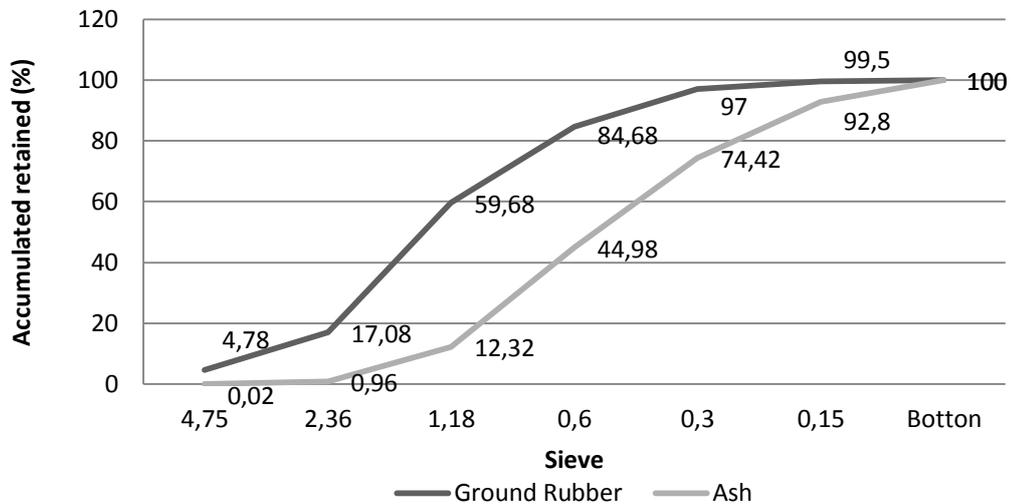


Figure 5: Percentage accumulated retained in sieves for ground rubber and ash.

Results of unit mass and specific gravity are presented in Table 2. The unit mass of the rubber is 340 Kg/m³ only 28.45% of your specific gravity. Values in accordance with Pinto et al. (2016) who found unit mass of 320 g/cm³ and specific gravity of 1150 g/cm³; Rahimi et al. (2016) found 464 g/cm³ and 1142 g/cm³. The values are obtained of unit weight of the ash and sieved ash correspond to 27.37% and 30.6% to specific gravity.

Table 2: Unit weight and specific gravity of ground rubber, Ash and Sieved Ash.

Materials	Unit mass (g/cm ³)	Specific gravity (g/cm ³)
Rubber particles	340(7.9)	1194,72(63.7)
Ash	330(12.7)	1205,64(89.12)
Sieved Ash	411(6.4)	1342,75(19.2)

* The means have a significant difference of confidence of 95% of ANOVA (variance analysis). Values in parentheses refer to standard deviation.

The ratios of water/plaster (w/p) was determined by flow table method, composition conforming for all samples. The ratio of (w/p) for R(reference) was 0.45, and the according Table 3, ratio (w/p) Decreases with the addition of crushed rubber, gray and sifted gray, because when added to the gypsum matrix they cause partial substitution of plaster for waste tire, causing a reduction of water proportional to gypsum (SERNA et al., 2012).

Table 3: Mix design for each developed composite.

Samples	Gypsum (%)	Tire particles (%)	Ash (%)	Sieved Ash (%)	Water/Plaster (w/p) ratio (%)
Reference	100	0	0	0	0.45
Ground rubber5%	95	5	0	0	0.43
Ground rubber10%	90	10	0	0	0.39
Ground rubber15%	85	15	0	0	0.38
Ground rubber20%	80	20	0	0	0.36
Sieved ash2,5%	97.5	0	0	2.5	0.44
Sieved ash5%	95	0	0	5	0.43
Sieved ash7,5%	92.5	0	0	7.5	0.41
Sieved ash10%	90	0	0	10	0.39
Ash2,5%	97.5	0	2.5	0	0.44
Ash5%	95	0	5	0	0.43
Ash7,5%	92.5	0	7.5	0	0.42
Ash10%	90	0	10	0	0.40

All the obtained results of the flexural test fulfilled the EN 13279-1(2008) standard, which defines (1Mpa) as the minimum value accepted, according Table 4.

Table 4: Results of compressive and flexural strength and density.

Samples	Compressive strength(Mpa)	Flexural strength(Mpa)	Density(g/cm ³)
Reference	19.06 (0.79)	6.58(0.28)	1.53(0.13)
Ground rubber5%	12.19 (1.31)	4.84(0.07)	1.49(0.04)
Ground rubber10%	11.10 (0.59)	4.42(0.11)	1.42(0.42)
Ground rubber15%	7.81 (0.33)	3.19(0.23)	1.38(0.14)
Ground rubber20%	6.82 (0.65)	2.95(0.03)	1.35(0.9)
Sieved ash2,5%	14.33 (0.47)	6.64(0.09)	1.50(0.15)
Sieved ash5%	13.26 (0.98)	6.34(0.4)	1.44(0.5)
Sieved ash7,5%	12.49(1.12)	6.19(0.31)	1.41(0.62)
Sieved ash10%	10.32(0.82)	5.55(0.14)	1.39(0.34)
Ash2,5%	13.55 (1.23)	5.49(0.18)	1.49(0.43)
Ash5%	12.73(1.11)	5.12(0.21)	1.43(0.76)
Ash7,5%	12.25 (0.74)	4.98(0.18)	1.40(0.06)
Ash10%	9.19 (0.51)	3.64(0.19)	1.37(0.53)

* The means have a significant difference of confidence of 95% of ANOVA (variance analysis). Values in parentheses refer to standard deviation.

Confirming the results of, where the of compressive strength decreased very in relation to those of flexural strength and density (RIVERA et al., 2014). The mechanical and density , Figura 6, conforming (SERNA et al., 2012; PINTO et al. 2016). Addition of rubber particles leads to a decrease in mechanical properties of gypsum plaster, but as this paper shows, small variations in (w/p) ratio are much more relevant in mechanical properties than the presence of rubber particles in the studied percentages.

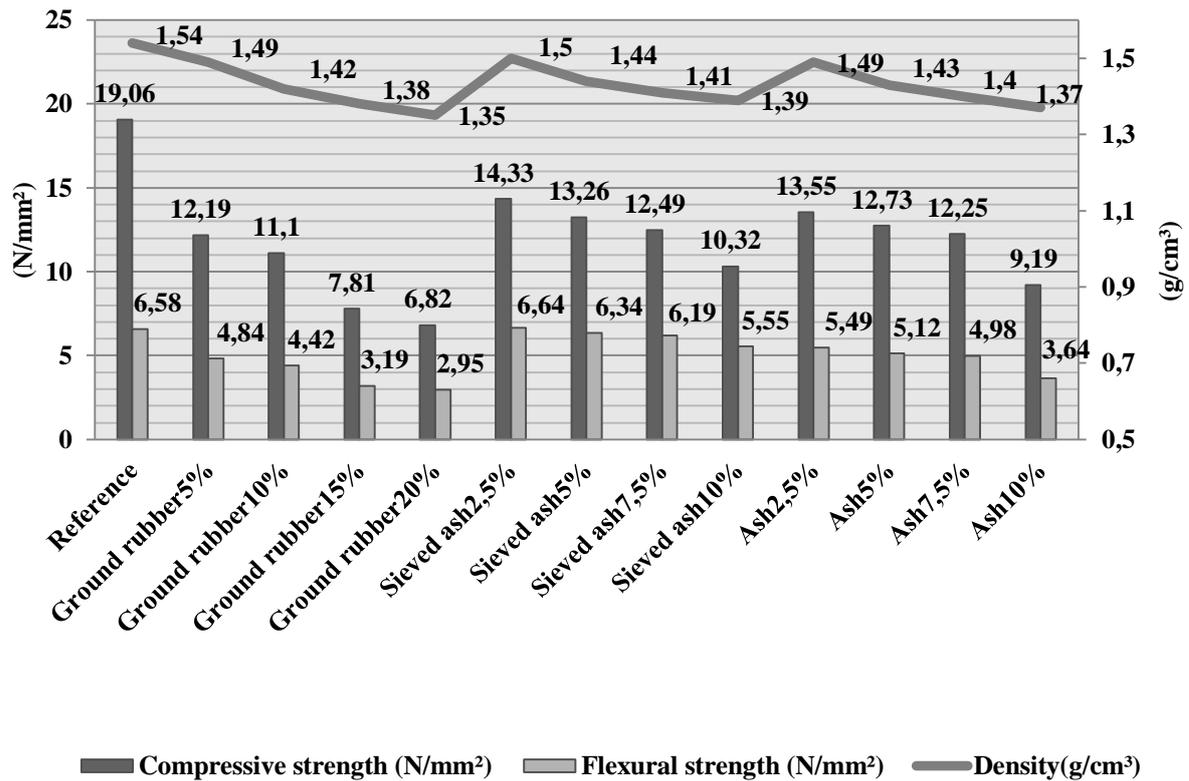


Figure 7: Results of Relation Compressive strength, Flexural strength and Density

Consequently, the addition of waste tires to the gypsum matrix implies a decrease in density in all processed samples, due to the low density of ground rubber, ash and sieve, ranging from 1.35 to 1.53 according to Table 4 and with the highest value found in the reference and the lowest in the addition of 20% ground rubber. But, in the same proportion, the lowest density is found in the composites with the ash, conformed shows Figure 7. These values are not compatible with those found by (RIVERO et al. 2014), 0,88 and 1,03 g/cm³. This probably because of the difference in the (w / p) ratio because in this study it was between 0.70 and 0.76, but confirmed those found by Pinto et al. (2016), who used a (w / p) ratio between 0.60 and 0.56.

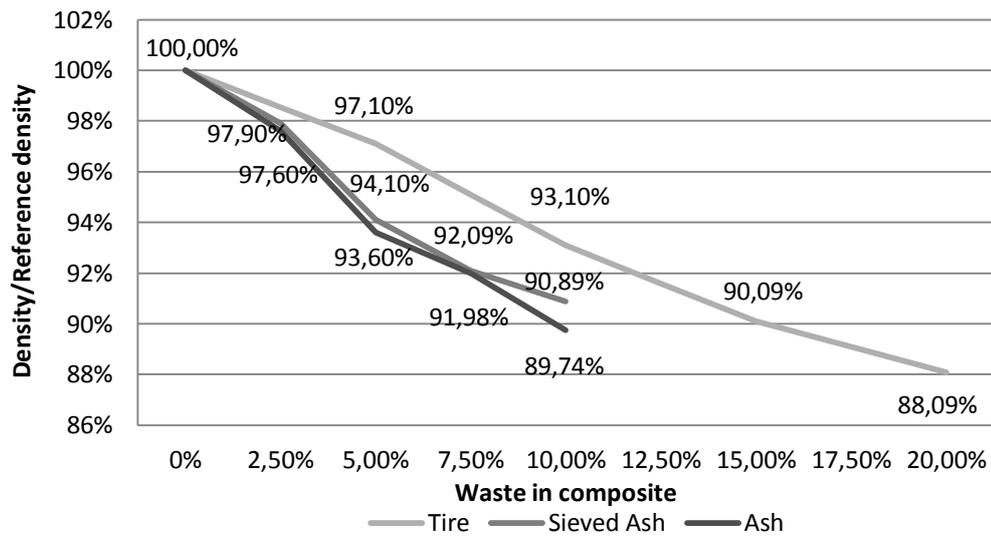


Figure 7: Results of density.

Treatments with sieved ash obtained the best results, being the sieve ash 2.5% treatment superior of the reference, the results of the Ash were on average 81.91%, inferior to those of the Sieved ash, and the specimens with crushed rubber found the worst results were somewhat lower and the ground rubber with the worst result, ground rubber 20% having the lowest value obtained, with a value of 44.41% Sieved ash 2.5 according to Figure 8.

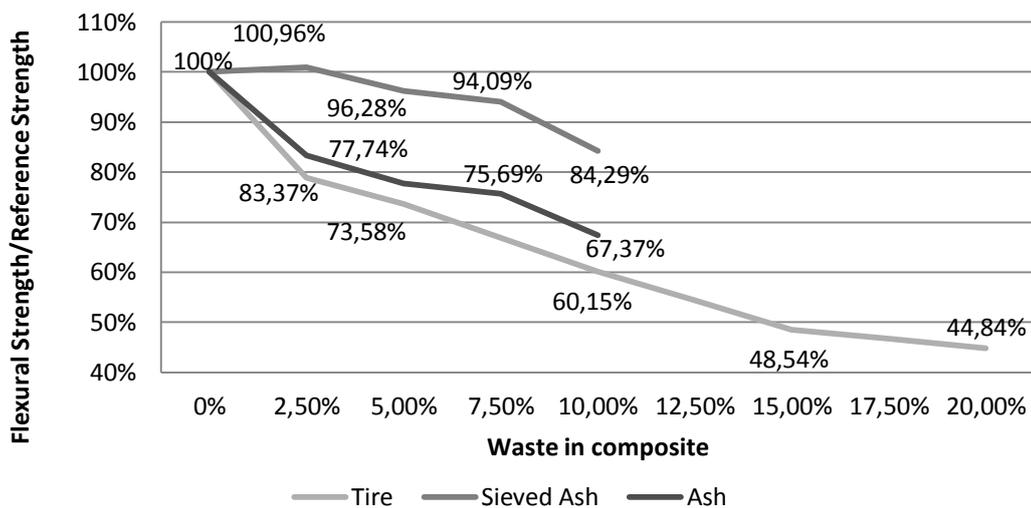


Figure 8: Results of Flexural strength

The compressive strength of the samples resulted in less than the reference standard requirements of 2Mpa EN 13279-1(2008). Values and averages are presented in Table 4. The behavior of the compressive strength white Sieved ash 2.5% is the better 75.17% of the reference and Ground rubber 20% the worse 35.80% to reference, and ash obtained intermediary value 94.42% of Sieved ash, according to Figure 9.

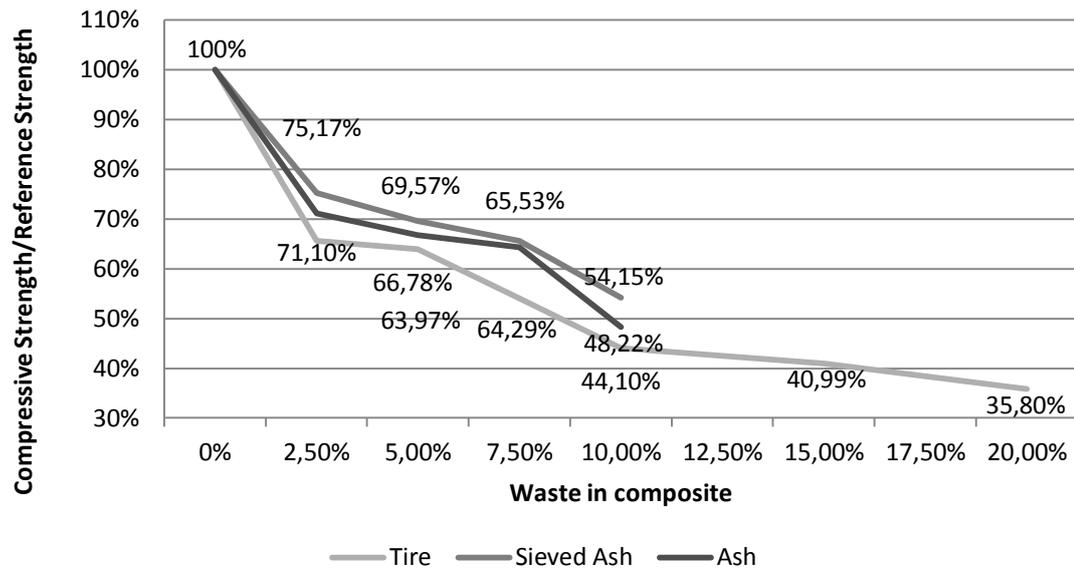


Figure 9: Results of Compressive strength

An incident radiation was measure with a value of 207 w/m², and then the thermal conductivity was calculate for the specimens as described in Table 6. All the treatments obtained better results than the reference, being Ash10, with lower thermal conductivity and all composites are according EN-13279-1(2006) observed in Figure 10, which establishes a relation between density and thermal conductivity.

Table 6: Results of thermal conductivity.

Samples	Thermal conductivity (w/cm.°C)
Reference	0.24(0.02)
Ground rubber5%	0.22(0.03)
Ground rubber20%	0.19(0.04)
Sieved ash2,5%	0.21(0.23)
Sieved ash10%	0.20(0.08)
Ash2,5%	0.19(0.01)
Ash10%	0.18(0.07)

* The means have a significant difference of confidence of 95% of ANOVA (variance analysis). Values in parentheses refer to standard deviation.

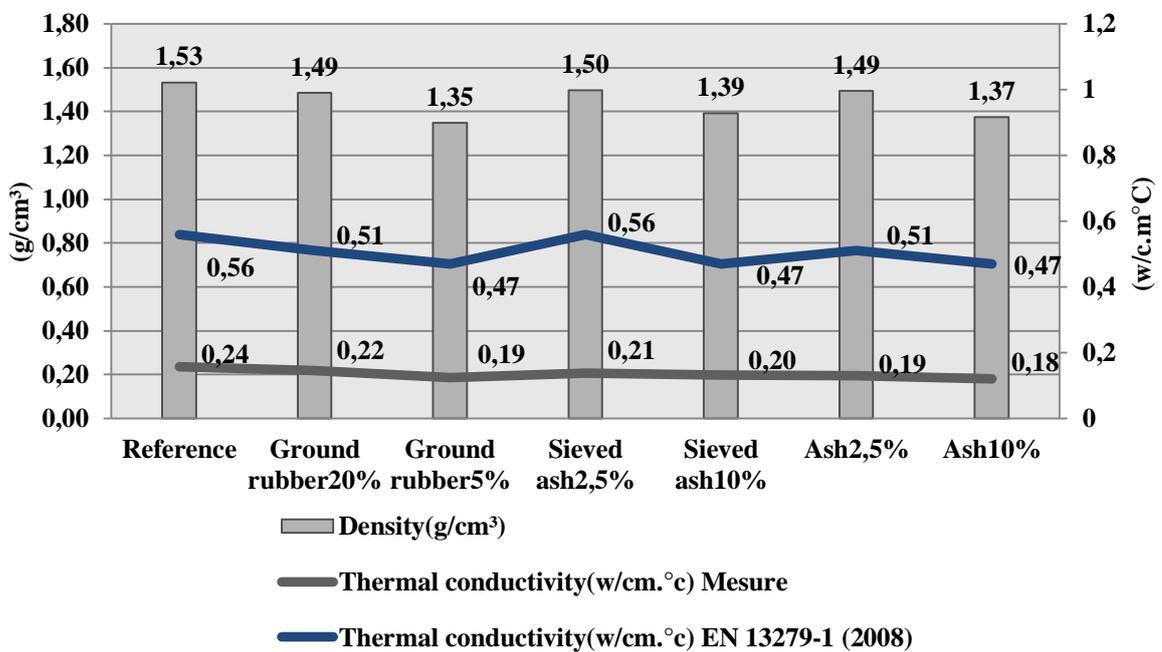


Figure 10: Results of relation between Thermal conductivity and density.

Pieces of sample were retire after cracking in a compressive test, specimens chosen of specimens with higher percentage of residues, this to facilitate better visualization of the gypsum residue interface. As can be seen in figure 11-A, there was the formation of gypsum crystals, smaller than those found in other proportions of water, as described by (ZHANG et al., 2016). This may explain higher flexural stress and compression density than those found in the literature (Fig. 11-B). In Figure 11-B, we can observe that there was no good adhesion between gypsum and Ground rubber particles, which indicates its lower mechanical properties (PINTO et al 2016, SERNA et al 2012, RIVERA et al., 2014). In Figure 11-C we see a good adhesion between gypsum crystals and Sieved ash, justifying its higher density, and higher values of resistance to bending and compression. In Figure 11-D we also see a

good adhesion between the ash but we can observe the existence of many empty spaces in the Ash and bigger size than Sieved ash, indicating its lower density and thermal conductivity

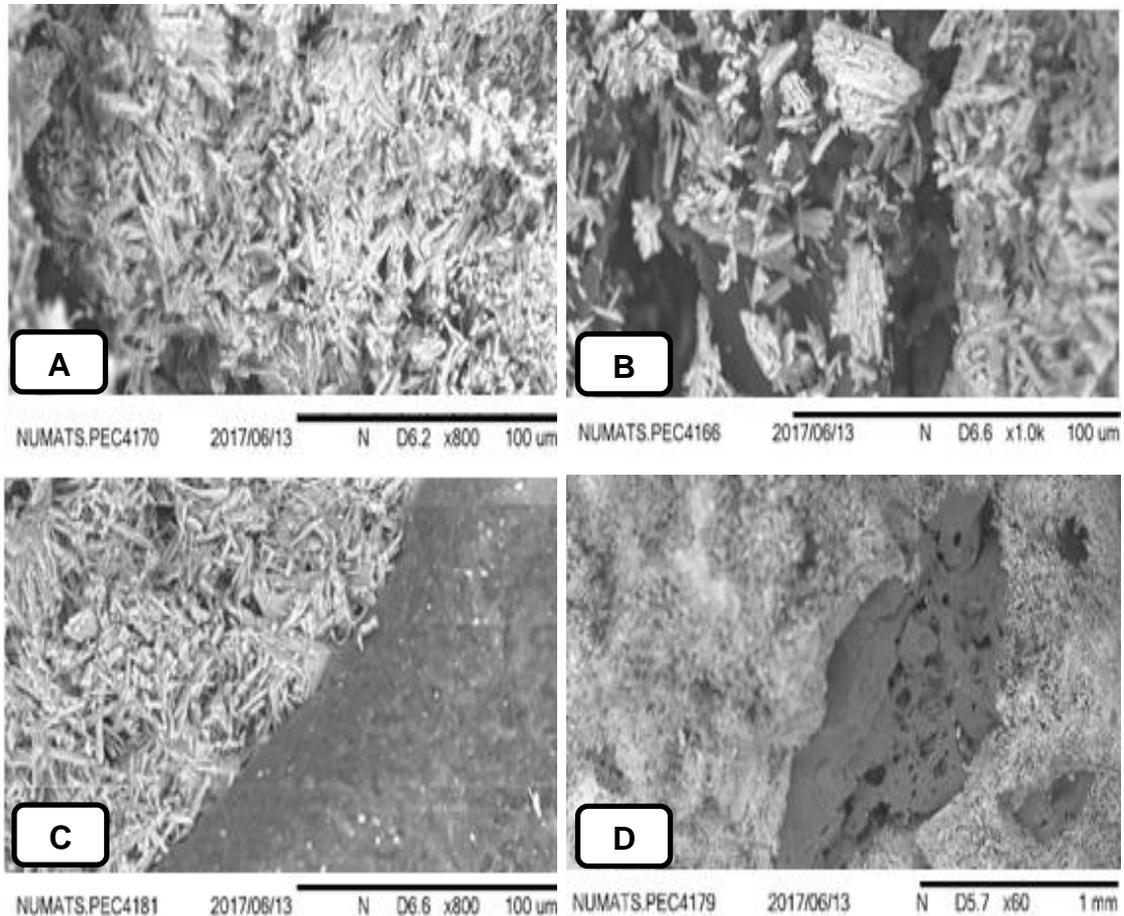


Figure 11: Scanning Electron Microscopy (SEM): Ordinary gypsum plaster (A); Tire waste particles (B); Sieved ash (C) and; non sieved-ash (D).

4. Conclusions

The study concludes that:

- The gypsum composite with sieved ash presented the best mechanical results, with a decrease in the compressive strength and flexural strength, with an increase in the percentage of residue, and a decrease in density and thermal conductivity.
- All the composites showed lower thermal conductivity than the reference. Showing that it is possible to use it as an insulating material.
- The high values of compressive strength and flexural strength suggest that these composites may have a promising future in the construction industry, requiring further studies to determine their durability.

5. References

- Adityaa L.; Mahliaa T. M. I.; Rismanchic B.; Nge H.M.; Hasane M.H.; Metselaare H.S.C.; Murazaf O.; Aditiyab H.B.; A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73, 1352–1365, 2017
- Al-Akhras, N. M.; SmadiI, M. M. Properties of tire rubber ash mortar. *Cement & Concrete Composites*, Barking, v. 26, p. 821-826, 2004.
- Aoudia k.; Saïd Azem s.; Nourredine A. H.; Gratton m.; Pettarin v.; Seghar s.; Recycling of waste tire rubber: Microwave devulcanization and incorporation in a thermoset resin. *Waste Management*, v.60, p.471-485, 2017.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004. Classificação de resíduos – Especificação. Rio de Janeiro, , 2004.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13207: Gesso para construção civil. Rio de Janeiro, 2003.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13280: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.
- Bernhoeft, L. F.; Gusmão, A. D.; Tavares, Y. V. P.; Influência da adição de resíduo de gesso no calor de hidratação da argamassa de revestimento interno. *Ambiente Construído*, v. 11, n. 2, p. 189-199, abr./jun. 2011.
- Chang NB. Economic and policy instrument analyses in support of the scrap tire recycling program in Taiwan. *J Environ Manage*, v.86, p.435–50, 2008.
- Dear R. J. de; Akimoto T.; Arens E. A.; Brager G.; Candido C.; Cheong K. W. D.; Li. B.; Nishihara N.; Sekhar S. C.; Tanabe S.; Toftum J.; Zhang H.; Zhu Y. Progress in thermal comfort research over the last twenty years. *Indoor Air*. 23, 442–461, 2013
- Dębska B.; Lichołai L.; The selected mechanical properties of epoxy mortar containing PET waste. *Construction and Building Materials*, v.94, p.579-588, 2015.
- Êugênio, T. M. C. Propriedades físicas, mecânicas e térmicas de argamassa de resvestimento com adição de resíduo de pneu. 2016. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.
- European Committee for Standardization. EN 13279-1, Gypsum Binders and Gypsum Plasters – Part 1: Definitions and Requirements, 2008.
- European Committee for Standardization. EN 13279-2, Gypsum Binders and Gypsum Plasters – Part 2: Test Methods, 2006.
- Fan KS, Lin CH, Chang TC. Management and performance of Taiwan’s waste recycling fund. *J AirWaste Manage Assoc*, v.55, p.574–82, 2005.

Ganjian, E.; Khorami, M.; Maghsoudi, A. A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*, Guildford, v. 23, n. 5, p. 1828-1836, 2009.

Lintz, R. C. C.; Gachet-Barbosa, L. A.; Seydell, M. R. R.; Jacintho, A. E. P. G. DE A. Avaliação do comportamento de concreto contendo borracha de pneus inservíveis para utilização em pisos intertravados. *Engenharia Civil*, v. 37, n. 12, p. 17–26, 2010.

Moustafa, A.; Elgawady, M. A. Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber. *Construction and Building Materials*, Guildford, v. 93, p. 249-256, Sept. 2015.

Mo K. H.; U. Alengaram U. J.; Jumaat M. Z.; Liu M. Y. J.; Lim J.; Assessing some durability properties of sustainable lightweight oil palm shell concrete incorporating slag and manufactured sand *Journal of Cleaner Production*, v.112, p.763-770, 2016.

Pinto N. A., Fioriti C. F., Bernabeu J.P., Jorge Luis Akasaki J. A., Evaluation of the matrix of plaster with incorporation of rubber tires for use in construction. *Revista Tecnológica Maringá*, v. 25, n. 1, p. 103-117, 2016.

Rahimi R. S.; Nikbin I. M.; Allahyari H.; Habibi T. S.; Sustainable approach for recycling waste tire rubber and polyethylene terephthalate (PET) to produce green concrete with resistance against sulfuric acid attack. *Journal of Cleaner Production* 126,166-177, 2016.

Rivero, a., j.; Báez, A., G.; Justo García Navarro, j., g.; New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation. *Construction and Building Materials*, 55, 146-152, 2014.

Ruppa R. F.; Vásquez N. G.; Lamberts R.; A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy Build* 105, 178–205, 2015.

Serna A.; Del Río M.; Gabriel P. J.; González M.; Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. *Construction and Building Materials*, 35, 633–41, 2012.

Silva, A. da R. Estudo térmico e de materiais na construção de casas populares com blocos confeccionados a partir de um composto a base de cimento, gesso, eps e raspa de pneu. 2010. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010

Weng YC, Chang NB. The development of sanitary landfill in Taiwan and its cost structure analysis. *Resour Conserv Recycl*, v.33, p.181–201, 2001.

Zhang X., Wang J., Wu J., Jia X., Du Y., Li H., Zhao B., Phase- and morphology-controlled crystallization of gypsum by using flue-gas-desulfurization gypsum solid waste. *Journal of Alloys and Compounds* v.674, p.200e206, 2016.

ARTIGO 3**STUDY OF TENSILE STRENGTH OF GYPSUM COMPOSITES WITH ADDITION
OF WASTES TIRE**

**Laércio Mesquita Júnior^{a, *}, Tony Matheus Carvalho Eugênio^a, Luciana Silva Villela^a,
Saulo Rocha Ferreira^a, Giovanni Francisco Rabelo^a**

^a Engineering Department, DEG, Universidade Federal de Lavras, P.O. Box 68506 – 21941-972, Lavras – MG, Brazil

Artigo submetido conforme normas da Revista Construction and Building Materials

March 2018

* Corresponding author: laerciomjr@gmail.com, Phone: + 55 (35) 98845-6540.

Abstract

The objective of this work was to evaluate the influence of the addition of tire rubber residues on the physical and mechanical behavior of composites with gypsum matrix, analyzing the tensile strength measured by the diametrical compression test, the modulus of elasticity and the initial bonding time and density. Composites were produced with the addition of 0%, 5%, 10%, 15% and 20% of ground rubber and 0%, 2.5%, 5%, 7.5% and 10% of ash that are collected after burning of the rubber particles for the production of energy, being that they were separated into two groups, Ash, collected after burning and sieved ash which are crushed and sifted ashes. The results of the treatments with 2.5% and 5% ground rubber had the best values of tensile strength, lower density than the reference and also lower modulus of elasticity, indicating possibility for the production of more resistant, ductile and mild Ash and Sieved Ash also showed potential for use, but as the results were similar, the energy expenditure to obtain the sifted ash is not justified. However, further studies are needed to enable the use of these composites on an industrial scale.

Keywords: wastes tire; gypsum composites; diametrical compression

1. Introduction

Today, due to growing concern for the environment, the concept of sustainable development stems from the efficient use of natural resources and new green technologies, which can be achieved through reduced consumption of raw materials, together with increased of waste recycling [1][2]. One of the most serious environmental problems affecting all countries is the disposal and storage of used tires, since hundreds of years of used tires are generated and accumulated worldwide [3]. If not disposed of properly, tire waste can accumulate water and can subsequently cause the spread of mosquito-borne diseases [4]. And many deposits, tire fires occur and cause serious air, water and soil pollution [5].

On the other hand, gypsum is an important building material because it is an inexpensive, easy to use, mechanically stable material, good thermal insulation properties and meets fire safety standards and can be recycled indefinitely [6]. Gypsum components are widely used in current buildings worldwide. However had very limited studies in literature concerning the mechanical properties of composites even their increasing importance in different areas of civil engineering [7]. The study of the mechanical properties of the solids is fundamental to be able to evaluate the use of a material for the purpose that is designated. In general, the tensile strength of a material is determined by the uniaxial tensile test. However, in the case of fragile materials this test is observed to be incorrect due to dispersion of results, eccentricity of loading, tightening difficulties, greater sensitivity to misalignments and position defects. In order to solve this problem, a diametral compression test was developed that measures the tensile strength indirectly and is currently being used for simplicity [8]. According [9] the diametrical compression test is a useful method to determine the tensile strength of ceramic materials.

The diametral compression test is very simple. A circular disk is diametrically compressed along its diameter thereby generating a maximum tensile stress perpendicular to the loading direction in the mid-region of the specimen, (see Figure 1). The strength (σ) is calculated using Eq. 1 where F is the fracture load, D is the disk diameter and L is the length disk thickness [10].

$$\sigma = \frac{(2 \times F)}{(\pi \times D \times L)} \quad (1)$$

The present work aims to evaluate the tensile strength by diametral compression, elasticity module and density of gypsum composites with wastes of tires and to analyze the interference of the residues.

2. Experimental Program

2.1. Materials and processing

The tire waste used in the present study was divided and processed in three different ways. All waste was obtained by tire retracted industry Bkerp, and processed in the UEPAM (Experimental Unit of Production of Panels of Wood) located in the Federal University of Lavras (UFLA). The first waste, denominated “tire waste particles” was used without any processing, presenting a nominal size of 1.5 mm (see Figure 2a). The second named “Tire ash” was used without sieved. The material presented a nominal size 1,15 mm (see Figure 2b). The Third was the material obtained from incineration of the raw waste, named “Sieved ash”. The product from the incineration was then sieved to a maximum size of 200 mesh (75 μm) (see Figure Fc)[11].

The incineration process was performed in an Equipment to which the particles were placed in an enclosed container, coupled to the filter base and structured so as to prevent the release of noxious gases or particulates without some treatment to the external environment, directing all the smoke to pass through the gas scrubber at UEPAM-UFLA

The used matrix presented a mix design of 1:0.39 until 0.45 (gypsum: water/plaster). A commercial gypsum from União company was used (40 kg/bag). The variation of the water/plaster was determined by knife method according to the procedure described in standard EN 13279-2 (2004). For each proportion, (see table 1) a different amount of water was added to keep a workability based in a spread (flowtable) between 160mm and 170mm. The mixtures were produced in a room with variable temperature ($21 \pm 5^\circ\text{C}$) using a becker with capacity of 5 dm³. The mixing procedure is described as follow. All dry components were homogenized in the becker. The water were added and mixed for 1 minute.

2.3. Testing

2.3.1 Setting Time

Determination of setting time by blade method adapted to [12]. This method consists of preparing the gypsum paste in a receptacle with the ratio of water / gypsum determined. Pour the paste into a smooth glass plate (minimum dimensions of 400mm x 200mm), to form a cake with a diameter between 100 mm and 120 mm and thickness with about 5 mm. Using a sheet with a thickness of approximately 1mm, cut the slurry with the blade at certain times, (1/20 of the estimated time for handle). As soon as the plaster mixture begins to water, time until the edges cut by the blade are no longer present. Recorded this time, this will be the takeover time.

2.3.2 Density

The density of the composites, adapted from standard [13], was evaluated. The test was performed for the 3 specimens of each of the treatments made for the flexural and compression tests. After 7 days and after being removed from the oven for 24h at 40 ° C, the specimens were then weighed on a scale with a resolution of 0.1g and measured lengths of height, diameter and length in 3 Different areas of life, with the aid of a pachymeter, and is calculate by Equation 2:

$$D = \frac{M}{V} \times 1000 \quad (2)$$

Where, D = Mass density (Kg / m³), M = Mass (g), V = Volume of the test piece (cm³)

2.3.3 Diametrical compression

The cylindrical specimens were tested after 7 days of their preparation and placed in a greenhouse 24 hours before, at a temperature of 40 ° C. The specimen were sawn by bench saw in 3 parts of 2,5 cm in height. They were placed so that the axial plane defined by diametrically opposed generators, which received the loading, coincides with the load application axis. They secured between the machine plates and test specimens the two strips

of aluminum plate. The strips were used for only one determination. The load was applied with constant tension increase at a speed of (0.05 ± 0.02) MPa / s until the rupture of the test pieces, adapted [14]. The diametral compression tensile strength should be calculated by Equation 3:

$$\sigma = \frac{(2 \times F)}{(\pi \times d \times l)} \times 100 \quad (3)$$

σ = Tensile strength by diametrical compression, in megapascals (MPa). F = Maximum force obtained in the test, expressed in newtons (N). D = Diameter of the specimen, expressed in millimeters (mm). L = Length of test piece, expressed in millimeters (mm).

Modulus of Elasticity (E) was calculated according to [15], and calculated by equation 4:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \times 100 \quad (4)$$

E = modulus of elasticity or modulus of young, in (GPa). σ = Tensile strength by diametrical compression, in (MPa). ε = elastic deformation (mm/mm).

2.3.4 Scanning electron microscopy (SEM)

The microstructure was investigated using an SEM Hitachi TM3000. The microscope was operated under an accelerating voltage of 15kV. A pre-coating with a thin layer of approximately 20 nm of gold was done to make the fiber conductive and suitable for analysis. , for each single composite used in the pullout and tensile test, an piece of the composite immediately next to the one tested for was used to analyzed Fiber-matrix interface zone.

2.4 Statistic analysis

To evaluate the tensile strength of the modulus of elasticity and the density of the composites produced, the data were submitted to analysis of variance and the Scott-Knott's mean test at 5% significance. The data were statistically evaluated using the Sisvar software.

3. Results and discussion

The experimental results of the measurement of the initial setting time of the plaster composites are shown in Figure 3. The results are in percentage, being adopted 100% in the value obtained in the reference and with the values of the treatments proportional to this one. The Ash 2.5% obtained higher value 82% and GroundRubber 20% lower value obtained. As we can see there was a decrease of the Initial Setting Time with the increase of the addition of residues. In this study, the use of natural rubber in gypsum composites has been found to be a major cause of the reduction [16].

As a consequence, the addition of tire residues to the gypsum matrix implied a significant decrease in density in all samples processed due to the density of the residues: GroundRubber 1184.72 g/cm³, Ash 1205.64 g / cm³ and SievedAsh 1372.75, g/cm³ had a lower value than Reference 1.55 g / cm³ (see Table 1. GroundRubber20% treatment found the lowest value 1.35 g / cm³, which was significantly equal to Ash10% (1.35 g / cm³), the composites SievedAsh2,5% and ASH2,5% obtained the highest values, which were the same as Reference. [17] found different values for the composites with ground rubber, varying between 0.88 and 1.03 g / cm³, probably because of the difference in relation (w / p), because in its study it was between 0.70 and 0.76, and in this was determined 0.45 by flow-table method [12]. The studies of [18], which used a relation (w / p) between 0.60 and 0.56, confirmed our findings.

The results of the diametral compression tensile strength can be seen in Table 2, where the highest value obtained was GroundRubber10% (2.81 MPa), being statistically equal to Reference, GrondRubber5%, Ash2.5%, Ash5%, SievedAsh2 , 5% and SievedAsh5%. The values found in the treatments with smaller quantities of Ash and SievedAsh residues were expected, since composites of gypsum basement with addition of the rubber residue with smaller diameter have higher mechanical resistance [17]. The increase in the volume of added residues will significantly decrease the mechanical properties, [19][18]. This confirms our results, as we found with lower tensile strength the GroundRubber15% (1.57Mpa) and GroundRubber20% 1.64Mpa) without statistical difference with Ash7,5%, Ash10%, SievedAsh7,5% and SievedAsh10%. However, the results of GroundRubber5% and GroundRubber10% were not expected, but these numbers can be attributed to the fact that the rubber particle behaved as a reinforcing material, as shown in Figure 6, this behavior was also observed in previous studies (Serna In addition, the composites with ground rubber present different characteristics to the other treatments with higher energy retention, Figure 5.

Data concerning the modulus of elasticity can be seen in Table 2, where the Reference obtained significantly higher values than the treatments, 11.91 GPa, and the worst result found in GroundRubber20% (3.90GPa), according to the found with [19] concluded that additions of 20% of rubber in gypsum composites produce decreases of 50% in the modulus of elasticity and studies by [20] show a decrease modulus of elasticity with increasing addition of rubber residue.

The relationship between density and tensile strength can be seen in Figure 5, in the composites with addition of ground rubber of 5% and 10% there was an increase in tensile strength even in the case of density reduction, contrary to [21], Which reports a decrease in the mechanical resistance of the plaster composites with the reduction of the density, after GroundRubber10% observed a great reduction in tensile strength, in the other treatments it can be seen that there is a relation between density and tensile strength. In the relation between density and modulus of elasticity, see Figure 5, except for the behavior of the modulus of elasticity of the treatments in relation to the treatments, where abrupt decrease is observed, which does not occur in relation to the density, found proportional relation of the properties shown according to was also found by [22].

In Figure 5, where the stress-strain curves were observed, where the curves of the Ash and Sivied Ash composites showed similar behavior of the Reference, however, the composites with Gorund rubber showed more ductile behavior described by [7].

The interface between the gypsum matrix and the added residues was studied by SEM (Scanning Electron Microscopy). In Figure 7-a, we have seen that the formation of gypsum crystals, which the smaller are, the better the mechanical properties, and for which a lower ratio (w / p) is required, these are smaller than those found in larger ratios. (ZHANG et al., 2016). In Figure 7-b we can see many voids in the gypsum interface with the ground rubber, which may explain the great drop of tensile strength with volume greater than 10%, something that does not happen in the composites with Ash and Sivied Ash, since there is a good interface between the residues and the gypsum matrix, Figure 7-c, Figure 7-d. However, it can be observed that the ash particles are larger than the ash particles and also have pores, thus reducing their tensile strength, lower modulus of elasticity and lower density.

4. Conclusions

The work investigated the effect of the addition of tire residues on tensile strength, modulus of elasticity, setting time and density in gypsum composites. The following conclusions can be drawn from the present research:

- Due to the residues of ground rubber, ash and sived ashes, they present a lower density than gypsum, all the treatments presented lower density in relation to the reference, and also their decrease with the addition of residues The fiber tensile strength increased with the application of all treatments.
- The composites developed with 2.5% and 5% of ground rubber had higher values of tensile strength, showing a behavior as reinforcement material.
- All treatments obtained lower values of modulus of elasticity, but the treatments with ground rubber presented a more ductile behavior
- The initial setting of the treatments obtained significantly lower values than the reference, which may be a problem for commercial use
- The results of the treatments with ground rubber had the best values of tensile strength, lower density than the reference and also lower modulus of elasticity, indicating possibility for the production of more resistant, ductile and mild Ash and Sived Ash also showed potential for use, but as the results were similar, the energy expenditure to obtain the sifted ash is not justified. However, further studies are needed to enable the use of these composites on an industrial scale.

Acknowledgements

The authors thank the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES, Brazilian National Agency Regulatory of Post-graduate strictu sensu) for their support.

References

- [1] Dębska B, Lichołai L, The selected mechanical properties of epoxy mortar containing PET waste. *Construction and Building Materials*, 2015;94:579-588.
- [2] Mo KHU, Alengaram UJ, Jumaat MZ, Liu MY J, Lim J, Assessing some durability properties of sustainable lightweight oil palm shell concrete incorporating slag and manufactured sand *Journal of Cleaner Production*, 2016;112:763-770.

- [3] Aoudia K, Saïd Azem S, Nourredine AH, Gratton M, Pettarin V, Seghar S, Recycling of waste tire rubber: Microwave devulcanization and incorporation in a thermoset resin. *Waste Management*, 2017:471-485.
- [4] Chang NB, Economic and policy instrument analyses in support of the scrap tire recycling program in Taiwan. *J Environ Manage*, 2008:86:435–50.
- [5] Fan KS, Lin CH, Chang TC, Management and performance of Taiwan's waste recycling fund. *J AirWaste Manage Assoc*, 2005:55:574–82.
- [6] Schug B, Mandel K, Schottner G, Shmeliov A, Nicolosi V, Baese R, Pietschmann B, Biebl M, Sextl G, A mechanism to explain the creep behavior of gypsum plaster. *Cement and Concrete Research* 2017:98:122–12.
- [7] Petrone C, Magliulo G, Manfredi G, Mechanical Properties of Plasterboards: Experimental Tests and Statistical Analysis, *Thermal Science and Engineering Progress* 2017:1:59–65.
- [8] Reddy S, Mukunda PG, Aithal K, Balachandra SP, Strength evaluation of flake and spheroidal graphite cast irons using diametral compression test, *Jornal of Materials Research and Technology*, 2017:6:1:96–100.
- [9] Sgambitterra E, Lamuta C, Candamano S, Pagnotta L, Fracture toughness of glasses as measured by the SCF and SEPB methods, *Journal of the European Ceramic Society* :201737:4243–4257.
- [10] Corradini A, Cerni G, D'Alessandro A, Ubertini F, Improved understanding of grouted mixture fatigue behavior under indirect tensile test configuration, *Construction and Building Materials* 2017:155: 910–918.
- [11] ÊUGENIO TMC, Propriedades físicas, mecânicas e térmicas de argamassa de revestimento com adição de resíduo de pneu, *Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais)-Universidade Federal de Lavras, Lavras*, 2016:137.
- [12] EN 13279-2:2014. Gypsum binders and gypsum plasters – Part 2: Test methods.
- [13] ABNT. NBR 13280: 2005. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes etetos - Determinação da densidade demassa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro.
- [14] ASTM standard D3967:2016, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimen, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [15] ASTM E111:2017 Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [16] Medina NF, Barbero-Barrera MM, Mechanical and physical enhancement of gypsum composites through a synergic work of polypropylene fiber and recycled isostatic graphite filler. *Construction and Building Materials*, 2017:131: 165–177, 2017.

- [17] Rivero AJ, Báez AG, Navarro JG, New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation. *Construction and Building Materials*, 2014;55:146-152.
- [18] Pinto N A, Fioriti CF, Bernabeu JP, Akasaki JL, Evaluation of the matrix of plaster with incorporation of rubber tires for use in construction. *Revista Tecnológica Maringá*, 2016;25:1:103-117.
- [19] Serna A, Del Río M, Gabriel PJ, González M, Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres, *Construction and Building Materials*, 2012;35:633–41.
- [20] Jian-he X, Yong-chang G, Li-sha L, Zhi-hong X Compressive and flexural behaviours of a new steel-fibre-reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber, *Construction and Building Materials*, 2015;79: 263–272.
- [21] Morales-Conde MJ, Rodríguez-Liñán C, Pedreño-Rojas MA, Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works, *Construction and Building Materials*, 2016;114:6–14.
- [22] Bicer A, Kar F, Thermal and mechanical properties of gypsum plaster mixed with expanded polystyrene and tragacanth, *Thermal Science and Engineering Progress*, 2017;1:59–65.
- [23] Zhang X, Wang J, Wu J, Jia X, Du Y, Li H, Zhao B, Phase- and morphology-controlled crystallization of gypsum by using flue-gas-desulfurization gypsum solid waste. *Journal of Alloys and Compounds* 2016;674:200-206.

Tables

Table 1: Mix design for each developed composite. Means followed by the same letter do not differ by Scott-knott test at 5% significance. Values between parts represent the standard deviation.

Treatment	Gypsum (%)	Tire particles (%)	Ash (%)	Sieved Ash (%)	Water/Plaster (w/p) ratio (%)
Reference	100	0	0	0	0,45
Ground rubber5%	95	5	0	0	0,43
Ground rubber10%	90	10	0	0	0,39
Ground rubber15%	85	15	0	0	0,38
Ground rubber20%	80	20	0	0	0,36
Sieved ash2,5%	97,5	0	0	2,5	0,44
Sieved ash5%	95	0	0	5	0,43
Sieved ash7,5%	92,5	0	0	7,5	0,41
Sieved ash10%	90	0	0	10	0,39
Ash2,5%	97,5	0	2,5	0	0,44
Ash5%	95	0	5	0	0,43
Ash7,5%	92,5	0	7,5	0	0,42
Ash10%	90	0	10	0	0,40

Table 2: Elasticity Module (MOE), tensile strength and density. Means followed by the same letter do not differ by Scott-knott test at 5% significance. Values between parts represent the standard deviation.

Treatment	MOE (GPa)	Tensile strength (MPa)	Density(g/cm ³)
Reference	11,91(0,74)A	2,28(0,12)A	1,55(0,09)A
Ground rubber5%	5,50(0,12)B	2,57(0,07)A	1,49(0,07)B
Ground rubber10%	5,09(0,20)B	2,81(0,04)A	1,39(0,11)C
Ground rubber15%	4,66(0,30)B	1,57(0,07)B	1,38(0,01)C
Ground rubber20%	3,90(0,10)C	1,64(0,05)B	1,36(0,33)D
Sieved ash2,5%	7,77(0,37)D	2,31(0,10)A	1,51(0,17)B
Sieved ash5%	6,96(0,12)E	2,31(0,15)A	1,45(0,22)E
Sieved ash7,5%	5,54(0,16)B	1,91(0,21)B	1,40(0,14)C
Sieved ash10%	5,08(0,31)B	2,07(0,45)B	1,38(0,04)C
Ash2,5%	6,07(0,23)B	2,41(0,02)A	1,50(0,13)B
Ash5%	5,63(1,07)B	2,23(0,64)A	1,42(0,41)F
Ash7,5%	5,04(0,88)B	1,83(0,32)B	1,39(0,21)C
Ash10%	4,62(0,73)C	2,00(0,29)B	1,36(0,09)D

Figures

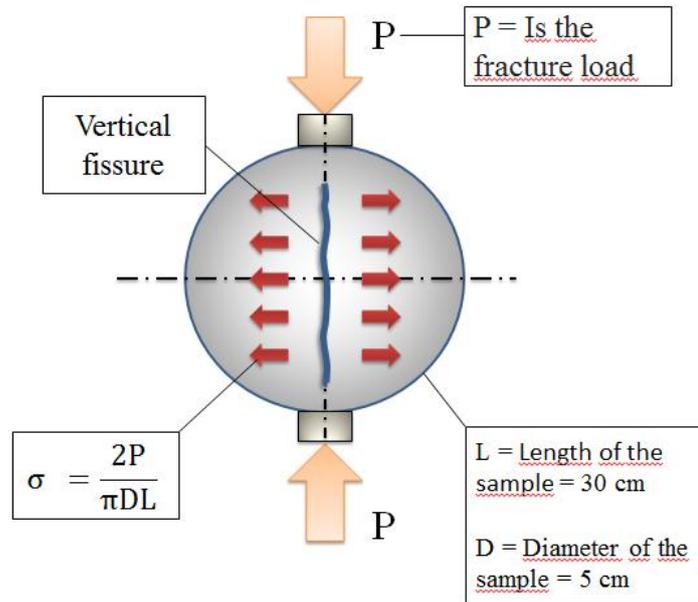


Figure 1. Application of load in diametral compression test.

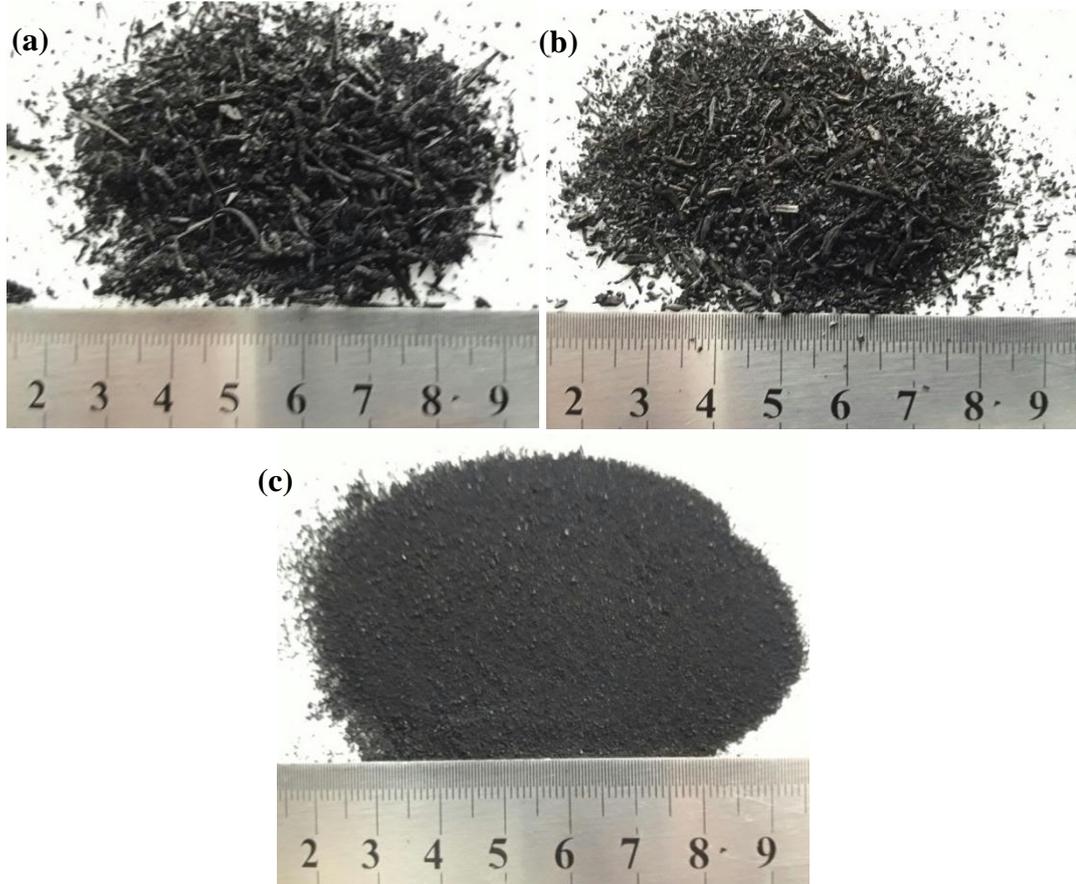


Figure 2. Figure 1: Image of raw material, named “tire waste particles (a); Image of Tire ash (b) and sieved ash with a maximum size of 200 mesh (c).

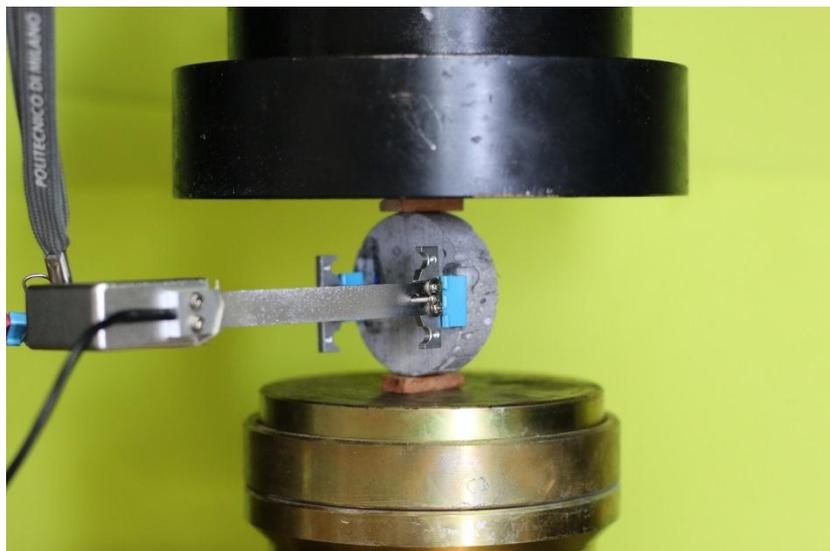


Figure 3. Coupled extensometers in the sample.

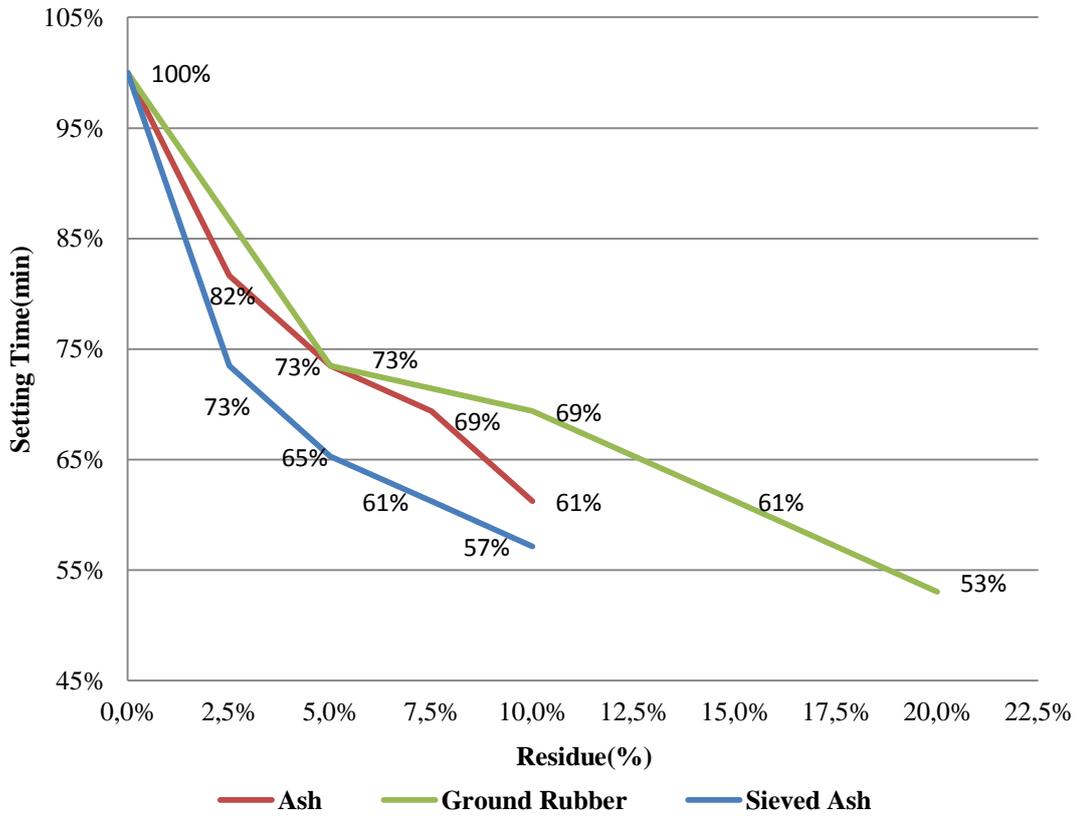


Figure 3. Variation of Inicial Setting Time relative to reference.

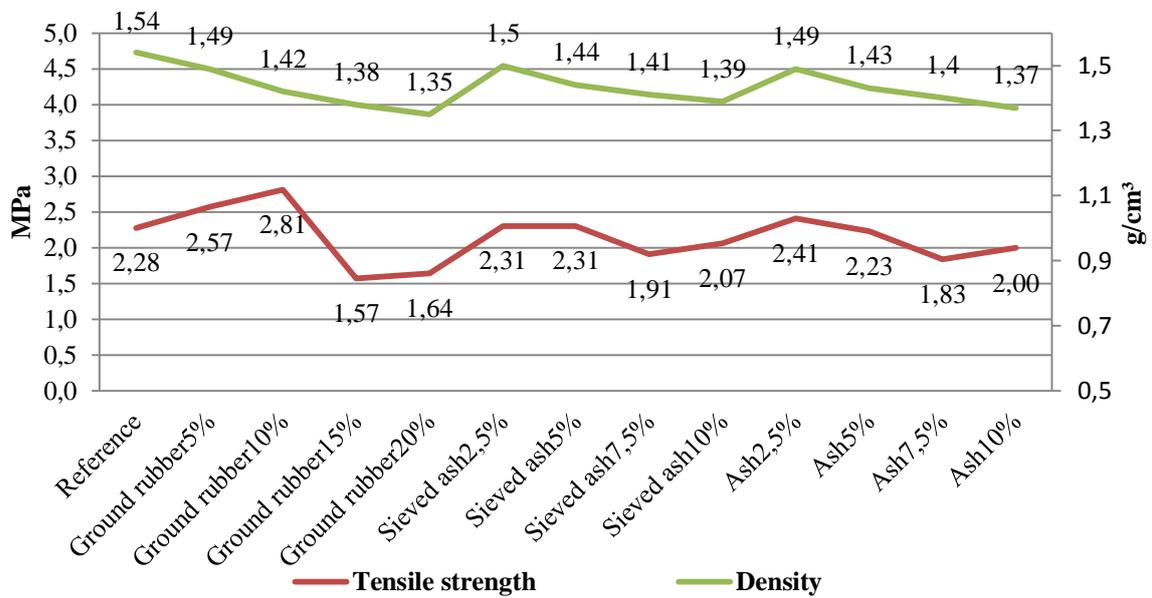


Figure 4. Relation of Tensile Strength and Density.

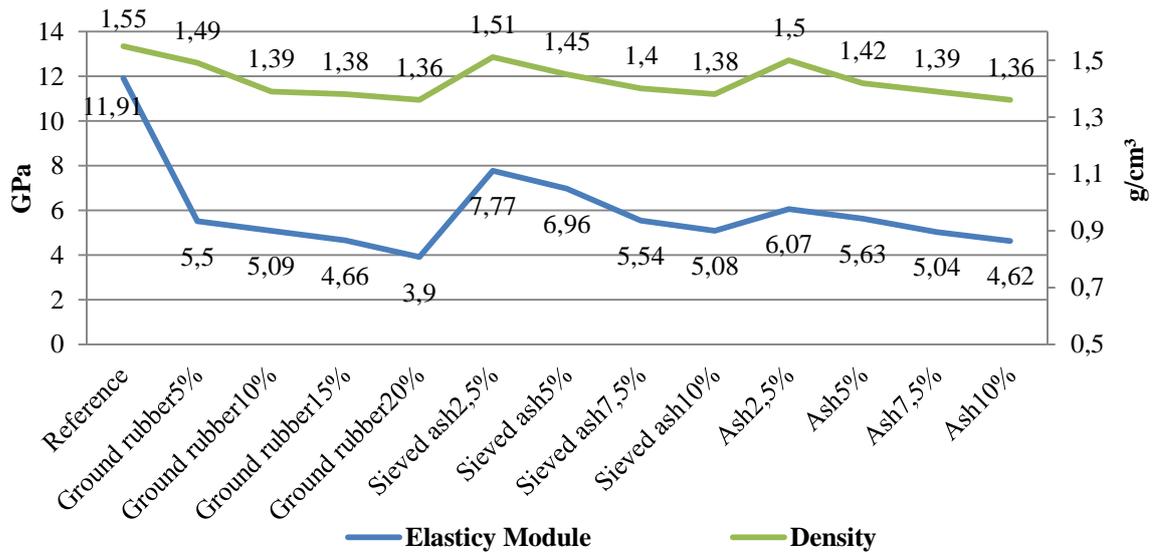


Figure 5. Relation of Elasticity Module and Density.

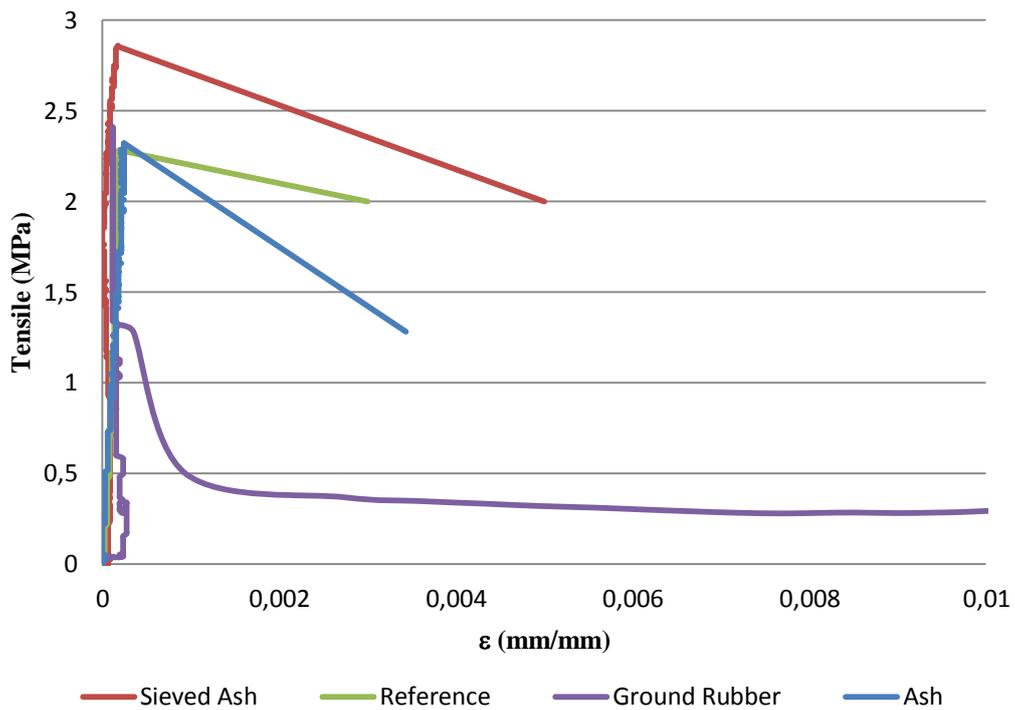


Figure 5. Characteristics Stress-strain curves of the treatments.

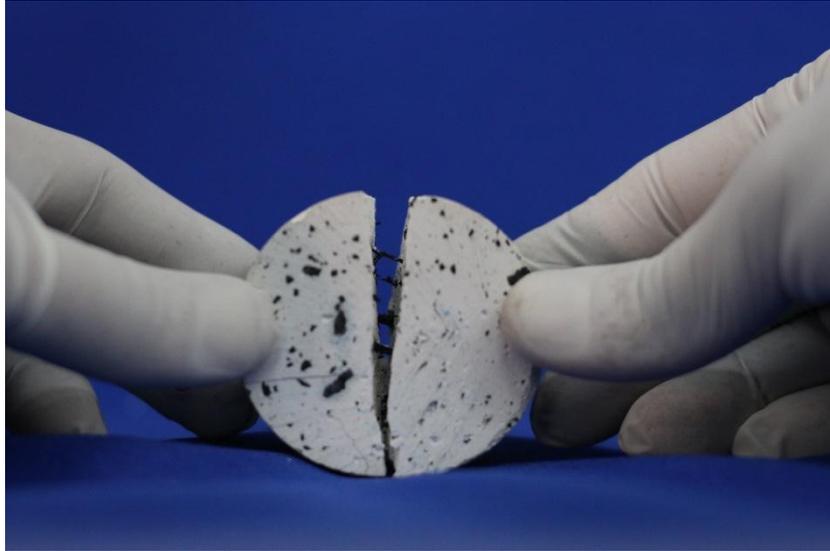


Figure 6. Rubber particles as a reinforcing function in the composite

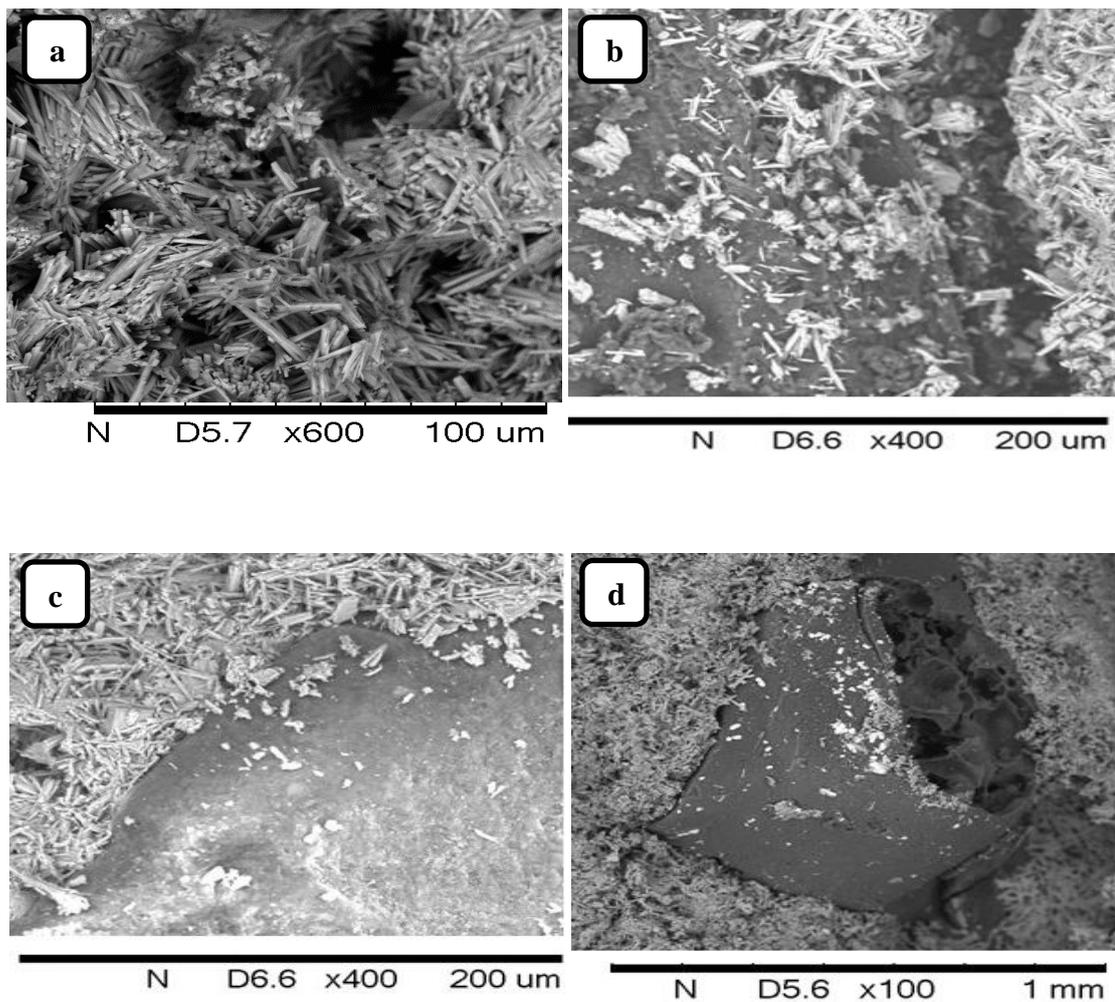


Figure 7. Micrograph showing the particles interface in the matrix of gypsum.