



**DAVID CARDOSO DOURADO**

**ESTUDO DE FIBROCIMENTO COM RESÍDUOS  
DE PNEU**

**LAVRAS - MG**

**2015**

**DAVID CARDOSO DOURADO**

**ESTUDO DE FIBROCIMENTO COM RESÍDUOS DE PNEU**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Doutor.

Dr. Giovanni Francisco Rabelo

Orientador

**LAVRAS - MG**

**2015**

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

Dourado, David Cardoso.

Estudo de fibrocimento com resíduos de pneu / David Cardoso  
Dourado. – Lavras : UFLA, 2015.  
115 p. : il.

Tese(doutorado)–Universidade Federal de Lavras, 2015.  
Orientador(a): Giovanni Francisco Rabelo.  
Bibliografia.

1. Fibrocimento. 2. Resíduos. 3. Borracha. 4. Cinzas. 5.  
Desempenho. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

**DAVID CARDOSO DOURADO**

**ESTUDO DE FIBROCIMENTO COM RESÍDUOS DE PNEU**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 08 de maio de 2015.

Dr. Rafael Farinasse Mendes	UFLA
Dr. Luciana Barbosa de Abreu	UFLA
Dr. Inácio Maria Dal Fabbro	FEAGRI
Dr. Lourival Marin Mendes	UFLA

Dr. Giovanni Francisco Rabelo  
Orientador

**Lavras – MG**  
**2015**

## DEDICATÓRIA

Minha mãe Noêmia.  
Meu Tio, Padre Cardoso.  
Minha esposa Dani.

## AGRADECIMENTOS

A Deus e aos anjos, por tudo o que sou e tudo o que tenho, e por estarem sempre presente em cada passo dessa caminhada.

À minha esposa, Daniela Alves Pereira, pela dedicação, amor, pela compreensão e incentivo nos momentos difíceis.

Ao meu Tio, Padre Cardoso, pelo apoio, carinho e conselhos.

Ao meu sogro e sogra, Augusto e Lia, pela convivência e amizade.

A meu Pai Té, todos os meus familiares, pelo exemplo de luta e vida.

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

Ao Professor Orientador e amigo Giovanni Francisco Rabelo, pelo apoio, confiança e incentivo.

Aos coorientadores Dr. Rafael Farinassi e Dra. Luciana Barbosa de Abreu, pelas colaborações, sugestões e auxílios nos artigos desenvolvidos.

Ao professor Lourival Mendes, por sua amizade e auxílio.

Ao Sr. Antônio, Diego, Renam, Hellem, Roberto, Pauliane, Danilo e demais amigos da pós-graduação e da graduação da UFLA, pela ajuda nos trabalhos desenvolvidos, paciência, momentos de descontração, etc. Valeu!

A Fernanda e a Hellem, secretárias da Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela ajuda e paciência.

Agradeço a todos os professores e técnicos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, que me proporcionaram conhecimento. Enfim, a todos aqueles que colaboraram de alguma forma, para o cumprimento desta etapa da minha vida. Obrigado!!!

“Na natureza nada se cria,  
nada se perde, tudo se transforma.”  
(LAVOISIER, Antoine Laurent).

## RESUMO

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar o desempenho físico-mecânico de compósitos de fibrocimento extrudados, produzidos com resíduos de pneus automobilísticos. Para isso, foram adotados os seguintes percentuais: para borracha de pneu - 0, 5, 10, 15 e 20% e para cinzas de pneu - 0, 2,5, 5, 7,5 e 10%, em relação à massa total da mistura. Para todos os tratamentos, foi empregado 60% de cimento CPV-ARI; 33% de calcário; 1% de HPMC, 1% de ADVA mais água. Entre os materiais avaliados, o melhor indicado foi o que levou em sua formulação as cinzas de pneu, com destaque para o compósito 5% de cinza, que superou os demais tratamentos avaliados quanto à absorção de água, porosidade, módulo de ruptura, módulo de elasticidade, limite de proporcionalidade e tenacidade, atribuindo ao material as melhores propriedades físicas e mecânicas. Nos tratamentos que levaram partículas de pneu, foi observado no compósito 10%, as melhores propriedades físicas e no compósito 5% partículas de pneu, as melhores propriedades mecânicas. Tanto nos compósitos que levam em sua composição partículas de borracha como aqueles que levam cinzas, ambos atenderam à norma de comercialização NBR 12800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1993) que requer absorção de água de 37%. Quanto aos resultados avaliados para Módulo de Ruptura (MOR), é seguida a NBR 15498 (ABNT, 2007) que classificou os compósitos que levam partículas de borracha na classe II e os compósitos que levam cinzas de pneu, na classe III, esta última, com MOR de valores mais altos.

Palavras-chave: Fibrocimento. Pneus. Resíduos. Borracha. Cinzas. Desempenho físico-mecânico.



## ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the physical-mechanical performance of composite fiber cement extruded, produced with waste automobile tires. For that they were adopted the following percentages: para borracha de pneu - 0, 5, 10, 15 and 20% - tire for ash - 0, 2.5, 5, 7.5 and 10% relative to the total weight of the mixture. For all treatments was employed 60% of CPV-ARI cement, 33% of limestone; 1% of HPMC, 1% of ADVA more water. Among the materials evaluated, the best indicated was leading in its formulation the tire ash, especially the composite 5% of ash, which surpassed the other treatments evaluated as to water absorption, porosity, modulus of rupture, elastic modulus, limit of proportionality and tenacity, assigning the material the best physical and mechanical properties. In treatments that led tire particles, composite was observed in 10%, the best physical properties and composite particles tire 5%, the best mechanical properties. Both comopósitos that lead in its composition rubber particles as those that lead ashes, both attended the marketing standard NBR 12800 (ABNT, 1993) requiring water absorption of 37%. requiring water absorption of 37%. As for the results evaluated to Break Module (MOR), It is then NBR 15498 (ABNT, 2007) which ranked the composite leading rubber particles in class II and composite qeu lead tire ash in class III, this very last, with higher values of MOR.

Keywords: Fiber cement. Tires. Waste. Rubber. Ash. Physical-mechanical performance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	(adaptada)- Partes funcionais de uma extrusora (SOTO, 2010).....	26
Figura 2	(adaptada) - Movimento das fibras na extrusão, (SRINIVASAN et al., 1999).....	28
Figura 3	Partículas de borracha de pneu.....	46
Figura 4	Cinzas provenientes da queima de borracha de pneu automobilísticos fora de uso.....	47
Figura 5	Produção das placas cimentícias. A) Mistura do material – Batedeira planetária; B) Processo de extrusão.....	50
Figura 6	Nesta Figura são apresentadas as dimensões ou relações entre o Comprimento (C), Largura (L) e Espessura (E) dos corpos de prova.....	51
Figura 7	Placas cimentícias. A) Armazenadas em ambiente com umidade saturada e em temperatura ambiente por 48 horas; B) Estufa de vaporização para cura do fibrocimento; C) Placas imersas em água por um período de 24 horas.....	51
Figura 8	Testes mecânicos executados em uma máquina de testes universal da marca Arotec e equipada com célula de carga de 20 KN.....	52
Figura 9	Relação da porcentagem de partículas de borracha versus porcentagem da absorção de água (AA) dos compósitos após 28 dias de cura.....	60
Figura 10	Relação da porcentagem de partículas de pneu sobre a porosidade dos compósitos após 28 dias de cura.....	63
Figura 11	Nas Figuras 11A, 11B e 11C, são fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) onde a relação	

máxima de 20% partículas de pneu contrastam com as Figuras 11D, 11E e 11F constituídas por 0% partículas de pneu, ou seja, sem nenhuma presença de borracha na sua formulação. Nas figuras 11A, 11B e 11C, são encontradas fotos capturadas via microscopia eletrônica de varredura, onde a relação de 20% partículas de pneu deixa claro que no momento da ruptura do compósito, quando aplicado à carga máxima, pode-se encontrar uma grande quantidade de partículas sintéticas e, conseqüentemente, uma grande quantidade de sulcos ou depressões (indicados por setas) que anteriormente eram ocupadas por borracha. Sendo assim, fica claro que as partículas de pneus não foram fraturadas ou rompidas e sim arrancadas..... 64

Figura 12 (0% partícula de pneu) Figura 12A, são fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde, pode se observar que a indicação apontada pela seta, diz respeito às reações químicas intrínsecas, ocorridas no interior dos compósitos que levaram 0% partículas de borracha. Quanto à Figura 12B, as setas indicam os poros presentes na estrutura dos compósitos que não levaram partículas de borracha..... 65

Figura 13 (5% partículas de pneu)- Na Figura 13A, são fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde, observamos que, as áreas mais escuras, em que se observam setas, indicam a presença de sulcos oriundos do arrancamento das partículas de borracha. Podem-se observar também poros, representados por pontos escuros menores. Quanto à Figura 13B, a sobressalência encontrada

	no centro da figura indicada pela seta, demonstra a presença de partículas de borracha ancoradas na parede da superfície rompida.....	65
Figura 14	(10% partículas de pneu)- Na Figura 14A, são fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde observamos que a área mais escura demarcada por um círculo, indica a presença de sulcos oriundos do arrancamento das partículas de borracha. Quanto à Figura 14B, a sobressalência encontrada no centro da figura indicada pela seta, demonstra a presença de partículas de borracha ancoradas na parede da superfície rompida. Podem-se observar também poros, representados por pontos escuros menores.....	66
Figura 15	(15% partículas de pneu)- Quanto à Figura 15A, são fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), em que a sobressalência encontrada no centro e indicada pela seta, demonstra a interface entre as partículas de borracha ancoradas e a parede da superfície rompida. Na Figura 15, observa-se que a área mais escura indicada por seta, demonstra a presença de sulcos oriundos do arrancamento das partículas de borracha ancoradas nos compósitos. Quanto aos pontos menores e escuros, estes são entendidos como a fração porosa dos compósitos.....	66
Figura 16	(20% partículas de pneu)- Quanto à Figura 16A, são fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde a sobressalência encontrada no centro e indicada pela seta, demonstra a interface entre as partículas de borracha ancoradas e a parede da superfície rompida. Quanto à área	

	mais escura demarcada por um círculo, essa indica a presença de sulcos oriundos do arrancamento das partículas de borracha. Na Figura 16 B, observa-se que as áreas mais escuras representadas por buracos, demonstra a presença de sulcos, estes são entendidos como protagonistas da fração porosa dos compósitos.....	67
Figura 17	Corpo de prova parcialmente rompido após aplicação de carga para obtenção do MOR.....	68
Figura 18	Foto capturada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), a sobressalência destacada na figura e indicada por setas, demonstra a interface entre as partículas de borracha ancoradas nas paredes do compósito rompido. Quanto às áreas mais escuras demarcadas por círculos, essa indica a presença de sulcos oriundos do arrancamento destas partículas.....	69
Figura 19	Foto capturada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As setas maiores representam a interface matriz/fibra, as setas menores representam os poros presentes no compósito fibrocimento.....	70
Figura 20	Valores médios do módulo de ruptura (MOR) dos compósitos com partículas de borracha, após 28 dias de cura.....	72
Figura 21	Valores médios do módulo de elasticidade (MOE) dos compósitos com partículas de borracha, após 28 dias de cura.....	73
Figura 22	Valores médios do Limite de Proporcionalidade (LOP) dos compósitos com partículas de borracha, após 28 dias de cura.....	74

Figura 23	Valores médios da Energia Específica ou Tenacidade (TE) dos compósitos com partículas de borracha, após 28 dias de cura .....	76
Figura 24	(0% resíduos de pneu) São fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde, pode-se observar que a indicação apontada pela seta, indicam os poros presente na estrutura dos compósitos que não levaram cinzas de pneu.....	80
Figura 25	Relação da porcentagem de CIPE versus porcentagem da absorção de água dos compósitos, após 28 dias de cura.....	81
Figura 26	Relação da porcentagem de CIPE versus porcentagem de poros dos compósitos, após 28 dias de cura.....	82
Figura 27	São fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Nelas, temos as relações das frações de cinzas de pneu. Nas imagens, onde encontramos sulcos ou depressões mais escuras, são os poros presentes nos compósitos de fibrocimento.....	84
Figura 28	Fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Nas imagens indicadas por setas, encontramos sulcos ou depressões mais escuras, estas são poros presentes nos compósitos de fibrocimento. Na mesma figura, são encontradas também frações da matriz que, provavelmente, encontra-se em sua fase sólida. O curioso são os poros visualizados nas partículas da matriz (região circulada indicada por setas).....	85
Figura 29	Valores médios do módulo de ruptura (MOR) dos compósitos de CIPE, após 28 dias de cura.....	87

Figura 30	Valores médios do módulo de elasticidade (MOE) dos compósitos com cinzas de pneu, após 28 dias de cura.....	88
Figura 31	Valores médios do módulo de Proporcionalidade (LOP) dos compósitos com cinzas de pneu, após 28 dias de cura.....	89
Figura 32	Valores médios da Energia Específica ou Tenacidade (TE) dos compósitos com cinzas das partículas de borracha, após 28 dias de cura.....	91
Figura 33	Na Figura A é observada a plasticidade do material, na Figura B é observada o entupimento da massa de extrudado	92
Figura 34	Propriedades físicas e mecânicas para percentuais de 5% cinzas de pneu versus partículas de borracha onde: AA (absorção de água), MOR (módulo de ruptura), MOE (módulo de elasticidade) e LOP (módulo de proporcionalidade).....	95
Figura 35	Propriedades físicas e mecânicas para percentuais de 10% cinzas de pneu versus partículas de borracha onde: AA (absorção de água), MOR (módulo de ruptura), MOE (módulo de elasticidade) e LOP (módulo de proporcionalidade).....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	(adaptada) Composição (% em peso) dos principais combustíveis utilizados como combustíveis primários e combustíveis alternativos em fornos de clique.....	44
Tabela 2	Composição química do cimento e do calcário.....	48
Tabela 3	Relação entre as porcentagens dos materiais (partículas de pneu e cinzas de pneu), e suas respectivas proporções de água utilizadas na confecção dos compósitos.....	49
Tabela 4	Relação entre às porcentagens dos materiais (partículas de pneu e cinzas de pneu), e suas respectivas proporções de água utilizadas na confecção dos compósitos.....	49
Tabela 5	Equações para determinação da propriedade mecânicas dos corpos de prova.....	53
Tabela 6	Equações para determinação da propriedade físicas dos corpos de prova.....	54
Tabela 7	Valores médios da densidade aparente dos compósitos com partículas de borracha, após 28 dias de cura.....	58
Tabela 8	Relação entre as porcentagens dos materiais (partículas de pneu), e suas respectivas proporções de água utilizadas na confecção dos compósitos.....	62
Tabela 9	Relação porcentagem de borracha vs propriedades mecânicas.....	71
Tabela10	Resumo da porcentagem de cinzas de pneu vs propriedades físicas.....	78
Tabela 11	Valores médios e desvio-padrão da densidade aparente dos compósitos com cinzas de pneu, após 28 dias de cura.....	78
Tabela 12	Relação entre às porcentagens do material (cinzas de pneu), e	



	suas respectivas proporções de água utilizadas na confecção dos compósitos.....	81
Tabela 13	Resumo da porcentagem de cinzas de pneu vs propriedades mecânicas.....	86

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	OBJETIVOS.....	22
2.1	Objetivo geral.....	22
2.2	Objetivo específico.....	22
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
3.1	Processo de produção de fibrocimento.....	23
3.1.1	Extrusão.....	24
3.2	Fibrocimentos sem amianto.....	25
3.3	Fibrocimento com celulose.....	31
3.4	Pneu fora de uso: matéria prima na produção de fibrocimento.....	33
3.4.1	Pneus em números.....	33
3.4.2	Processo de reforma de pneus usados.....	35
3.4.3	Processos de reciclagem dos pneus.....	36
3.4.4	Aproveitamento energético dos pneus fora de uso.....	37
3.5	Fibrocimento com cinzas (resíduos alternativos).....	39
3.5.1	Definição de resíduos.....	39
3.5.2	Cinzas vegetais.....	40
3.5.3	Escoria de alto forno.....	41
3.5.4	Lodo poluente.....	42
3.5.5	Flay Ash e Bottom Ash.....	42
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
4.1	Preparações das cinzas e partículas de borracha.....	45
4.1.1	Borracha de pneu .....	45
4.1.2	Cinza de Pneu (CIPE).....	46
4.2	Produção dos compósitos cimentícios.....	47
4.2.1	Caracterizações dos compósitos.....	52
4.2.1.1	Propriedades mecânicas dos compósitos.....	52
4.2.2	Propriedades físicas dos compósitos.....	53
4.3	Caracterização microestrutural.....	55
5	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	56
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
6.1	Partículas de borracha de pneu.....	57
6.1.1	Propriedades físicas.....	57
6.1.2	Densidade.....	57
6.1.3	Absorção de Água (AA).....	60
6.1.4	Porosidade.....	61
6.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	63
6.3	As partículas de borracha nos corpos de prova.....	67

6.4	Propriedades mecânicas das partículas de borracha.....	68
6.5	Cinzas de pneu.....	77
6.5.1	Propriedades físicas.....	77
6.5.1.1	Densidade.....	78
6.5.1.2	Absorção de Água e porosidade.....	79
6.6	Propriedades mecânicas.....	85
6.7	Melhores percentuais indicados.....	93
7	CONCLUSÃO.....	97
7.1	Partículas de borracha.....	97
7.2	Cinzas das partículas de borracha carbonizada.....	97
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
	REFERÊNCIAS.....	100

## 1 INTRODUÇÃO

De forma geral, os compósitos de cimento, quando submetidos à tensão, apresentam-se como um material frágil, sendo necessárias técnicas de reforço para melhorar a qualidade final do produto (COUTTS, 2005).

A fibra de reforço mais utilizada na produção de fibrocimento é o amianto, devido principalmente ao seu ótimo comportamento mecânico e seu baixo custo. Porém, a exposição ao amianto, após um período de exposição de 20-50 anos é conhecido por causar doenças incuráveis como a asbestose pulmonar, câncer de pulmão e mesotelioma maligno (AZUMA et al., 2009; BARTRIP, 2004; COOKE, 1924, 1927; DOLL, 1955; DOLL; PETO; BRITAIN, 1985; HOURIHANE, 1964; IKAI et al., 2010; KUMAGAI; KURUMATANI, 2010; LINTON et al., 2012; OLIVER, 1925; WAGNER; SLEGGES; MARCHAND, 1960 ). Sendo assim, a nocividade do amianto tem sido um tema de pesquisa (KAMP, 2009; WAGNER, 1965).

Apesar dos mais de 3000 produtos comerciais que levam amianto em sua formulação (HARRIS; KAHWA, 2003), a sociedade moderna clama por uma consciência mundial para o uso dos recursos naturais de forma sustentável, o que abre um grande espaço para o emprego de novas fibras, em substituição às convencionais que lesam a saúde de pessoas, além de provocarem grande degradação ambiental (COUTTS, 2005; MOHANTY; DRZAL; MISRA, 2002; MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2005; SAVASTANO JÚNIOR; WARDEN; COUTTS, 2000, 2003; TEIXEIRA, 2010; TOLEDO FILHO; SANJUÁN, 1999; TONOLI et al., 2007).

Os tipos de fibras que têm sido recentemente utilizadas como agente de reforço no intuito de reduzir a fragilidade inerente do compósito de cimento, têm encontrado aplicações práticas nas últimas décadas no mercado comercial, como um substituto as fibras de amianto (KHORAMI; GANJIAN, 2011; MENDES,

2014). E entre estes substitutos para o amianto já foi e vêm sendo estudadas, as fibras naturais, sintéticas, plásticos, vidro, alumínio dentre outros.

Quanto a outros resíduos que ainda não foram estudados na aplicação em fibrocimento, estão os pneus automobilísticos fora de uso. Os mesmos ocuparam, no ano de 2012, o volume de produção de mais de 14,71 milhões de tonelada, no mundo (JAPAN AUTOMOBILE TYRE MANUFACTURE ASSOCIATION – JATMA, 2014; UNITED NATIONAL UNIVERSITE – UNU, 2013). Números estes, praticamente crescentes (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS - ANIP, 2014) ano após ano, consequência do consumismo e do aumento populacional. E a consequência destes números faz com que os pneus fora de uso, tornem-se um significativo agravante ambiental na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), quando acumulados em depósitos a céu aberto ou descartado de forma indiscriminada em mananciais, lixões e aterros sanitários.

Segundo estimativa, 0,5% do lixo urbano brasileiro são constituídos por pneus automotivos fora de uso. O grande volume ocupado em aterros, em função da grande dificuldade de compactação e a possibilidade de incêndio de difícil controle, são fatores que agravam ainda mais a situação (FRANÇA, 2004).

No Brasil, é muito comum encontrar gigantescos estoques de pneus fora de uso, estocados de forma desordenada, a céu aberto, sem controle algum de entrada ou saída dos mesmos. Esta destinação fica sob a responsabilidade da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei 12.305 de agosto de 2010, que incentiva e implementa apoio às soluções compartilhadas entre cidades e estados, nos planos de gestão de resíduos (BRASIL, 2010). Entre esses resíduos e as soluções atreladas à destinação correta, fazem parte do cenário, os pneus automobilísticos fora de uso.

Quanto às soluções científicas, pesquisas ligadas à utilização de pneus como fonte alternativa de energia, vêm sendo estudadas por Dourado (2011), que avaliou a composição físico-química e poder calorífico de várias categorias de pneus descartados, a fim de levantar dados referentes aos agentes poluentes que compõem o ato de sua queima (DOURADO, 2011). Todavia, os resíduos (cinzas) da carbonização, bem como o excesso de raspas, devem ter outro destino, pois ainda são resíduos e podem ter outras destinações, além do seu aproveitamento como fonte de energia calorífica.

Sendo assim, frente ao cenário ambiental, social e sanitário oferecido pelo amianto, este trabalho vem propor a utilização e avaliação de resíduos de pneu fora de uso, em forma de partículas e cinzas, sobre as qualidades físicas (Densidade, Porosidade e Absorção de Água) e mecânicas (Módulo de Ruptura, Módulo de Elasticidade, Limite de Proporcionalidade e Tenacidade), no processo fibrocimento.

## **2 OBJETIVOS**

Em muitos referências literários existem vários trabalhos que buscam avanços tecnológicos e científicos na elaboração de novos materiais, empregando-se resíduos oriundos de indústrias florestais e da agropecuária como matéria-prima, no entanto, este trabalho vem propor a utilização de pneus automobilísticos fora de uso.

### **2.1 Objetivo geral**

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar tanto as propriedades físicas quanto mecânicas de compósitos de fibrocimento, utilizando-se partículas de pneu e também cinzas provenientes da carbonização destas partículas.

### **2.2 Objetivo específico**

Avaliar cada propriedade individualmente tanto física quanto mecânica e compará-las, entre si e uma para com a outra, no intuito de estudar a influência, tanto positiva, quanto negativa dos seus resultados. Estas propriedades são: Propriedades físicas:

- Densidade
- Porosidade
- Absorção de Água

Propriedades mecânicas

- Módulo de Ruptura (MOR)
- Limite de Proporcionalidade (LOP)
- Módulo de Elasticidade (MOE)
- Tenacidade (Te)

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

Normalmente, os compósitos à base de cimento apresentam comportamento mecânico frágil, então, o processo fibrocimento seria a adição de fibras que possibilitam o surgimento de mecanismos de tenacificação que, por sua vez, promovem um comportamento mecânico pseudoplástico do compósito, aumentando a resistência mecânica e a capacidade de absorção de energia de fratura, que, sem o reforço das fibras, falharia de maneira brusca, após iniciada a fissuração (TONOLI, 2009).

#### **3.1 Processos de produção de fibrocimento**

A origem da produção de fibrocimento foi criada por Ludwig Hatschek, no final do século XIX, que baseou-se no processo de produção de papel. Desde então, o processo Hatschek é utilizado em 85% dos produtos fibrocimento comercializados no mundo, e no decorrer do tempo, este processo tem sido submetido a aperfeiçoamentos que melhoram suas propriedades, sem interferir em seu princípio fundamental (IKAI et al., 2010). Este princípio consiste na produção de placas de fibrocimento pela superposição de lâminas finas feitas de uma suspensão de cimento, fibras, aditivos minerais e água (DIAS; SAVASTANO JÚNIOR; JOHN, 2010). As lâminas finas de fibrocimento, obtidas pela retenção dos sólidos durante a filtragem, são transferidas e acumuladas em uma prensa cilíndrica, até adquirirem a espessura desejada (BEZERRA et al., 2006).

Neste trabalho, serão descritas, utilizadas e discutidas as vantagens do método da extrusão, como uma forma de processamento dos compósitos de fibrocimento.



### 3.1.1 Extrusão

O processo de extrusão consiste na compressão de um material com comportamento pseudoplástico, com tensão de escoamento. Esse material adquire um fluxo através de uma abertura e atinge uma configuração geométrica, conferida pela geometria da boquilha. Em tal processo, o material é submetido à altas tensões normais e tangenciais (SOTO, 2010).

O processo de extrusão é uma tecnologia utilizada recentemente na elaboração de fibrocimento e, uma de suas características principais é a necessidade de utilizar relações água/cimento (a/c) baixas, entre 0,2 a 0,3, assim como também utilizar misturas que apresentam comportamento reológico pseudoplástico. O mesmo permite uma ampla variedade de secções transversais ou formas de elementos construtivos (BURBIDGE; BRIDGWATER, 1995; SHAO; MARIKUNTE; SHAH, 1995).

O processo de extrusão tem seu êxito em função do comportamento reológico da formulação, da geometria da boquilha, das características da máquina extrusora e da boa homogeneização das matérias-primas (SHAH; SHAO; MARIKUNTE, 1999; SHAO et al., 2000; SHAO; MARIKUNTE; SHAH, 1995; TAKASHIMA et al., 2003).

Estudos relatam o processo de extrusão como uma alternativa econômica para produção de materiais construtivos com propriedades físico-mecânicas semelhantes ou até mesmo melhores que os oriundos do processo Hatschek (LI; UM; CHUI, 2001; QIAN et al., 2003; SHAO et al., 2000; SHAO; MARIKUNTE; SHAH, 1995; SHAO; SHAH, 1997; SRINIVASSAN; DEFORD; SHAH, 1999; TAKASHIMA et al., 2003).

As melhorias trazidas no processo de extrusão podem ser observadas na indústria de cimento, em que a técnica de extrusão permite flexibilidade na fabricação rápida de produtos, em diferentes formas e das mais complexas, com

menores custos e maior lucratividade. Por exemplo, em painéis, telhas em forma de onda, etc, sem a utilização de moldes, podendo assim, em grande medida reduzir o custo de produção (ZHOU et al., 2013).

Sendo assim, a tecnologia de extrusão foi introduzida com sucesso na indústria cimentícia, como uma solução econômica e eficiente para a fabricação de materiais de fibrocimento de alto desempenho (KUDER; SHAH, 2007; SHAO; MARIKUNTE; SAH, 1995). A técnica de extrusão pode produzir compósitos de cimento reforçado com fibras, com uma matriz consolidada, resultando em baixa porosidade e forte vínculo matriz e fibra (PELED; SHAH, 2003). Descobriu-se também na extrusão, que as fibras descontínuas curtas podem ser alinhadas, ao longo da direção de extrusão (QIAN et al., 2003), de forma que a técnica da extrusão, em grande parte, possa melhorar o desempenho mecânico de compósitos de cimento reforçado com fibras (LI; UM; CHUI, 2001; PELED; SHAH, 2003).

Este forte vínculo entre matriz e fibra, é alcançado em função dos componentes mecânicos que compõem a extrusora, visualizada na Figura 1. Nesta, podemos observar partes de uma extrusora de vácuo, onde está demonstrada a câmara de mistura, a câmara de vácuo ou de desaeração, câmara de compactação e, ao final do processo, temos a boquilha, local esse em que é expelida a massa extrudada.

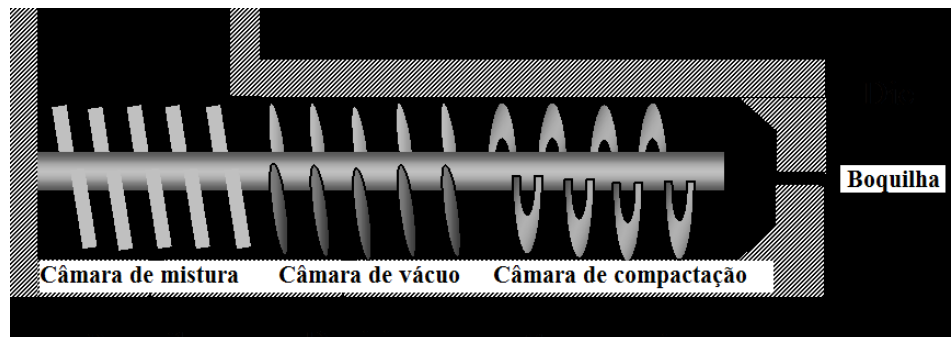


Figura 1(adaptada)- Partes funcionais de uma extrusora (SOTO, 2010)

Quanto ao sucesso no processo de extrusão, esse pode estar relacionado ao comportamento reológico da mistura cimentícia, o qual está relacionado, nesse caso, pela fase líquida, pela fase sólida e pela fase fibra, na otimização do processo de extrusão. Temos, também, o comportamento reológico das fibras, temos as características mecânicas e físicas da máquina extrusora, tais como a geometria da rosca, o comprimento das seções de alimentação, de desaeração e de compactação, velocidade da rosca e as pressões de vácuo exercidas na seção de desaeração, (LI; LI, 2013; LI; UM; CHUI, 2001; QIAN et al., 2003; SHAO et al., 2000; SHAO; SHAH, 1997; SHAO; MARIKUNTE; SHAH, 1995; STÄHLI; CUSTO; VAN MIER, 2008; STÄHLI; VAN MIER, 2007; ZERBINO et al., 2012; ).

Tem havido uma tendência, nos últimos anos, direcionados a modelos com descrição eletrônica para discretamente representem as fibras individuais dentro do volume do material (KOZICKI; TEJCHMAN, 2010; KUNIEDA et al., 2011; MONTERO-CHACÓN; SCHLANGEN; MEDINA, 2013; OLIVER et al., 2012; SCHAUFFERT; CUSATIS, 2012; ZHAN; MESCHKE, 2013). Tais comportamentos podem demonstrar os defeitos que ocorrem, durante a mistura, na extrusão dentro da massa de fibrocimento (SHEN et al., 2008). E

estes comportamentos são de extrema importância haja vista que, o comportamento reológico das fibras dentro do compósito pode ser mais bem estudado e avaliando.

Esse comportamento é descrito por Soto (2010), em relação à mistura, o qual afirma que: na fase sólida, há influência da distribuição granulométrica, da química da superfície, da fração volumétrica, da morfologia das partículas e da densidade de empacotamento; na fase fibras, as mesmas se apresentam, principalmente, como um obstáculo ao movimento das outras duas fases. Durante o processo, elas tendem a ficar alinhadas na direção do fluxo da pasta, sendo esse o posicionamento que menos obstrui o movimento do particulado, Figura 2; quanto à fase líquida, essa é influenciada pela extrusão, devido à capacidade de molhar as superfícies dos particulados e os mesmos reagirem com o cimento, assim como ter o seu próprio comportamento reológico, devido à presença de modificadores reológicos no processo de mistura (SOTO, 2010).

No que diz respeito à parte sólida, podemos dizer também que, com o aumento no volume das fibras, ocorre também um aumento linear na energia de fratura. Esse fraturamento está relacionado à deterioração da aderência em altos volumes, em consequência da interação entre as fibras e, esses altos volumes ou frações de fibra nos compósitos, podem aumentar a porosidade total da matriz, e, a porosidade induzida pelas fibras, pode reduzir o módulo da matriz, a tenacidade e a aderência da interface (LI et al., 1996; MAALEJ; HASHIDA; LI, 1995).

Na Figura 2, é descrita a movimentação das fibras na extrusão, em que:  $D_0$  é o diâmetro do barril,  $D$  é o diâmetro da boquilha,  $L$  é o comprimento da boquilha,  $v$  é a velocidade de extrusão,  $P_{tot}$  pressão total de extrusão e ZE é a zona estática.

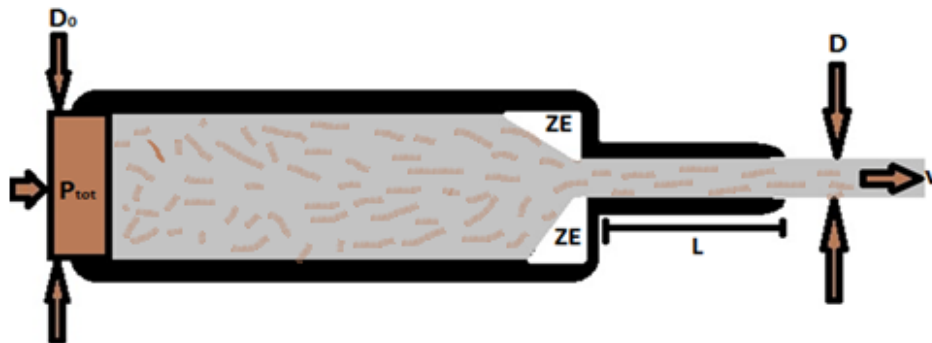


Figura 2 (adaptada) - Movimento das fibras na extrusão, (SRINIVASAN; DEFORD; SHAH, 1999)

### 3.2 Fibrocimentos sem amianto

As matrizes à base de cimento são frágeis e quebradiças e, quando as mesmas são submetidas à ação de pequenos esforços de tração ou deformações por alongamento, tendem à formação de fissuras. Quanto às suas características na adição de fibras, a fissuração na matriz é reduzida, uma vez que, estas fissuras são interligadas pelas mesmas fibras, e, como consequência, ocorre um aumento na tenacidade, na resistência à tração e ao impacto. Além disso, o compósito, ao invés de se romper, subitamente, após o início da fissuração da matriz, apresenta uma deformação plástica considerável que o torna um material adequado para construção (FREIRE; RAMIREZ-SARMIENTO, 1997; LIMA et al., 2007; MELO FILHO, 2005).

O amianto que tem sido usado desde os tempos antigos, devido à sua alta acessibilidade e às propriedades físicas desejáveis, como resistência ao calor e ao fogo, bem como às suas propriedades antissépticas e isolantes. Sendo assim, com a utilização de motores a vapor, desde a Revolução Industrial, o consumo de amianto cresceu rapidamente (BECKLAKE, 1976).

Nos últimos anos, as pesquisas sobre a empregabilidade de fibras vegetais na construção civil, como reforço em compósitos cimentícios, em substituição às fibras minerais e sintéticas, têm-se intensificado. No mundo, as fibras de polipropileno (PP) são produzidas em uma grande variedade de formas e com distintas propriedades, tanto vantajosas, quanto desvantajosas, quando aplicadas na produção de fibrocimento (HANNANT, 1986). No Brasil, são comumente utilizadas fibras do tipo polivinil (PVA) com celulose, no entanto, há um aumento de cerca de 40%, no custo total, quando utilizado somente PVA (DIAS; SAVASTANO JÚNIOR; JOHN, 2010; TORGAL; JALALI, 2011).

No Brasil, além do amianto, existem diversas culturas com potencial para produção de fibras e também resíduos agrícolas aplicáveis na confecção desses compósitos, com grandes benefícios socioeconômicos (LOPES et al., 2011). No entanto, fibras como o amianto, merecem atenção tanto Ministério do Meio Ambiente (MMA) quanto do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), onde destaca-se, nesse sentido, a exploração e uso do asbesto, um mineral extremamente agressivo para o sistema respiratório do trabalhador e vizinhança (AZUMA et al., 2009; BARTRIP, 2004; DOLL, 1955; DOLL; PETO; BRITAIN, 1985; HOURIHANE, 1964; IKAI et al., 2010; LINTON et al., 2012; WAGNER; SLEGGES; MARCHAND, 1960), fato que motivou o MTE a proibir, em 2000, sua utilização em sete estados da federação, embora tardiamente.

Essa era uma preocupação antiga de países desenvolvidos, sendo que, já no início dos anos 40, James Hardie e Coy Pty Ltda mostraram um interesse muito grande no uso de celulose, como um substituto econômico ao amianto em fibrocimentos, reforçando-os com fibras. Esse trabalho foi intensificado durante os anos seguintes à Segunda Guerra Mundial, na qual uma investigação foi conduzida em Camélia pela Heath and Hackworthy (JAMES HARDIE E COY PTY LTDA, 1947), na tentativa de descobrir se a polpa de celulose (papelão) poderia ser um substituto completo ou parcial para o amianto. Das fontes de

fibras estudadas estavam madeiras nativas, bagaço de cana, palha de trigo, papel não branqueado e sacos de cimento.

No início de 1970, esforços globais foram reforçados com legislações para remoção do amianto como reforço, em uma grande gama de produtos (TONOLI, 2006). O mercado de fibrocimento é o maior usuário de amianto e, por este motivo, nesta classe de materiais de construção, novas alternativas de fibras para reforço estão sendo investigadas para a sua substituição (COUTTS, 2005). Haja vista também, que os compósitos de cimento possuem características próprias de um material com baixa resistência à tração (LOPES et al., 2011).

Apesar de o amianto ter sido a primeira fibra a ser utilizada no reforço de compósitos cimentícios em escala industrial, devido ao seu baixo custo e seu ótimo comportamento mecânico, atualmente vem sendo utilizado em compósito, na porcentagem de 8 a 15% (MENDES, 2014). A sua extração pode estar associada à sérias doenças pulmonares, como o câncer e a asbestose (LINTON et al., 2012) dotenham ligações com o processamento e transporte desse mineral, o que fez esse produto ser proibido, em 58 países ao redor do mundo. Todavia, no Brasil, a proibição prevista em Lei foi aplicada somente em sete estados - Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Pernambuco, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Espírito Santo e Pará (IKAI et al., 2010; INSTITUTO BRASILEIRO DO CRISOTILA – IBC, 2014).

Ao longo das últimas três décadas, no Brasil, pesquisas consideráveis têm sido executadas com o objetivo de encontrar uma fibra alternativa, em substituição ao amianto em fibrocimento (AGOPYAN; SAVASTANO JÚNIOR, 1997; AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI, 1996; JOHN; AGOPYAN, 1993; SAVASTANO JÚNIOR; DANTAS; AGOPYAN, 1994). No entanto, muitos estudos ainda são necessários, tanto para caracterização da

matéria-prima fibrosa, como no desenvolvimento de novos produtos e métodos de produção (TOLEDO FILHO; SANJUÁN, 1999).

Por isso, destaca-se a importância em estar testando novos materiais de fibrocimento para diferentes aplicações que utilizam resíduos, os quais podem se tornar um fator impactante na economia do País, principalmente pelo momento de expansão o setor da construção civil está vivendo no Brasil.

### **3.3 Fibrocimento com celulose**

É bem conhecido que os compósitos de fibrocimento reforçados com fibras exibem tenacidade melhorada, ductilidade, capacidade de flexão e resistência a rachar, em comparação com os materiais à base de cimento não reforçados com fibras (TONOLI et al., 2009). Fibras vegetais são consideradas um material que oferece numerosas vantagens. As principais vantagens da sua utilização como aditivos, em cimento, é a sua baixa densidade, baixo custo devido ao alto volume de enchimento dentro do material, com baixo consumo de energia, além da grande variedade de fibras vegetais disponíveis em todo o mundo (WAN et al., 2011; YADOLLAHI et al., 2013). No entanto, a melhoria nas qualidades mecânicas nem sempre é alcançada com o uso de fibras vegetais (CARLMARK, 2013; ZHANG; RONG; LU, 2005).

Na realidade, muitos materiais alternativos não conferem às telhas de fibrocimento a resistência alcançada pelo uso do amianto; estudos recentes demonstram perdas de 50%, em média, no desempenho mecânico de telhas após um ano sob exposição às intempéries (envelhecimento). Atribuiu-se a causa da diminuição das propriedades mecânicas, à degradação das fibras vegetais na matriz cimentícia, pela ação da degradação alcalina (BLANCO et al., 2010; DEVITO, 2003; SAVASTANO JÚNIOR et al., 1999).



Dentre as fibras, podemos citar: sisal, bagaço de cana, linho, cânhamo, coco, bambu e juta (JOHN et al., 2005; SANJUA; TOLEDO FILHO, 1998; SAVASTANO JÚNIOR; WARDEN; COUTTS, 2003; TEIXEIRA, 2010; TOLEDO et al., 2000; TOLEDO FILHO; SANJUA, 1999; TONOLI et al., 2007). acrílico, aramida, carbono, nylon, poliéster, polietileno e polipropileno (ANGEL et al., 2013; BOŠNJAK; OŽBOLT; HAHN, 2013; JULIE et al., 2014; LEI; PLANK, 2014; ZHENJUN et al., 2014).

Além dos materiais utilizados e no parágrafo acima citados, outras matérias-primas vêm sendo estudadas como papelão, papel reciclado, materiais vegetais não madeireiros e fibras de agros resíduos (ASHORI; TABARSA; VALIZADEH, 2011; VAN TRAN, 2002).

Entretanto, para se estudar novos materiais, é necessário estudar novos métodos na busca de melhorar, tanto as propriedades físicas, quanto mecânicas. Sendo assim, podemos citar a polpação alcalina (processo Kraft), na qual grande parte da lignina e hemiseluloses, materiais menos resistentes à alcalinidade da matriz cimentícia do que a celulose é retirada (JOAQUIM et al., 2009; MOHR; NANKO; KURTIS, 2005).

Outro método estudado, a carbonatação, é aplicado com o intuito de se atribuírem características positivas às propriedades físicas dos compósitos de fibrocimento (ALMEIDA et al., 2013; LESTI; TIEMEYER; PLANK, 2013; PIZZOL et al., 2014; TONOLI et al., 2010b), haja vista que, fibras vegetais dentro da matriz cimentícia, sofrem degradação alcalina, causando alterações no desempenho mecânico, dependendo da idade do compósito e das condições de exposição (BLANCO et al., 2010).

Com isto, não estaremos somente transformando e dando valor a um material muitas vezes descartado indiscriminadamente, como também podemos estar contribuindo na confecção de um rentável e inovador produto.

### **3.4 Pneus fora de uso: matéria-prima na produção de fibrocimento**

Segundo Goulart (1999), polímero pode ser entendido como uma macromolécula composta por unidades menores (do grego mero), que se repetem dezenas ou centenas de vezes (daí polímero). Elastômeros são polímeros que podem ser estirados facilmente em grandes extensões (cerca de 3 a 10 vezes sua extensão original) e retornarem rapidamente à sua dimensão original. Esta propriedade é reflexo de sua estrutura molecular, composta por uma rede com baixa densidade de reticulação. A palavra borracha é, geralmente, empregada para descrever polímeros não reticulados (GOULART, 1999).

Sendo assim, temos o pneu fora de uso, um polímero, e também um resíduo, que é produzido em escala proporcional ao crescimento progressivo da população humana, a qual traz consigo um expressivo aumento no consumo de bens materiais e, conseqüentemente, seus efeitos ao meio ambiente.

#### **3.4.1 Pneus em números**

Estima-se que a produção total de pneus do mundo, em 2012, tenha sido de 14,71 milhões de toneladas. Desse volume, a produção da Ásia e da Oceania é estimada em 63% (JATMA, 2014; UNU, 2013). Dos mais de 3,4 milhões de toneladas de pneus geradas na Europa, 314.000 t. provém da Espanha. No Brasil, no ano de 2013, as dez empresas integradas à ANIP produziram 68,8 milhões de pneumáticos e importaram 3,8 milhões, totalizando 72,6 milhões de unidades, volume esse 6,47% maior, comparado ao ano de 2012 (ANIP, 2014; DOURADO, 2011; LOPES; CENTENO; AGUACIL, 2012).

O problema está quanto aos pneus ser uma fonte volumosa e muito incômoda de resíduos sólidos. Estudos estimam uma produção de pneus seja de 6-8 kg /habitante, por ano, para a maioria dos países da União Europeia e de 8

kg /habitante, por ano, para o Japão, o que leva a sociedade a reunir esforços para organizar sua coleta e incentivar a reciclagem (JATMA, 2007; LUYTEN, 2009; RUBBER MANUFACTURES ASSOCIATION - RMA, 2009).

Nos dias atuais, este consumo desenfreado pode ser percebido claramente na cadeia produtiva dos pneus automobilísticos fora de uso, ou seja, na quantidade de “carcaças” de pneus expressivamente espalhadas no Brasil e no mundo. A destinação final destas carcaças há muito tempo, vem demonstrando um problema de difícil solução, já que os mesmos são materiais sintéticos de prazo indeterminado de decomposição, que requer um grande espaço de armazenamento, em função da sua baixa taxa de compressibilidade. Não suficiente, temos também as condições de armazenamento, que devem ser adequadas para evitar riscos de acidentes, incêndio, proliferação de insetos e roedores.

Quando armazenados inadequadamente os pneus, a preocupação não é somente quanto aos vetores e às doenças por estes trazidas, mas também devemos estar atentos à disseminação destas, frente ao aumento da população mundial e às alterações climáticas que têm assumido papel de importância nesse cenário. Até 2050, a população mundial deverá atingir um total de 9 bilhões de pessoas e os suprimentos de alimento, água, fibras e energias terão que aumentar, colocando em foco novos estudos da interação do homem e o meio ambiente (CERRI et al., 2007; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2009; GODFRAY et al., 2010; HAYLOCK et al., 2006; INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2007; INTERNATIONAL INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEMS ANALYSIS - IIASA, 2010; KERR, 2005; MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT - MEA, 2005). Por isso, medidas precavidas, quanto à destinação das carcaças de pneu, devem ser estudadas.

### 3.4.2 Processo de reforma de pneus usados

Diante destes números, a primeira solução encontrada está no processo de reforma que envolve os mesmos. Pneu usado é aquele que passou por um dos seguintes processos para reutilização de sua carcaça: Recapagem, Recauchutagem ou Remoldagem. O material, nesse trabalho utilizado, provém do processo de recapagem, ou seja, processo pelo qual o pneu tem sua banda de rodagem, (parte do pneu que entra em contato com o solo), substituída (DOURADO, 2011).

Para que o processo de recapagem aconteça, primeiro a banda de rodagem do mesmo é raspada. O resíduo final desse processo (partículas de borracha) é a matéria-prima utilizada na confecção dos compósitos de fibrocimento que os levam. No caso específico dos compósitos que levaram cinzas de pneu, estas partículas foram carbonizadas para que fossem elaborados corpos de prova com estas cinzas (negro de fumo).

Diferente do processo de reforma, a reciclagem de pneus envolve um ciclo que compreende a coleta, transporte, trituração e separação de seus componentes (borracha, aço e lona), transformando sucatas em matérias-primas, que serão direcionadas ao mercado. No processo de reciclagem, obtém-se borracha pulverizada ou granulada que vai ter diversas aplicações: utilização em misturas asfálticas, em revestimentos de quadras e pistas de esportes, fabricação de tapetes automotivos, adesivos etc. No entanto, não é encontrada na literatura, a utilização das partículas ou cinzas de pneu na produção de fibrocimento, no entanto, alguns trabalhos citam a utilização do polímero de borracha de pneu em estruturas de concreto ou aço.

O conseqüente aumento no número de veículos automotores, em todo o planeta e a ausência de mecanismos técnicos e econômicos, faz com que pneus sejam um grave problema ambiental, em termos de eliminação e destinação dos

mesmos, haja vista que, seu tempo de decomposição na natureza, como já dito, ainda não foi estimado (BRASIL, 2005; MOTTA, 2008).

Por isto, a responsabilidade compartilhada é por todo o ciclo de vida do produto, a qual deve abranger: fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos. Ficando na responsabilidade dos fabricantes e importadores de pneus novos, com peso unitário superior a 2,0 kg (dois quilos), a responsabilidade de coletar e dar destinação adequada aos pneus fora de uso, existentes no território nacional, na proporção definida na Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009 (BRASIL, 2009).

### **3.4.3 Processos de reciclagem dos pneus**

Para que uma fração de pneus seja reutilizada, processos como a reforma, o qual torna um pneu apto para reuso, são necessários. No entanto, quando estes não mais servem para serem reformados, outros processos devem ser executados para evitar que o pneu torne-se um passivo ambiental. Sendo assim, para uma destinação ambientalmente correta, métodos como a reciclagem mecânica dos resíduos são necessárias, a qual implica dois processamentos principais: a fragmentação (usando trituradores, moinhos, granuladores, equipamentos criogênicos ou outras técnicas) e a separação dos constituintes básicos (borracha de pneu, aço, fibras de nylon, etc) por flotação, sistemas magnéticos ou pneumáticos (RMA, 2004).

No entanto, tais processos, não parecem ter atingido competitividade suficiente para a sua aplicação em larga escala, pois, claramente, os custos de processamento também são muito diferentes: por exemplo, um guia para potenciais recicladores estima que os custos de processamento sejam

aumentados por um fator cinco, quando o tamanho final do produto reduz de 50 para 10 mm (AYLÓN et al., 2010; KHOO, 2009; RMA, 2004).

Por isto, outros métodos de reciclagem podem ser aplicados como, por exemplo, a reciclagem química, pirólise seguido da gaseificação ou até mesmo a carbonização, processos que produzem resíduos, e estes resíduos (as cinzas), é a matéria-prima na elaboração dos compósitos de fibrocimento, deste trabalho.

#### **3.4.4 Aproveitamento energético dos pneus fora de uso**

Atualmente, tanto a proteção ambiental, quanto o uso eficiente de recursos são dois dos mais importantes temas de preocupações constantes de políticas governamentais e público em geral. O aumento contínuo de resíduos poliméricos associados à dependência das sociedades modernas ao petróleo e matérias-primas essenciais tem um impacto negativo sobre o ambiente, na maioria dos países em desenvolvimento (PINTO et al., 2001).

Os pneus são uma mistura complexa de materiais muito diferentes, que incluem várias borrachas, os negros de fumo, cabo de aço e outros componentes secundários orgânicos e inorgânicos. Diferentes alternativas de reciclagem de pneus podem ser utilizadas, no entanto, é sabido que os pneus possuem um alto valor energético que poderia ser convertido a causas mais nobres, por exemplo, o aquecimento térmico em sistemas industriais, com aproveitamento de seus gases produzidos via pirólise, que consiste basicamente no aquecimento e na ausência de oxigênio.

Na pirólise do pneu, independente das dimensões de suas partículas (LEUNG; WANG, 1999), os principais componentes dos gases produzidos são monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o sulfureto de hidrogênio (SH<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), etano (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), eteno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), propeno (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>), o butano (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), o buteno (C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>) e butadieno

(C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>), que têm valores caloríficos brutos cerca de 30-40 MJ N m<sup>3</sup> (GOULART, 1999; KAMINSKY; MAKROMOL, 1992). A gaseificação consiste basicamente no aprisionamento dos gases energéticos para que os mesmos sejam utilizados, posteriormente, como combustível.

No caso do Brasil, onde os pneus são incinerados em muitas companhias de processamento de cimento que utilizam este método na busca de fornecer energia ao sistema, haja vista que a energia fornecida com a queima do pneu é da ordem de 8000 kcal/kg (ATAL; LEVENDIS, 1995) ou 8790 kcal/kg (DOURADO, 2011), energia esta comparável ou até mesmo superior à fornecida com a queima de determinados tipos de carvão (ATAL; LEVENDIS, 1995; DOURADO, 2011).

No entanto, devido à sua composição química, que inclui metais pesados, borracha natural e sintética, óleos e negro de fumo. Na sua fração sólida, as cinzas são compostas basicamente por negro de fumo, acrescido de alguns outros compostos em menor quantidade (DARMSTADT; ROY; KALIAGUINE, 1995). No entanto, inconvenientes ambientais, consequência da degradação do pneu na presença de calor que ocasiona, no caso de sua queima direta, na liberação de substâncias tóxicas e cancerígenas, poluentes orgânicos e inorgânicos, é que foi criada a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA nº 5, de 15 de junho de 1989, que monitora e regula os percentuais de emissões de poluentes, no meio ambiente (DOURADO, 2011).

Segundo esses preceitos, temos uma nova e abundante matéria-prima a ser utilizada na produção fibrocimento, os pneus automobilísticos inservíveis, um problema ambiental de infinitas consequências ao meio ambiente e um passivo ambiental com tempo indeterminado de degradação. O atual trabalho veio propor a utilização de partículas de borracha de pneus e suas cinzas (provenientes da carbonização monitorada de partículas de borracha) como matéria prima substituidora do amianto em compósito de fibrocimento.

### **3.5 Fibrocimento com cinzas (resíduos alternativos)**

Para falar de cinzas, primeiro é necessário definir sua origem como resíduo e também sua aplicação na indústria cimentícia.

#### **3.5.1 Definição de resíduos**

Resíduo industrial é classificado por John (1997) como sinônimo de subproduto, enquadrando desta maneira, todos os produtos secundários gerados em um processo. Outros autores costumam diferenciar resíduos de subproduto, definindo o segundo como sendo o resíduo que adquire valor comercial (CINCOTTO, 1988).

John (2000) classifica resíduos agroindustriais, como aqueles provenientes de atividades tipo agricultura, indústrias têxteis, de papel, automobilísticas e de beneficiamento de metais e, devido à sua geração concentrada, sua recuperação torna-se mais fácil.

No ano de 1997, os pesquisadores Marciano e Khiara (1997) estimaram que a indústria cimenteira economizasse, entre 1976 e 1995, 750 mil toneladas de combustível, substituindo-os pela queima de resíduos como, serragem, pneus, borrachas e outros tipos diversos de materiais, técnica conhecida pelo nome de co-processamento.

A substituição parcial do clínquer pela adição de resíduos de combustão de carvão minimiza as desvantagens quanto ao consumo de recursos não renováveis na fabricação do clínquer, além da grande liberação de CO<sub>2</sub>. Em geral, a utilização de adições em cimentos provoca produtos de hidratação mais densos e uma rede porosa mais fechada do que a do cimento comum sem adições, resultando em materiais de construção mais duráveis (MENÉNDEZ; DE FRUTOS, 2009, 2011).



As tecnologias disponíveis para o fibrocimento sem o emprego do amianto não são muito bem recebidas em muitos países no mundo. No entanto, a sociedade moderna clama por uma consciência mundial para o uso dos recursos naturais de forma sustentável, o que abre um grande espaço para o uso de novas fibras vegetais em substituição às convencionais (MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2005; SAVASTANO JÚNIOR; WARDEN; COUTTS, 2003).

Essas novas fibras, no entanto, devem ser mais bem estudadas, uma vez que, vários autores atribuem à diminuição das propriedades mecânicas à degradação das mesmas, a ações de degradação alcalina, causando alterações no desempenho mecânico, em função da idade e das condições expostas (AGOPYAN, 1991; BLANCO et al., 2010; DEVITO, 2003; SAVASTANO JÚNIOR et al., 1999). Por isso, novos e alternativos materiais como as cinzas, vêm sendo pesquisadas.

### **3.5.2 Cinzas vegetais**

Sendo assim, novos materiais tais como, cinzas de casca de arroz e da cana de açúcar, matérias-primas muitas vezes descartadas na agricultura, vem sendo utilizados como substituto parcial do cimento, como adição mineral em concretos e na fabricação de outros tipos de materiais de construção (AGOPYAN, 1991; FERREIRA; SILVEIRA; DAL MOLIN, 1997; HERNÁNDEZ et al., 1998; TEIXEIRA, 2010). Estas cinzas podem ser acrescentadas no fibrocimento, tanto como aditivas, como materiais reforçantes devido às suas propriedades químicas.

As cinzas vegetais, as quais possuem variações mineralógicas, têm como principal representante a cinza de casca-de-arroz, a qual apresenta atividade pozolânica, ao contrário das escórias de alto-forno, as cinzas da casca de arroz necessitam de uma fonte auxiliar de cálcio, que pode ser o cimento

Portland ou a cal hidratada, para que possam formar produtos hidratados em meio aquoso (SILVA, 2002).

A propriedade pozolânica é encontrada em materiais silicosos ou silico-aluminosos, que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante hidráulica, entretanto quando os mesmos são preparados e moídos, estes apresentam a característica de reagirem em meio aquoso e a temperatura ambiente junto ao hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), ocasionando a formação de novos, com propriedades aglomerantes, ou seja, cimentícias e, portanto, insolúveis em água (FERREIRA; SILVEIRA; DAL MOLIN, 1997) .

### **3.5.3 Escoria de alto forno**

A composição química e o elevado conteúdo energético destes resíduos – caso das escórias de alto-forno granuladas e das cinzas volantes, tornam alguns resíduos adequados à produção de cimentos alternativos sem a necessidade de calcinação da matéria-prima, o que permite uma redução no consumo energético de até 80%, refletindo-se assim no custo final do material e, conseqüentemente, do sistema onde está inserido (JOHN, 1995).

Savastano Júnior, Mabe e Devito (1998) realizaram estudos com cimentos de escória de baixa alcalinidade e concluíram pela viabilidade de seu uso em componentes construtivos por apresentarem durabilidade semelhante à de outros sistemas compatíveis (AGOPYAN; JOHN, 1992).

No entanto, para utilização como aglomerante, as escórias precisam possuir como característica fundamental, a reatividade hidráulica e função de diversos fatores, como, conteúdo de fase vítrea, composição química e finura. Não podemos esquecer também que a temperatura e pH do meio podem influenciar a sua maior ou menor hidráulica, ou seja, capacidade para dar

pega e endurecer na presença de água, formando compostos estáveis (SILVA, 2002).

#### **3.5.4 Lodo poluente**

Além das cinzas de alto-forno, temos também a queima de lodo altamente poluente, proveniente de esgoto urbano. Neste, pode ser atribuída às suas cinzas uma alternativa segura e econômica, em substituição parcial de até 20% do cimento (GEYER; MOLIN; CONSOLI, 2000). Acarretando assim, uma redução no custo final do produto, haja vista que, ao adicionar as cinzas do lodo poluente, pode-se diminuir a adição do cimento, com isso, estaria reduzindo meu custo do capital final.

#### **3.5.5 Flay Ash e Bottom Ash**

Além das cinzas do lodo poluente, temos materiais classificados como aditivos na fabricação de cimento. A norma europeia EN 197-1 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARTIZATION - CEN, 2011) limita, tanto o tipo, quanto a quantidade de adições que podem substituir clínquer na fabricação de cimento. Entre estas adições, alguns são subprodutos industriais, ou seja, os resíduos reciclados para a produção de cimento.

Um dos subprodutos mais comumente utilizados na produção de cimento, são cinzas de granulometrias reduzidas (Flay Ash). Vindas de centrais hidroelétricas de carvão pulverizado, estas cinzas, são partículas finas recolhidas por precipitação eletrostática ou mecânica. Estas usinas hidroelétricas de carvão, também produzem cinzas Bottom Ash, que são partículas conglomeradas grossas e vítreas, que caem no fundo do forno. Cinzas Flay Ash, representam

entre 70% e 90% de cinzas de carvão produzidos em centrais hidroelétricas, enquanto Bottom Ash representa entre 10% e 30% (SIDDIQUE, 2010).

As propriedades da Flay Ash ou cinzas volantes como adição ao cimento têm sido amplamente estudadas. Na Europa, por exemplo, essas são incluídas como adições autorizadas ao cimento em quantidades de até 50% de substituição EN 197-1 (CEN, 2011); RC-08 (ESPANHA, 2008). Pode-se deduzir, a partir destes estudos, que a adição de Flay Ash traz propriedades semelhantes ou mesmo melhores que o cimento Portland (PAPADAKIS, 1999, 2000). Uma das principais melhorias é a menor demanda de água e menos calor no processo de hidratação (GONZÁLEZ; NAVIA; MORENO, 2009).

No que diz respeito à Bottom Ash de carvão, elas só foram usados em algumas aplicações na indústria da construção, principalmente, como um agregado de concreto na fabricação de blocos e como material de enchimento, por exemplo, nos fundamentos da construção de estradas (EUROPEAN COAL COMBUSTION PRODUCTS ASSOCIATION - ECOBA, 2008; LEE; KIM; HWANG, 2010; SIDDIQUE, 2010).

A produção europeia de Flay Ash e Bottom Ash em 2008 foi de 37,5 e 4,8 mil toneladas, respectivamente (ECOBA, 2008). Apesar de as quantidades de carvão Bottom Ash produzidos, estes não foram ainda utilizados como adições em cimento. Por este e inúmeros outros desafios que os resíduos trazem para o homem e ao meio ambiente, é que devemos estudar e dar um destino ecológico, social e racionalmente correto aos resíduos industriais.

Na Tabela 1, temos as composições tanto do carvão mineral quanto dos pneus usados. É encontrada também nessa tabela, a composição das cinzas de pneu. Um fato curioso quanto à composição destas cinzas, está ligado à relação de semelhança entre os elementos que a compõem e os elementos que compõem o carvão mineral, como já descrito anteriormente, um material utilizado com um aditivo pozolânico na formulação de cimento.

Tabela 1 (adaptada) Composição (% em peso) dos principais combustíveis utilizados como combustíveis primários e combustíveis alternativos, em fornos de clique.

<b>Componentes</b>	<b>Carvão mineral <sup>(a)</sup> %</b>	<b>Pneus usados <sup>(b)</sup> %</b>
C	63,9	72,15
H	3,6	6,74
S	4,6	1,23
O	0,9	9,67
N	1,8	0,36
Cl	-	0,149
Cinzas	24,9	8,74
CaO	1,03	10,64*
SiO <sub>2</sub>	9,32	22,0*
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,08	9,09*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,21	1,45*
MgO	0,44	1,35*
álcalis	0,85	-
zinco	0,04	-
cádmio	0,001	0,0006
cromo	0,008	0,0097
níquel	0,008	-
chumbo	0,027	0,0065
tálio	0,0004	0,00001
mercúrio	-	-
arsênio	0,00017	-
vanádio	0,0648	-

Fontes: Carvalho, Ferreira e Figueiredo (1997) e Salomon (2002); \* Componente nas cinzas.

Sendo assim, esse trabalho vem propor a adição de cinzas e ou grânulos de raspa de pneus automobilísticos inservíveis, como uma alternativa para substituir ou conciliar seu uso a outros materiais, aumentando assim, a durabilidade das fibras naturais na matriz de cimento, uma vez que as cinzas modificam as microestruturas da massa hidratada (MENÉDEZ; DE FRUTOS, 2011).

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Preparações das cinzas e partículas de borracha**

As partículas de borracha foram a matéria-prima na produção das cinzas utilizadas neste trabalho.

#### **4.1.1 borracha de pneu**

As raspas de pneu automobilísticos, provenientes do processo de raspagem na reforma dos pneus, foram doadas por uma unidade reformadora da cidade de Lavras-MG. As partículas resultantes apresentam formatos e tamanhos diversos, sendo assim, foram encaminhadas para o UEPAM (Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira) da Universidade Federal de Lavras, para posterior preparo e aquelas que passaram através da peneira com malha de diâmetro equivalente a 1,5 mm. Após o peneiramento, as raspas foram fotografadas e submetidas ao programa editor de imagens ImageJ e, posteriormente, conferidas suas dimensões com um paquímetro eletrônico. Sendo assim, foram obtidas as seguintes dimensões: comprimento variando entre 0,1 a 15 mm e espessura variando de 0,1 a 1,3mm. Esse procedimento foi realizado para que fossem obtidas partículas de borracha com dimensões mais uniformes (Figura 3).



Figura 3 Partículas de borracha de pneu

#### **4.1.2 Cinza de Pneu (CIPE)**

Quanto às cinzas de pneu, para obtê-las, primeiro foi necessário adquirir as partículas de borracha. Estas partículas foram provenientes do processo de raspagem na reforma dos pneus, em unidade reformadora localizada na cidade de Lavras-MG. Tais partículas de borracha foram processadas mecanicamente em peneiras com malha de diâmetro equivalente a 1,5 mm. Logo após, estas partículas foram encaminhadas para o processo de carbonização. Nesse processo, tanto a fumaça quanto a foligem provenientes da queima, foram purificadas e coletadas, respectivamente, em filtro de lavagem de gases (em fase de registro de patente), localizado na Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira da Universidade Federal de Lavras. As cinzas foram processadas em um liquidificador industrial e então foram classificadas e utilizadas as cinzas peneiradas que passaram através da peneira de 120 mesh.



Figura 4- Cinzas provenientes da queima de borracha de pneu automobilísticos fora de uso

#### 4.2 Produção dos compósitos cimentícios

Foram utilizados como matriz cimentícia o cimento CPV-ARI (ABNT, 1983); este cimento foi escolhido, pois possui um diâmetro médio equivalente de partícula de  $10,98\mu\text{m}$ , menor quantidade de adições como a sílica cristalina e ausência de adição de pozolanas, evitando, assim, efeitos combinados de minerais. O “*filler*” carbonático ou calcáreo, atualmente empregado na indústria de fibrocimento, foi utilizada no intuito de reduzir custos no processo de produção dos compósitos e promover melhora no empacotamento dos materiais (BEZERRA et al., 2006).

As composições químicas (% em massa de óxidos) do cimento e do calcário, determinadas por espectrometria de fluorescência de raios-X, estão apresentadas na Tabela 2.



Tabela 2 Composição química do cimento e do calcário utilizados (MENDES, 2014).

Matéria-prima	Ca O	Mg O	SiO 2	Al <sub>2</sub> O 3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO 3	Mn O	P <sub>2</sub> O 5	Ti O <sub>2</sub>
	% em massa										
Cimento <sup>1</sup>	63,5	3,1	19,4	4,1	2,3	0,2	1,1	3	-	-	-
Calcário <sup>2</sup>	39,1	8,9	9,0	2,2	1,2	0,1	0,4	-	<0,1	0,2	0,1

<sup>1</sup>Cimento Portland CPV-ARI (ABNT, 1983), <sup>1</sup>perda ao fogo (PF) a 1000°C = 3,3% em massa; <sup>2</sup>perda ao fogo (PF) a 1000°C = 39,0% em massa.

Para viabilizar o processo, facilitar a extrusão e garantir assim o comportamento pseudoplástico da mistura, foram utilizados os modificadores reológicos à base de celulose HPMC (hidroxipropilmetilcelulose) e ADVA, um redutor de água. Tais modificadores são citados na literatura como os que têm apresentado maior eficiência na produção de extrudados de fibrocimento (ONADA, 1979; PELED; SHAH, 2003; QIAN et al., 2003; SHEN et al., 2008).

Quanto à formulação empregada na produção dos compósitos, essa foi baseada em estudos anteriores (MENDES, 2014; TEIXEIRA, 2010; TONOLI et al., 2010a), sendo fixado para todos os tratamentos: 60% de cimento Portland CPV-ARI (ABNT, 1983), 33% de calcário agrícola moído (cal), 1% de HPMC (Hidroxipropilmetilcelulose) que fazem reduzir o atrito do compósito com a boquilha da extrusora e 1% de ADVA (Aditivo poliéter carboxílico), um retentor de água. Os percentuais de HPMC e o ADVA são calculados e pesados em função da massa do cimento (peso).

Os materiais que sofreram variação foram: as partículas de borracha de pneu, as cinzas (Tabela 2) e a concentração de água. Esta última foi estipulada em 30% da fração total do cimento. No entanto, para ajustar a massa do compósito para posterior processamento, era adicionada vagarosamente mais

água na argamassadeira, até que o ponto ideal de plasticidade e trabalhabilidade da pasta de fibrocimento fossem alcançados, por isso, a variação nas proporções de água (Tabela, 3).

Tabela 3 Relação entre as porcentagens dos materiais (partículas de pneu e cinzas de pneu), e seus respectivos percentuais utilizadas na confecção dos compósitos.

	0%	2,50%	5%	7,50%	10%	15%	20%
Partículas	X		X		X	X	X
Cinzas	X	X	X	X	X		

Nesta Tabela 2, são encontrados os respectivos percentuais, tanto de partículas de borracha, quanto de cinzas que foram utilizados na confecção dos compostos. Essa proporção foi estimada sobre a massa total de material a ser processado.

Tabela 4 Relação entre às porcentagens dos materiais (partículas de pneu e cinzas de pneu), e suas respectivas proporções de água utilizadas na confecção dos compósitos.

PNEUS	0%	2,50%	5%	7,50%	10%	15%	20%
Partículas	0,354	-	0,30	-	0,36	0,36	0,37
Cinzas	0,354	0,369	0,389	0,403	0,42	-	-

Os compósitos foram produzidos em escala laboratorial por processo de extrusão. Antes que fosse iniciada a extrusão, foram pesados o ADVA, a BOPE, o cimento e o calcário. Os mesmos foram colocados em uma argamassadeira ou bateadeira planetária com velocidade de rotação de 140 RPM (Figura 5A), permanecendo por 5 minutos em processo de homogeneização. Logo após, foi calculado e misturado o volume de HPMC e a quantidade de água a ser utilizada foi acrescentada de forma gradual na argamassadeira, a qual permaneceu em processo de homogeneização por mais 5 minutos, em rotação de 140 RPM (Figura 5A).

Depois que a pasta saiu da argamassadeira, a mesma foi encaminhada para a extrusora da marca VERDÉS, modelo 052, com velocidade de rotação na rosca helicoidal de 32rpm (Figura 5B). Nesta extrusora, o mesmo material foi por 3 vezes processado na busca da uniformidade de homogeneização e só então se iniciou a produção dos compósitos de formato retangular, com dimensões aproximadas de 200 mm x 30 mm x 20 mm; comprimento (C), largura (L) e espessura (E), respectivamente.

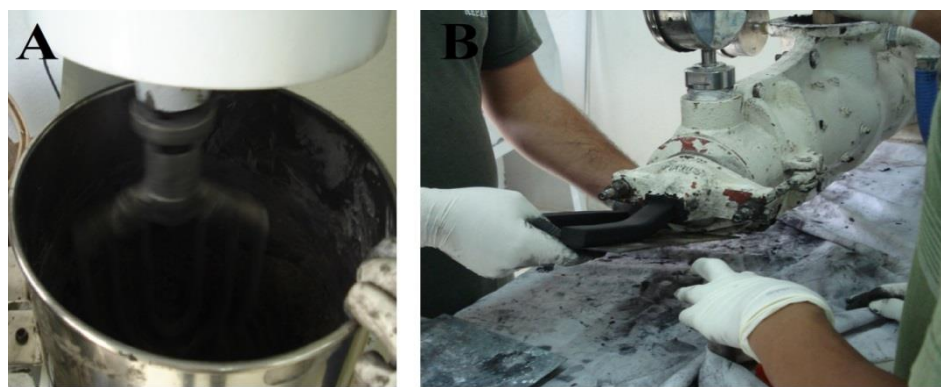


Figura 5 Produção das placas cimentícias. A) Mistura do material – Batedeira planetária; B) Processo de extrusão

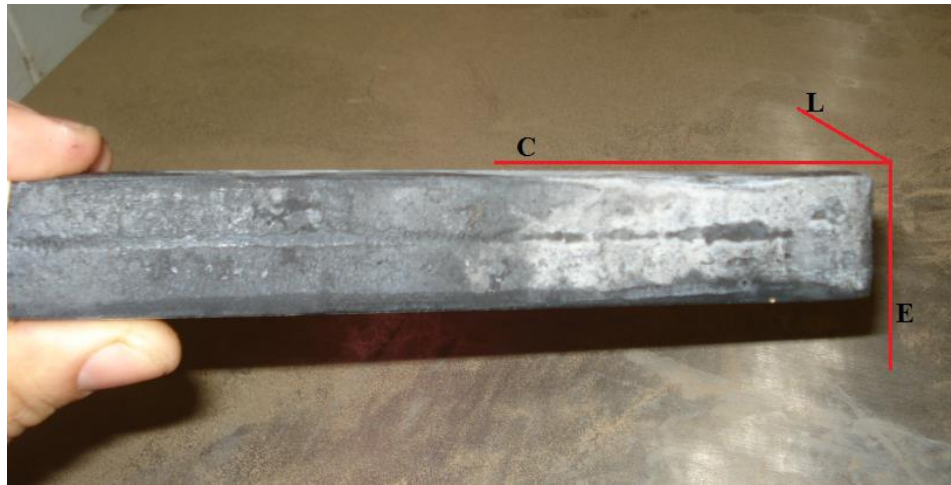


Figura 6 Nesta Figura é apresentada as dimensões ou relações entre o Comprimento (C), Largura (L) e Espessura (E) dos corpos de prova

Após a moldagem, os corpos de prova foram acondicionados em sacos plásticos fechados (ambiente saturado), por 48 horas (Figura 7C). Após este período, os mesmos foram levados para uma câmara de vaporização, com umidade saturada e com temperatura interna de  $70^{\circ}\text{C}$ , onde ficaram por um período de 7 dias (Figura 7B).

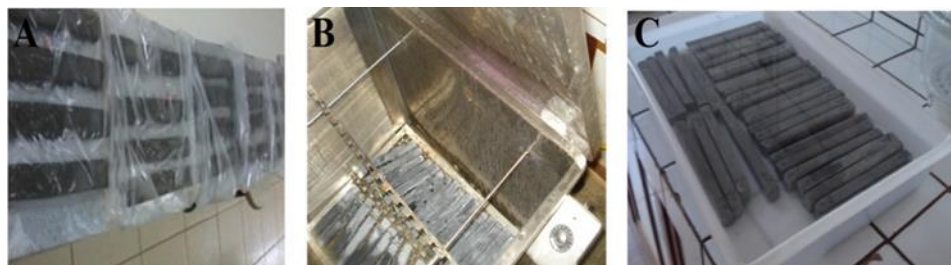


Figura 7 Placas cimentícias. A) Armazenadas em ambiente com umidade saturada e em temperatura ambiente por 48 horas; B) Estufa de vaporização para cura do fibrocimento; C) Placas imersas em água por um período de 24 horas

#### 4.2.1 Caracterizações dos compósitos

O passo seguinte foi o encaminhamento dos materiais para a caracterização das propriedades físicas e mecânicas. Os corpos de prova foram ensaiados na condição saturada, ou seja, imersos em água por 24 horas, antes dos ensaios mecânicos e físicos (Figura 7C).

##### 4.2.1.1 Propriedades mecânicas dos compósitos

Os ensaios mecânicos de flexão estática foram executados em uma máquina de testes universal da marca TIME GROUP, modelo WDW 20E. Para o ensaio de Módulo de Ruptura (MOR), Módulo de Elasticidade (MOE), limite de proporcionalidade (LOP) e Tenacidade à flexão estática foram utilizados os procedimentos descritos em International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures - RILEM (1984), com uma configuração com três pontos, vão de 140 mm e velocidade de avanço de 1,5 mm/min. As equações utilizadas para os cálculos dos valores médios de cada propriedade, para cada corpo de prova ensaiado mecanicamente estão apresentadas na Tabela 4.



Figura 8 Testes mecânicos executados em uma máquina de testes universal da marca Arotec e equipada com célula de carga de 20 KN

Tabela 5 Equações para determinação da propriedade mecânicas dos corpos-de-prova.

<b>Propriedades mecânicas</b>	<b>Fórmula</b>
Módulo de ruptura (MPa)	$(3 \cdot C_{\text{máx}} \cdot \text{vão}) / (2 \cdot b \cdot d^2)$
Módulo de elasticidade (MPa)	$\text{vão}^3 \cdot (C_2 - C_1) / 4(D_2 - D_1) \cdot b \cdot d^3$
Limite de proporcionalidade (MPa)	$(3 \cdot C_{\text{lop}} \cdot \text{vão}) / (2 \cdot b \cdot d^2)$

Onde:

$C_{\text{máx}}$  = Carga máxima aplicada em Newton;

$C_{\text{lop}}$  = Carga máxima aplicada antes da curva carga-deformação, em Newton;

$b$  = Largura do corpo-de-prova em milímetros;

$d$  = Espessura do corpo-de-prova em milímetros;

$C_1$  = Carga obtida dentro do regime elástico e menor que a  $C_2$ , em Newton;

$C_2$  = Carga obtida dentro do regime elástico e maior que a  $C_1$ , em Newton;

$D_1$  = Deformação obtida dentro do regime elástico e menor que a  $D_2$  (em, mm);

$D_2$  = Deformação obtida dentro do regime elástico e maior que a  $D_1$  (em, mm);

Quanto à tenacidade ( $TE = \text{energia absorvida}/b \cdot h$ ) foi definida como sendo a energia absorvida durante o teste de flexão, dividida pela área da seção transversal da amostra, RILEM (1984).

#### 4.2.2 Propriedades físicas dos compósitos

Os valores médios de densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente foram obtidos, seguindo-se os procedimentos especificados pela norma C 948 American Society for Testing and Materials - ASTM (1981). Para a determinação dessas propriedades, os corpos de prova foram submersos

em água destilada à temperatura ambiente por período de 24 horas, sendo determinada a massa imersa  $M_i$  (com a amostra dentro da água) e a massa úmida  $M_u$  (a amostra é retirada da água e sua superfície é enxugada levemente para a retirada do excesso de água). Logo após, foi realizada a secagem das amostras, por período de 24 horas, em uma estufa com circulação de ar na temperatura de  $75 \pm 5$  °C, sendo as amostras posteriormente pesadas para determinação da massa seca  $M_s$ .

Para determinar as propriedades físicas foram utilizadas as equações da Tabela 5.

Tabela 6 Equações para determinação da propriedade físicas dos corpos de prova.

Propriedades físicas	Fórmula
Densidade aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$(M_s/(M_u-M_i)) \cdot \rho_w$
Absorção de água (%)	$((M_u-M_s)/M_s) \cdot 100$
Porosidade aparente (%)	$((M_u-M_s)/(M_u-M_i)) \cdot 100$

Onde:

$M_u$  = Massa úmida;

$M_i$  = Massa imersa;

$M_s$  = Massa seca;

$\rho_w$  = Densidade do líquido em que as amostras foram imersas.

### **4.3 Caracterização microestrutural**

As propriedades microestruturais foram avaliadas nos compósitos de fibrocimento produzidos, sendo verificadas via microscopia eletrônica de varredura (MEV). Tal caracterização foi realizada na superfície de ruptura das placas que foram ensaiadas por flexão estática. Essa observação visou avaliar o efeito de reforço com cinzas e com partículas de pneus sobre os ensaios mecânicos e físicos dos compósitos produzidos.

As amostras passaram inicialmente por dois banhos de ouro, sendo posteriormente avaliadas mediante a utilização de um microscópio eletrônico de varredura da marca Zeiss Modelo DSM 940<sup>a</sup>, pertencente ao Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras.



## **5 ANÁLISE ESTATÍSTICA**

Os dados foram avaliados em delineamento inteiramente casualizado, tendo sido realizada análise de variância e regressão, ambos a 5% de significância. Para os dados de densidade aparente foram utilizadas análise de variância e teste de média Scott-Knott, ambos a 5% de significância.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1 Partículas de borracha de pneu**

As partículas de pneu utilizadas neste trabalho são um material de comprimento variando entre 0,1 a 15 mm e espessura variando de 0,1 a 1,3mm, que não passaram por nenhum tratamento químico ou qualquer tipo de lavagem. Tudo isso com o intuito do menor gasto de energia no processo e, consequentemente, um menor gasto de capital, haja vista que, quanto menores os custos, maiores os lucros.

#### **6.1.1 Propriedades físicas**

Nesse tópico serão avaliadas as propriedades físicas de densidade, absorção de água e porosidade. Estas serão de fundamental importância na avaliação nas propriedades mecânicas de MOR, MOE, LOP e Tenacidade.

#### **6.1.2 Densidade**

Na Tabela 7, estão apresentados os valores médios para densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) dos compósitos com partículas de borracha.

Tabela 7 Valores médios da densidade aparente dos compósitos com partículas de borracha, após 28 dias de cura.

% de borracha	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
0	1,818 (0,052) a
5	2,071 (0,052) b
10	2,050 (0,018) b
15	2,113 (0,044) c
20	2,225 (0,049) c

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferenciam estatisticamente pelo Teste de média Scott-Knott, a 5% de significância. Os valores que se encontram dentro dos parênteses correspondem ao desvio padrão.

Foram observadas na Tabela 7, diferenças significativas para a propriedade densidade aparente dos diferentes tratamentos avaliados. Observa-se que houve aumento significativo da densidade aparente do fibrocimento com a adição das partículas de borracha, havendo relação direta com o aumento da porcentagem de borracha. Sendo assim, o tratamento sem borracha em sua constituição, foi aquele que apresentou a menor densidade dentre todos os tratamentos avaliados (1,81 g/cm<sup>3</sup>). Em contrapartida, foram encontradas, no tratamento, 20% partículas de borracha, a maior densidade dentre todos os tratamentos avaliados, 2,22g/cm<sup>3</sup>. Tal situação poderia estar atrelada ao fato do compósito 20% partícula de pneu possuir a maior quantidade de poros dentre todos os tratamentos avaliados, 21,70% (Figuras 11 A, B, C e 10), ou mesmo no grau de empacotamento, em função do efeito da borracha na hidratação do cimento.

Foi no tratamento 0% partículas de borracha, que encontramos o maior valor para absorção de água, 10,98% (Figura, 9). Este fato pode estar

relacionado também ao seu alto índice de poros, 19,88% (Figura 10 e 11) ou mesmo devido às reações químicas que acontecem na água, daí uma absorção maior desta. A Figura 12 deste trabalho melhor explica as reações intrínsecas ocorridas no interior da massa dos compósitos.

Segundo Zardo et al. (2004), o fato da adição de partículas de borracha promover um aumento na densidade dos compósitos, pode estar relacionado ao empacotamento na adição de partículas, com granulometrias distintas que pode promover o aumento da densidade por meio de dois mecanismos. Partindo de uma distribuição unimodal, a densidade do compacto pode ser aumentada pela substituição de uma porção volumétrica ocupada por partículas finas e poros, por um volume igual de partículas sólidas grosseiras. De forma similar, a densidade pode ser aumentada, pelo preenchimento do espaço entre as partículas grossas por partículas finas. Basicamente, a estrutura com empacotamento denso é composta por partículas grandes cujos interstícios são preenchidos por partículas menores, criando novos interstícios que serão preenchidos por partículas ainda menores, e assim sucessivamente.

Ou seja, as propriedades físicas e mecânicas podem estar relacionadas aos elementos que compõem os diferentes tipos de cimento, seu processo de hidratação e as conseqüentes reações químicas que ocorrem entre a matriz e os demais elementos que constituirão os compósitos de fibrocimento.

Com os valores estimados neste trabalho, pode ser observada que a média para densidade aparente para os compósitos que levam partículas de pneu, foi de 2,11 g/cm<sup>3</sup> (Tabela 6). Tal estimativa está atrelada aos parâmetros físicos que podem estar atrelados a outros parâmetros, como os químicos, que incluem a composição e estrutura química dos materiais cimentícios e a compatibilidade entre os aditivos químicos e o material (SOTO, 2010).

### 6.1.3 Absorção de Água (AA)

Quanto à absorção de água (AA), nas Figuras 9 e 11 podemos observar seus valores médios e comportamentos, quando adicionadas partículas de borracha. O menor valor para absorção de água pode ser encontrado no compósito 10% partículas de borracha (8,04%), enquanto ficam sob a responsabilidade dos compósitos 0% e 5% partículas de borracha, os maiores valores percentuais para absorção de água 10,98 e 10,31%, respectivamente (Figura 9). Tal característica atribuiu ao compósito 10% partículas de borracha, aquele compósito que possui a menor porosidade, 16,47 g/cm<sup>3</sup> (Figura 10) e o segundo maior MOR (6,34 MPa) entre os compósitos que levam borracha em sua formulação. O composto 5% partícula de borracha com a segunda maior absorção de água (10,31%), foi o que atingiu o maior MOR (6,73MPa).

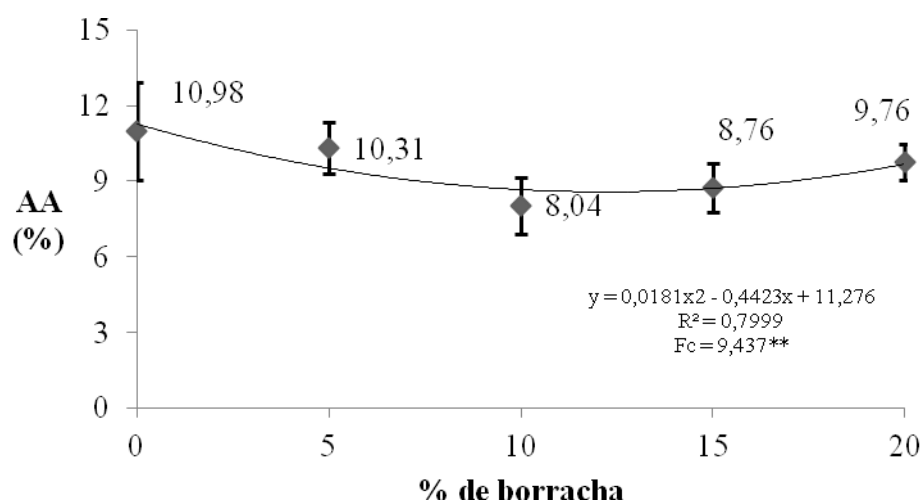


Figura 9 Relação da porcentagem de partículas de borracha versus porcentagem da absorção de água (AA) dos compósitos após 28 dias de cura

De forma geral, observou-se uma relação significativa entre o aumento da porcentagem de borracha e a absorção de água, atingindo assim uma média percentual de 9,21% entre os compósitos que levam partículas de borracha em sua constituição. Tal fato pode estar atrelado à extrusão e ao comportamento do gradual alto volume das fibras nos compósitos.

Para legislar e controlar os percentuais de água aceitável na produção de telhas tipo fibrocimento existe a norma NBR 12800 (ABNT, 1993), que estabelece que a absorção de água máxima para telhas onduladas do fibrocimento seja de 37%. Nesse sentido, todos os tratamentos atenderam à norma de comercialização.

#### **6.1.4 Porosidade**

Observa-se na Figura 10, que a adição de partículas de borracha trouxe um efeito significativo sobre a porosidade do compósito. Observa-se que a porosidade se manteve com a adição de 5%, seguida de uma queda com a adição de 10 e 15% de partículas de pneu e depois um aumento máximo da porosidade, com a adição de 20% de borracha de pneu.

A porosidade também é uma importante propriedade por este trabalho relatadas. Dentre os 5 tratamentos avaliados, foi o tratamento 10% partículas de borracha, aquele que apresentou a menor porosidade ( $16,47\text{g/cm}^3$ ) e o segundo maior valor para MOR (6,34 MPa) para os compósitos que levam partículas de borracha. Outro fato curioso para o tratamento 10% partículas de borracha, se encontra no fato do mesmo, além de possuir a menor porosidade, possui também a menor absorção de água (Figura 9), atrelando assim, um ocorrido fato ao outro.

Tabela 8- Relação entre as porcentagens dos materiais (partículas de pneu) e suas respectivas proporções de água, utilizadas na confecção dos compósitos.

PNEUS	0%	2,50%	5%	7,50%	10%	15%	20%
Partículas	0,354	-	0,30	-	0,36	0,36	0,37

Tais situações podem ser explicadas, quanto ao fato do aumento da porcentagem de borracha ter proporcionando uma maior porosidade ao compósito, a qual estaria associada à questão da extrudabilidade da massa de cimento, onde pode ocorrer junção das partículas e geração de espaços entre elas, no interior do compósito, no momento da fabricação do produto (SHEN et al., 2008; SRINIVASAN; DEFORD; SHAH, 1999; TEIXEIRA, 2010).

Para melhor entendermos tal propriedade, pode-se observar a Figura 14, onde foram capturadas fotos por microscopia eletrônica de varredura (MEV), ficando esclarecido desse modo que as áreas mais escuras, Figura 14 A, que foi circulada e demarcada está indicando a presença de sulcos oriundos do arrancamento das partículas de borracha, que pode estar associado à baixa adesão. No entanto, quanto a Figura 14 B, o alto relevo encontrado no centro da figura, para o qual a seta chama a atenção, demonstra a presença de partículas de borracha ancoradas na parede da superfície rompida. Tudo isso foi falado para chegarmos à conclusão da presença marcante de uma pequena quantidade de poros, se compararmos as fotos dos demais tratamentos que levaram partículas de borracha de pneu, portanto, a baixa porosidade desse compósito pode estar ligada à sua baixa concentração de poros.

Quanto ao tratamento que levou em sua formulação 20% partículas de borracha, dentre os demais, este foi o que apresentou a maior porosidade (21,70g/cm<sup>3</sup>), veja Figura 16. Foi neste compósito também que se encontrou o

menor MOR (4,73 MPa). Outro registro da grande porosidade do compósito, 20% partículas de pneu pode ser observado nas fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da Figura 16 B, em que são observadas áreas mais escuras representadas por depressões ou buracos, que demonstram claramente a presença de poros e estes são entendidos como protagonistas da fração expressiva e porosa dos compósitos.

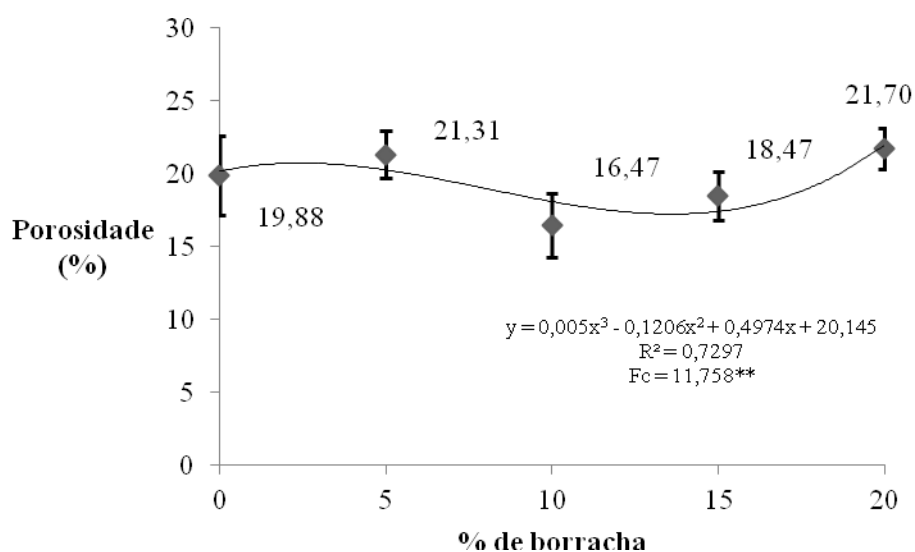


Figura 10 Relação da porcentagem de partículas de pneu sobre a porosidade dos compósitos, após 28 dias de cura

## 6.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para melhor entendermos as propriedades físicas dos compósitos de fibrocimento, são utilizadas fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde são observadas áreas mais escuras que indicam a presença de sulcos ou buracos oriundos do arrancamento das partículas de



borracha. Com a MEV, pode-se encontrar nas fotos eletrônicas a presença de sobressalências, demonstrando a presença de partículas de borracha ancoradas na parede da superfície rompida.

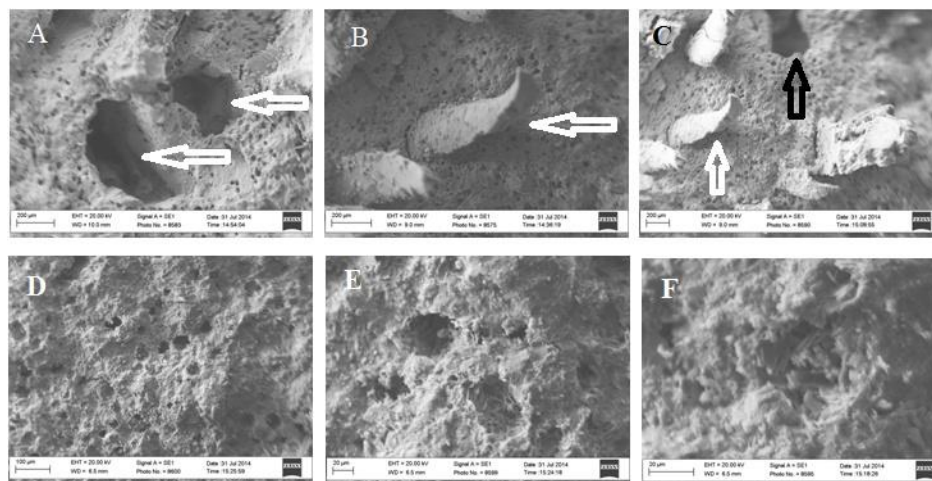


Figura 11- As Figuras 11A, 11B e 11C, são fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde a relação máxima de 20% partículas de pneu contrastam com as figuras 11D, 11E e 11F, constituídas por 0% partículas de pneu, ou seja, sem nenhuma presença de borracha na sua formulação. Nas figuras 11A, 11B e 11C, são encontradas fotos capturadas via microscopia eletrônica de varredura, onde a relação de 20% partículas de pneu deixa claro que no momento da ruptura do compósito, quando aplicado à carga máxima, pode-se encontrar uma grande quantidade de partículas sintéticas e, conseqüentemente, uma grande quantidade de sulcos ou depressões (indicados por setas), que anteriormente eram ocupadas por borracha. Sendo assim, fica claro que as partículas de pneus não foram fraturadas ou rompidas e sim arrancadas, ou seja, as partículas tiveram uma baixa adesão para com a matriz, provavelmente por efeito da cura

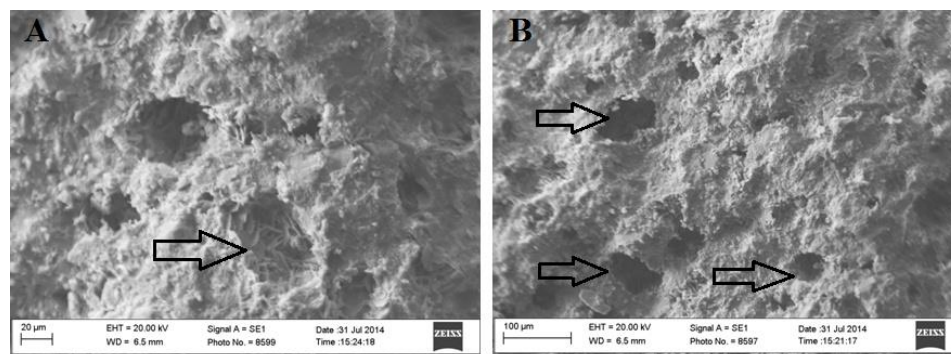


Figura 12 (0% partícula de pneu) Figura 12A, são fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde, pode se observar que a indicação apontada pela seta, diz respeito às reações químicas ocorridas no interior dos compósitos que levaram 0% partículas de borracha. Quanto à Figura 12B, as setas indicam os poros presentes na estrutura dos compósitos que não levaram partículas de borracha

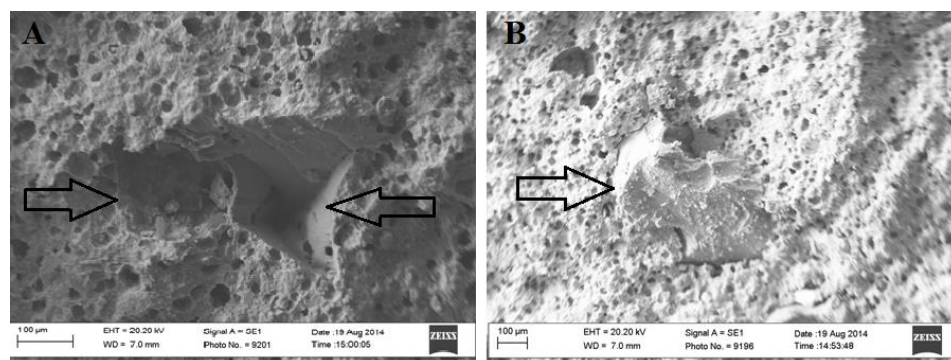


Figura 13 (5% partículas de pneu)- Na Figura 13A, são fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde, observamos que as áreas mais escuras onde se observam setas, indicam a presença de sulcos oriundos do arrancamento das partículas de borracha. Pode-se observar também poros, representados por pontos escuros menores. Quanto à Figura 13B, a sobressalência encontrada no centro da figura indicada pela seta, indica a presença de partículas de borracha ancoradas na parede da superfície rompida

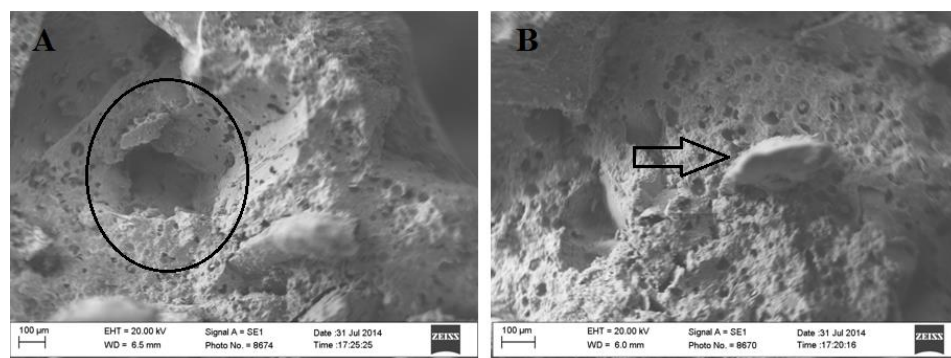


Figura 14 (10% partículas de pneu)- A Figura 14A, são fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde observamos que a área mais escura demarcada por um círculo, indica a presença de sulcos oriundos do arrancamento das partículas de borracha. Quanto à Figura 14B, a sobressalência encontrada no centro da figura indicada pela seta, indica a presença de partículas de borracha ancoradas na parede da superfície rompida. Pode-se observar também poros, representados por pontos escuros menores

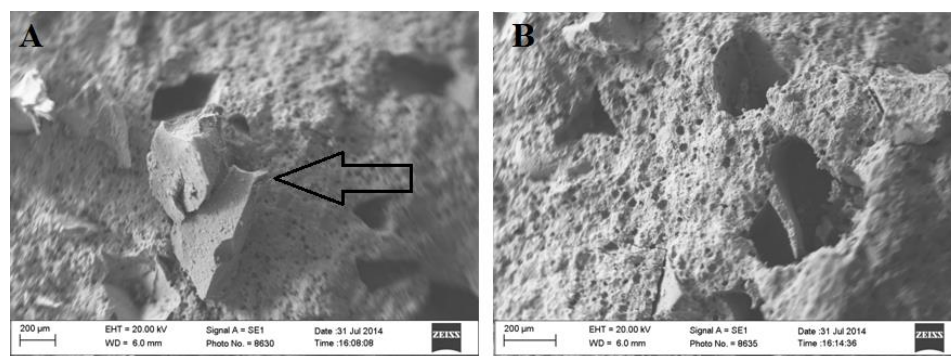


Figura 15 (15% partículas de pneu)- Quanto à Figura 15A, são fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), em que a sobressalência encontrada no centro e indicada pela seta, demonstra a interface entre as partículas de borracha ancoradas e a parede da superfície rompida. Na Figura 15, observa-se que a área mais escura indicada por seta, indica a presença de sulcos oriundos do arrancamento das partículas de borracha ancoradas nos compósitos. Quanto aos pontos menores e escuros, estes são entendidos como a fração porosa dos compósitos

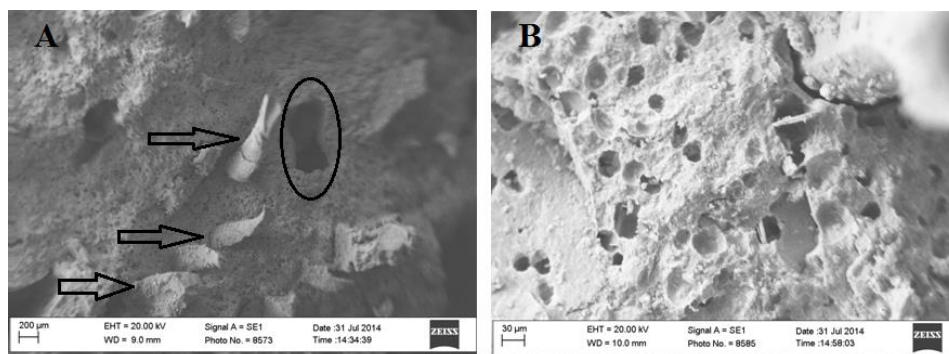


Figura 16 (20% partículas de pneu)- Quanto à Figura 16A, são fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde a sobressalência encontrada no centro e indicada pela seta, demonstra a interface entre as partículas de borracha ancoradas e a parede da superfície rompida. Quanto à área mais escura demarcada por um círculo, essa indica a presença de sulcos oriundos do arrancamento das partículas de borracha. Na Figura 16 B, observa-se que a área mais escura representa buracos, indicando a presença de sulcos e estes são entendidos como a fração porosa dos compósitos

### 6.3 As partículas de borracha nos corpos de prova

Antes de iniciar a discussão acerca das propriedades mecânicas das partículas de borracha, é necessário entender uma propriedade curiosa quanto ao fato de ter ocorrido a ruptura e não o fraturamento das partículas. Esta situação pode ser explicada devido à borracha de pneu ser um polímero e pertencer à classe dos elastômeros. Os elastômeros são caracterizados por apresentarem propriedades elásticas, sendo assim, podem se deformar e voltar ao estado inicial de repouso (Figura 17), como observado nesta figura, mesmo o corpo de prova tendo se quebrado, não ocorreu seu rompimento total, haja vista que as partículas de borracha de pneu ancoraram uma seção fraturada a outra, não deixando que as partes se separassem. Essa característica justifica também a invariabilidade ou semelhança do módulo elástico com baixa tenacidade.

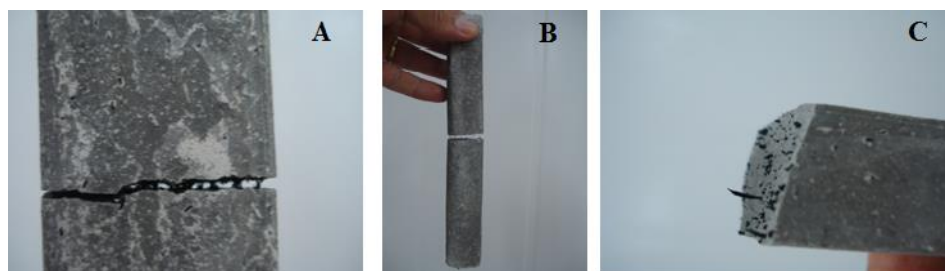


Figura 17 Corpo de prova parcialmente rompido após aplicação de carga para obtenção do MOR

#### 6.4 Propriedades mecânicas das partículas de borracha

Na Figura 20, 21, 22 e 23 são encontrados, respectivamente, os valores médios para módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE), limite de proporcionalidade (LOP) e tenacidade para os compósitos que levam, em sua formulação, partículas de borracha nas proporções: 5, 10, 15 e 20% do volume total da massa extrudada. Nessas figuras também é encontrado o tratamento 0%, o qual não foi adicionado em sua confecção de partícula de borracha.

Com os resultados médios destas propriedades avaliadas, observa-se uma relação significativa quando porcentagens adicionais de partículas de borracha são introduzidas nos compósitos. Ou seja, quando incluímos partículas de borracha nos compósitos, encontra-se uma tendência decrescente dos valores médios para MOR, MOE e LOP e uma baixa tenacidade ou energia específica (Figura 23), fato esse que pode estar associado ao arranchamento das partículas de borracha de pneu e não ao rompimento ou fratura, como normalmente ocorre com as fibras vegetais. Soto (2010) explica também que este ocorrido pode está ocasionando danos na interface matriz-fibra, promovendo a queda do desempenho de MOR, e possível escorregamento friccional matriz-fibra, durante solicitação de carregamento (SOTO, 2010).

Esse escorregamento das fibras, citado por Soto (2010), claramente pode ser observado na Figura 18 e 19, uma foto capturada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde observamos que a área mais escura demarcada por um círculo, indica a presença de sulcos oriundos do arrancamento das partículas de borracha; quanto à sobressalência encontrada no centro da figura indicada pela seta, demonstra a presença de partículas de borracha ancoradas na parede da superfície rompida.

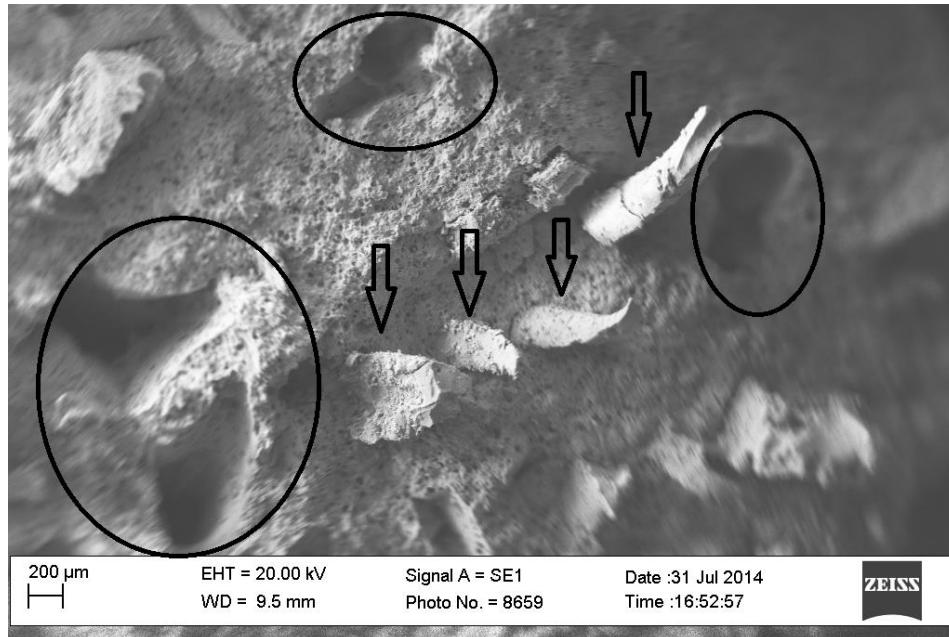


Figura 18- Foto capturada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), a sobressalência destacada na figura e indicada por setas, demonstra a interface entre as partículas de borracha ancoradas nas paredes do compósito rompido. Quanto à área mais escura demarcada por círculos, essa indica a presença de sulcos oriundos do arrancamento destas partículas.

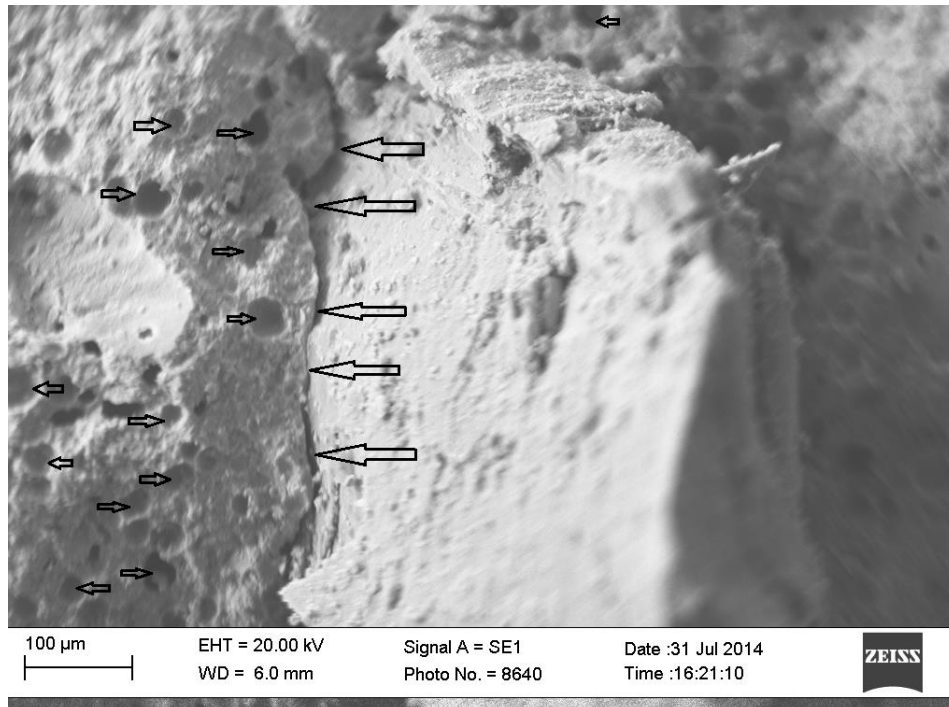


Figura 19- Foto capturada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As setas maiores representa a interface matriz/fibra, as setas menores representam os poros presentes no compósito fibrocimento.

Com a Figura 19, podemos dizer também que a porosidade induzida pelas fibras, podem reduzir os módulos da matriz tenacidade e a aderência da interface (LI et al., 1996). Haja vista que, quando aumentado à porcentagem de fibra nos compósitos, foram obtidas baixas qualidades mecânicas, encontradas na Tabela 7 e Figuras 20, 21, 22 e 23.

Tabela 9- Relação porcentagem de borracha vs propriedades mecânicas.

<b>% Partículas de borracha</b>	<b>MOR (MPa)</b>	<b>MOE (MPa)</b>	<b>LOP (MPa)</b>	<b>TE Kj/m<sup>2</sup></b>
0%	8,96	5,75	8,92	0,3367
5%	6,73	5,15	6,70	0,3500
10%	6,34	4,32	6,37	0,3377
15%	5,79	3,57	5,62	0,3556
20%	4,73	3,21	4,68	0,3430

O tratamento formulado com adição de 5% de partículas de pneu, dentre todos que levaram borracha, foi o qual demonstrou o MOR mais expressivo (6,73 MPa) e, conseqüentemente, aquele com maior MOE e LOP, 5,151 MPa e 6,709 MPa respectivamente. A semelhança entre os valores de MOR e LOP indicam que não houve uma resistência, quanto às partículas de borracha ao rompimento do corpo de prova. Tal fato pode ser provado, numericamente, com um baixo e invariável valor na tenacidade (Figura 23).



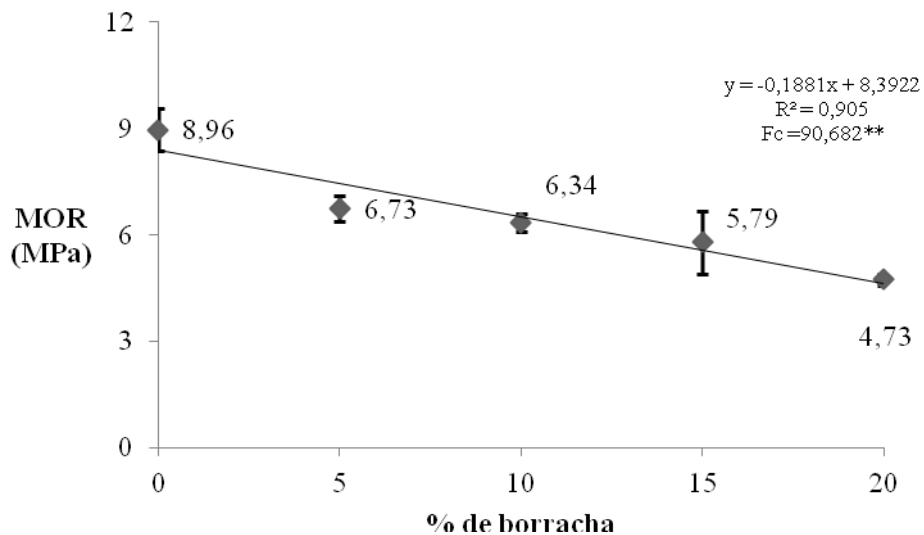


Figura 20- Valores médios do módulo de ruptura (MOR) dos compósitos com partículas de borracha, após 28 dias de cura

Quanto ao tratamento 20% partículas de borracha, este foi o que apresentou o menor MOR (Figura 20), o menor MOE (Figura 21), e também o menor LOP (Figura 22), com 4,73 MPa, 3,21 MPa, 4,68 MPa, respectivamente. Outra curiosidade comum, ocorrida em todos os tratamentos e também nos 20% partículas de borracha, está no fato da baixa tenacidade (0,343 KJ/m<sup>2</sup>, para o tratamento 20% borracha). Outra justificativa para valores tão baixos nas propriedades físicas do compósito 20% partículas de borracha, pode estar no fato de que a região de transição da matriz em torno da fibra tem como característica sua alta porosidade, permite o acúmulo de água, e uma maior concentração de hidróxido de cálcio, propiciando elevada alcalinidade (SAVASTANO JÚNIOR; DANTAS; AGOPYAN, 1994) e conseqüente baixa resistência à cargas pontuais (Figura 19).

No gráfico de módulo de elasticidade, da Figura 21, é observada uma redução em seus valores médios, quando temos os valores percentuais de partículas de pneu, aumentados. Tal situação também pode ser observada quanto ao MOR.

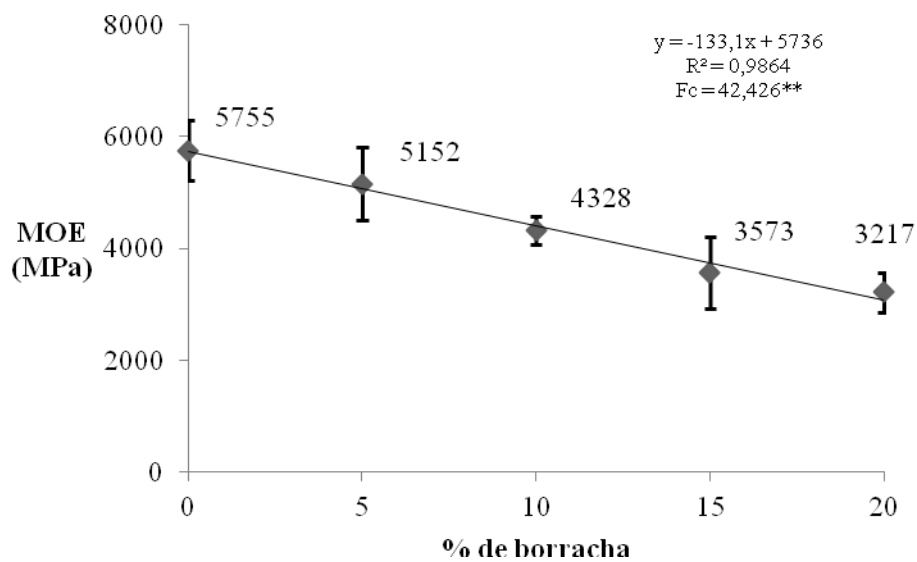


Figura 21 Valores médios do módulo de elasticidade (MOE) dos compósitos com partículas de borracha, após 28 dias de cura

As dimensões das fibras no compósito podem influenciar nas suas características (Figura 19). Fibras com relação de aspecto (comprimento/espessura) alto tendem a possuir resistências à tração mais elevadas, podendo contribuir positivamente com a resistência à flexão do compósito, pelo efeito de melhor ancoragem na matriz (MCKENZIE, 1994).

Como ficou observado nas Figuras 20, 21 e 22, claramente, os resultados, tanto de MOR, quanto de MOE e o LOP, são diminuídos à medida

que são acrescentadas quantidades maiores de partículas de borracha. Tal fato pode ser explicado por Savastano Júnior, Warden e Coutts (2000), o qual diz: relações de aspecto altas podem também conduzir a reduções nos valores de absorção de energia do compósito pela ruptura da fibra, em detrimento de seu arrancamento da matriz (Figura 19). As fibras longas podem ainda trazer dificuldades nos processos de produção de compósitos, por meio de dispersão em solução aquosa (SAVASTANO JÚNIOR; WARDEN; COUTTS, 2000).

Na Figura 22, temos o Limite de Proporcionalidade (LOP) dos compósitos que levam partículas de borracha de pneu em sua formulação. Nesta podemos perceber seu paralelismo ou semelhança, quanto aos valores de MOR e MOE, encontradas nas Figuras 20 e 21.

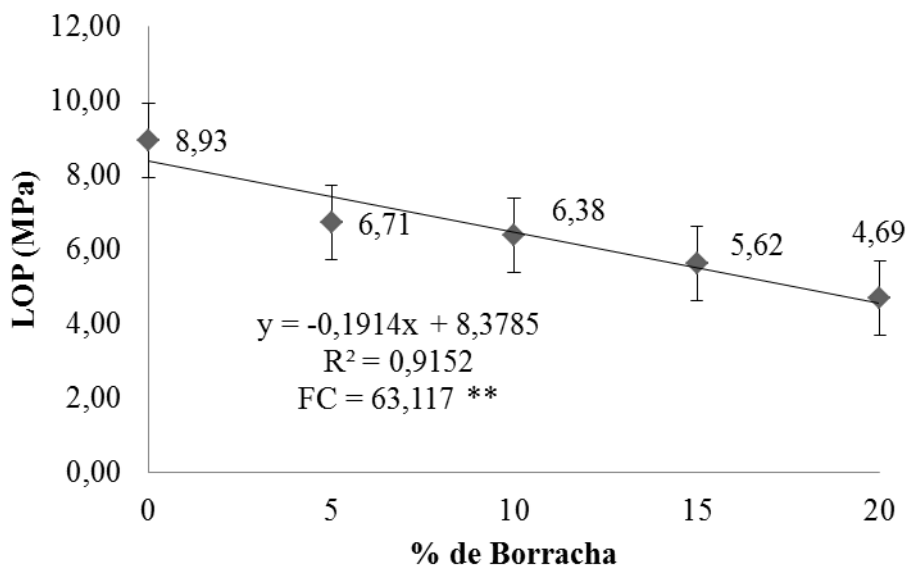


Figura 22 Valores médios do Limite de Proporcionalidade (LOP) dos compósitos com partículas de borracha, após 28 dias de cura

Na Figura 23, temos representada a tenacidade dos materiais que levam em sua formulação partículas de borracha de pneus. Nesta, é observado que os valores para energia na ruptura não se destacaram expressivamente como esperado. Isso implica que a adição de partículas de borracha possui uma baixa tenacidade, quanto à aplicação de cargas pontuais.

Dentre todos os materiais avaliados para tenacidade, não foi observado um valor expressivo que destacasse sua superioridade quanto aos demais. Sendo assim, é observada uma baixa tenacidade, quando aplicadas sem efeito, partículas de pneu nos compósitos.

Como neste trabalho as fibras tiveram uma relação de comprimento variando de 0,1 a 15 mm, e espessura de 0,1 a 1,3mm, podemos dizer assim que a grande variação dimensional teria proporcionado resultados mecânicos com valores decrescentes à medida que foram aumentadas as proporções da borracha. Haja vista que a tenacidade também obteve valores baixos, sendo sua média para os compósitos que levam borracha de 0,34 KJ/m<sup>2</sup>.

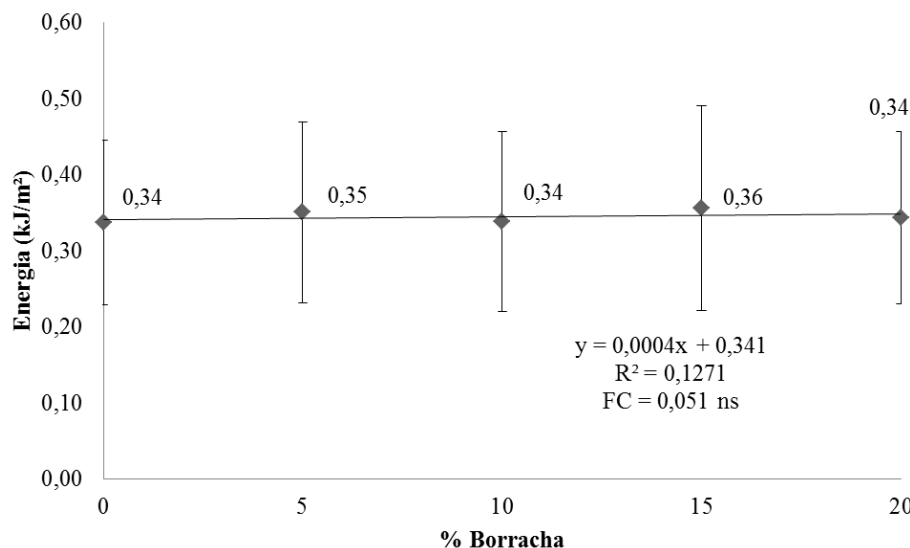


Figura 23 Valores médios da Energia Específica ou Tenacidade (TE) dos compósitos com partículas de borracha, após 28 dias de cura

Um fenômeno positivo quanto à utilização de partículas de borracha no compósito, está relacionado com o fato da borracha de pneu ser um polímero. Sendo assim sua absorção ou mesmo sua afinidade com a água, tanto no preparo dos compósitos quanto nos materiais produzidos e acabados é praticamente nula, haja vista que borracha de pneu não absorve água como as fibras vegetais absorvem, ou melhor, a aplicação de partículas de borracha de pneu não sofreria, em suas fibras, o processo de degradação alcalina que ocorre com as fibras vegetais nos compósitos de fibrocimento, haja vista que o pneu tem um tempo de degradação natural, indeterminado, (BRASIL, 2005; MOTTA, 2008), fato que prova a resistência da borracha frente às intempéries da natureza.

No entanto, a norma NBR 15498 (ABNT, 2007), para placas planas sem amianto, exige para categoria 2 (telhas fibrocimento) uma resistência mínima para o módulo de ruptura de 4 MPa. Nesse sentido, mesmo com a

diminuição da resistência dos compósitos, com a adição de partículas de borracha, os compósitos produzidos atendem aos critérios para comercialização.

Uma curiosidade é encontrada no compósito que não leva partículas de borracha (0%), foi o que melhor se destacou dentre os demais, haja vista que, seu MOR, MOE e LOP alcançaram valores respectivos de 8,96 MPa, 5,75 MPa e 8,92 MPa. Sendo assim, tal compósito se encaixa na categoria 3, que aceita um MOR, a partir de 7 MPa, para confecção de telhas de fibrocimento, comercialmente.

## **6.5 Cinzas de pneu (CIPE)**

As cinzas de pneu foram matérias provenientes da queima direta e controlada de partículas de pneu automobilístico fora de uso. Esta queima foi realizada no intuito do aproveitamento energético deste calor (cerca de 8790 kcal/kg) em sistemas industriais que o requerem (DOURADO, 2011). Ou mesmo, poderia ser utilizada esta fumaça no processo de carbonatação dos compósitos de fibrocimento, melhorando assim, suas propriedades mecânicas (TONOLI et al., 2010a).

### **6.5.1 Propriedades físicas**

Nesse tópico, serão avaliadas as propriedades físicas de densidade, absorção de água e porosidade. Estas serão de fundamental importância na avaliação das propriedades mecânicas de MOR, MOE, LOP e tenacidade.

### 6.5.1.1 Densidade

Na Tabela 10, encontra-se o resumo da relação entre as porcentagens de cinzas presentes nos compósitos e as propriedades físicas a estes atribuídas.

Tabela 10- Resumo da porcentagem de cinzas de pneu vs propriedades físicas.

% Cinzas	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de Água (%)	Porosidade (%)
0,0%	1,81	11	19,9
2,5%	1,96	12,2	23,9
5,0%	2,1	5,6	11,8
7,5%	1,966	13,2	26
10,0%	2,243	7,4	16,6

Na Tabela 11 encontram-se os valores médios para densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>), dos fibrocimentos, com adição de cinza de pneu.

Tabela 11 Valores médios e desvio padrão da densidade aparente dos compósitos com cinzas de pneu, após 28 dias de cura.

% de cinzas	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
0	1,81 (0,052) a
2,5	1,96 (0,073) a
5	2,10 (0,056) a
7,5	1,96 (0,039) a
10	2,24 (0,040) a

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferenciam estatisticamente pelo Teste de média Scott-Knott, a 5% de significância. Os valores que se encontram dentro dos parênteses correspondem ao desvio padrão.

Não foi observado efeito significativo da adição de cinzas de pneu sobre a densidade do fibrocimento (Tabela 11). No entanto, observa-se que os tratamentos 5 e 10% de cinzas de pneu foram aqueles, dentre todos os materiais avaliados, os que apresentaram os maiores valores para densidade ( $2,1 \text{ g/cm}^3$  e  $2,24 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente).

Quanto aos compósitos que levaram em sua formulação as proporções de 2,5% e 75%, foram encontradas frações percentuais iguais para suas densidades de  $1,96 \text{ g/cm}^3$ , cada. Tal fato poderia estar relacionado à composição desses produtos hidratados que ajudarão a definir as propriedades físicas e mecânicas do compósito (SILVA, 2002). Ou seja, está questão poderia estar atrelada ao fato das cinzas de pneu serem um material de formulação com diferentes e inúmeros elementos químicos (Tabela 1), e, conseqüentemente, diferentes reações químicas ocorrem entre os diferentes tipos de elementos encontrados no interior dos compósitos, atribuindo ao material comportamento incomum quanto à densidade.

Outro fato curioso está no compósito que não leva em sua formulação cinzas de pneu. Este, como observado na Tabela 11, em que seus valores para densidade são os menores entre todos os aspectos avaliados, ou seja, o compósito que não leva cinzas de pneu foi o que apresentou a menor densidade,  $1,81 \text{ g/cm}^3$ , sua porosidade pode ser observada na Figura 26. Densidade baixa deixará o material mais leve, uma propriedade de fundamental importância na produção de telhas de fibrocimento.

#### **6.5.1.2 Absorção de água e porosidade**

Nas Figuras 25 e na Tabela 10, podem se verificar os valores médios de absorção de água dos compósitos produzidos com adição de cinzas de pneu.



Observa-se que não houve efeito significativo com a adição de cinzas sobre a propriedade de absorção de água, nos compósitos de fibrocimento produzidos.

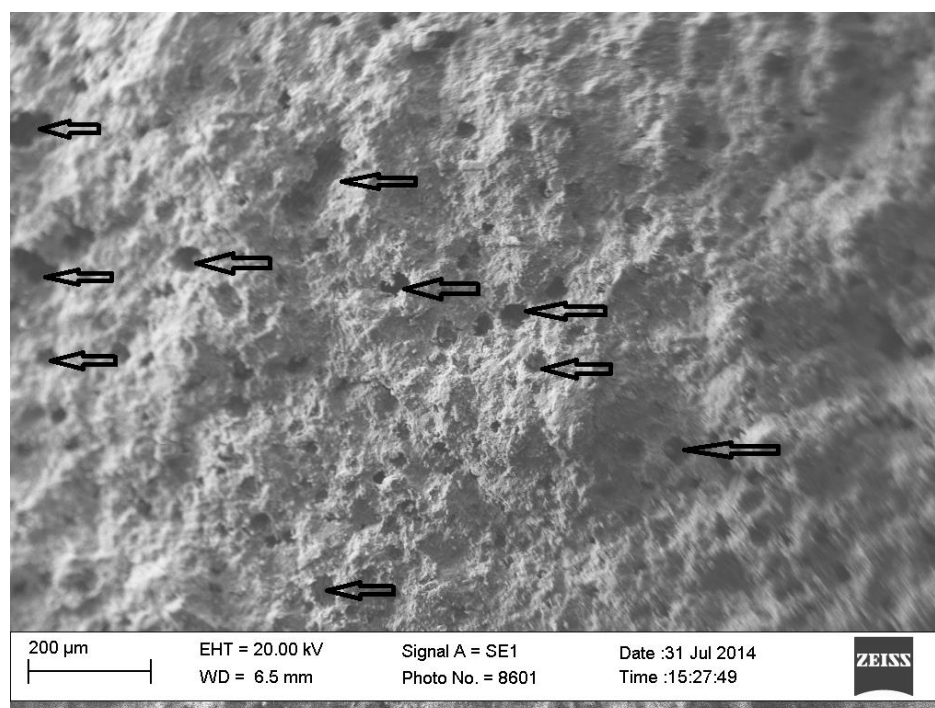


Figura 24 (0% resíduos de pneu) São fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde, pode- se observar que a seta, indica os poros presentes na estrutura dos compósitos que não levaram cinzas de pneu

Entre os tratamentos avaliados, notou-se uma redução bastante destacada no compósito 0%, ao qual não foi adicionado cinzas de pneu. Neste, foi encontrada uma absorção de água de 11%, como pode ser observado na Figura 24 e 25; a baixa quantidade de poros pode ter contribuído com a baixa absorção de água.

Tabela 12 Relação entre as porcentagens do material (cinzas de pneu), e suas respectivas proporções de água, utilizadas na confecção dos compósitos.

PNEUS	0%	2,50%	5%	7,50%	10%	15%	20%
Cinzas	0,354	0,369	0,389	0,403	0,42	-	-

Como relatado, do ponto de vista físico do processo de fibrocimento, a baixa absorção de água do material é um ponto positivo. No entanto, devemos lembrar que a eficácia do reforço com a fibra depende também de inúmeros fatores físicos (KUDER; SHAH, 2010; TORGAL; JALALLI, 2011); além destes, temos a interação dos superplastificantes que, ao contribuírem para a fluidez da pasta de cimento, podem retardar a hidratação dessa pasta (MINDESS; YOUNG, 1981). Todos estes estudos, citados por cada autor, será melhor comparado para cada situação apresentada por este trabalho.

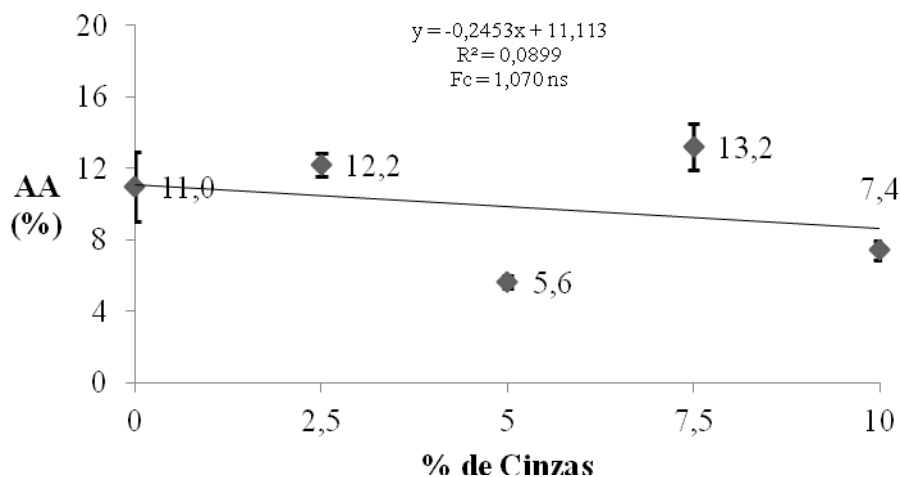


Figura 25 Relação da porcentagem de CIPE versus porcentagem da absorção de água dos compósitos, após 28 dias de cura

Observando as Figuras 26 e 28, podemos dizer que, nas proporções de 5 e 10% de cinzas de pneu, encontramos porcentagens de 11,8% e 16,6% para porosidade respectivamente, enquanto para as proporções de 2,5% e 7,5%, encontramos 23,9% e 26% de porosidade (Figura 26). Com isso, pode ser observado que, tanto no tratamento 5% de cinzas de pneu, quanto no 10%, são encontradas as menores absorções de água e as menores porosidades entre todos os compósitos que levam cinzas avaliadas.

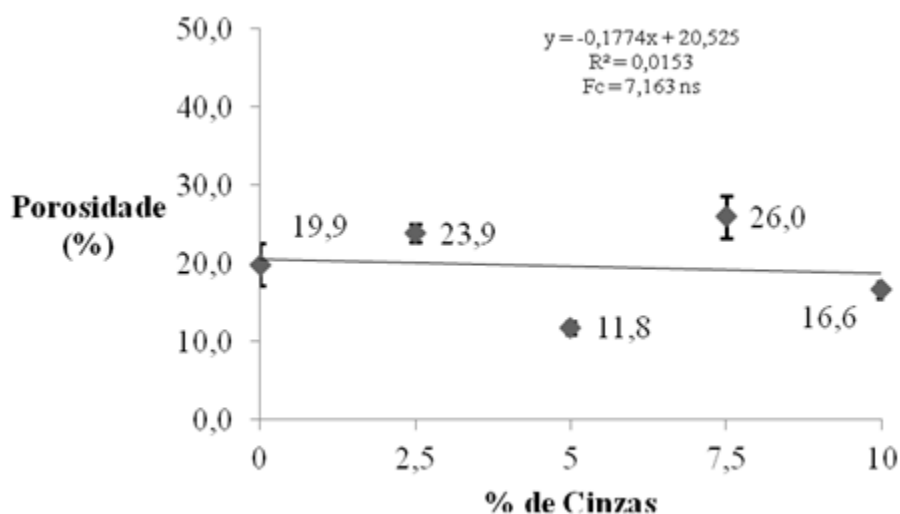


Figura 26 Relação da porcentagem de CIPE versus porcentagem de poros dos compósitos, após 28 dias de cura

Em contrapartida, o compósito que leva 7,5% de cinzas de pneu, foi aquele onde encontramos a maior AA e também porosidade, 13,2% e 26% respectivamente. Para melhor entendermos a dominância destes poros nos compósito, pode-se observar a Figura 26, a qual demonstra visualmente a porosidade dos compósitos formados por 2,5%, 5%, 7,5% e 10% cinzas de pneu.

Segundo Torgal e Jalali (2011), tal propriedade é de extrema consideração, haja vista que a baixa absorção de água nos compósitos pode acarretar melhores propriedades físicas e também mecânicas. Ou seja, a água é responsável pelas reações químicas no interior dos compósitos (alta alcalinidade); quando um material possui uma maior quantidade de poros, conseqüentemente, o mesmo terá também uma maior absorção de água, como demonstrado nesse trabalho, conseqüentemente, a grande quantidade de espaços vazios promovidos pelos poros, faz com que o material fique mais frágil e quebradiço.

Na Tabela 12, podemos observar claramente que a proporção de água está diretamente ligada à porcentagem de poros do material. Ou seja, foram nos compósitos com menor porcentagem de absorção de água que obtivemos as menores porcentagens de poros (5% e 10%). Conseqüentemente, foram nos compósitos com maior índice de poros que obtivemos os maiores índices de absorção de água (2,5% e 7,5%).

No entanto, a norma NBR 12800 (ABNT, 1993) estabelece que a absorção de água máxima para telhas onduladas do fibrocimento seja de 37%. Nesse sentido, todos os tratamentos com ou sem adição de cinzas de pneu atenderam à norma de comercialização, já que nenhum deles excedeu o valor estabelecido por tal norma.

Na Figura 27, estão as fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura, onde temos as proporções de cinza e sua respectiva porosidade.

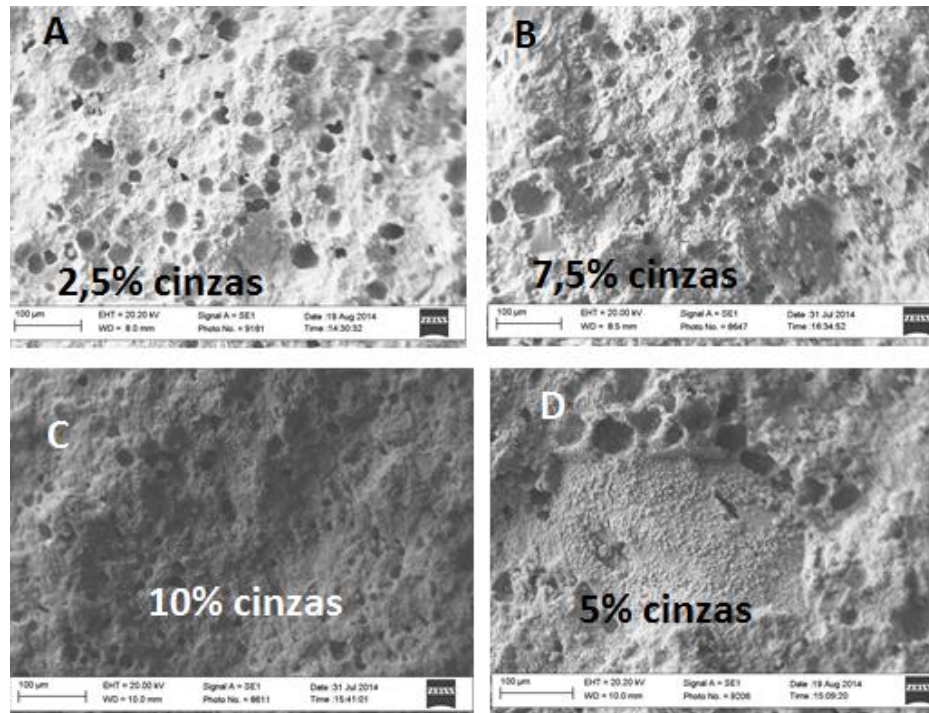


Figura 27 São fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Nelas temos as relações das frações de cinzas de pneu. Nas imagens, onde encontramos sulcos ou depressões mais escuras, são os poros presentes nos compósitos de fibrocimento

Na Figura 28, é encontrada foto capturada por microscopia eletrônica de varredura, como observada na imagem, temos setas indicando partes sólidas e também sulcos que ajudarão a formar as estruturas físicas nos compósitos.

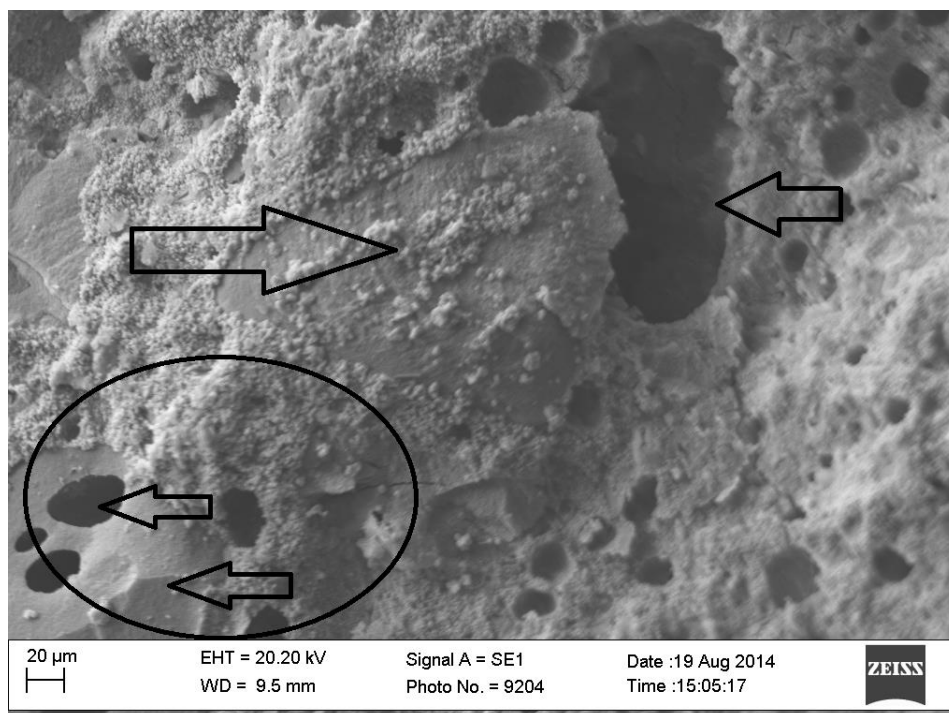


Figura 28 Fotos capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Na imagem (indicada por uma seta menor e fora do círculo), encontramos sulcos ou depressões mais escuras; Estes são poros presentes nos compósitos de fibrocimento. Na mesma figura, são encontrados também fragmentos dispersos (seta maior fora do círculo). Outra curiosidade, se encontra nos poros visualizados no interior das partículas dos fragmentos sólidos (região circulada indicada por setas)

## 6.6 Propriedades mecânicas

Nas Figuras 29 e 30, estão apresentados os valores médios de MOR e MOE a flexão estática e na Tabela 13, temos os valores das propriedades mecânicas dos compósitos que levam cinzas de pneu. Pode-se observar que não houve efeito significativo da porcentagem de adição de cinzas de pneu sobre os resultados de MOR, MOE, LOP e tenacidade. Apesar de se notar uma tendência

no aumento, tanto no MOR, MOE, quanto no LOP, já a tenacidade, podemos dizer que seus valores foram relativamente baixos.

Neste trabalho, pode-se observar que os valores médios para MOR e LOP são praticamente iguais, ou seja, à medida que se aumentam os valores para MOR, praticamente na mesma proporção também são aumentados os valores médios do LOP, em cada tratamento.

Tabela 13- Resumo da porcentagem de cinzas de pneu vs propriedades mecânicas.

% Cinzas	MOR (KPa)	MOE (KPa)	LOP (KPa)	TE Kj/m <sup>2</sup>
0,0%	8,96	5,75	8,92	0,3367
2,5%	7,9	5,71	7,5	0,341
5,0%	9,8	7,03	9,83	0,319
7,5%	6,9	5,39	6,98	0,329
10,0%	8,3	6,65	8,25	0,328

Sendo assim, nos compósitos que levaram cinzas de pneu, o que melhor destacou-se foi o constituído por 5% CIPE. Neste, claramente, ficou demonstrada sua superioridade quanto ao MOR, MOE e LOP que atingiram os respectivos valores médios de 9,8 KPa; 7,03 KPa e 9,83 KPa. Quanto à sua tenacidade (0,319 Kj/m<sup>2</sup>), não foi observado nenhum comportamento extraordinário, pois, como já foi comentado anteriormente, a mesma não atingiu valores expressivos.

O segundo melhor material indicado é aquele que leva, em sua formulação, 10% cinzas de pneu, e alcançou valores médios para MOR, MOE e LOP equivalentes a 8,3 KPa; 6,65 KPa e 8,25 KPa, respectivamente. Quanto à tenacidade, esta também foi baixa, 0,328 Kj/m<sup>2</sup>.

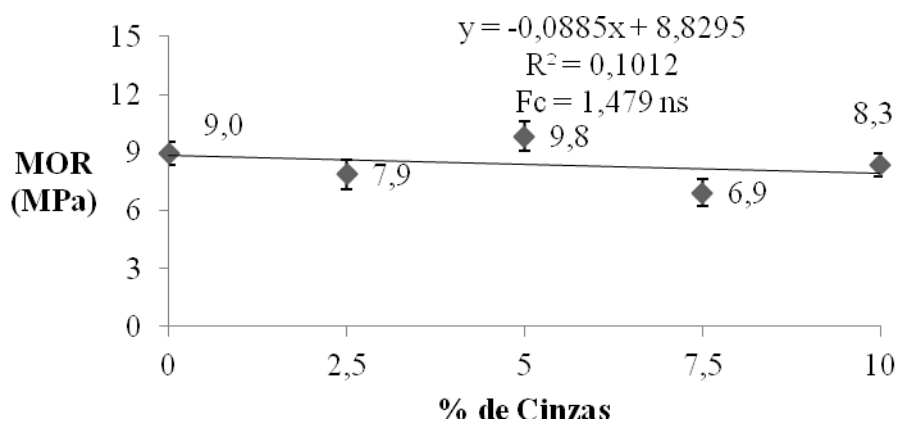


Figura 29 Valores médios do módulo de ruptura (MOR) dos compósitos de CIPE, após 28 dias de cura

Sendo assim, foi encontrado no compósito 5% e 10%, os quais levaram cinzas de pneu em sua formulação, aqueles com melhores propriedades mecânicas. Tal situação poderia estar atrelada ao fato dos mesmos terem possuído as melhores propriedades físicas (Tabela 10) para porosidade, absorção de água e densidade.

Como o MOR está diretamente relacionado às demais propriedades mecânicas, podemos dizer que as propriedades físicas também influenciaram nas propriedades mecânicas de MOE e LOP (SOTO, 2010).



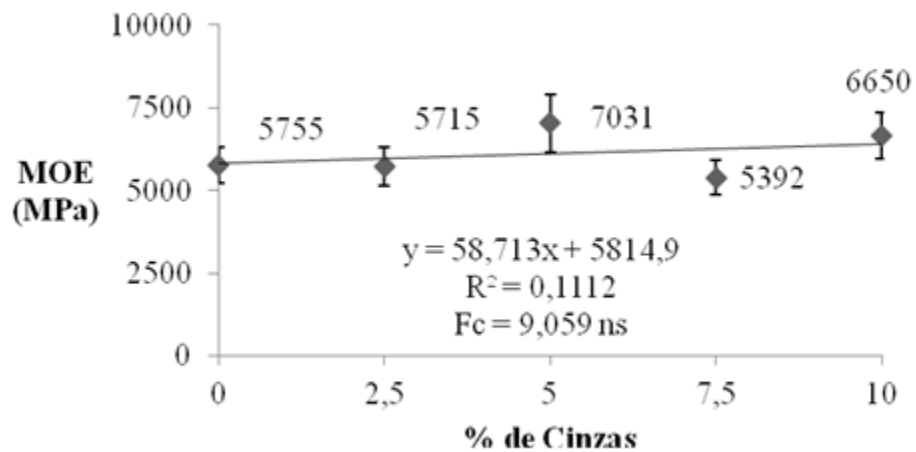


Figura 30 Valores médios do módulo de elasticidade (MOE) dos compósitos com cinzas de pneu, após 28 dias de cura

Na Figura 31, pode-se observar o limite de proporcionalidade dos compósitos que levam, em sua formulação, cinzas de raspa de borracha. Se compararmos a Figura 31 com a Figura 29, esta última avalia o MOR em cada proporção de cinzas, observamos a proporcionalidade existente entre as duas propriedades mecânicas, ou seja, se uma propriedade tem seu valor aumentado em determinada porcentagem de cinzas, a outra também a tem.

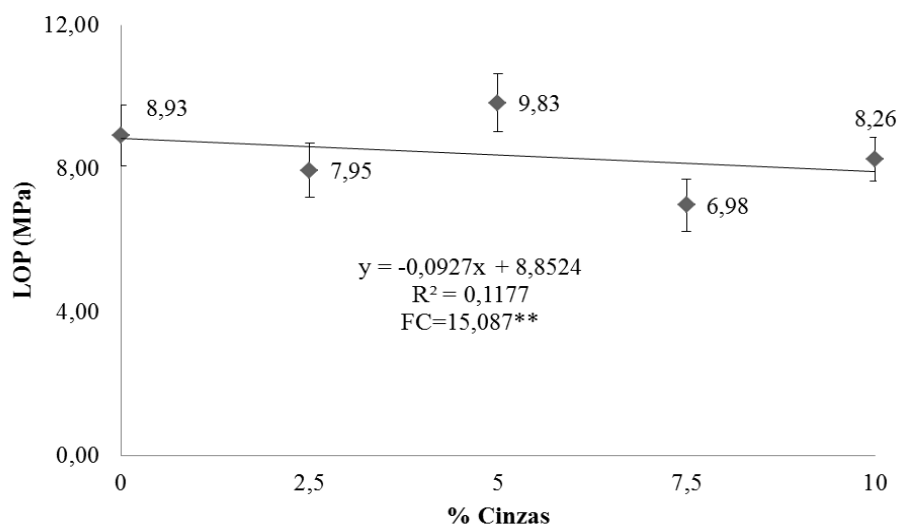


Figura 31 Valores médios do módulo de Proporcionalidade (LOP), dos compósitos com cinzas de pneu, após 28 dias de cura

Outra explicação convincente quanto à atuação das cinzas de melhora não só das propriedades mecânicas como também físicas, é atribuída à sua provável Pozolaneidade.

Pozolana são materiais silicosos ou silico-aluminosos, que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante hidráulica, entretanto, quando preparados adequadamente (moídos), exibem a propriedade de reagirem em meio aquoso e à temperatura ambiente com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), proporcionando a formação de novos compostos, com propriedades aglomerantes (cimentíceas) e, portanto insolúveis em água (ZARDO et al., 2004).

Segundo Salomon (2002), nas cinzas de pneus, são encontradas as seguintes formulações e suas respectivas frações,  $\text{CaO}$  (10,64%),  $\text{SiO}_2$  (22,0%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (9,09%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (1,45%) e  $\text{MgO}$  (1,35%). Tais elementos são os mesmos encontrados no cimento CPV-ARI constituído por 63,5% de  $\text{CaO}$ ; 3,1% de

MgO; 19,4% de SiO<sub>2</sub>, 4,1% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 2,3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (MENDES, 2014). Sendo assim, fica claro que os mesmos elementos encontrados no cimento são aqueles presentes nas cinzas do pneu, fato esse que, atrelado à resistência promovida com o acréscimo da CIPE, levanta a hipótese das cinzas de pneu comportar-se como um material pozolânico nos compósitos.

O compósito 2,5% CIPE, apesar de termos introduzido uma pequena quantidade de cinzas, isso não quer dizer que não houve uma resposta significativa, haja vista que, suas propriedades mecânicas alcançaram valores médios para MOR, MOE e LOP, equivalentes a 7,9 MPa; 5,71 MPa e 7,5 MPa, respectivamente. Quanto à sua tenacidade, esta também foi baixa, assim como todas avaliadas, 0,341 Kj/m<sup>2</sup>. No entanto, ainda assim, seus valores contribuíram muito na média final das propriedades mecânicas.

Até o momento, falamos de compósitos que levam em sua formulação as cinzas de borracha de pneu, no entanto não se pode deixar de comentar sobre aquele que não leva cinza em sua formulação. Sendo assim, o composto 0% cinzas de pneu, entre todos os avaliados, foi encontrado o segundo maior MOR (8,96 MPa), MOE (5,75 MPa) e LOP(8,92 MPa), ou seja, foi o que demonstrou entre todas as características mecânicas avaliadas, sem levarmos em consideração o compósito 5%, aquele com as melhores qualidades mecânicas.

Na Figura 32, temos representada a tenacidade dos materiais que levam em sua formulação cinzas das partículas de borracha de pneus. Nesta, é observado que os valores para energia na ruptura não se destacaram expressivamente como esperado. Isso implica que a adição de cinzas de borracha possui uma baixa tenacidade quanto à aplicação de cargas, haja vista que sua média atingiu o valor de 0,332 Kj/m<sup>2</sup>.

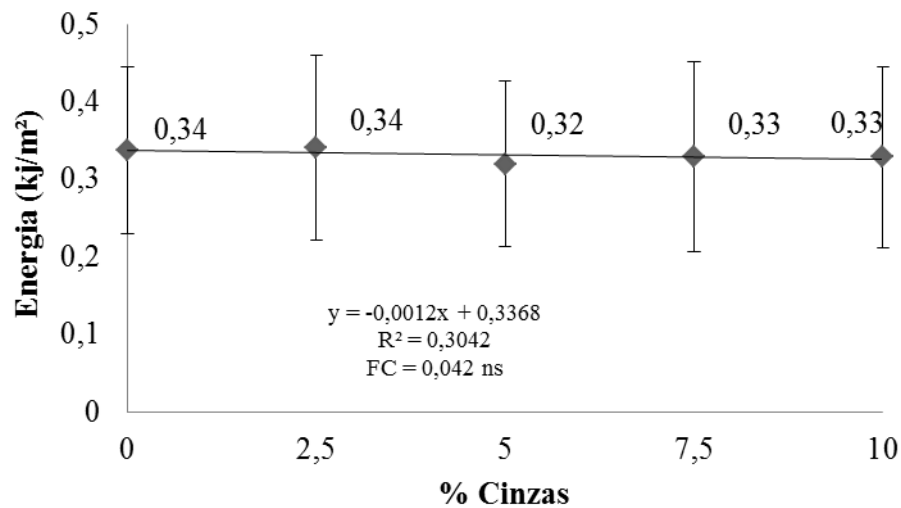


Figura 32 Valores médios da Energia Específica ou Tenacidade (TE) dos compósitos com cinzas das partículas de borracha, após 28 dias de cura

Uma observação importante, quanto à adição de CIPE superiores a 10%, ocorreu quando, ao tentarmos adicionar proporções de CIPE superiores a esta porcentagem, aconteceu o entupimento e conseqüente interrupção no fluxo contínuo do material extrudado. Tal situação poderia ser explicada também pelo fato de que o incremento do dispersante na mistura apresenta efetiva capacidade de reduzir a pressão de extrusão (BENBOW; BRIDGWATER, 1993), Figura 33.

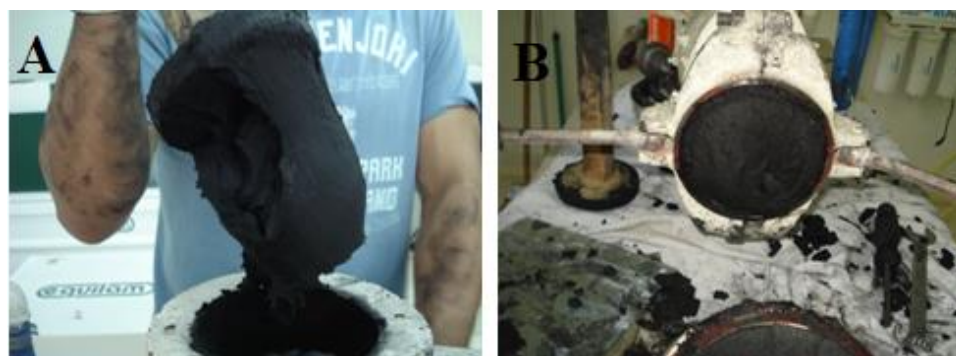


Figura 33 Na Figura A é observada a plasticidade do material. Na Figura B é observado o entupimento da massa de extrudado

Outra explicação poderia estar na fase líquida que também influencia a extrusão (ou seja, a quantidade de água utilizada para molhar e dar plasticidade ao material na argamassadeira para uma posterior extrusão) devido à capacidade de molhar as superfícies dos particulados e reagirem com o cimento (SOTO, 2010). Na Figura 33A é observado claramente o estado plástico do material extrudado.

Os dispersantes de alto desempenho são conhecidos na área de cimento como superplastificantes. Muitos dos superplastificantes são polímeros lineares, contendo grupos de ácidos sulfonados ligados à estrutura polimérica. Os sulfonados melamina-formaldeídos condensados e naftaleno formaldeídos-condensados são os mais comuns (MINDESS; YOUNG, 1981). Como sabemos, os pneus são estruturas poliméricas com elevados teores do elemento carbono, em torno de 79,5% (DOURADO, 2011), isso implica que suas cinzas exercerão função lubrificadora de fácil escoamento tangencial, e, quando em excesso, exercerem características plásticas com alto índice de escoamento, o que provavelmente poderia ter provocado o entupimento na boquilha da extrusora, Figura 33.

São atribuíveis a esses efeitos a capacidade de dispersar, aumentada no material cimentício com a presença de CIPE, disponibilizando para o sistema, água em dosagens crescente. O uso desse aditivo (CIPE), com o incremento crescente de água nas formulações, junto aos modificadores reológicos foi observado uma redução na relação de pressão do sistema cimentício. Em contrapartida, foi encontrado um incremento no MOR quando adicionado 10% de CIPE, na formulação do compósito.

Sendo assim, com os resultados positivos apresentados, podemos dizer que as propriedades mecânicas dos compósitos que levam cinzas foram satisfatórias para atender e justificar da norma para placa plana cimentícia (ABNT, 2007), a qual determina os valores para MOR à flexão, no que se refere a placas ensaiadas saturadas de 7MPa, para categoria 3. Como podemos observar, os valores encontrados neste trabalho atendem às exigências e permitem, dessa maneira, a confecção e comercialização de materiais que se enquadram nesta categoria, exemplo, telhas.

### **6.7 Melhores percentuais indicados (partículas de borracha vs cinzas)**

Quando estudamos a aplicação, tanto de partículas de borracha, quanto suas cinzas, fica nítida a superioridade de alguns tratamentos, em comparação aos demais. Sendo assim, é observado na Figura 34 e 35, as melhores relações físicas e mecânicas versus percentuais, de cada material distintamente.

Na Figura 34, são encontradas as propriedades físicas e mecânicas para percentuais de 5% cinzas de pneu versus partículas de borracha. Na figura temos as cores azul, vinho e verde representando respectivamente: o tratamento que não leva nem cinza nem partícula de borracha, o tratamento 5% partícula de borracha e 5% cinzas.

Como observado, quanto às propriedades físicas, o tratamento 5% cinzas de partículas de borracha foi aquele que apresentou as melhores características para absorção de água (AA) e porosidade, 5,6% e 11,8%, respectivamente. Autores demonstram em seus trabalhos que, a baixa porosidade está atrelada a baixa proporção de água dos materiais, uma vez que, quanto menor a quantidade de poros, menor a quantidade de água retida no mesmo, propriedade essa de extrema importância e de influência significativa com as propriedades mecânicas (SOTO, 2010; TORGAL; JALALI, 2011).

Sendo assim, na Figura 34 fica confirmada esta relação direta e positiva das propriedades físicas para com as mecânicas, ou seja, os valores para MOR, MOE e LOP, obtiveram seus maiores valores, se comparados aos demais, 9,8 MPa, 7,03 MPa, 9,83 MPa, respectivamente. Quanto à tenacidade, esta não alcançou valores expressivos como demonstrado na Figura 34.

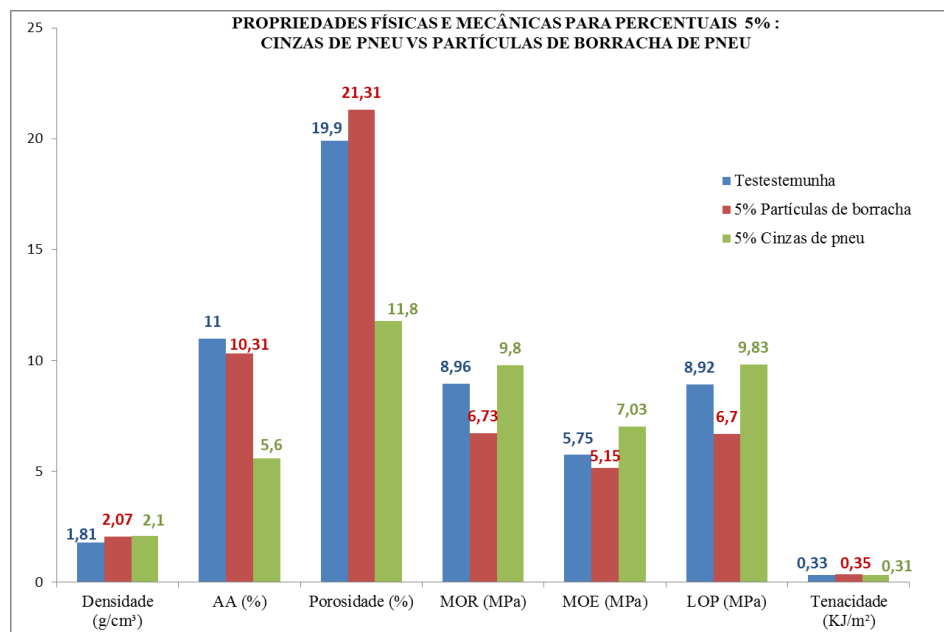


Figura 34 Propriedades físicas e mecânicas para percentuais de 5% cinzas de pneu versus partículas de borracha onde: AA (absorção de água), MOR (módulo de ruptura), MOE (módulo de elasticidade) e LOP (módulo de proporcionalidade)

Quanto à Figura 35, nesta são observadas as propriedades físicas e mecânicas para percentuais de 10% partículas de borracha, versus cinzas de pneu. Nesta, são encontradas as cores azul, vinho e verde representando, respectivamente: o tratamento que não leva nem partícula de borracha nem cinzas, o tratamento 10% partícula de borracha e, o último, 10% cinzas.

Quanto às propriedades físicas, o tratamento 10% cinzas de partículas de borracha foi aquele que apresentou as melhores características para absorção de água (AA) com 7,4%, e a segunda maior porosidade (16,6%), ficando a menor porosidade de 16,4%, para o tratamento 10% partículas de borracha. No entanto, o tratamento que não levou em sua formulação, nem cinzas, nem



partículas de borracha, foi aquele que obteve a menor densidade, no entanto, este obteve as maiores porcentagens de AA e porosidade.

Sendo assim, foi encontrado no compósito 10% cinzas de pneu, o melhor indicado quanto às propriedades mecânicas de MOR, MOE e LOP, sendo seus valores respectivos de 8,3 MPa, 6,65 MPa, 8,25 Mpa. No entanto, não poderíamos deixar de observar na Figura 35 que o compósito que não levou nem partículas de borracha, nem cinzas, foi aquele que apresentou os melhores e maiores resultados para MOR e LOP, 8,96 MPa e 8,92 MPa, respectivamente.

Já a tenacidade encontrada na Figura 35, essa foi relativamente baixa, haja vista que o material não resistiu positivamente, quanto à aplicação de cargas pontuais.

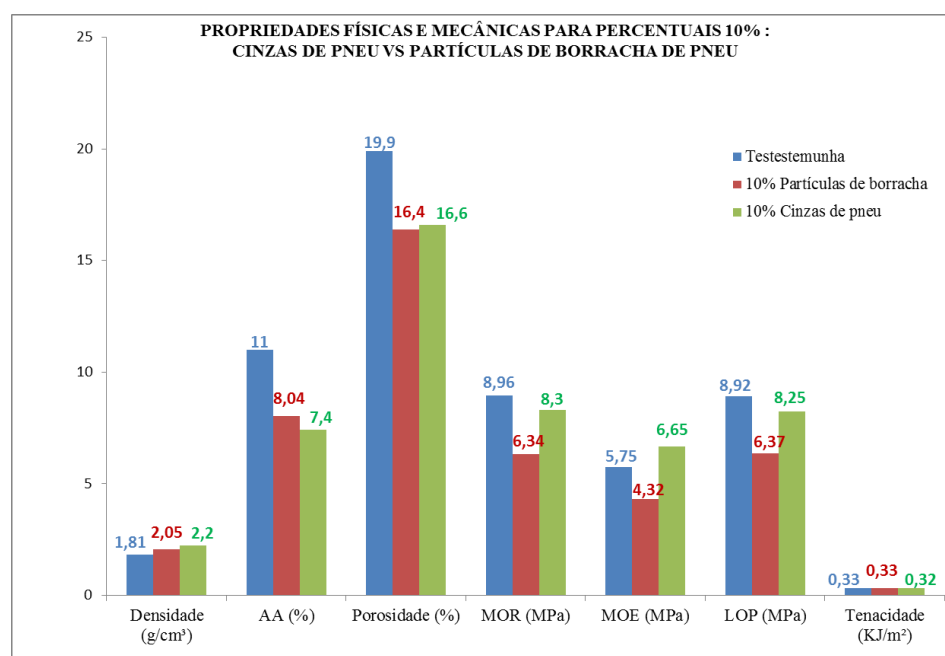


Figura 35 Propriedades físicas e mecânicas para percentuais de 10% cinzas de pneu versus partículas de borracha onde: AA (absorção de água), MOR (módulo de ruptura), MOE (módulo de elasticidade) e LOP (módulo de proporcionalidade)

## **7 CONCLUSÃO**

### **7.1 Partículas de borracha**

Todos os tratamentos que levam partículas de borracha, em sua formulação atendem à norma NBR 15498 (ABNT, 2007), para placas planas sem amianto, que exige para categoria 2 (telhas fibrocimento), uma resistência mínima para o módulo de ruptura de 4 Mpa.

Quanto às propriedades físicas, todos os tratamentos que levam borracha em sua constituição, incluindo o que não leva, cumprem com a norma de comercialização NBR 12800 (ABNT, 1993), que estabelece absorção de água máxima para as telhas onduladas do fibrocimento, de 37%.

Para os compósitos que levaram partículas de borracha de pneu em sua formulação, o melhor indicado foi o material 10%. No entanto, é encontrado no compósito que não leva partículas de borracha (0%), as melhores propriedades, tanto físicas, quanto mecânicas.

### **7.2 Cinzas das partículas de borracha carbonizada**

Uma observação importante é que a adição de cinzas de borracha de pneu melhorou as propriedades, tanto mecânicas, quanto físicas. Esta melhora nas propriedades mecânicas fez com que adição de cinzas classificasse os compósitos, segundo a NBR 15498 (ABNT, 2007), a qual categorizou os mesmos, à classe 3 de 7Mpa, para Módulo de Ruptura.

Quanto aos dados estimados para propriedades físicas, todos os compósitos que levam cinzas de pneu em sua formulação atendem às normas de comercialização, para absorção de água (ABNT, 1993).

Para os compósitos que levaram cinzas de borracha de pneu em sua formulação, o melhor indicado, tanto para propriedades físicas, quanto mecânicas, foi o material 5% partículas de borracha.

## **8 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Tanto a utilização de partículas de borracha de pneu, quanto suas cinzas, podem ser empregadas na confecção de telhas de fibrocimento obedecendo à suas normas de comercialização. Com os resultados destas pesquisas, novos métodos e novos materiais poderiam ser produzidos e comercializados industrialmente de maneira inovadora, ecologicamente correta e lucrativa.

Outro fato a ser considerado, seria a substituição parcial ou total do cimento por cinzas de partículas de pneu.

## REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Durability evaluation of vegetable fiber reinforced materials. **Building Research and Information**, London, v. 20, n. 4, p. 233-235, 1992.

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento**: o uso de fibras vegetais. 1991. 204 p. Tese (Livre Docência em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JÚNIOR, H. Uso de materiais alternativos à base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO DE MATERIALES FIBROR REFORZADOS, 1.; REUNIÓN PROYECTO PIP VIII.5 CYTED, 3., 1997, Cali. **Proceedings**... Cali: Universidad del Valle, 1997. p. 23-40,

ALMEIDA, A. E. F. S. et al. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 22, p. 49-58, Sept. 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. In: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of concrete practice**. Detroit, 1996. 60 p. (ACI 544.1R-96).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C948-81**: test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete. West Conshohocken, 1981. 2 p.

ANGEL, M. L. B. et al. Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 54, p. 29-35, Dec. 2013.

ASHORI, A.; TABARSA, T.; VALIZADEH, I. Fiber reinforced cement boards made from old newsprint. **Materials Science and Engineering: A**, Lausanne, v. 528, n. 25/26, p. 7801-7804, Sept. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial, especificação. Rio de Janeiro, 1983. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12800**: telha de fibrocimento, tipo pequenas ondas; especificação. Rio de Janeiro, 1993. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15498**: placas planas cimentícias sem amianto: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2007. 26 p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. **ANIP em números, 2014**. Disponível em: <[http://www.anip.com.br/arquivos/producao\\_vendas.pdf](http://www.anip.com.br/arquivos/producao_vendas.pdf)>. Acesso em: 5 jul. 2014.

ATAL, A.; LEVENDIS, Y. A. Comparison of the combustion behaviour of pulverized waste tyres and coal. **Fuel**, London, v. 74, n. 11, p. 1570-1581, Nov. 1995.

AYLÓN, E. et al. Valorisation of waste tyre by pyrolysis in a moving bed reactor. **Waste Management**, New York, v. 30, n. 7, p. 1220-1224, July 2010.

AZUMA, K. et al. Mesothelioma risk and environmental exposure to asbestos: past and future trends in Japan. **International Journal of Occupational and Environmental Health**, Philadelphia, v. 15, n. 2, p. 166-172, Abr./June 2009.

BARTROP, P. W. G. History of asbestos related disease. **Postgraduate Medical Journal**, London, v. 80, n. 940, p. 72-76, Feb. 2004.

BECKLAKE, M. R. Asbestos-related diseases of the lung and other organs: their epidemiology and implications for clinical practice. **The American Review of Respiratory Disease**, New York, v. 114, n. 1, p. 187-227, July 1976.

BENBOW, J. J.; BRIDGWATER, J. The cutting of paste extrudates. **Chemical Engineering Science**, Cambridge, v. 48, n. 17, p. 3088-3091, Sept. 1993.

BEZERRA, E. M. et al. The effect of different mineral additions and synthetic fiber contents on properties of cement based composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 28, n. 6, p. 555-563, July 2006.

BLANCO, A. et al. Optimal use of flocculants on the manufacture of fiber cement material by the Hatscheck process. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 24, n. 2, p. 158-164, Feb. 2010.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] Republica Federativa do Brasil**. Brasília, 2010, p. 1. Edição Extra. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em: 7 out. 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lixo**: um grave problema do mundo moderno. Brasília, 2005. 160 p. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/secex\\_consumo/\\_arquivos/8%20-%20mcs\\_lixo.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/secex_consumo/_arquivos/8%20-%20mcs_lixo.pdf)>. Acesso em: 23 mar. 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 416, de 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] Republica Federativa do Brasil**. Brasília, 01 out. 2009. n. 188, p. 64-65. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res09/res41609.pdf>>. Acesso em: 7 out. 2014.

BOŠNJAK, J.; OŽBOLT, J.; HAHN, R. Permeability measurement on high strength concrete without and with polypropylene fibers at elevated temperatures using a new test setup. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 53, p. 104-111, Nov. 2013.

BURBIDGE, A. S.; BRIDGWATER, J. The single screw extrusion of paste. **Chemical Engineering Science**, Cambridge, v. 50, n. 16, p. 2531-2543, Aug. 1995.

CARLMARK, A. Tailoring cellulose surfaces by controlled polymerization methods. **Macromolecular Chemistry and Physics**, Stockholm, v. 214, n. 14, p. 1539-1544, July 2013.

CARVALHO, M. G.; FERREIRA, P. J.; FIGUEIREDO, M. M. A comparative study of two automated techniques for measuring length. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 8, n. 2, p. 137-142, Feb. 1997.

CERRI, C. E. P. et al. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 83-99, Jan./Feb. 2007.

CINCOTTO, M. A. Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. In: **TECNOLOGIA** das edificações. São Paulo: PINI, 1988. p. 71-74.

COOKE, W. E. Fibrosis of the lungs due to the inhalation of asbestos dust. **British Medical Journal**, Bethesda, v. 2, n. 3317, p. 140-142, July 1924.

COOKE, W. E. Pulmonary asbestosis. **British Medical Journal**, Bethesda, v. 2, n. 3491, p. 1024-1025, Dec. 1927.

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

DARMSTADT, H.; ROY, C.; KALIAGUINE, S. Esca characterization of commercial carbon-blacks and of carbon-blacks from vacuum pyrolysis of used tires. **Carbon**, New York, v. 32, n. 8, p. 1399-1406, 1995.

DEVITO, R. A. **Physical and mechanical studies of roofing tiles made of blast furnace slag cement reinforced with residual cellulose fibres**. 2003. 63 p. Dissertation (Master in Science of Environmental Engineering) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

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

DOLL, R. Mortality from lung cancer in asbestos workers. **British Medical Journal**, Bethesda, v. 12, n. 2, p. 81-86, Apr. 1955.

DOLL, R.; PETO, J.; BRITAIN, G. **Effects on health of exposure to asbestos**. London: HSE Books, 1985. 67 p.

DOURADO, D. C. **Poder calorífico e análise elementar de pneus automobilísticos inservíveis e de frutos da macaubeira**. 2011. 86 p. Dissertação (Mestrado em Mecanização e Automação Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

ESPAÑA. Real Decreto nº 956, de 6 de junio de 2008. Por el se aprueba la instrucción para la recepción de cementos. **Diário Oficial Boletín Oficial del Estado**, Madrid, 19 de junio 2008. n. 148, p. 27794-27841.



EUROPEAN COAL COMBUSTION PRODUCTS ASSOCIATION.

**Production and Utilization of CCPs in 2008.** Essen, 2008. Disponível em: <<http://www.ecoba.com/ecobaccputil.html>>. Acesso em: 2 jan. 2015.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 197-1 Cement:** composition, specification and conformity criteria for common cements. London: BSI, 2011. 50 p.

FERREIRA, A. A.; SILVEIRA, A. A.; DAL MOLIN, D. C. C. A cinza da casca de arroz: possibilidades de utilização como insumo na produção de materiais de construção. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 6., 1997, Canela. **Anais...** Canela: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1997. p. 293-298.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **2050:** un tercio más de bocas que alimentar. Brasília, 2009. Disponível em: <<https://www.fao.org.br/2050atmmmf.asp>>. Acesso em: 1 out. 2011.

FRANÇA, V. H. **Aderência aço-concreto:** uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha. 2004. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2004.

FREIRE, W. J.; RAMIREZ-SARMIENTO, C. Argamassa de cimento e areia combinada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 17, n. 2, p. 1-8, dez. 1997.

GEYER, A. L. B.; MOLIN, D. D.; CONSOLI, N. C. Recycling of sewage sludge from treatment plants of Porto Alegre city, Brazil, and its use as a addition in concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE CONSTRUCTION INTO THE NEXT MILLENNIUM: ENVIRONMENTALLY FRIENDLY AND INNOVATIVE CEMENT BASED MATERIALS, 2000, João Pessoa. **Proceedings...** João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba/The University of Sheffield, 2000. p. 464-473.

GODFRAY, H. C. J. et al. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. **Science**, New York, v. 327, n. 5967, p. 812-818, Feb. 2010.

GOULART, E. A. **Reciclagem energética de pneus automotivos em reator de leite fluidizado:** uma proposta para a questão ambiental. 1999. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Campinas, Campinas, 1999.

GONZALEZ, A.; NAVIA, R.; MORENO, N. Fly ashes from coal and petroleum coke combustion: current and innovative potential applications. **Waste Management Research**, London, v. 27, n. 10, p. 976-987, Dec. 2009.

HANNANT, D. J. **Fibre cements and fibre concretes**. Great Britain: J. Wiley, 1986. 234 p.

HARRIS, L.; KAHWA, I. Asbestos, old foe in 21st century developing countries. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 307, n. 1/3, p. 1-9, May 2003.

HAYLOCK, M. R. et al. TRENDS in total and extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, Washington, v. 19, n. 8, p. 1490-1512, Apr. 2006.

HERNÁNDEZ, J. F. M. et al. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 28, n. 11, p. 1525-1536, Nov. 1998.

HOURIHANE, D. O. The pathology of mesotheliomata and an analysis of their association with asbestos exposure. **Thorax**, Bethesda, v. 3, n. 3, p. 268-278, May 1964.

IKAI, S. et al. Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 24, n. 2, p. 171-180, Feb. 2010.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate changes 2007**: synthesis report. Valencia, 2007. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>>. Acesso em: 22 jan. 2015.

INTERNATIONAL INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEMS ANALYSIS. Environment & Natural Resources. **Annual Report**, Vienna, p. 18-19, 2010. Disponível em: <<http://www.iiasa.ac.at/web/home/resources/publications/annual-report/ar10.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2014.

INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS, SYSTEMS AND STRUCTURES. Testing methods for fibre reinforced cement-based composites. **Materiaux et Constructions**, Paris, v. 17, n. 102, p. 441-456, 1984. (RILEM. TC 49, TRF).

INSTITUTO BRASILEIRO DO CRISOTILA. **O amianto**. Disponível em: <<http://www.crisotilabrasil.org.br/site/novidades/noticiaIntegra.php?id=152>>. Acesso em: 11 set. 2014.

JAMES HARDIE AND CO PTY. Report on paper pulp sheets. **Internal Report**, La Jolla, Nov. 1947.

JAPAN AUTOMOBILE TYRE MANUFACTURERS ASSOCIATION. **Tyre industry of Japan**. Tokyo, 2007. Disponível em: <[http://www.jatma.or.jp/kankou/pdf/tyre\\_industry\\_2007.pdf2007](http://www.jatma.or.jp/kankou/pdf/tyre_industry_2007.pdf2007)>. Acesso em: 18 jan. 2015.

JAPAN AUTOMOBILE TYRE MANUFACTURERS ASSOCIATION. **Tyre industry of Japan**. Tokyo, 2013. Disponível em: <[http://www.jatma.or.jp/media/pdf/tyre\\_industry\\_2013.pdf](http://www.jatma.or.jp/media/pdf/tyre_industry_2013.pdf)>. Acesso em: 13 out. 2014.

JOAQUIM, A. P. et al. Sisal organosolv pulp as reinforcement for cement based composites. **Materials Research**, São Carlos, v. 12, n. 3, p. 305-314, July/Sept. 2009.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Materiais reforçados com fibras vegetais. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE MATERIAIS REFORÇADOS COM FIBRAS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL, 1993, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EP-USP, 1993. p. 29-38.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 200 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

JOHN, V. M. et al. Durability of slag mortar reinforced with coconut fibre. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 27, n. 5, p. 565-574, May 2005.

JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos agro-industriais para uso na construção civil no Brasil. In: RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, ALTERNATIVA ECONÔMICA PARA PROTEÇÃO AMBIENTAL, 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo: NUDEPE/POLI-UPE, 1997. p. 67-76.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 113 f. Tese (Livre Docência em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

- JULIE, H. et al. Adsorbing polymers and viscosity of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 63, p. 12-19, Sept. 2014.
- KAMINSKY, W.; MAKROMOL, W. Possibilities and limits of pyrolysis. **Makromolekulare Chemie. Macromolecular Symposia**, New York, v. 57, n. 1, p. 145-160, May 1992.
- KAMP, D.W. Asbestos-induced lung diseases: an update. **Translational Research**, New York, v. 4, n. 4, p. 143-152, Apr. 2009.
- KERR, R. A. How hot will the greenhouse world be? **Science**, New York, v. 309, n. 5731, p. 100, July 2005.
- KHOO, H. H. Life cycle impact assessment of various waste conversion technologies. **Waste Management**, New York, v. 29, n. 6, p. 1892-1900, June 2009.
- KHORAMI, M.; GANJIAN, E. Comparing flexural behaviour of fire-cement composites reinforce bagasses: wheat and eucalyptus. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 25, n. 9, p. 3661-3667, Sept. 2011.
- KOZICKI, J.; TEJCHMAN, J. Effect of steel fibres on concrete behavior in 2D and 3D simulations using lattice model. **Archives of Mechanics**, Warszawa, v. 62, n. 6, p. 465-492, 2010.
- KUDER, K. G.; SHAH, S. P. Processing of high-performanced cement-based composites. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 24, n. 2, p. 181-186, Feb. 2010.
- KUDER, K. G.; SHAH, S. P. Tailoring extruded HPFRCC to be nailable. **ACI Materials Journal**, Detroit, v. 104, n. 5, p. 26-34, Sept./Oct. 2007.
- KUMAGAI, S.; KURUMATANI, N. Asbestos fiber concentration in the área surrounding a former asbesto cement plant and excess mesothelioma deaths in residents. **American Journal of Industrial Medicine**, New York, v. 52, n. 10, p. 790-798, Oct. 2010.
- KUNIEDA, M. et al. Tensile fracture process of SHCC by means of three-dimensional meso-scale analysis. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 33, n. 9, p. 956-965, Oct. 2011.

LEE, H. K.; KIM, H. K.; HWANG, E. A. Utilization of power plant bottom ash as aggregates in fiber-reinforced cellular concrete. **Waste Management**, New York, v. 30, n. 2, p. 274-284, Feb. 2010.

LEI, L.; PLANK, J. A study on the impact of different clay minerals on the dispersing force of conventional and modified vinyl ether based polycarboxylate superplasticizers. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 60, p. 1-10, June 2014.

LESTI, M.; TIEMEYER, C.; PLANK, J. CO<sub>2</sub> stability of Portland cement based well cementing systems for use on carbon capture & storage (CCS) wells. **Cement and Concrete Research**, Barking, v. 45, p. 45-54, Aug. 2013.

LEUNG, D. Y. C.; WANG, C. L. Kinetic modeling of scrap tire pyrolysis. **Energy Fuel**, London, v. 13, n. 2, p. 421-427, Jan. 1999.

LI, M.; LI, V. C. Rheology, fiber dispersion, and robust properties of engineering cementitious composites. **Materials and Structures**, London, v. 46, n. 3, p. 405-420, Mar. 2013.

LI, V. C. et al. Tensile behavior of cementbased composites with random discontinuous steel fibers. **American Ceramic Society Journal**, Detroit, v. 79, n. 1, p. 74-78, Jan. 1996.

LI, Z. J.; UM, B.; CHUI, S. N. C. Static and dynamic behaviour of extruded sheets with short fibers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, New York, v. 13, n. 4, p. 248-54, Aug. 2001.

LIMA, P. R. L. et al. Caracterização mecânica de laminados cimentícios esbeltos reforçados com fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campinas, v. 11, n. 6, p. 644-651, nov./dez. 2007.

LINTON, A. et al. The ticking time-bomb of asbestos: its insidious role in the development of malignant mesothelioma. **Critical Review in Oncology Hematology**, Boca Raton, v. 2, n. 2, p. 200-212, Nov. 2012.

LOPES, F. A.; CENTENO, T. A.; ALGUACIL, F. J. **Aprovechamiento energético de residuos**: el caso de los neumáticos fuera de uso. Disponível em: <<http://www.energia2012.es/sites/default/files/Aprovechamiento%20energ%C3%A9tico%20de%20residuos,el%20caso%20de%20los%20neum%C3%A1ticos%20fuera%20de%20uso.pdf>>. Acesso em: 13 dez. 2012.

LOPES, F. F. M. et al. Modificação das propriedades das fibras de curauá por acetilação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 316-321, mar. 2011.

LUYTEN, M. End of life tyres management in Europe. In: EUROPEAN CONFERENCE ON ELT RECYCLING AND VALORIZATION, 1., 2009, Seville. **Proceedings**... Seville, 2009. Disponível em: <<http://www.signus.es>>. Acesso em: 23 jan. 2015.

MAALEJ, M.; HASHIDA, T.; LI, V. C. Effect of fiber volume fraction on the offcrack- plane fracture energy in strain hardening engineered cementitious composites. **Journal American Ceramic**, London, v. 78, n. 12, p. 3369-3375, Dec. 1995.

MARCIANO, E.; KIHARA, Y. Looking green. **World Cement**, London, v. 28, n. 4, p. 82-88, 1997.

MCKENZIE, A. W. **A guide to pulp evaluation**. Melbourne: CSIRO 1994. 66 p.

MELO FILHO, J. A. **Desenvolvimento e caracterização de laminados cimentícios reforçados com fibras longas de sisal**. 2005. 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MENDES, R. F. **Desempenho de fibrocimentos extrudados produzidos com poupas celulósicas modificadas com silanos**. 2014. 158 p. Tese (Doutorado em Ciências e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

MENÉNDEZ, E.; DE FRUTOS, J. Equivalencia entre medidas eléctricas y diracción de rayos X en la formación de fases cristalinas de pastas de cementos. **Boletín de la Sociedade Española de cerâmica y Vidro**, Madri, v. 50, n. 5, p. 225-234, Sept./Out. 2011.

MENÉNDEZ, E.; DE FRUTOS, J. Ion monitoring solutions in cements using electrical spectroscopy. **Revista Mexicana de Física**, Cidade do México, v. 55, n. 1, p.76-80, May 2009.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being**: general synthesis. Washington: Island Press, 2005. 765 p.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F. **Concrete**. New Jersey: Prentice-Hall, 1981. 644 p.

MOHANTY, A. K.; DRZAL, L. T.; MISRA, M. Engineered natural fiber reinforced polypropylene composites: influence of surface modifications and novel powder impregnation processing. **Journal of Adhesion Science and Technology**, Boston, v. 16, n. 8, p. 999-1015, 2002.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. **Natural fiber, biopolymers and biocomposites**. London: CRC Press, 2005. 989 p.

MOHR, B. J.; NANKO, H.; KURTIS, K. E. Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 27, n. 4, p. 435-448, Apr. 2005.

MONTERO-CHACÓN, F.; SCHLANGEN, E.; MEDINA, F. A lattice-particle approach for the simulation of fracture processes in fiber-reinforced high-performance concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE AND CONCRETE STRUCTURES, 8., 2013, Toledo. **Proceedings...** Toledo: CINNE, 2013. 1 CD-ROM.

MOTTA, F. G. A cadeia de destinação dos pneus inservíveis: o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico. **Ambiente & Sociedade**. Campinas, v. 11, n. 1, p. 167-184, jan./jun. 2008.

OLIVER, J. et al. A micromorphic model for steel fiber reinforced concrete. **International Journal of Solids and Structures**, New York, v. 49, n. 1, p. 2990-3007, Oct. 2012.

OLIVER, T. Some dusty occupations and their effects upon the lungs. **Journal of the Royal Society the Promotion Health**, London, v. 46, n. 6, p. 224-230, 1925.

ONADA, G. Y. The rheology of organic binder solutions. In: ONADA, G. W.; HENCH, L. L. **Ceramic processes before firing**. New York: Wiley, 1979. chap. 19, p. 235-251.

PAPADAKIS, V. G. Effect of fly ash on Portland cement systems: part I. lowcalcium fly ash. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 29, n. 11, p. 1727-1736, Nov. 1999.

PAPADAKIS, V. G. Effect of fly ash on Portland cement systems: part II. highcalcium fly ash. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 30, n. 10, p. 1647-1654, Oct. 2000.

PELED, A; SHAH, S. Processing effects in cementitious composites: extrusion and casting. **Journal of Materials in Civil Engineering**, New York, v. 15, n. 2, p. 192-199, Mar./Apr. 2003.

PINTO, F. et al. Study of pyrolysis process to recycle tyres and plastic wastes. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM RECYCLING AND REUSE OF TYRES, 1., 2001, Dundee. **Proceedings...** Dundee, 2001. p. 27-38.

PIZZOL, V. D. et al. Effect of accelerated carbonation on the microstructure and physical properties of hybrid fiber-cement composites. **Minerals Engineering**, London, v. 59, p. 101-106, May 2014.

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

RUBBER MANUFACTURERS ASSOCIATION. **Considerations for starting a scrap tire company**: a blueprint for planning a business strategy. Washington, 2004. 20 p. (RMA Special Report, 60).

RUBBER MANUFACTURERS ASSOCIATION. **Scrap tire markets in the United States**: ninth biennial report. Washington, 2009. Disponível em: <file:///C:/Users/David/Downloads/Scrap\_Tire\_Markets\_In\_The\_Unites\_States%20(2).pdf>. Acesso em: 6 ago. 2014.

SALOMON, V. G. **Avaliação dos efeitos da presença de metais pesados nos resíduos co-processados quando utilizados como combustíveis alternativos e matéria-prima na indústria cimenteira**. 2002. 145 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2002.

SANJUA, M. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Effectiveness of crack control at early age on the corrosion of steel bars in low modulus sisal and coconut fibre-reinforced mortars. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 28, n. 4, p. 555-565, Apr. 1998.



SAVASTANO JÚNIOR, H.; DANTAS, F. A. Z.; AGOPYAN, V. **Materials reforçados com fibras**: correlação entre a zona de transição fibra-matriz e as propriedades mecânicas. São Paulo: IPT/Pini, 1994. 56 p. (Publicação IPT 2158, - Boletim, 67).

SAVASTANO JÚNIOR, H. et al. Plant fibre reinforced cement components for roofing. **Construct Build Mater**, Kidlington, v. 13, n. 8, p. 433-438, Dec. 1999.

SAVASTANO JÚNIOR, H.; MABE, I.; DEVITO, R. A. Fiber cement based composites for civil construction. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NATURAL POLYMERS AND COMPOSITES, 2., 1998, São Carlos. **Proceedings**... São Carlos: UNESP/EMBRAPA/USP, 1998. p. 119-122.

SAVASTANO JÚNIOR, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Brazilian waste fiber as reinforcement for cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking v. 22, n. 5, p. 379-384, Oct. 2000.

SAVASTANO JÚNIOR, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Potential of alternative fiber cements as building materials for developing areas. **Cement and Concrete Composites**, Barking v. 25, n. 6, p. 85-92, Apr. 2003.

SCHAUFFERT, E. A.; CUSATIS, G. Lattice discrete particle model for fiber-reinforced concrete: I theory. **Journal of Engineering Mechanics**, New York, v. 138, n. 7, p. 826-833, July 2012.

SHAH, S.; SHAO, Y.; MARIKUNTE, S. **Method of making extruded fiber reinforced cement matrix composites**. US n. PI 5891374, 24 set. 1997, 06 abr. 1999.

SHAO, Y. et al. Wood fibre-cement composites by extrusion. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Ottawa, v. 27, n. 3, p. 543-552, June 2000.

SHAO, Y.; MARIKUNTE, S.; SHAH, S. P. Extruded fiber-reinforced composites. **Concrete International**, Detroit, v. 17, n. 4, p. 48-52, 1995.

SHAO, Y.; SHAH, S. Mechanical properties of PVA fiber reinforced cement composites fabricated by extrusion processing. **ACI Materials Journal**, Detroit v. 94, n. 6, p. 555-564, 1997.

SHEN, B. et al. Functionally-graded fiberreinforced cement composites: processing, microstructure, and properties. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 30, n. 8, p. 663-673, Sept. 2008.

SIDDIQUE, R. Utilization of coal combustion by-products in sustainable construction materials. **Resources Conservation Recycling**, Amsterdam, v. 54, n. 12, p. 1060-1066, Oct. 2010.

SILVA, A. C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose**. 2002. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SOTO, Y. J. M. **Adequação de formulações para a produção de placas de fibrocimento por extrusão**. 2010. 201 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SRINIVASAN, R.; DEFORD, D.; SHAH, P. S. The use of extrusion rheometry in the development of extrudate fiber-reinforced cement composites. **Concrete Science and Engineering**, Paris, v. 1, n. 1, p. 26-36, 1999.

STÄHLI, P.; CUSTO, R.; VAN MIER, J. G. M. On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behavior of FRC. **Materials Structures**, London, v. 41, n. 1, p. 189-196, Jan. 2008.

STÄHLI, P.; VAN MIER, J. G. M. Manufacturing, fibre anisotropy and fracture of hybrid fibre concrete. **Engineering Fracture Mechanics**, Zurich, v. 74, n. 1/2, p. 223-242, Jan. 2007.

TAKASHIMA, H. et al. A design approach for the mechanical properties of polypropylene discontinuous fiber reinforced cementitious composites by extrusion molding. **Engineering Fracture Mechanics**, Zurich, v. 70, n. 6, p. 853-870, Apr. 2003.

TEIXEIRA, R. S. **Utilização de resíduo sucro-alcooleiros na fabricação de fibrocimento pelo processo de extrusão**. 2010. 135 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia São Carlos, Instituto de Química de São Paulo, São Carlos, 2010.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 22, n. 2, p. 127-143, Apr. 2000.

TOLEDO FILHO, R. D.; SANJUÁN, M. A. Effect of low modulus sisal and polypropylene fiber on the free and restrained shrinkage of mortlars at early age. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 29, n. 10, p. 1597-1604, Oct. 1999.

TONOLI, G. H. D. **Aspectos produtivos e análise do desempenho do fibrocimento sem amianto no desenvolvimento de tecnologia para telhas onduladas**. 2006. 129 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2006.

TONOLI, G. H. D. et al. Cellulose modified fibers in cement based composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Kidlington, v. 40, n. 12, p. 2046-2053, Dec. 2009.

TONOLI, G. H. D. et al. Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fiber. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 24, n. 2, p. 193-201, 2010a

TONOLI, G. H. D. et al. Performance and durability of cement based composites reinforced with refined sisal pulp. **Materials and Manufacturing Processes**, Berlin, v. 22, n. 2, p. 149-156, Feb. 2007.

TONOLI, G. H. D. et al. Surface properties of eucalyptus pulp fibers as reinforcement of cement-based composites. **Holzforschung**, Berlin, v. 64, n. 5, p. 595-601, Aug. 2010b.

TONOLI, G. H. D. **Fibras curtas de eucalipto para novas tecnologias em fibrocimento**. 2009. 148 p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fiber: A review. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 25, n. 2, p. 575-581, Jan. 2011.

UNITED NATIONAL UNIVERSITE. E-waste recycling in China. **E-waste in China: A Country Report**, Bonn, p. 21-28, Apr. 2013. Disponível em: <<http://isp.unu.edu/publications/scycle/files/ewaste-in-china.pdf>>. Acesso em: 21 fev. 2014.

VAN TRAN, A. Recycled old corrugated containers as a partial substitute for virgin hardwood kraft pulp. **Appita Journal**, Paris, v. 55, n. 4, p. 301-304, 2002.

WAGNER, J. C.; SLEGGES, C. A.; MARCHAND, P. Diffuse pleural mesothelioma and asbestos exposure in North West Cape Province. **British Journal of Industrial Medicine**, London, v. 17, n. 4, p. 260-271, Oct. 1960.

WAGNER, J. The sequelae of exposure to asbestos dust. **Annals of the New York Academy of Science**, New York, v. 132, n. 1, p. 691-695, Dec. 1965.

WAN, J. et al. Effects of pulp preparation and papermaking processes on the properties of OCC fibers. **BioResources**, Raleigh, v. 6, n. 2, p. 1615-1630, 2011.

YADOLLAHI, R. et al. Reuse of waste paper sludge from papermaking process in cement composites. **Polymer Engineering and Science**, Stanford, v. 53, n. 1, p. 183-188, Jan. 2013.

ZARDO, A. M. et al. Utilização da cinza de bagaço cana-de-açúcar como “filler” em compostos de fibrocimento. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 1.; ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2004, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo: Antac, 2004. p. 1-13.

ZERBINO, R. et al. On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 34, n. 2, p. 191-200, Feb. 2012.

ZHANG, M. Q.; RONG, M. Z; LU, X. Fully biodegradable natural fiber composites from renewable resources: all-plant fiber composites. **Composites Science and Technology**, London, v. 65, n. 15/16, p. 2514-2525, Dec. 2005.

ZHAN, Y.; MESCHKE, G. A multiscale oriented concept for the analyses of steel fiber reinforced concrete materials and structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE AND CONCRETE STRUCTURES, 8., 2013, Toledo, Spain. **Proceedings...** Toledo, Spain: University of Castilla La-Mancha, 2013. 1 CD-ROM.

ZHENJUN, W. et al. Quantitative evaluation of carbon fiber dispersion in cement based composites. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 68, p. 26-30, Oct. 2014.

ZHOU, X. et al. Rheology of semi-solid fresh cement pastes and mortars in orifice Extrusion. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 37, p. 304-311, Mar. 2013.