

ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADO GRAÚDO POR RESÍDUO DE PNEU TRATADO EM CONCRETO PERMEÁVEL

TENROLLER, Gabriela Esteffani.¹

PERES, Maria Vânia Nogueira do Nascimento.²

RESUMO: A presente pesquisa tem como objetivo analisar a viabilidade de se produzir um concreto permeável com resistência capaz de atingir os parâmetros exigidos pela NBR 16416 (ABNT, 2015). A finalidade desse material é favorecer a drenagem das águas pluviais em grandes centros, quando utilizado como pavimento, além de ser uma alternativa sustentável ao substituir parcialmente o agregado graúdo por 5%, 10% e 15% de resíduo de pneu triturado. Visando aumentar a aderência entre o material incorporado e a matriz do cimento, aplicou-se uma técnica de lavagem utilizando Óxido de Cálcio (Cal Virgem), entretanto o material resultante desse processo interferiu negativamente nos resultados de resistência à compressão axial do concreto, reduzindo em 1,1MPa, 1,4MPa e 0,6MPa, respectivamente, conforme as substituições, o que equivale de 10% a 20% de queda nas resistências, não atingindo o valor esperado de 20MPa. Outro parâmetro analisado na pesquisa e de suma importância para esse tipo de concreto refere-se ao coeficiente de permeabilidade do material, atingindo resultados entre 0,00229 m/s e 0,00244 m/s sendo positivos e dentro do especificado na norma de concretos permeáveis, classificado como alto grau de permeabilidade segundo a *American Concrete Institute*. Porém, em decorrência da baixa resistência à compressão axial, torna-se inviável para a produção seguindo o traço 1:4 utilizado, bem como as devidas proporções de substituição.

Palavras-chave: Concreto Permeável, Borracha, Sustentabilidade, Óxido de Cálcio.

1. INTRODUÇÃO

A Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos – ANIP divulgou em seu último relatório mensal, referente ao mês de janeiro de 2020, que houve uma queda de 2% na comercialização dos produtos em relação ao mesmo mês no ano de 2019. Entretanto, apesar disso, foram comercializados 4.379.434 pneus que em breve estarão sendo depositados em locais indevidos se não forem reciclados, resultando em sérios riscos à saúde pública e ao meio ambiente (CONAMA, 1999).

Mesmo com a Resolução nº 258 (1999) do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, que determina que os fabricantes e as importadoras de pneumáticos são obrigados a coletar e a dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis, Oliveira e

¹Discente, Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel - PR. E-mail: gabriela_tenroller@hotmail.com

²Docente, Mestre, Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel – PR.

Castro (2007) constataram, em pesquisa, que a consciência ambiental acerca do assunto ainda é muito pequena por parte da população brasileira e dos empresários, além da inexistência de um engajamento coletivo de mudança.

Em paralelo a isso, em média, 14% a 50% dos recursos naturais extraídos do planeta são consumidos pelo setor da construção civil. Com o objetivo de minimizar a extração desses recursos, os materiais reciclados podem se tornar substitutos dos agregados naturais empregados no concreto (FIORITI, INO e AKASAKI, 2007), além de dar uso adequado aos reciclados.

Alcântara e Florêncio (2017), apontam que os impactos gerados ao ciclo hidrológico do planeta são decorrentes da falta de planejamento urbano, uso e ocupação irregular do solo, o que ocasiona inúmeras inundações nos grandes centros urbanos, provoca perdas econômicas, danos às edificações e afeta a saúde da população.

Nesse contexto, insere-se o estudo do concreto permeável, uma tecnologia que auxilia na percolação da água pluvial, quando utilizado como pavimento. Trata-se de um concreto composto basicamente por agregado graúdo e cimento, com um alto índice de vazios, o qual permite a passagem de água, podendo ser utilizado como uma possível solução inteligente aos problemas de alagamentos (POLASTRE e SANTOS, 2006).

Além disso, ressalta-se a possibilidade de unir os problemas expostos acima em uma só solução, utilizar o resíduo dos pneus inservíveis no concreto permeável, em substituição parcial ao agregado graúdo, em pequenas proporções. Mesmo com a queda da resistência à compressão, ainda é viável para pavimentos com baixo tráfego de veículos (Silta et al, 2019), desde que seja encontrada a proporção correta que não altere as propriedades mecânicas do concreto estabelecidas pela NBR 16416 (ABNT, 2015).

Diante desses fatos, a justificativa para a realização desta pesquisa baseia-se em encontrar uma solução viável aos decorrentes casos de alagamentos das cidades e ainda utilizar um material alternativo, diminuindo os impactos gerados no meio ambiente. Isso se justifica através da redução da extração de recursos naturais e também da diminuição na produção de dejetos sólidos. Além disso, essa ação possibilita novas aplicações dos materiais.

Para tanto, a pergunta a ser respondida com a realização deste estudo será a seguinte: É possível substituir parcialmente o agregado graúdo por resíduo de pneu tratado com óxido de cálcio em concreto permeável, respeitando os limites mínimos de resistência e permeabilidade estabelecidos por normativas?

A análise estará limitada ao tratamento da borracha por método de lavagem, classificação dos resíduos que serão utilizados no concreto e posterior moldagem dos corpos de prova para realização dos ensaios futuros. Vale ressaltar que a pesquisa se restringe aos ensaios de granulometria, resistência do concreto à compressão axial e à permeabilidade.

De acordo com todas as informações expostas anteriormente, o objetivo geral é analisar a possibilidade da substituição de 5%, 10% e 15% do agregado graúdo por resíduo de pneus na composição do concreto permeável utilizado como revestimento de pavimentação com tráfego leve.

Salienta-se que para que este trabalho científico possa ter pleno êxito, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- a) Verificar se o óxido de cálcio possibilitará maior aderência entre o concreto e a borracha, gerando ganho de resistência à peça;
- b) Encontrar a proporção adequada de substituição do agregado graúdo pelo resíduo de pneu;
- c) Atingir os parâmetros mínimos exigidos por norma para tornar o concreto permeável apto a ser utilizado como revestimento de pavimentação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A problemática dos pneus inservíveis

No Brasil, os resíduos sólidos são classificados e conceituados segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) pela NBR 10004 (ABNT, 2004) para que possam ser manuseados e destinados adequadamente, em virtude dos seus potenciais riscos à saúde pública e ao meio ambiente. O resíduo pode ser classificado quanto a sua composição química, natureza física, pelos riscos à saúde e ao meio ambiente e ainda quanto a sua origem (ANDRADE, 2007).

Como prescrito no Anexo H da NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos de borracha são classificados como não perigosos, no entanto, não há classificação para o objeto pneu. Em um estudo, Bertollo, Fernandes Júnior e Schalch (2002) classificaram os pneus como sendo Classe II (não inertes) por apresentarem teores de zinco e manganês superiores aos estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004) e ainda concluíram que o pneu triturado deve ser considerado um bem valioso devido a sua expansão em diferentes mercados.

Em contrapartida, os pneus, quando abandonados ou dispostos de maneira irregular, servem de local para a procriação de vetores de doenças como a dengue e ainda abrigo para animais peçonhentos. Além disso, quando queimados, emitem grande quantidade de poluentes para a atmosfera, como o monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO²), fuligem e hidrocarbonetos poliaromáticos (PAH) e ainda eliminam óleos que ao infiltrarem no solo podem contaminar os lençóis freáticos (MONTEIRO, MATTIOLI e FERREIRA, 2011).

2.2 Reciclagem de pneus e a incorporação na construção civil

Atualmente são vários os destinos dados aos pneus. Para aqueles que ainda apresentam sua estrutura intacta, o processo de reforma é uma alternativa para aumentar a sua vida útil, podendo ser a recapagem, recauchutagem ou remoldagem, o que depende da situação em que o pneu se encontra. Vale ressaltar que ambos são processos que não eliminam o pneu inservível, sendo que o mesmo volta a ser utilizado em sua função principal (ANDRADE, 2007).

A reciclagem é a mudança da função do pneu, agora incorporado à cadeia produtiva, tanto na forma inteira como triturado, abrindo um leque de possibilidades para amenizar a sua problemática de descarte (ANDRADE, 2007). Algumas das principais aplicações serão descritas ao longo deste capítulo.

2.2.1. Fonte alternativa de combustível (coprocessamento)

Algumas indústrias, principalmente as cimenteiras, vêm utilizando os pneus em fornos rotativos de produção de clínquer como fonte de energia (combustível) devido ao seu elevado poder calorífico (MONTEIRO e MAINIER, 2008). Entretanto, as empresas só podem realizar esse coprocessamento do resíduo se estiverem licenciadas e ambientalmente regularizadas. Todo o processo deve obedecer à Resolução Conama n° 264 (1999), que estabelece diversos critérios e exigências.

2.2.2. Reaproveitamento em sua forma inteira

Se o pneu for mantido em sua forma original, sem passar por nenhum processo de modificação físico-química, tem grande aplicabilidade na construção civil, podendo ser utilizado como muro de arrimo/contenção ao ser organizado em pilhas verticais, montando colunas uma ao lado da outra, interligadas por alças de metal e preenchidas com solo. É possível ser aplicado também em obras de drenagem, formando tubos que substituam os bueiros. Além disso, ainda pode ser utilizado como quebra-mares, protegendo portos e dunas e para a contenção de erosão do solo (ANDRADE, 2007).

2.2.3. Incorporação de pneus em pavimentos asfálticos e no concreto

Na pavimentação asfáltica, a borracha moída pode ser adicionada de duas maneiras, o processo úmido (asfalto-borracha) e o processo seco (agregado-borracha). No primeiro, a borracha é incorporada ao ligante asfáltico antes do agregado, atuando como modificadora do cimento. Já no segundo, ela substitui parcialmente o agregado fino e é misturada inicialmente a ele para posterior junção com o ligante. O ligante asfalto-borracha vem sendo utilizado para reparos em pavimentos CAUQ e tem se mostrado mais vantajoso que selantes sem borracha, pois mesmo sendo 50% mais caro, apresenta durabilidade três vezes maior (KAMIMURA, 2002).

No processo seco, quando usado para substituir uma pequena parte do agregado, atua como agregado elástico. Alguns estudos evidenciam que essa mistura tende a produzir pavimentos que resistam mais à fadiga e ao trincamento a baixas temperaturas. No entanto, os estudos realizados não apresentam perspectivas sobre a durabilidade a longo prazo. (KAMIMURA, 2002).

Já na incorporação ao concreto, a borracha é triturada a uma granulometria adequada e pode tanto substituir o agregado graúdo como o miúdo. Kamimura (2002), cita em sua pesquisa o exemplo de municípios americanos que utilizam desse artifício para confeccionar casas pré-moldadas de baixo custo como uma possível solução para o déficit habitacional.

Kamimura apud LQES (2002), explica que quando há incorporação de borracha como substituição do agregado graúdo ao concreto, o processo torna o material mais flexível, sendo que também poderia ser mais resistente a impactos e um bom isolante térmico e acústico.

Segre (1999), buscou tratar a borracha que foi implementada ao concreto com NaOH e outros elementos, com o objetivo de aumentar a aderência entre ela e a matriz do cimento e, de fato, o NaOH, comparado a outras amostras, apresentou resultados positivos, visto que houve ganho de resistência ao concreto, possibilitando assim a pesquisa por novas substâncias básicas que aumentem a hidrofiliabilidade da superfície das partículas de borracha para que possa ser compatibilizada com a matriz de cimento.

2.3 Concreto permeável

O concreto permeável vem sendo utilizado para a pavimentação desde 1970, quando teve início nos Estados Unidos. Hoje já é amplamente aplicado em países da Europa e também no Japão. Devido à problemática da impermeabilização dos grandes centros urbanos, que dificulta a infiltração das águas pluviais e provoca alagamentos com frequência, os pavimentos porosos tornam-se grandes aliados da infiltração (MONTEIRO, 2010).

Esse material tem função similar aos pavimentos de asfalto permeável, blocos intertravados e outros materiais. Porém, sua composição baseia-se em agregado graúdo, água e cimento Portland, com um alto índice de vazios, o que permite a passagem de água (POLASTRE e SANTOS, 2006).

Desde o ano de 2015 esse tipo de pavimento é regido pela NBR 16416 (ABNT, 2015), que tem como título Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos e Procedimentos e regulamenta os requisitos mínimos exigidos em projetos, execução e manutenção dos pavimentos.

A norma NBR 16416 (ABNT, 2015) estabelece que os locais revestidos com pavimento permeável, sejam eles ruas com baixo tráfego de veículos, calçadas, estacionamentos, dentre outros, permitam a percolação de 100% da água precipitada sobre essa área e suas demais áreas de contribuição definidas em projeto.

Dentro dos parâmetros que a norma exige está o coeficiente de permeabilidade (k), “parâmetro que representa a velocidade com que determinada quantidade de água percola um elemento ou estrutura permeável”. Para pavimentos com peças de concreto permeável $k > 10^{-3}$ (m/s). Em relação à resistência mecânica das peças, o regulamento estabelece que peças de concreto permeável destinadas ao tráfego leve tenham uma espessura igual ou superior a 80mm e uma resistência à compressão igual ou superior a 20MPa (NBR 16416, ABNT 2015).

2.4 Propriedades mecânicas do concreto com adição de borracha de pneu

Ainda não há uma normativa brasileira que regule a adição de borracha de pneu ao concreto permeável nem ao concreto convencional, no entanto, existem várias pesquisas com esse enfoque, principalmente no que diz respeito à segunda opção.

Silva e Fernandes (2018) afirmaram ser perceptível a redução da resistência à compressão do concreto permeável conforme houve o aumento na substituição do agregado pela borracha. Mesmo assim, é possível fazer essa substituição, desde que seja encontrada a porcentagem exata. Em decorrência da falta de uma norma específica, os parâmetros a serem seguidos devem ser os da NBR 16416 (ABNT, 2015).

Muller (2017), fez ensaios substituindo 50% do agregado por borracha, porém a substituição foi em teor muito alto, o que ocasionou drástica queda de resistência. Nos seis corpos de prova que foram ensaiados, a resistência à compressão ficou entre 0,26MPa e 1,22MPa, enquanto os moldados com concreto permeável convencional apresentaram resultados de 7,34MPa a 12,30MPa, tornando a substituição ineficaz e tendo como base os valores aceitáveis variando entre 4,1 MPa e 55,8 MPa (MULLER apud SCHAEFER (2017). Já o coeficiente de permeabilidade, neste estudo, ficou entre 0,71 e 1,38 cm/s, enquanto os valores encontrados por Schaefer et. al. (2006) variavam de 0,01 cm/s a 1,5 cm/s, estando em um intervalo aceitável.

Idalgo et. al. (2018), utilizaram a mesma metodologia de Muller (2017) e que será utilizada na presente pesquisa para determinar o coeficiente de permeabilidade de blocos permeáveis comercializados por três empresas distintas. Para tanto, chegou-se a resultados médios de 0,0012 m/s, 0,0012m/s e 0,0018m/s, considerados “Alto” segundo a tabela de análise, o que demonstra serem adequados para uso em pavimentos com o intuito de diminuir o escoamento superficial e evitar enchentes.

Saldanha, Nunes e Borja (2016), realizaram a substituição de apenas 10% do agregado graúdo por borracha, obtendo resultados de 13,5 MPa na resistência à compressão no concreto permeável convencional e 11,3 MPa no que houve a incorporação da borracha, sendo que ambos apresentaram alta permeabilidade. O que influencia nos resultados é o traço utilizado, já que cada um dos projetos apresentados utilizou um traço diferente.

Alcântara e Florêncio (2017), incorporaram ainda 10% de agregado miúdo ao concreto permeável, no entanto, sem adicionar borracha. O traço convencional apresentou uma resistência à compressão de 5,7 MPa, enquanto o segundo, contendo agregado miúdo, subiu

para 8,4 MPa, tornando-se viável nesse quesito. Já na permeabilidade, como o índice de vazios foi reduzido com o preenchimento pelo agregado miúdo, o coeficiente de permeabilidade de 0,00854 m/s reduziu para 0,00106, mas ainda se manteve dentro do mínimo exigido pela NBR 16416 (ABNT, 2015).

3. METODOLOGIA

3.1 Tipo de estudo e local da pesquisa

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Ensaios Mecânicos e Construção Civil do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel – PR. Inicialmente fez-se a coleta dos resíduos de pneu em uma empresa especializada em triturar o material, no município de Cascavel. Em laboratório, realizou-se a higienização dos resíduos e o ensaio de granulometria, para posterior moldagem dos corpos de prova.

Após a cura, foram feitos ensaios de permeabilidade e resistência à compressão, de acordo com as normas vigentes. Por fim, os resultados obtidos nos ensaios foram comparados aos parâmetros normativos para possível validação do novo traço.

3.2 Caracterização física dos materiais

3.2.1. Cimento

O cimento utilizado foi o OBRAS ESPECIAIS, INDUSTRIAL - MEIOS AGRESSIVOS, da marca VOTORANTIM que é indicado para a produção de pavers e atende à NBR 16697 (ABNT, 2018) na categoria CP V ARI RS sendo benéfico no quesito resistência (Votorantim cimentos).

3.2.2. Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado no concreto permeável foi a brita 0 comercial, disponível no mercado de Cascavel-PR. Para obter mais informações acerca do material utilizado foi realizado o ensaio de granulometria, seguindo a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

O concreto permeável não emprega agregado miúdo em sua composição, sendo assim, Saldanha, Nunes e Borja (2016), utilizaram em sua pesquisa o agregado graúdo que ficou na peneira 4,8 e 2,4 mm, além dos passantes na peneira 12,5mm. Nesta pesquisa será observada a mesma granulometria.

3.2.3. Resíduo de pneu

O resíduo de borracha utilizado na substituição parcial do agregado graúdo foi fornecido por uma empresa especializada em triturar pneus inservíveis, com sede no município de Cascavel-PR. Havia duas opções, utilizar o pneu triturado ou o resíduo gerado no processo de recauchutagem, que é semelhante a fibras de aproximadamente 2,5mm de comprimento. Foi decidido utilizar o pneu triturado por apresentar geometria próxima a uma brita. Para melhor caracterizá-lo, realizou-se o ensaio de granulometria seguindo a NBR NM 248 (ABNT, 2003). A norma citada é referente a agregados, mas como não há uma norma relacionada à granulometria do material utilizado, adaptou-se o ensaio.

3.2.4. Água

A água utilizada no processo é fornecida pelo sistema de abastecimento de água do município de Cascavel-PR, no qual também foram confeccionados os corpos de prova.

3.3 Definição do traço

Com base em estudos sobre concreto permeável e concreto permeável com adição de borracha, optou-se em seguir o traço que apresentou melhores resultados à resistência mecânica,

os quais foram apresentados no estudo de Monteiro (2010), o traço 1:4 (cimento: agregado graúdo), ressaltando que no concreto permeável não se utiliza agregado miúdo e a relação água/cimento utilizada é de 0,4. A substituição do agregado pela borracha foi de 5%, 10% e 15% em volume, levando em consideração a densidade mais baixa da borracha, o que acarretaria em um volume muito maior de material.

Sendo assim, moldaram-se corpos de prova para os ensaios de compressão e permeabilidade com os seguintes traços:

- 1: Traço de referência;
- 2: Traço com 5% de substituição com aplicação de óxido de cálcio;
- 3: Traço com 10% de substituição com aplicação de óxido de cálcio;
- 4: Traço com 15% de substituição com aplicação de óxido de cálcio;
- 5: Traço com 5% de substituição in natura;
- 6: Traço com 10% de substituição in natura;
- 7: Traço com 15% de substituição in natura;

3.4 Preparação do resíduo

Após a coleta do pneu triturado na empresa, o resíduo passou por uma lavagem com Cal Virgem para retirar quaisquer impurezas que poderiam vir a interferir na aderência com os demais componentes do concreto. Inicialmente, a Cal Virgem foi misturada à água na proporção de 5,7g/l, para iniciar o processo de hidratação. Logo em seguida, o resíduo foi misturado à solução.

Esperava-se que o processo de hidratação, ao liberar calor, favorecesse a eliminação das impurezas. A borracha permaneceu imersa por 24h. No dia seguinte, a solução foi descartada e o resíduo lavado em água corrente, sobre uma peneira, para retirar o restante das impurezas e da cal, conforme Figura 1. Depois, disposto para secar naturalmente e então armazenado em sacos plásticos.

Figura 1: Borracha em imersão e em lavagem final.



Fonte: Autor (2020).

3.5 Moldagem dos corpos de prova

O método utilizado para produzir o concreto permeável foi o mesmo de Batezini (2013). Segundo o autor, a ordem da adição dos materiais altera o resultado do produto final. Para se alcançar o melhor resultado, deve-se inicialmente adicionar o agregado graúdo, só a brita no traço de referência e, nos demais traços, a devida proporção de borracha mais a brita 0, na betoneira com mais 5% do peso total do cimento e bater por 1 minuto. Em seguida, adicionou-se o restante do cimento e a água e feita a mistura por mais 3 minutos.

Como não há uma norma referente à moldagem de corpos de prova cilíndricos de concreto permeável, foi seguida a NBR 5738 (ABNT, 2018). Os corpos de prova cilíndricos para o ensaio de compressão possuem dimensões de 10cm de diâmetro e 20cm de altura, seguindo a definição da norma, na qual o diâmetro mínimo deve ser três vezes maior que a dimensão nominal máxima do agregado graúdo do concreto. A quantidade está expressa na Tabela 1, indicando o tipo de ensaio realizado e os devidos traços.

Para o ensaio de permeabilidade, Muller (2017) confeccionou corpos de prova com 15cm de diâmetro e 15cm de altura. Pela disponibilidade de formas e por não interferir no resultado, já que a equação para definir o coeficiente de permeabilidade leva em consideração as medidas de cada ensaio em particular, foram utilizados corpos de prova com 10cm de diâmetro e 10cm de altura.

Tabela 1: Quantidade de corpos de prova por traço e ensaio.

QUANTIDADE POR TIPO DE ENSAIO		
TRAÇO	COMPRESSÃO	PERMEABILIDADE
1 - De referência	6	3
2 - 5% lavado	6	3
3 - 10% lavado	6	3
4 - 15% lavado	6	3
5 - 5% <i>in natura</i>	6	3
6 - 10% <i>in natura</i>	6	3
7 - 15% <i>in natura</i>	6	3
TOTAL	42	21

Fonte: Autor (2020).

Seguindo a NBR 5738 (ABNT, 2015) todos os moldes para os corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão receberam uma camada de desmoldante nas laterais e na base. Em seguida, despejou-se o concreto em camadas intercaladas com golpes, conforme a Tabela 3 da norma, que especifica que para corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 100mm e adensamento manual, sejam colocadas 2 camadas e aplicados 12 golpes em cada.

No entanto, seguindo estudos sobre a influência da energia de compactação na moldagem dos corpos de prova de concreto permeável, Muller (2017) optou em fazer 3 camadas, com 15 golpes em cada camada. Para esta pesquisa, foi seguido o mesmo critério, totalizando 45 golpes com haste metálica. Finalizados os golpes, fez-se o rasamento da superfície com a borda do molde, utilizando uma colher de pedreiro.

Finalizadas as moldagens, os corpos de prova ficaram 24h em uma superfície horizontal e rígida, sem nenhum tipo de vibração e longe de intempéries. Decorrido esse período, foram desmoldados e levados para a câmara úmida, que segue as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2015), para passar pelo processo de cura e aguardar o 28º dia após a sua confecção para serem rompidos (Figuras 2 e 3). É importante ressaltar que essa câmara úmida tem uma temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar superior a 95%.

Figura 2: Corpos de prova moldados para ensaio de compressão numerados de 1 a 4.



Fonte: Autor (2020).

Figura 3: Corpos de prova moldados para ensaio de compressão numerados de 5 a 7.



Fonte: Autor (2020).

Já os 21 corpos de prova ensaiados para determinação do coeficiente de permeabilidade do concreto foram confeccionados com 10cm de diâmetro, a mesma medida do tubo no qual o corpo de prova foi inserido para realizar o ensaio. Também foram feitas 3 camadas com 15 golpes em cada, para manter o adensamento utilizado anteriormente. Após 24 horas, o molde

foi retirado e os corpos de prova passaram seu período de cura na câmara úmida, juntamente com os demais (Figura 4).

Figura 4: Corpos de prova moldados para ensaio de permeabilidade.



Fonte: Autor (2020).

3.6 Ensaio de compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos seguiu a NBR 5739 (ABNT, 2018) que especifica o método de ensaio realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos e Construção Civil do Centro FAG, em uma prensa computadorizada da marca CONTENCO, com capacidade de 100 toneladas. O corpo de prova foi colocado entre os pratos, alinhado ao eixo da máquina para que a força fosse aplicada em seu centro.

A força aplicada deve ser contínua e isenta de choques, a uma velocidade de carregamento especificada pela norma para concreto convencional, a qual é de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s (NBR 5739, ABNT 2018). Pelo fato do concreto permeável ser mais frágil e possuir resistência menor, foi adotada a velocidade utilizada por Muller (2017) que variou de 0,3 MPa/s a 0,8 MPa/s. O carregamento só foi suspenso quando houve queda de força, que indicou a ruptura. A prensa utilizada emitiu um relatório de cada ensaio, contendo a tensão máxima suportada pela amostra, além do gráfico Carga versus Tempo de aplicação de carga. Os resultados foram tabelados em uma planilha do Excel para a geração de um gráfico.

3.7 Ensaio de permeabilidade

Para definir o coeficiente de permeabilidade do concreto permeável, normatizado pela NBR 10786 (ABNT, 2010), seguiu-se o método de ensaio utilizado por Muller (2017). Para realizar o procedimento, os corpos de prova foram moldados com o diâmetro do aparelho utilizado, o qual consiste em um tubo de PVC de 100mm, no qual o corpo de prova é inserido envolto em uma faixa de látex, para que não haja percolação de água pelas laterais e nem alteração nos resultados do ensaio. Na parte inferior, há um tubo de menor diâmetro (25mm) na horizontal com um registro e outro na vertical, voltado para cima (Figura 5). Já o tubo maior serviu de reservatório (100mm).

O intuito foi fazer com que a água percolasse através do corpo de prova inserido no tubo maior. Já com o corpo de prova saturado e conhecendo o nível da água, foi possível cronometrar o tempo que a água do reservatório levou para passar da altura de 290mm para 70mm, sobre o corpo de prova após a abertura do registro.

Figura 5: Aparelho utilizado no ensaio de permeabilidade.



Fonte: Autor (2020).

Conhecendo as medidas do aparelho e o tempo de ensaio aplicou-se a Equação 1 para definir o coeficiente de permeabilidade.

$$K = \frac{A_1 \times l}{A_2 \times t} \times \log \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \quad (1)$$

Onde:

K = coeficiente de permeabilidade (mm/s);

A_1 = área do reservatório (mm²);

A_2 = área do permeômetro (mm²);

l = comprimento do corpo de prova (mm);

t = tempo decorrido para percolação da água (s);

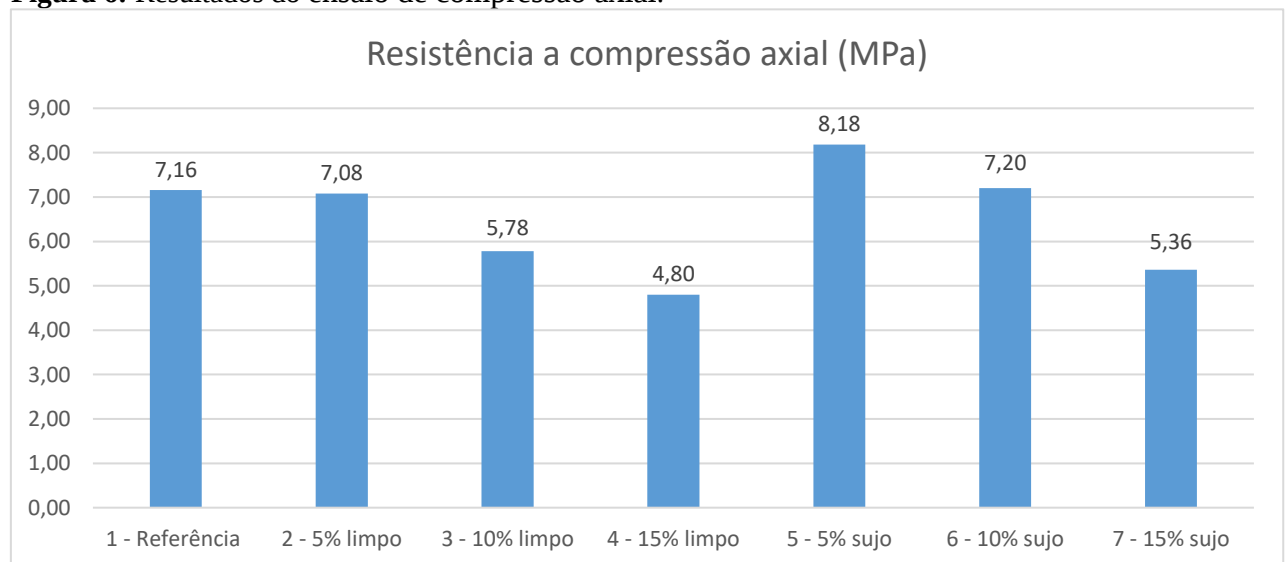
h_1 = altura referencial (mm);

h_2 = altura referencial (mm).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a realização do ensaio de compressão axial, obtiveram-se os resultados conforme Figura 6, com a média da Resistência à Compressão dos 6 corpos de prova *versus* traço.

Figura 6: Resultados do ensaio de compressão axial.



Fonte: Autor (2020).

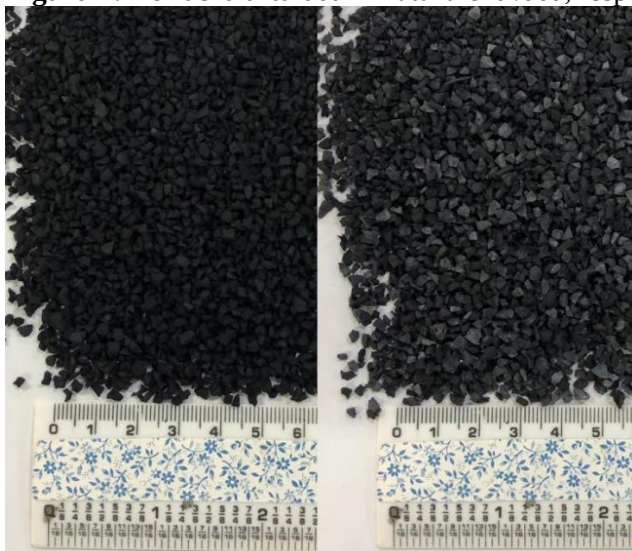
A resistência mínima exigida pela NBR 16416 (ABNT, 2015) para peças de concreto permeável com solicitação de tráfego leve é de 20MPa, reprovando todas as peças. Já comparando o resultado do traço 1-Referência com o traço convencional utilizado por Alcântara e Florêncio (2017) que apresentou uma resistência à compressão de 5,7 MPa, houve um aumento de 1,46MPa, tornando-se um fator positivo.

Observou-se que os resultados de resistência dos traços 5 e 6 que sofreram substituição ficaram superiores à resistência do traço de referência. O esperado seria uma queda na resistência, já que o material incorporado possui característica elástica. Uma das justificativas pode estar relacionada à falha no processo de confecção de ambos os traços e até mesmo na irregularidade da superfície do corpo de prova no momento da aplicação da carga.

Outro fator que pode ter influenciado na perda de resistência foi o método de substituição utilizado, em que foi retirada a porcentagem de brita em massa e incorporou-se a borracha com o mesmo volume retirado de brita, já que as densidades dos materiais são diferentes, o que acarretaria em um volume muito maior de borracha. Entretanto, com esse método, acabou aumentando a proporção de cimento para brita, elevando a resistência.

Além disso, ao comparar visualmente as amostras de borracha, *in natura* e lavada (Figura 7), é possível verificar que a segunda ficou com aspecto esbranquiçado em decorrência do processo ao qual foi submetida, criando uma reação reversa ao esperado e dificultando ainda mais a aderência entre o material e a massa de cimento. Entretanto, a confirmação só pode ocorrer se as amostras forem analisadas microscopicamente.

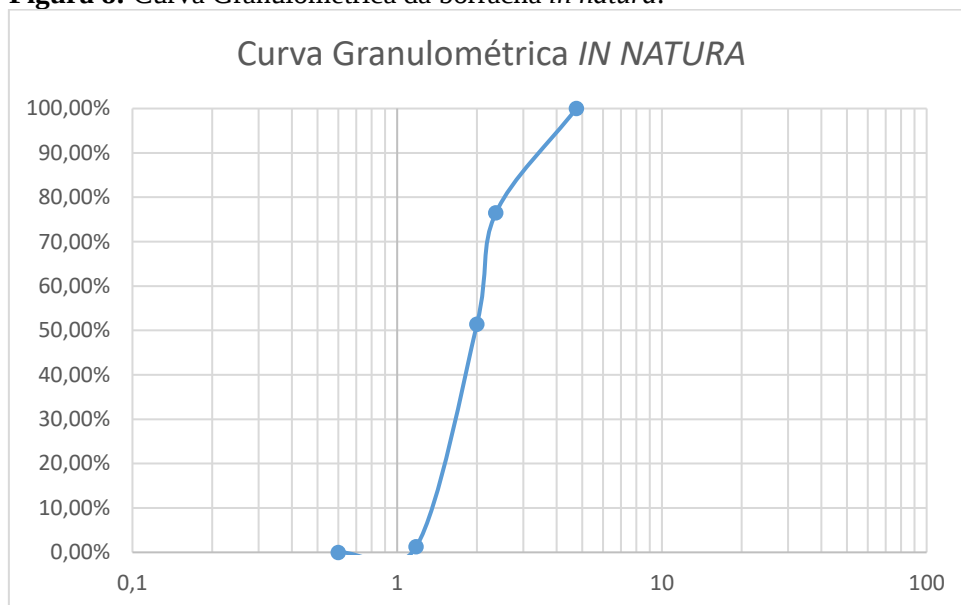
Figura 7: Borracha triturada *in natura* e lavada, respectivamente.



Fonte: Autor (2020).

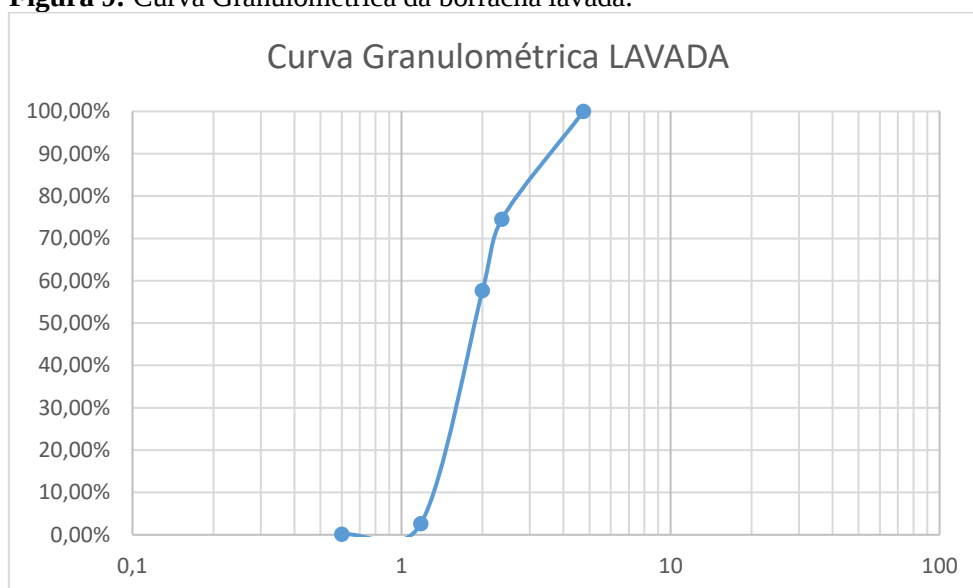
Já as curvas granulométricas de ambas as amostras ficaram muito próximas uma à outra (Figura 8 e 9), o que significa que não ocorreu perda de material fino no processo de lavagem, sendo assim, não configura um fator relevante na comparação das resistências.

Figura 8: Curva Granulométrica da borracha *in natura*.



Fonte: Autor (2020).

Figura 9: Curva Granulométrica da borracha lavada.



Fonte: Autor (2020).

Entretanto, a geração de grânulos de cal que acabaram não sendo separados do material incorporado ao concreto podem ter interferido e foram visualizados apenas no ensaio de granulometria (Figura 10).

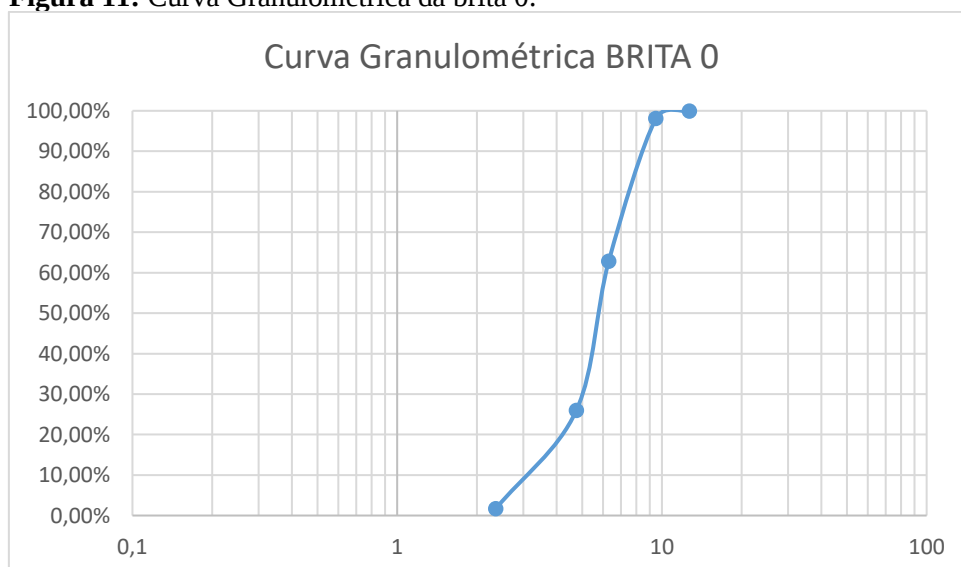
Figura 10: Grânulos de cal restantes.



Fonte: Autor (2020).

Ainda sobre o ensaio de granulometria, porém da brita, 1,7% da massa usada no ensaio correspondeu a pó de pedra que estava misturado ao material utilizado e o não peneiramento pode ter acarretado danos à resistência do concreto. A curva granulométrica do material pode ser verificada na Figura 11.

Figura 11: Curva Granulométrica da brita 0.



Fonte: Autor (2020).

Já a permeabilidade foi definida através dos parâmetros estabelecidos na Figura 12, que foram criados pela *American Concrete Institute* e utilizados por Saldanha, Nunes e Borja (2016). Em seguida, foi preenchida a Tabela 2 para melhor análise dos dados.

Figura 12: Grau de permeabilidade estabelecido pela ACI 522 R-06.

Coeficiente de permeabilidade K (m/s)	Grau de permeabilidade
$\geq 10^{-3}$	Alta
10^{-3} a 10^{-5}	Média
10^{-5} a 10^{-7}	Baixa
10^{-7} a 10^{-9}	Muito baixa
$< 10^{-9}$	Praticamente impermeável

Fonte: Saldanha, Nunes e Borja (2016).

Tabela 2: Resultados do ensaio de permeabilidade.

ENSAIO DE PERMEABILIDADE		
TRAÇO	COEF. DE PERMEABILIDADE (m/s)	GRAU PERMEABILIDADE
1 - De referência	0,00243	Alta
2 - 5% lavado	0,00244	Alta
3 - 10% lavado	0,00243	Alta
4 - 15% lavado	0,00238	Alta
5 - 5% <i>in natura</i>	0,00240	Alta
6 - 10% <i>in natura</i>	0,00238	Alta
7 - 15% <i>in natura</i>	0,00229	Alta

Fonte: Autor (2020).

Conforme os coeficientes calculados com os dados do ensaio e a Equação (1), os valores se mantiveram entre 0,00229 m/s e 0,00244 m/s, decrescendo conforme foram sendo incorporados os percentuais de borracha triturada, os quais acabaram obstruindo a passagem da água. Entretanto, segundo os parâmetros da *American Concrete Institute*, o Grau de Permeabilidade é alto em todos os traços, estando de acordo com o exigido.

Em comparação aos dados obtidos por Idalgo *et. al.* (2018), que analisou a permeabilidade de blocos comercializados, obteve-se resultados médios de 0,0012 m/s a 0,0018m/s, um coeficiente mais baixo do que o encontrado nesta pesquisa, mas também dentro dos parâmetros, o que pode justificar a queda de resistência em virtude do maior número de vazios no concreto.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo da pesquisa foi analisar a possibilidade de se produzir um concreto permeável para fins de pavimentação com tráfego leve que levasse em sua composição 5%, 10% e 15%

de resíduo triturado de pneus inservíveis em substituição do agregado graúdo. Esperava-se chegar a um material com resistência à compressão de 20 MPa, entretanto o objetivo não foi alcançado em nenhum dos traços testados, chegando a uma resistência máxima de 8,18MPa e a mínima de 4,8MPa.

Ensaio laboratoriais exigem um extremo controle de qualidade e atenção na execução de cada passo e na dosagem dos materiais que compõem o concreto. Erros que passam despercebidos podem ser verificados nos resultados, bem como os demais fatores descritos anteriormente que interferiram na resistência, como o método de lavagem com óxido de cálcio que tinha por objetivo aumentar a aderência entre o concreto e a borracha e que interferiu negativamente, dados os resultados inferiores encontrados no ensaio de resistência.

Os demais objetivos buscavam encontrar uma proporção adequada de substituição do agregado graúdo pelo resíduo de pneu, processo que se mostrou ineficaz em virtude da baixa resistência à compressão, bem como o não cumprimento dos parâmetros exigidos pela NBR 16416 (ABNT, 2015).

Outro parâmetro analisado foi o coeficiente de permeabilidade, que alcançou resultados entre 0,00229 m/s e 0,00244 m/s, o que é satisfatório e acima do esperado em comparação a outros trabalhos. Entretanto, um índice muito elevado pode tornar-se prejudicial se comparado à redução da resistência, porém isso só pode ser afirmado com a realização de um estudo específico levando em consideração a relação índice de vazios *versus* resistência.

Mesmo não obtendo os resultados esperados, a pesquisa abre caminho para novos estudos. Por exemplo, verificar mais a fundo a reação química que ocorreu na borracha estando em contato com a cal virgem, já que a cal é usualmente utilizada na construção civil, porém com outras finalidades, incorporada benéficamente em argamassas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 10004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10786:** Concreto endurecido: Determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 16416:** Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.

ALCÂNTARA, I. C. A.; FLORENCIO, M. S. **Análise do traço de concreto permeável quanto a sua resistência à compressão e permeabilidade.** Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Civil Faculdade Capixaba de Nova Venécia. Nova Venécia/ES, p.26, 2017.

ANDRADE, H. S. **Pneus inservíveis: alternativas possíveis de reutilização.** Monografia. Ciências Econômicas UFSC. Florianópolis/SC, p.101, 2007.

Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos – ANIP. **Vendas de pneus fecham janeiro com queda de 2%.** Disponível em: <http://www.anip.org.br/sitenovo/wp-content/uploads/2020/03/infografico_anip_JANEIRO_2020_28022020.pdf> Acesso: 16 março 2020.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves.** Dissertação (Mestrado) Engenharia de transportes Universidade de Passo Fundo. São Paulo/SP, p. 133, 2013.

BERTOLLO, S. M.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. **Benefícios da incorporação de borracha de pneus em pavimentos asfálticos.** Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitária y Ambiental. Cancun – México, 27 a 31 de outubro, 2002.

CIMENTOS ITAMBÉ. **Cimento Portland pozolânico resistente a sulfatos.** Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/produtos/cp-iv-32-rs/>> Acesso em: abril, 2020.

Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução nº 258 de 26 de Agosto de 1999.** Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/_arquivos/36_09102008030342.pdf>. Acesso: 16 março 2020.

Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução nº 264 de 26 de Agosto de 1999.** Disponível em: <<https://www.areaseg.com/conama/1999/264-1999.pdf>>. Acesso: 27 março 2020.

FIORITI, C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus.** Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Porto Alegre/RS. V. 7, n. 4, p. 43-54, 2007.

IDALGO, A. N.; CASTRO, J. A.; ALMEIDA, P. L.; SILVA, Y. C.; SILVA, M. J. M. **Determinação do coeficiente de permeabilidade de elementos drenantes de concreto.** Revista Eletrônica Organizações e Sociedade, Iturama/MG. V. 7, n. 8, p. 4-13, 2018.

KAMIMURA, E. **Potencial de utilização dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil.** Dissertação (Pós-graduação) Engenharia Civil UFSC. Florianópolis/SC, p. 143, 2002.

MONTEIRO, A. C. N. **Concreto poroso: dosagem e desempenho.** Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Civil Universitário Federal de Goiás. Goiânia/GO, p.36, 2010.

MONTEIRO, M. A.; MATTIOLI, L. M. L.; FERREIRA, R. H. **Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Pneumáticos PGIRPN.** Publicado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente – Feam e pela Fundação Israel Pinheiro – FIP. Belo Horizonte/MG, 2ed, 56p, 2011.

MONTEIRO, L. P. C.; MAINIER, F. B. **Queima de pneus inservíveis em fornos de clínquer.** ENGEVISTA, v. 10, n. 1, p. 52-58, junho 2008.

MULLER, L. E. S. **Análise das propriedades do concreto permeável com adição de resíduos de borracha de pneus inservíveis.** Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Civil Centro Universitário Assis Gurgacz. Cascavel/PR, p.63, 2017.

OLIVEIRA, O. J.; CASTRO, R. **Estudo da destinação e da reciclagem de pneus inservíveis no Brasil.** XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Foz do Iguaçu – Brasil, 09 a 11 de outubro, 2007.

SALDANHA, G.S.; NUNES V. S.; BORJA, E.V. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de resíduo de pneu na composição de concreto permeável para pavimentação urbana.** 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Águas de Lindóia – Brasil, 15 a 18 de maio, 2016.

SEGRE, N. C. **Reutilização de borracha de pneus usados como adição em pasta de cimento.** Tese (Doutorado). Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas. Campinas/SP, p. 104, 1999.

SILVA, L. C.; FERNANDES, F. A. S. **Produção de concreto poroso com adição de borracha de pneu reciclado.** 73º Congresso Anual da ABM – Internacional Parte integrante da ABM Week. São Paulo – Brasil, 02 a 04 de outubro, 2018.



VOTORANTIM CIMENTOS. **Obras especiais.** Disponível em:
<https://www.votorantimcimentos.com.br/produtos/cimentos-votoran/obras-especiais-industrial-meios-agressivos/> Acesso em: setembro, 2020.

<