



Concreto alternativo com utilização de resíduos de borracha de recauchutagem de pneus para elementos e componentes pré-fabricados

Luzilene Souza Silva¹, Marlos Henrique Pires Nogueira¹, Gleisy Kelly Moreira Lima¹, Filipe da Silva Cipriano¹, Núbia Jane da Silva Batista¹

¹Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais - Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) – Belém – PA – Brasil

eng.luzilene@gmail.com, paulistta2000@yahoo.com.br,
gleisy.fotog@hotmail.com, filipe.cepriano@hotmail.com,
nubiabatista257@gmail.com

Resumo. *A utilização de resíduos provenientes de processos industriais tais como a recauchutagem vem crescendo no cenário mundial como uma alternativa no reaproveitamento de materiais. Com o intuito de contribuir para a logística reversa dos pneus inservíveis, o presente trabalho visa avaliar a influência da incorporação de diferentes proporções de resíduos de borracha de recauchutagem de pneus em um concreto de composição alternativa. Os resultados mostraram que todas as composições analisadas apresentam resistência à compressão axial superiores a 35 MPa enquadrando-se nos padrões estabelecidos pela ABNT NBR 9781 (2013) para utilização na manufatura de elementos e componentes pré-fabricados.*

Palavras Chave: *Resíduos. Pneus. Passivo Ambiental. Pavimentos. Concreto com Borracha.*

Abstract. *The use of waste from industrial processes such as tire retreading has seen a rise globally as an alternative for the reutilization of materials. With the aim of contributing to the reversal logistics of unserviceable tires, this work's objective is to evaluate the influence of the incorporation of different proportions of rubber waste from tire retreading in an alternative concrete mixture. The results have shown that the mixtures analyzed have axial compressive strength superior to 35MPa, being adequate to utilization in the manufacture of precast elements and components accordingly to ABNT NBR 9781 (2013).*

Key words: *Waste. Tires. Environmental Passive. Paving. Concrete With Rubber.*



1. Introdução

O pneu, por ser essencial para as atividades da vida moderna, se tornou um dos produtos de maior consumo no mundo e um dos resíduos mais problemáticos em virtude de sua difícil decomposição na natureza. Quando se tornam inservíveis, os pneus são colocados em aterros onde podem permanecer por mais de 500 anos. Isto constitui um problema ambiental que pode ser solucionado pela engenharia. Neste contexto, a reciclagem surge como instrumento promotor do bem-estar ecológico e social (PNEWS, 2013).

Segundo a ANIP (2017) a frota de automóveis brasileira é composta por mais de 52 milhões de veículos. Se fosse estimado que ao menos 30% desses carros trocam os pneus anualmente, seriam mais de 60.000.000 de pneus descartados ou sem tratamento adequado todos os anos.

Segundo Oda e Fernandes Júnior (2001), quando abandonados em locais inadequados, os pneus servem como local para procriação de mosquitos e outros vetores de doenças e representam um risco constante de incêndios que contaminam o ar com fumaça altamente tóxica e os lençóis freáticos com óleo. Além disso, a disposição de pneus em aterros sanitários é problemática, pois os pneus dificultam a compactação, reduzindo significativamente a vida útil dos aterros. Por outro lado, a trituração, que resolveria o problema da compactação, é um processo oneroso.

A Resolução nº 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (BRASIL^a, 2009), delega aos fabricantes a responsabilidade pelo destino final do montante de pneus descartados. Para cada novo pneu introduzido ao mercado, deve ser dada uma destinação adequada a um inservível. Silveira (2016) destaca ainda que, segundo Alberto Mayer, presidente da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (Anip), desde que esta Resolução entrou em vigor, já foram criados mais de 1.008 pontos de coleta, sendo que no ano de 2015, cerca de 90 milhões de pneus foram coletados para terem uma destinação ecologicamente adequada.

A recauchutagem de pneus contribui para reduzir o volume desse passivo ambiental. No entanto, as bandas de rodagem substituídas vêm a constituir resíduo que demanda seu próprio descarte adequado. Uma das possibilidades que vêm sendo estudadas para o reaproveitamento deste material é o seu emprego em misturas cimentícias.

Nesse sentido, pesquisadores vêm desenvolvendo estudos sobre a viabilidade da inserção de resíduos de recauchutagem de pneus na fabricação de concreto (ALTOÉ, 2017; SOUSA, 2016; GRANZOTTO, 2010; ALBUQUERQUE, 2009; FIORITI *et al*, 2017; SANTOS, 2005). Até então, a maioria dos estudos estavam voltados à incorporação da borracha ao asfalto para fabricação de asfalto borracha. No entanto, pesquisas recentes têm indicado o potencial do uso deste produto como agregado do concreto, um dos materiais mais consumidos no mundo, com importância primária na indústria de construção civil.

A incorporação de resíduos de borracha ao concreto propicia algumas modificações nas suas propriedades. Apesar de diminuir sua resistência mecânica, pode aumentar sua capacidade de deformação. As fibras de borracha atuam como obstáculos para a propagação de fissuras, propriedade importante, pois a ruptura de corpos de concreto se dá mediante o surgimento de trincas que comprometem a sua capacidade de suportar esforços.

Segundo Fioriti *et al* (2017), o concreto com adição de borracha é capaz de resistir a tensões mesmo depois de sua ruptura.

A utilização de resíduos de pneus em obras da construção civil contribui para dar uma destinação nobre a um elemento altamente poluente ao meio ambiente e poderá proporcionar uma sensível redução de custos no processo de produção do concreto, considerando a substituição de alguns agregados naturais de uso tradicional para produção deste compósito. Não se pode ignorar, contudo, que um dos aspectos de grande relevância na utilização deste material é o ecológico. Diante desse contexto, o presente trabalho busca é avaliar a viabilidade técnica de um concreto produzido com inserção de resíduo de borracha de recauchutagem de pneus para elementos e componentes pré-fabricados para uso na construção civil.

2. Produção e destinação dos pneus no Brasil

Segundo dados da ANIP (2017), o terceiro trimestre de 2017 registrou um aumento de 8,6% nas vendas de pneus. O índice foi puxado principalmente pelos pneus de passeio, que cresceram 10,3%, seguidos por ônibus e caminhões (9,7%) e comerciais leves (8,5%). Na Figura 1 pode ser observado o comparativo de crescimento de vendas desses produtos em relação ao ano de 2016.

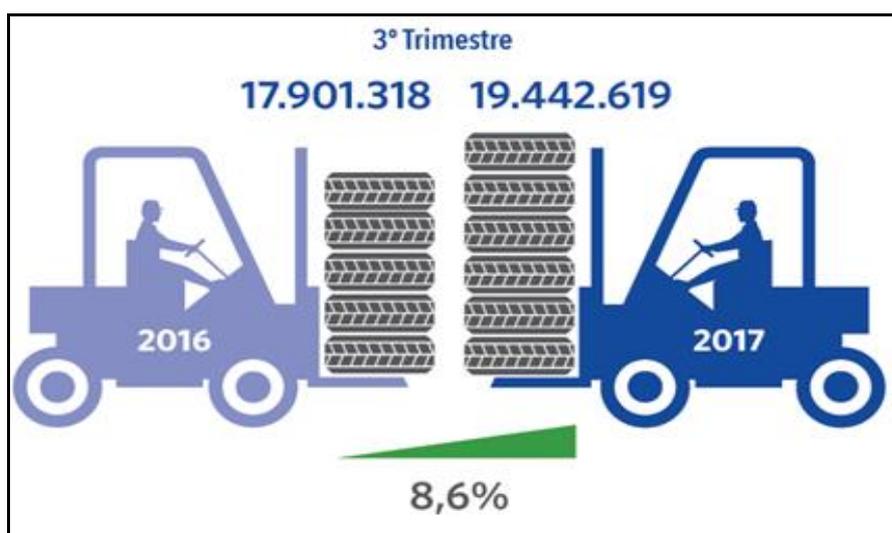


Figura 1. Total de vendas de pneus 3º trimestre (milhões de unidades) (ANIP, 2017)

A produção de pneus no terceiro trimestre de 2017 apresentou um crescimento de 9,4%. Os aumentos mais significativos foram verificados nos pneus de passeio (12,4%) e de comerciais leves (14,5%). No entanto, os pneus de carga e para veículos duas rodas não tiveram um crescimento tão acentuado (3,6% e 0,3%, respectivamente) (ANIP, 2017).

Em 2016, os fabricantes e importadores de pneus novos comercializaram no mercado nacional 53.411.924 unidades de pneus, o equivalente, em peso, a 729.214,03 toneladas (ANIP, 2017).

A Resolução nº 416 do CONAMA, de 30 de Setembro de 2009 (BRASIL^b, 2009),

que dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, determina em seu artigo I que os fabricantes e os importadores de pneus novos com peso unitário superior a 2,0 kg ficam obrigados a coletar e dar destinação adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional. Prevê também que, os distribuidores, os revendedores, os destinadores, os consumidores finais e o poder público deverão, em articulação com os fabricantes e importadores, implementar os procedimentos para coleta destes materiais. O ciclo completo da produção até a destinação ambientalmente adequada dos pneumáticos está descrito na Figura 2.

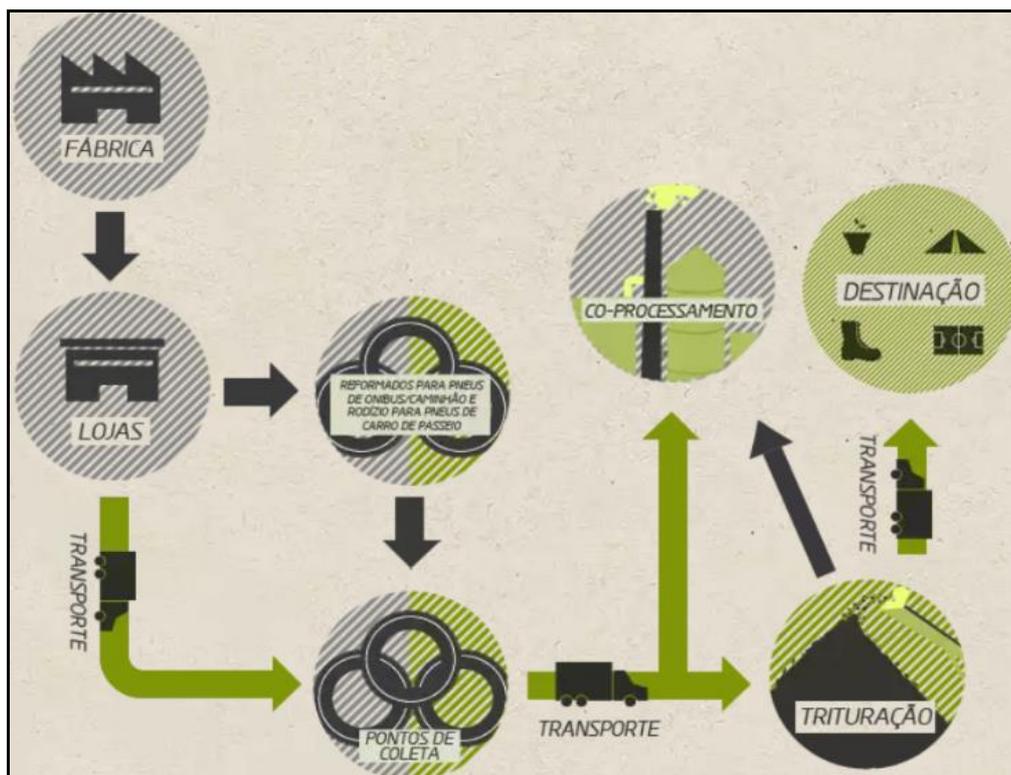


Figura 2. Ciclo de vida dos pneumáticos (ANIP, 2017)

Os pneus inservíveis podem ser deixados em lugares apropriados como, por exemplo, estabelecimentos comerciais de revenda ou pontos de coleta, que são locais definidos pelos fabricantes e importadores de pneus para receber e armazenar provisoriamente os pneumáticos. Em 2016, foram cadastrados 1.723 pontos de coleta, sendo 932 localizados em municípios com população residente acima de 100 mil habitantes, restando 13 municípios com essa característica, sem nenhum ponto de coleta declarado (ANIP, 2017).

No processo de coleta, a Reciclanip (entidade criada pelas fabricantes de pneus Bridgestone, Goodyear, Michelin, Pirelli, Continental e Dunlop) é a responsável pelo transporte dos pneus a partir destes locais até as empresas de trituração, quando necessário, de onde serão encaminhados para destinação final. Os acordos com as prefeituras municipais têm permitido a ampliação do número de pontos de coleta de pneus em todo o país. Isso se comprova no balanço anual do Programa de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis, que vêm apresentando resultados positivos a cada mês.

As tecnologias de destinação ambientalmente adequadas praticadas pelas empresas destinadoras e declaradas no Relatório dos Pneumáticos em ANIP (2017), estão apresentadas a seguir:

- **Coprocessoamento:** utilização dos pneus inservíveis em fornos de clínquer como substituto parcial de combustíveis e fonte de elementos metálicos;
- **Laminação:** processo de fabricação de artefatos de borracha;
- **Granulação:** fabricação de borracha moída, em diferente granulometria, com separação e aproveitamento do aço;
- **Pirólise:** decomposição térmica da borracha conduzida na ausência de oxigênio ou em condições em que a concentração de oxigênio é suficientemente baixa para não causar combustão, com geração de óleos, aço e negro de fumo.

Na Figura 3 está disposta a representatividade das principais tecnologias de destinação. Para a aplicação dessas tecnologias descritas, muitas vezes é necessária à transformação do pneu inservível em lascas ou *chips*, por meio da trituração. As empresas trituradoras coletam ou recebem pneus inteiros, radiais e convencionais, bem como os resíduos de borracha provenientes do processo de laminação.

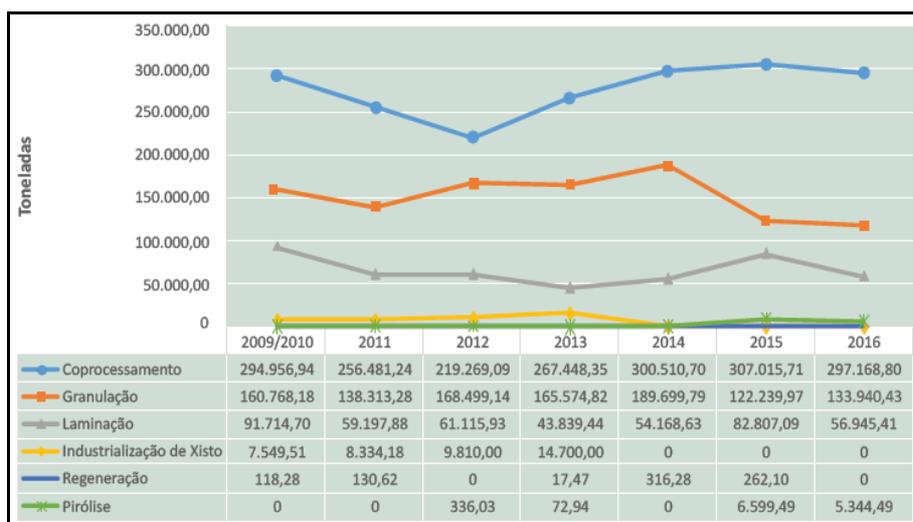


Figura 3. Tecnologias utilizadas na destinação de pneus inservíveis (Toneladas) (ANIP, 2017).

No Brasil, uma das formas mais comuns de reaproveitamento dos resíduos de pneus é como combustível alternativo para as indústrias de cimento (Figura 4, a). Outras possíveis formas de reutilização referem-se ao uso para produção de solados de sapatos (Figura 4, b), borrachas de vedação, dutos pluviais, pisos para quadras poliesportivas (Figura 4, d), pisos industriais, além de tapetes para automóveis. Mais recentemente, surgiram estudos que indicam a viabilidade da inserção destes resíduos para fabricação de manta asfáltica e asfalto borracha (Figura 4, c), processo que tem sido acompanhado e aprovado pela indústria de pneumáticos (ANIP, 2017).

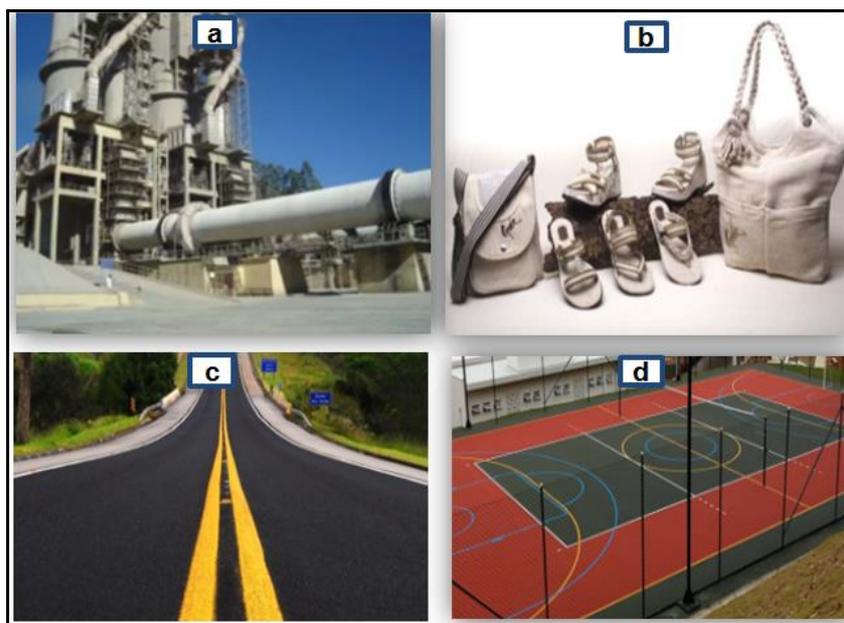


Figura 4. Produtos fabricados a partir da reutilização dos resíduos de pneus (ANIP, 2017)

2.1. Impacto ambiental causado pela deposição inadequada dos pneus

Os pneumáticos ocupam papel de destaque nas discussões sobre os impactos causados ao solo, o ar e a água. Quando utilizados, liberam fragmentos no ar que provocam reações alérgicas nas pessoas. Ao término de sua vida útil, tornam-se estruturas difíceis de serem eliminadas, por serem materiais não biodegradáveis de decomposição muito lenta, em torno de 600 anos, além da dificuldade de serem armazenados em função de seu grande volume. Atualmente os aterros sanitários não os recebem inteiros e, por isso, eles acabam sendo abandonados clandestinamente em vias urbanas.

Apesar de o pneu ser um material inerte, que não contém metais pesados em sua composição e ser indissolúvel em água, o que evita o fenômeno da lixiviação (solubilização dos constituintes no lençol freático), possui peculiaridades que dificultam o seu descarte final, exigindo desta forma, um gerenciamento eficiente. Não é recomendada a sua disposição em aterros sanitários devido a sua forma e composição, dificuldade de compactação, decomposição e redução na vida útil do aterro (ODA e FERNANDES JÚNIOR, 2001).

Os pneumáticos podem reter ar e gases em seu interior, fazendo com que inflam (como um balão) e cheguem até a superfície do aterro, o que gera a quebra da camada de cobertura. Dessa forma, os resíduos ficam expostos novamente, atraindo insetos, roedores e pássaros. Além disso, há o favorecimento da entrada de água das chuvas, o que produz uma quantidade maior de chorume. Quando na superfície, tornam-se vetores de proliferação de insetos transmissores de doença tropicais – com destaque ao *Aedes aegypti*, transmissor da dengue e ambiente propício para proliferação de roedores que, entre inúmeras doenças, transmitem a leptospirose (PARRA; NASCIMENTO e FERREIRA, 2017).



Quando este material é disposto em terrenos a céu aberto, dois problemas surgem: de saúde pública, já que o acúmulo de água da chuva pode servir de criadouros para micro e macro vetores, e ambiental, pois para cada pneu queimado são liberados 10 litros de óleo, que podem percolar e contaminar o solo e o lençol freático, além de gases como carbono, dioxinas, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e outras substâncias também tóxicas e cancerígenas (RODRIGUES *et al.*, 2004).

Muitas vezes os pneus são jogados em córregos, lagos ou rios, o que provoca a diminuição da calha desses locais que conseqüentemente ficam mais passíveis a enchentes, causando inundações às vias e residências próximas. Quando são empilhados e descobertos a céu aberto favorecem os riscos de incêndio (CEMPRE, 2010).

Devido aos problemas sanitários e ambientais causados pela destinação inadequada dos pneus inservíveis, esse assunto passou a ser motivo de regulamentação específica abrangendo as indústrias de pneus. Neste contexto surge a logística reversa da coleta e destinação dos pneumáticos inservíveis (BRANCO, 2011).

2.2. Concreto com resíduo de borracha de pneus

No intuito de diminuir o passivo ambiental causado pela disposição inadequada dos pneus inservíveis, e tendo em vista as propriedades da borracha de pneu, tais como baixa densidade, absorção ao impacto, capacidade de deformação, durabilidade e impermeabilidade, diversos autores têm buscado avaliar o potencial do uso de resíduos de borracha de pneus reciclados para produção de pavimentos de concreto e elementos pré-fabricados.

O resíduo incorporado ao concreto pode dar-se por substituição parcial ou total do agregado graúdo ou miúdo, e mesmo somente pela adição deste material ao composto. Santos (2005), afirma que quando se adiciona fibras ao concreto, pretende-se com isso provocar uma costura entre as infinitas seções que compõem o sólido, combatendo principalmente as fissuras provocadas pela retração.

Lintz (2010) fizeram uma avaliação das propriedades mecânicas de concretos com resíduos de borracha vulcanizada empregados na fabricação de pisos intertravados, produzindo diferentes misturas de concreto com incorporações crescentes de borracha, em substituição parcial aos agregados naturais de (2,5%, 5%, 7,5% e 10%). Os resultados demonstraram a viabilidade técnica dessa ideia com a substituição de até 2,5% da massa de agregado miúdo natural pelo agregado reciclado de borracha.

Romualdo *et al.*, (2011) reaproveitaram os resíduos de borracha inserindo-os na composição de concreto para pavimentação de calçadas, em substituição ao agregado miúdo em frações de (5%, 10% e 15%). Os resultados apontaram que o traço que se mostrou mais satisfatório para o uso em pavimentação de calçadas foi o de 5% de adição fibras de pneus. Apesar de perder em resistência, o concreto borracha ganhou em outras propriedades mecânicas, principalmente relacionadas à flexibilidade.

Tretim (2014) fez uma análise do comportamento estrutural de cinco tubos de concreto armado, sendo um deles sem adição de resíduo de borracha, dois deles com uma quantidade de resíduos igual a 10 kg de borracha por metro cúbico de concreto e outros



dois com uma quantidade de resíduo de 20 kg de borracha por metro cúbico de concreto. Os tubos confeccionados tinham um diâmetro nominal de 60 cm e um comprimento efetivo de 150 cm. Como resultado este autor verificou que todos os tubos com resíduo de borracha de pneu seguiram o mesmo padrão de fissuração em relação ao tubo controle (sem adição de resíduo), porém, apresentando uma carga de fissura maior, retardando, deste modo, o início do processo de fissuração.

Vieira (2014), em sua dissertação de mestrado, buscou demonstrar a viabilidade de um compósito cerâmico contendo fibra de borracha na fabricação de blocos intertravados. Como já era de se esperar, os resultados indicaram que a adição que fibras conferiu ao concreto estudado uma diminuição na resistência à compressão em relação ao concreto tradicional. Este resultado foi atribuído à maior presença de poros e à baixa aderência entre as fibras e a matriz cimentícia.

Altoé (2017) analisou a resistência mecânica e a absorção de água de corpos de prova de concreto fabricados com e sem resíduos. Foram utilizados 4 teores de substituição (2%, 5%, 7% e 10%), na tentativa de definir um comportamento para as características estudadas quando da substituição proposta. O resíduo de pneu mostrou-se um substituto viável ao agregado miúdo em teores de (2%, 5% e 7%), na fabricação de *pavers* sujeitos a solicitações leves, apesar de apresentar uma redução na resistência à compressão e um aumento na absorção de água dos traços confeccionados.

3. Materiais e métodos

A fase laboratorial deste estudo foi dividida em quatro etapas, constando de: caracterização dos materiais (agregados miúdo, agregado graúdo e resíduo de borracha); determinação da dosagem do concreto; confecção e moldagem dos corpos de prova e realização dos ensaios físico-mecânicos.

3.1. Materiais utilizados

Para a confecção do concreto utilizou-se o cimento CP II-F-40, areia natural, seixo de origem quartzosa, água, e resíduo de borracha de pneus, proveniente do processo de recauchutagem de uma fábrica localizada na região metropolitana de Belém-PA. Durante a etapa de raspagem da banda de rodagem dos pneus são gerados grânulos de borracha. Estes resíduos ficam no chão da fábrica e logo após são recolhidos por uma mangueira de sucção para serem armazenados em camburões e posteriormente receberem uma destinação, que na maioria das vezes, é o aterro sanitário. A Figura 5 ilustra as etapas de geração deste material.



Figura 5. Geração dos resíduos

Este resíduo é composto por grânulos de diversas formas e tamanhos, compreendendo desde partículas muito pequenas em formato de pó, até fibras que podem ser muito curtas ou mais alongadas, conforme ilustrado na Figura 6.



Figura 6. Resíduo de borracha de pneu utilizado

3.2. Caracterização dos materiais

Os componentes do concreto foram submetidos a ensaios para determinação de suas propriedades físicas, conforme as normas vigentes. O ensaio da composição granulométrica seguiu os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR NM 248 (2003). Para o seixo utilizou-se duas amostras com (5 kg) cada uma; para a areia duas amostras com (1kg); e para a borracha duas amostras com (3kg). Primeiramente secou-se certa quantidade de areia em estufa a temperatura de (110°C). Depois, deixou-se a areia esfriar em temperatura ambiente e determinou-se as massas (m1 e m2). Logo em seguida,

procedeu-se ao peneiramento manual. Após esse processo, foram pesadas as massas retidas em cada peneira e calculadas as porcentagens médias, retida e acumulada, a dimensão nominal máxima característica ($D_{máx}$), e o módulo de finura (M_F) do agregado.

Para a determinação da massa específica da areia seguiu-se os procedimentos adotados pela ABNT NBR NM 52 (2009). A aferição da massa específica do agregado graúdo baseou-se na NBR NM 53 (ABNT, 2009). Para o resíduo de borracha, devido não existir uma norma específica, utilizou-se a Norma ASTM C 792 (2015), com algumas adaptações. Inicialmente, pesou-se duas amostras de 500 g, cada uma, que foram colocadas em estufa por um período de 4 horas, a uma temperatura de (110°C). Depois desse intervalo, as amostras foram resfriadas ao ar durante 2 horas e então inseridas em uma proveta contendo (500 dm^3) de querosene à temperatura de 25°C . Após a inserção do resíduo, foi feita a agitação do frasco para eliminação das bolhas de ar e então realizou-se a leitura do nível atingido pelo líquido no gargalo do frasco indicando o volume em cm^3 ocupado pelo conjunto (água-agregado). Com esses dados determinou-se a massa específica da borracha.

Utilizou-se o procedimento de ensaio estabelecido pela ABNT NBR NM 45 (2006) para determinação da massa unitária dos agregados e do resíduo de borracha. Primeiramente foi determinada a massa do recipiente prismático (em Kg). Logo após secou-se o seixo e a areia em estufa a uma temperatura de (110°C) durante 24 horas (a borracha ficou na estufa por apenas 4 horas). Com o material seco, encheu-se o recipiente em três camadas de $1/3$ de altura, aplicando-se em cada uma delas 25 golpes com uma haste, de modo a distribuir uniformemente a amostra. Posteriormente, nivelou-se a superfície com uma régua metálica e pesou-se o conjunto (recipiente-agregado) em kg. Esse procedimento foi repetido por 3 vezes consecutivas.

3.3. Determinação da dosagem

Após a caracterização dos agregados foi elaborado o traço do concreto, feito segundo o método da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Primeiramente, estipulou-se o F_{ckj28} , que se refere à resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias de cura, o qual é calculado utilizando-se a resistência característica à compressão mínima desejada para o projeto (F_{ck}) multiplicado por um coeficiente de majoração (desvio padrão) que, para este caso, foi adotado o valor de 5,5. Tendo em vista que o objetivo era avaliar a viabilidade de aplicação deste material para confecção para peças e elementos pré-moldados, fixou-se o F_{ck} em 35 MPa, conforme o que estabelece a ABNT NBR 9781 (2013), e utilizando-se a curva de *Abrams*, estabeleceu-se a relação água/cimento em 0,45, chegando-se ao consumo de materiais necessários para a produção de 1 m^3 de concreto (sem adição de borracha), conforme mostra a Tabela 1. A apresentação do traço ficou da seguinte forma: (1: 1,17: 2,74). Foram utilizados três traços, sendo um de referência, denominado CR (sem adição de resíduo), e outros dois com adição de 6% (CB6) e 9% (CB9) em massa de borracha, em relação ao agregado miúdo. Essas porcentagens de adição foram escolhidas devido aos estudos analisados na revisão bibliográfica terem demonstrado que frações na faixa de 5% a 10% de resíduo, proporcionavam bons resultados para o concreto.

Tabela 1. Consumo de materiais para 1m³ de concreto

Traços	Nome	Cimento (Kg/m ³)	Seixo (Kg/m ³)	Areia (Kg/m ³)	Água (l/m ³)	Borracha (Kg/m ³)
(1: 1,17: 2,74) sem adição	CR	444,44	1216,6	518,3	200	0,00
(1: 1,17: 2,74) com adição de (6%)	CB6	444,44	1216,6	518,3	200	31,10
(1: 1,17: 2,74) com adição de (9%)	CB9	444,44	1216,6	518,3	200	46,65

3.4. Fabricação do Concreto

Primeiramente, pesaram-se todas as quantidades de materiais necessários para confecção dos traços para então seguir ao procedimento de produção do concreto, nesta ordem: umidificação da betoneira; colocação de todo o agregado graúdo; colocação de metade da areia; inserção de metade da água; mistura na betoneira por 1 minuto; adição de todo o cimento; adição do restante de areia; inserção da borracha (para o traço de referência – pular essa etapa); homogeneização dos materiais na betoneira por mais 3 minutos, e; mistura do restante de água, rodando a betoneira por mais 2 minutos.

Para verificar a consistência do concreto no estado fresco, retirou-se uma amostra que foi submetida ao ensaio do abatimento pelo tronco de cone (*slump test*), segundo o que estabelece a ABNT NBR NM 67 (1998). Para cada um dos traços confeccionados obteve-se um *slump* diferente, sendo eles: 55 mm (para o CR); 40 mm (para O CB6) e; 25 mm (para O CB9). Após a moldagem, os corpos de prova foram postos em um tanque para cura úmida até as datas de serem ensaiados.

3.5. Realização dos ensaios mecânicos

3.5.1 Ensaio de resistência à compressão axial

O ensaio de compressão axial simples foi realizado segundo as recomendações da ABNT NBR 5739 (2007), que prescreve uma metodologia, na qual devem ser ensaiados à compressão os corpos de prova cilíndricos de concreto, moldados conforme a ABNT NBR 5738 (2015). O procedimento consiste em posicionar os corpos de prova de concreto sobre uma prensa hidráulica, que aplicará uma força axial, submetendo-os a um esforço máximo até o rompimento, a fim de determinar o nível de carga suportado pela amostra correspondente a cada traço. Utilizou-se 4 corpos de prova cilíndricos para cada traço, que foram ensaiados aos 7, 14 e 28 dias de cura. Após o procedimento, realizou-se a determinação da resistência à compressão axial simples, dividindo-se o valor da força aplicada pela área do corpo de prova rompido, conforme a Equação 1 a seguir, retirada da ABNT NBR 5739 (2007).

$$f_c = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (1)$$

Onde:

f_c: resistência à compressão, em Megapascal;

F: força máxima alcançada, em Newtons;

d: diâmetro do corpo-de-prova, em milímetros.

3.5.2 Ensaio de resistência à tração na flexão em corpos de provas prismáticos

A resistência à tração na flexão é expressa em termos de módulo de ruptura, que é a resistência máxima à ruptura calculada a partir da fórmula de flexão (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Para este ensaio, assim como no ensaio de resistência à compressão axial, foram utilizados quatro corpos de prova.

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado com base na norma ASTM C 293 (2016). O procedimento consistiu em posicionar os corpos de prova de seção prismática com dimensões de 10x10x30 cm, com 28 dias de idade, sobre um suporte metálico de aço, onde o concreto ficou apoiado na base inferior através de dois cutelos. Em sua parte superior, foi centralizado, de forma simétrica, o sistema de carregamento de força que aplicou uma carga de forma contínua entre 3 a 6% da carga máxima estimada até o ponto de ruptura do corpo de prova. Por fim, calculou-se a resistência à tração na flexão com aproximação de 0,01 MPa para os resultados individuais, utilizando a (Equação 2), retirada da ASTM C 293 (2016).

$$R = \frac{3 PL}{2 bd^2} \quad (2)$$

Onde:

R: módulo de ruptura ou resistência ao dobramento, em psi ou MPa;

P: carga Máxima Aplicada conforme indicado pela máquina, em Ibf ou N;

L: comprimento de span, em polegada ou mm;

b: espessura média da amostra na fratura, em polegadas ou mm;

d: profundidade média da amostra na fratura, em polegadas ou mm.

4. Análise dos Resultados Obtidos

4.1 Características Físicas dos Agregados

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de determinação de composição granulométrica, massa específica e massa unitária dos agregados. Conforme a classificação da ABNT NBR 7211 (2009), a areia por apresentar um módulo de finura de (1,80) enquadra-se na faixa da Zona Utilizável Inferior, como mostrado na Figura 7. O seixo assemelha-se a brita zero, já que a sua curva granulométrica se encontra entre os limites superiores e inferiores dos parâmetros desse tipo de agregado, como pode ser observado na Figura 8.

A borracha, por sua vez, extrapola todos os limites para ser considerado como agregado miúdo, sendo, portanto, classificado como agregado graúdo, como pode ser visto na Figura 9.

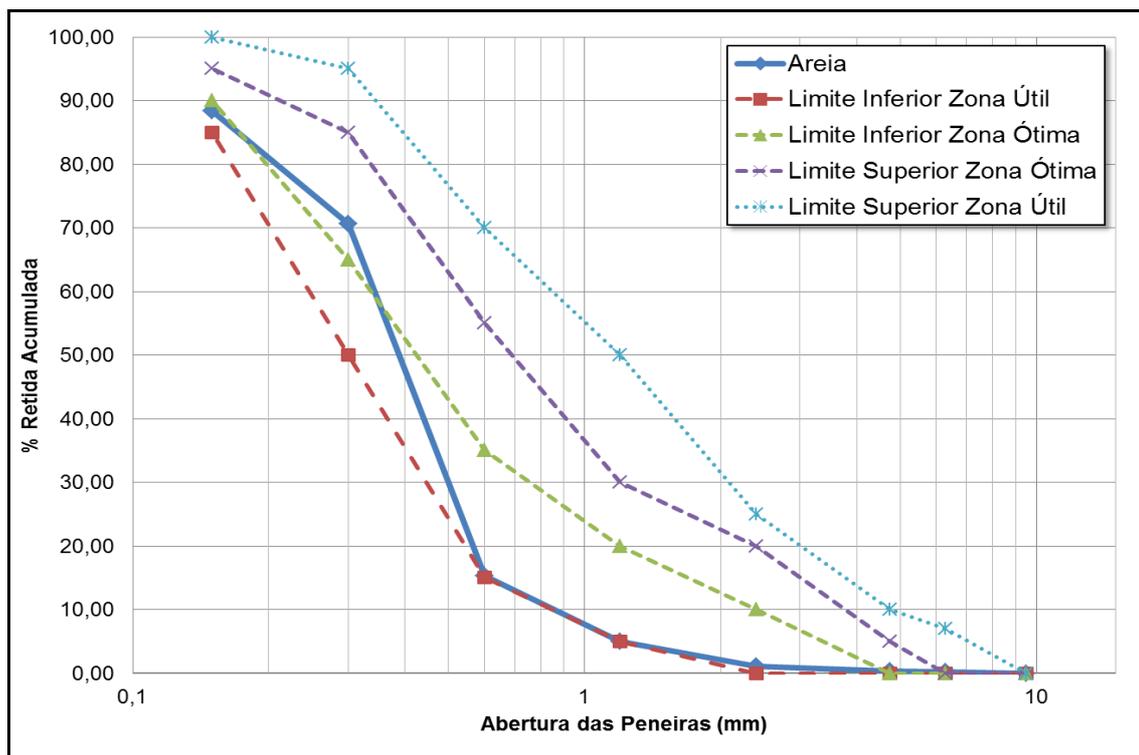


Figura 7. Curva de distribuição granulométrica da areia

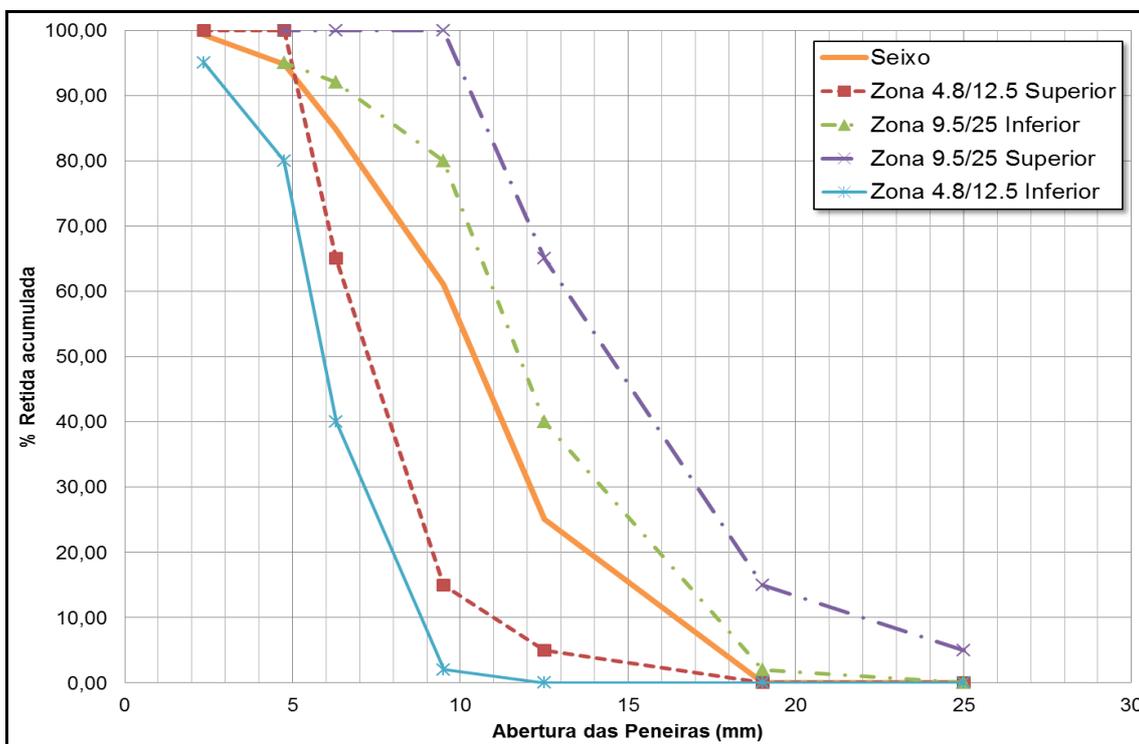


Figura 8. Curva de distribuição granulométrica do seixo

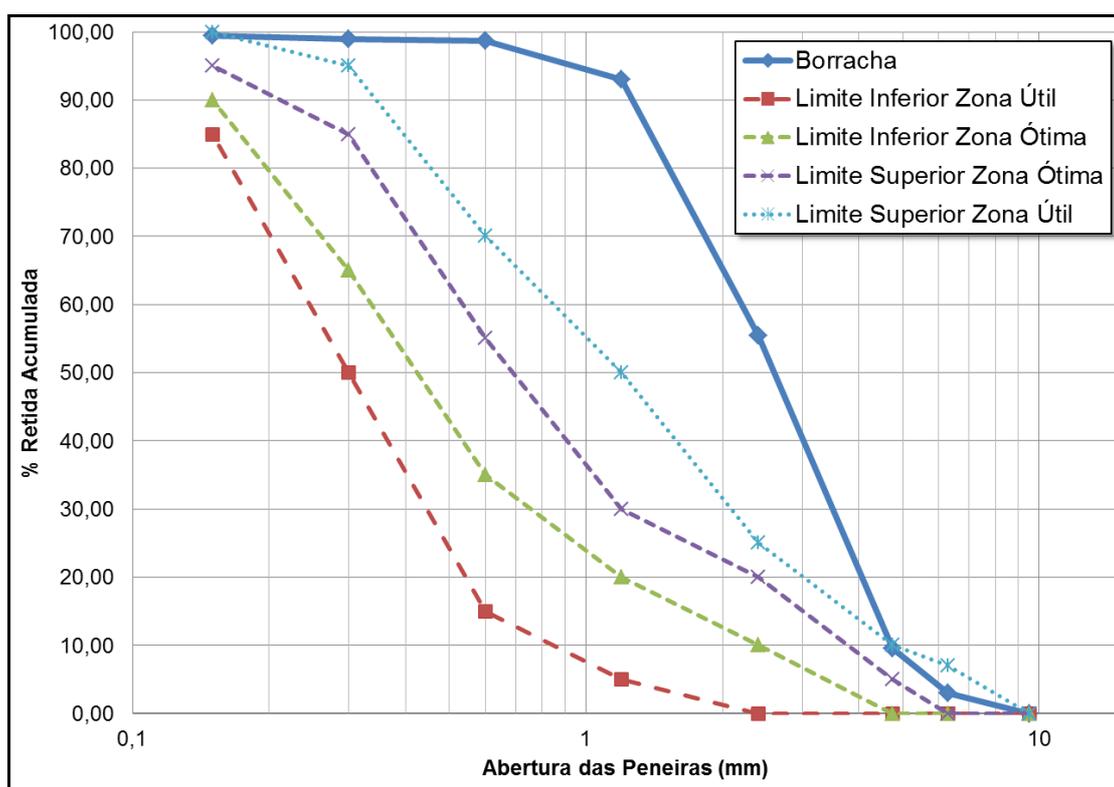


Figura 9. Curva de distribuição granulométrica da borracha

Em relação à massa específica e massa unitária. Verifica-se que, a borracha possui baixos valores para essas grandezas em comparação com o seixo e a areia. Os valores obtidos na presente pesquisa estão em consonância com as informações obtidas nas literaturas pesquisadas, onde a massa unitária da borracha varia de 0,27 a 0,50 g/cm³, enquanto que a massa específica mais recorrente é de 1,14 g/cm³.

Tabela 2. Caracterização física dos agregados

Material	Massa Específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)	Dimensão Máxima Característica (mm)	Módulo de Finura
Agregado miúdo natural (areia)	2,63	1,69	1,18	1,80
Agregado graúdo (seixo)	2,65	1,58	19,0	6,55
Resíduo de borracha	1,11	0,35	6,3	4,55

4.2 Resistência à compressão axial

A Figura 10 apresenta os resultados dos ensaios de compressão axial simples que foram realizados aos 7, 14 e 28 dias de cura do concreto. Observa-se que a adição de borracha promove a queda gradativa da resistência do concreto, fato este que já era esperado, tendo em vista os resultados verificados nas literaturas existentes sobre o tema, (ALTOÉ, 2017; MOREIRA, 2014; BRITO, 2013; ROMUALDO *et al.*, 2011; LINTZ, 2010; FIORITI,

2017). Estes autores atribuíram esse fenômeno à fraca aderência entre a borracha e a matriz cimentícia. No entanto, devido à aplicação final proposta para esse compósito ser a confecção de elementos e peças pré-moldadas, preferencialmente pisos para baixo tráfego, o objetivo deste trabalho foi alcançado, pois a menor resistência obtida foi referente ao CB9 com 41,6 MPa. Esse valor está acima dos 35 MPa estabelecidos pela ABNT NBR 9781 (2013).

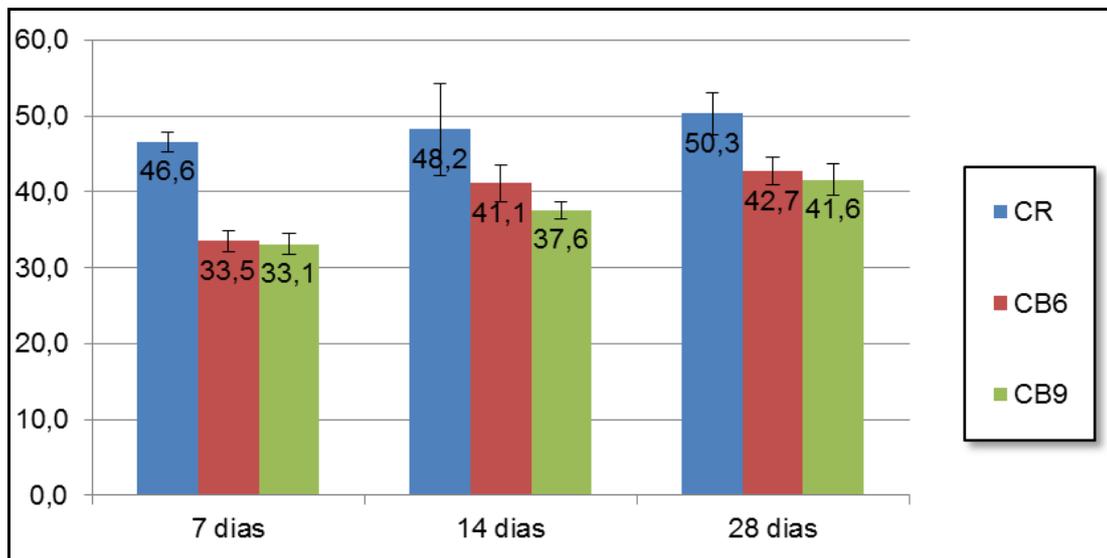


Figura 10. Resistência à compressão axial

Os resultados dos ensaios de compressão axial demonstram que existe uma relação inversamente proporcional entre a quantidade de borracha inserida no concreto e sua queda de resistência. Entre os quatro corpos de prova utilizados para cada ensaio, observa-se que não há grande dispersão de resultados entre as composições. Ao analisar a queda de resistência do concreto por idade de rompimento, verifica-se que aos 7 dias o concreto com borracha, tanto o CB6 quanto o CB9 apresentam uma queda de resistência de aproximadamente 30% em relação ao CR, sendo que aos 28 dias essa diferença diminui para 15,14% e 17,27% para o compósito com adição de 6 e 9%, respectivamente.

Estes resultados se mostram satisfatórios, tendo em vista os trabalhos realizados por outros autores, como Altoé (2017) que obteve uma redução de 54,6% para o concreto com adição de 7% de borracha e 79,84% para uma adição de 10%, e Fioriti (2017), que observaram uma queda de 18, 13% de resistência para o concreto com adição de 8% de resíduo de borracha e 22,46% para o adicionado com 10%. É válido ressaltar, no entanto, que os trabalhos citados realizaram a substituição em fração parcial em massa de agregado miúdo pelo resíduo de borracha, enquanto que na presente pesquisa foi feita apenas a adição.

4.2 Resistência à tração na flexão

Na Figura 11 é possível visualizar a média aritmética dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial que foi realizado aos 28 dias. Os dados demonstram que o CB9 apresentou uma menor queda na resistência à tração quando comparado ao CB6, que

teve uma redução de 9,15%. Também se verificou que os corpos de prova utilizados não apresentaram significativo desvio nos resultados para cada composição analisada. Apesar de ter havido uma diminuição da resistência à tração, nota-se que os valores são muito aproximados, sendo que o CB9 apresentou um melhor resultado em relação ao CB6.

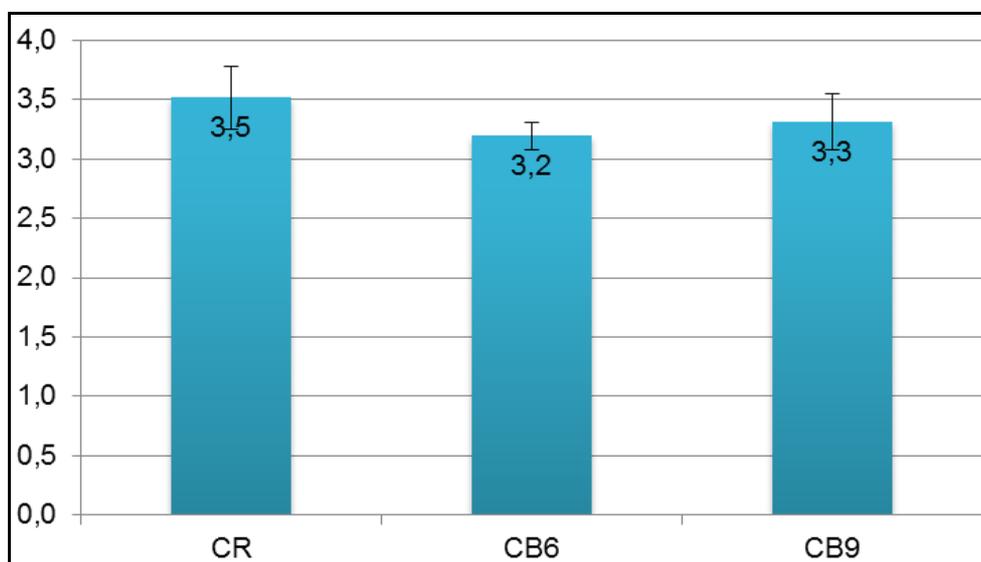


Figura 11. Resistência à tração na flexão - 28 dias (MPa)

A ABNT NBR 9781 (2013) não estabelece critérios quanto à resistência à tração, porém, algumas normas internacionais já utilizam este parâmetro para a avaliação da resistência mecânica dos pisos de concreto.

Os resultados encontrados neste trabalho também estão condizentes com bibliografia sobre o tema, que apresentam menores valores para o concreto com adição de borracha em relação ao concreto tradicional (ALTOÉ, 2017; MOREIRA, 2014; BRITO, 2013; ROMUALDO *et al.*, 2011; LINTZ, 2010; FIORITI, 2017).

5. Conclusão

Por meio deste trabalho foi possível constatar que o emprego de resíduo de borracha de recauchutagem de pneus para a produção de concreto é uma alternativa viável do ponto de vista técnico e ambiental, sendo que este compósito pode ser empregado em elementos e peças pré-moldadas, principalmente em placas de pavimentação intertravada de baixo tráfego, por estar adequada às condições estabelecidas pela legislação vigente.

Para os traços analisados, a resistência à compressão axial e de tração na flexão foram reduzidas em relação ao concreto de referência. Isto se deve à baixa aderência presente em alguns pontos entre a fibra de borracha e a matriz cimentícia. No entanto, estas reduções podem ser consideradas pequenas levando-se em consideração as literaturas pesquisadas sobre o tema. Ressalte-se, ainda, que todos os três tipos de concreto analisados obtiveram resistências à compressão axial superiores ao que está previsto na ABNT NBR 9781 (2013), sendo, portanto, indicados para aplicação de pavimento intertravado com pouca solicitação de carga.



No estado fresco foi observado que a trabalhabilidade dos concretos com adição de borracha foi reduzida em relação ao de referência. Todavia, não foi necessária alteração na relação água/cimento nem a utilização de aditivos, o que poderia encarecer o concreto produzido.

Ao comparar os resultados obtidos, identifica-se que o teor ótimo de adição de resíduo é o de 9%, pois apesar de apresentar uma redução na resistência à compressão axial de 2,13% em relação ao teor de 6%, consegue incorporar uma maior quantidade de resíduo, contribuindo para a logística reversa deste material.

Através da análise quantitativa realizada neste trabalho, constatou-se que o uso de resíduos de borracha de pneus de recauchutagem em concreto é uma prática altamente benéfica à gestão ambiental dos pneumáticos, que contribui de forma significativa para redução desse passivo ambiental.

Conclui-se dessa forma que, a proposta estabelecida na presente pesquisa teve êxito, uma vez que, conseguiu demonstrar que o material final obtido está dentro dos parâmetros técnicos estabelecidos pelas normas vigentes, além de contribuir de forma significativa para a logística reversa dos pneumáticos.

6. Referências

- Albuquerque, A. C. (2009) "Estudo das Propriedades de Concreto Massa com Adição de Partículas de Borracha de Pneu", Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFRGS, Porto Alegre.
- Altoé, S. P. S. (2017) "Avaliação da resistência mecânica de pavers fabricados com resíduos de pneus em substituição parcial do agregado miúdo", Artigo científico, in: *Syn. scy*. UTFPR, Pato Branco, v. 12, n. 1, p. 262–268, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C293 (2016) "Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading)", West Conshohocken, Pennsylvania, United States of America, p.9.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C792 (2015) "Standard Test Method for Effects of Heat Aging on Weight Loss, Cracking, and Chalking of Elastomeric Sealants", West Conshohocken, Pennsylvania, United States of America, p.6.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE INDÚSTRIAS DE PNEUMÁTICOS. ANIP (2017) "Relatório dos Pneumáticos", www.anip.com.br. Outubro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45 (2006) "Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios", Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52 (2009) "Agregado miúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente", Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53 (2009) "Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água", Rio de Janeiro.



- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 (2003) "Agregados - Determinação da composição granulométrica", Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9781 (2013) "Peças de concreto para pavimentação – Especificação e método de ensaio", Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67 (1998) "Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone", Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 (2015) "Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova", Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 (2007) "Concreto – Ensaio de compressão de corpo de prova cilíndrico", Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211 (2009) "Agregados para Concreto", Rio de Janeiro.
- Branco, J. E. H. (2011) "Caracterização da logística reversa de pneus inservíveis", In: Logística Ambiental de Resíduos Sólidos, São Paulo, Atlas.
- BRASIL^a, Ministério do Meio Ambiente (2009) "CONAMA, Resolução nº 416", de 30 de setembro.
- BRASIL^b, Ministério do Meio Ambiente (2009) "CONAMA, Resolução nº 258", de 26 de agosto.
- Brito, G. P. S. (2013) "Estudo da Viabilidade Técnica de Paver com Resíduo de Pneu em Substituição Parcial dos Agregados", Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pampa, Alegrete.
- CEMPRE (2017) "Mercado para Reciclagem", http://cempre.tecnologia.ws/fichas_tecnicas.php?lnk=ft_pneus.php, Outubro.
- Fioriti, C. F. (2017) "Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus", in: Ambiente Construído, Porto Alegre, v.7, n.4, p.43-54.
- Granzotto, L. (2010) "Concreto com adições de borracha: uma alternativa ecologicamente viável", Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós - Graduação em Engenharia Urbana, Maringá.
- Lintz, R. C. C. (2010) "Avaliação do comportamento de concreto contendo borracha de pneus inservíveis para utilização em pisos intertravados", Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, São Paulo.
- Mehta, P. K. e Monteiro, P. J. M. (2008) "Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais", São Paulo, 3ª Edição, Ed. IBRACON.
- Morilha Jr. A. e Greca, M. R. (2003) "Considerações relacionadas ao asfalto ecológico – ecoflex. IEP", Apostila sobre asfalto borracha, Instituto de Engenharia do Paraná.



- Moreira, J. F. (2014) "Concreto com borracha de pneus aplicado em ciclovia" in: *Holos Environmental*, v. 14, n. 2, p.186.
- Oda, S. e Fernandes Jr, J. L. (2001) "Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação", *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 23, n. 6, p. 1589-1599.
- Parra, C. V.; Nascimento, A. P. B e Ferreira, M. L. (2017) "Reutilização e Reciclagem de pneus, e os problemas causados por sua destinação incorreta" http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2010/anais/arquivos/0908_0988_01.pdf, Junho.
- Pnews, R. (2002) "Associação Brasileira dos Recauchutadores, Reformadores e Remoldadores", *Revista* nº 34.
- Rodrigues Jorge, M. R. P.; Ferreira, O. P. e Clareto Neto, S. (2004) "Aproveitamento de borracha de pneus inservíveis na produção de componentes para construção" in: *Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável*, Florianópolis, SC, Anais, Florianópolis, SC: ICTR.
- Romualdo, A. C. A. (2011) "Pneus Inservíveis como Agregados na Composição de Concreto para Calçadas de Borracha", in: *3 International Workshop Advances in Cleaner Production São Paulo, Brazil, May, 18th-20th*.
- Santos, A. C. (2005) "Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneus com aplicação em placas pré-moldadas", *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Alagoas, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Maceió*.
- Silveira, E. (2016) "Reciclagem de Pneus", *Engenharia de Materiais, Pesquisa FAPESP, Edição 246*, revistapesquisa.fapesp.br/2016/08/19/reciclagem-de-pneus/, Novembro.
- Sousa, F. S. (2016) "Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de concreto utilizando resíduo de recapagem de pneus", *Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA), Belém, PA*.
- Tretin, T. F. S. (2014) "Análise estrutural de tubos de concreto armado com resíduo de borracha de pneu", *Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, UNESP, Campus de Ilha Solteira, São Paulo*.
- Vieira, A. P. N. B. (2014) "Viabilidade técnica da fabricação de compósito utilizando fibra de pneu na fabricação de blocos intertravados", *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal*.