

ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA AREIA POR RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU NO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

ANALYSIS OF THE PARCIAL REPLACEMENT OF SAND BY RUBBER WASTE IN SELF-COMPACTING CONCRETE

Lucas da Silva Barboza ¹

Pâmela Dayane de Oliveira Pereira ²

Resumo: Baseado na crescente e expressiva quantidade de resíduos sólidos gerados pelo atual modelo de desenvolvimento, a busca pela produção de concretos que sigam as diretrizes e os conceitos de sustentabilidade tornou-se um grande desafio para o âmbito da construção civil. Nestas diretrizes estão inseridas a reciclagem e a reutilização, ambas se apresentam como alternativas sustentáveis para reduzir os danos acarretados ao meio ambiente. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi analisar a substituição parcial de 5% da areia natural por resíduos de borracha de pneu para dois tipos de malhas, sendo a mais fina malha 40 e a mais grossa de malha 10. Os corpos de provas foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias e módulo de elasticidade dinâmico nas idades de 28 e 91 dias. Verificou-se então que todos os concretos em ambos estados, fresco e endurecido atenderam aos parâmetros normativos e surgem como uma alternativa um tanto quanto promissora no quesito sustentabilidade.

Palavras-chaves: Resistência. Resíduos de Borracha. Concreto Autoadensável. Sustentabilidade.

Abstract: Based on the growing and expressive amount of solid waste generated by the current development model, the search for the production of concrete that follow the guidelines and concepts of sustainability has become a major challenge for the civil construction sector. These guidelines include recycling and reuse, both of which are sustainable alternatives to reduce the environmental damage. In this context, the objective of this research was to analyze the partial replacement of 5% of natural sand by rubber waste for two types of meshes, being the thinnest 40 mesh and the thickest 10 mesh. The specimens were submitted to compressive strength tests, being applied by diametral compression traction at the ages of 3, 7, 28 and 91 days and dynamic elastic modulus at the ages of 28 and 91 days. It was then verified that all concretes in both fresh and hardened states met the normative parameters and appear as a somewhat promising alternative in terms of sustainability.

Keywords: Resistance. Rubber Waste. Self-compacting Concrete. Sustainability.

1 Introdução

Com a expansão significativa e desordenada de resíduos sólidos gerados pelo atual modelo de desenvolvimento, um dos inúmeros problemas que a sociedade vem enfrentando é a destinação incorreta dos resíduos. Em função da produção em grande escala, a quantidade de resíduos descartados vem aumentando a cada ano, e de acordo com a Associação Nacional da Indústria de Pneumático - ANIP (2015), apenas no ano de 2015 foram confeccionados no Brasil cerca de 68,6 milhões de unidades de pneus. Estes pneus passam pela recauchutagem e remoldagem, e quando não apresentam mais condições de serem reformados, tornam-se inservíveis

Echimenço (2001) afirmou com base na avaliação realizada pela ANIP que de fato, o acúmulo destes resíduos está diretamente vinculado a falta de incentivo à reciclagem e a debilidade das leis que regem o país como um todo e estes acabam por propiciar um desequilíbrio ambiental, visto que estes são descartados na natureza indistintamente. Essa alegação vem-se tornando gradativamente alarmante, acarretando diversos problemas sociais e econômicos.

Neste contexto, mediante a comprovação dos riscos relacionados aos pneus inservíveis, tem-se observado o surgimento de estratégias que buscam atenuar os seus efeitos adversos. Como por exemplo, a resolução 416 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) promulgada no dia 30 de setembro de 2009, que dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental devido aos pneus inservíveis e sua destinação ambiental adequada.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010, também se configura em outra importante ferramenta voltada a mitigar a problemática dos pneus. A partir da publicação desta lei, todos fabricantes, importadores e comerciantes de pneus, e outros materiais, passaram a ser obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos (PESSOA E PESSOA, 2017).

É possível afirmar que os dois instrumentos legais têm, em linhas gerais, contribuído para maior compreensão acerca do tema em questão e proporcionado avanços consideráveis no Brasil. No entanto, em boa parte do país, esse passivo ambiental ainda representa uma série ameaça a qualidade do meio ambiente e à saúde pública.

De acordo com Morosini (2006) a destinação incorreta dos pneus pode gerar diversos problemas. Por exemplo, quando queimados, provocam a emissão de gases tóxicos que acabam por contaminar o ar, o solo e também os cursos d'água; quando abandonados nos rios, córregos e galerias de águas pluviais, bloqueiam a vazão de escoamento, contribuindo assim para possíveis alagamentos, enchentes, inundações e tornam-se locais propícios para a reprodução de mosquitos transmissores de doenças, como a febre amarela e a dengue. Além de demorarem anos para se decompor.

Atualmente, com o surgimento de novas tecnologias e a adequação dos recursos, o âmbito da construção civil prescreve a elaboração e execução de projetos que sigam as diretrizes e os conceitos de sustentabilidade. Nestas diretrizes estão inseridas a reciclagem e a reutilização, ambas se apresentam como alternativas sustentáveis para reduzir os danos acarretados ao meio ambiente, como a escassez de recursos naturais, por exemplo da areia utilizada na construção civil.

Segundo Almeida e Silva (2005) as licenças para exploração da areia natural têm sido suspensas, visto que esta é retirada, principalmente, do leito de cursos d'água, atividade na qual pode levar ao assoreamento e degradação dos cursos d'água e à remoção da vegetação, com isso este material, vem se tornando mais caro e cada vez mais escasso.

Sendo assim, a incorporação de resíduos reciclados em misturas concreto surge como uma possibilidade para mitigar os impactos ambientais.

Por outro lado, a exigência por concretos de resistências elevadas, com melhor desempenho está em crescente busca, devido à preocupação com a qualidade e durabilidade da estrutura, dois pontos cruciais no quesito produção e aplicação. Um fator muito relevante para atingir essa qualidade, é o correto adensamento do concreto, cujo qual necessita de mão de obra especializada. Em contrapartida, a má execução pode acarretar danos futuros à estrutura.

Em paralelo a isso, e ao avanço da tecnologia do concreto, em meados de 1988 no Japão, Okamura então criou o primeiro protótipo de concreto autoadensável com o uso de materiais já existentes no mercado, nomeando-o como “Concreto de alto desempenho”, conhecido atualmente como concreto autoadensável”, no qual dispensava qualquer tipo de adensamento (OKAMURA; OUCHI, 2003).

O Concreto Autoadensável (CAA) por sua vez possui um nível de trabalhabilidade bem superior quando comparado com os concretos convencionais (CC), pois além do seu lançamento ser rápido no momento da concretagem o adensamento mecânico é dispensado, pois pela ação da gravidade e seu peso próprio preenche todos os espaços (EFNARC, 2005; TUTIKIAN, DAL MOLIN, CREMONINI (2005).

Segundo Tutikian (2007), o CAA vem adquirindo ampla aprovação no âmbito da construção civil e é considerado como um grande avanço tecnológico, pois implicam em menores gastos com manutenção, restringe a quantidade de mão de obra e melhora a produtividade.

A análise de materiais empregados na dosagem é também de grande importância para atingir as características necessárias de um concreto autoadensável, por isso tem-se a necessidade de estudar materiais que possam compor o CAA, no intuito de minimizar a escassez e os impactos ambientais.

Diante disso, existem diversas pesquisas cuja finalidade é a possibilidade de inserção e análise da interferência da incorporação de resíduos na composição do CAA. Por esse motivo, buscou-se uma destinação, ou seja, uma alternativa mais refinada a esse material apresentado como inservível: a substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de borracha de pneu no concreto autoadensável.

Uma das pesquisas realizadas por Lintz (2008) mostrou que o concreto autoadensável com borracha tem potencial para ser usado em elementos que exigem alta ductilidade, associando alta fluidez e preservação dos esforços mecânicos, atributos que não são preservados em concretos autoadensáveis convencionais.

De acordo com Yunping Xi *et al.* (2004), o concreto com a incorporação de resíduos de borracha dispõe de propriedades únicas com capacidade para uso em diversas finalidades.

Neste contexto, a presente pesquisa tem por objetivo analisar as influências da substituição de 5% da areia natural por resíduos de borracha nas malhas de 10 e 40 mm, nas propriedades do concreto autoadensável.

2 Materiais e procedimento experimental

Com intuito de alcançar os objetivos especificados na pesquisa, os métodos e os procedimentos para obtenção da dosagem foram baseados no Método de Gomes (2002). A metodologia foi dividida em 3 partes; na escolha e caracterização dos materiais, método de dosagem e, por último, a caracterização do concreto em ambos estados, fresco e endurecido.

Todos os ensaios necessários para seguimento da pesquisa foram executados no Laboratório de Materiais e Estruturas do Centro Universitário Adventista de São Paulo - UNASP-EC.

2.1 Caracterização dos Materiais

Para confecção dos corpos de prova, nesta pesquisa, utilizou-se o cimento CP-II-Z-32 (Cimento Portland Composto de Pozolanas) fabricado pela Votorantim®, pelo fato de ser empregado em vasta escala em obras de modo geral. Este foi caracterizado, atendendo as normas vigentes. A massa específica do cimento foi determinada segundo as prescrições da ABNT NBR 16605:2017, que resultou em 3,10 g/cm³.

A escolha da sílica ativa SILMIX® fabricada pela empresa TECNOSIL, foi utilizada em função dos benefícios gerados pela ação pozolânica na microestrutura do concreto autoadensável, e pelo efeito microfíler da adição, cuja finalidade é atribuir uma maior coesão à mistura do concreto autoadensável. O pó fino pulverizado, segundo seu fabricante, apresenta massa específica de 2,22 g/cm³, teor de SiO₂ > 90% e diâmetro médio de 0,20 µm (TECNOSIL, 2018).

Os ensaios de composição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima característica foram realizados em conformidade com a ABNT NBR NM 248:2003. Para a determinação da massa unitária dos agregados foi utilizada a ABNT NBR NM 45:2006. Já para o ensaio de determinação da massa específica do agregado miúdo foi utilizada a ABNT NBR NM 52:2009 e para o agregado graúdo a ABNT NBR NM 53:2009. Referente a classificação granulométrica do agregado miúdo foram seguidos os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2009.

Como agregado miúdo natural foi utilizada areia média quartzosa oriunda da região de Campinas-SP com dimensão máxima característica de 4,8 mm, módulo de finura de 2,51 e, como seu substituto parcial, utilizou-se resíduos de borracha de pneus resultante do processo de remoldagem e recauchutagem, classificados como sendo borracha grossa (#10), cuja dimensão máxima característica é de 4,8 mm e borracha fina (#40) com dimensão máxima característica de 2,4 mm.

No que se refere ao agregado graúdo foi utilizada pedra britada de origem basáltica com dimensão máxima característica de 9,5 mm, módulo de finura de 4,8 e classificado como brita 0. No que diz respeito aos finos, foi empregado o fíler, que é obtido através da moagem de calcário, que segundo o fabricante apresenta massa específica variando entre 2,55 a 2,75 g/cm³ (BRASILMINAS, 2018).

Também foi utilizado um superplastificante de última geração, o aditivo ADVA™ CAST 525, à base de policarboxilato fabricado pela GRACE e fornecido em consistência líquida, na cor laranja. Segundo informações técnicas fornecidas pelo fabricante, apresenta massa específica de 1,06 kg/m³ e é isento de cloreto (GRACE, 2018).

2.2 Ensaio preliminar de empacotamento

Com o objetivo de alcançar quantidades adequadas de materiais e garantir uma boa composição na mistura do concreto, afim de que se consiga alcançar um material com índice de vazios mais baixo, foi realizado o ensaio de empacotamento que consiste em analisar o comportamento físico e granular dos agregados (partes estas que comporão o concreto) e a real interação entre eles. Para esse procedimento foi utilizado o sistema das misturas sucessivas apresentada por Rebmann (2011). Este processo pode ser composto, a contar de duas ou mais formações, de forma que as áreas entre as partículas maiores se tornem ocupadas por partículas menores.

Delimitados pela quantidade de material adquirido e também por resultados de trabalhos acadêmicos feitos anteriormente, foi adotado um traço com 5% de substituição da areia natural por resíduos de borracha. Arelados a tal metodologia tornou-se possível analisar a proporção

ótima entre os agregados graúdo e miúdo, tanto em termos de massa unitária, quanto pelo índice de vazios.

2.3 Dosagem do concreto

A técnica de dosagem utilizada seguiu as indicações de Gomes (2002), para concretos autoadensáveis de alta resistência. Diante das técnicas divulgadas, julgou-se ser esta a mais adequada, já que a mesma visa melhorias no comportamento do concreto no estado endurecido, que é o objetivo deste estudo (Tabela 1).

Para a análise foi elaborado um concreto de referência constituído por cimento, fíler, água, agregado miúdo e graúdo, superplastificante e sílica ativa e dois concretos com substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de borracha de granulometrias diferentes, ou seja, para dois tipos de malhas, sendo elas malha 40, e malha 10, ambas com substituição parcial de 5% em relação ao agregado miúdo, com base na quantidade delimitada de material e também com referência ao trabalho acadêmico de (ANGELIN; LINTZ; BARBOSA, 2018) que realizou a substituição com agregados leves e recicláveis no concreto autoadensável. É válido ressaltar que não foi adotado um percentual maior para substituição, mediante a alegação feita por Shen, Shan, Zhang (2013), na qual, consiste em dizer que a borracha apresenta um baixo módulo de elasticidade e isso colabora para a existência de alguns pontos fracos no concreto.

2.4 Concreto no estado fresco

No processo de mistura, para melhorar a homogeneidade do concreto, foi necessário adicionar mais 0,5% de aditivo superplastificante nas dosagens.

Após o término da mistura e atingida a trabalhabilidade esperada, foram realizados os ensaios de estado fresco: Caixa L, Funil V, *Slump-Flow test* e Anel J, mediante as prescrições da ABNT NBR 15823:2017.

2.5 Concreto no estado endurecido

Para caracterização da propriedade do concreto no estado endurecido foram moldadas 72 amostras, ao todo, para as três dosagens desenvolvidas, sendo 36 corpos de prova para caracterização da resistência à compressão axial e 36 corpos de prova para determinação da resistência à tração por compressão diametral nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias, segundo a ABNT NBR 5739:2018 e ABNT NBR 7222:2011, respectivamente.

Os procedimentos para moldagem e cura dos corpos de prova seguiram as prescrições da ABNT NBR 5738:2015.

Ressalta-se que para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, utilizou-se as mesmas amostras do ensaio de resistência à compressão para as idades de 28 e 91 dias, uma vez que o processo de análise do módulo elasticidade dinâmico do concreto caracterizasse como um ensaio não destrutivo.

Para a execução dos ensaios utilizou-se uma prensa servo-hidráulica universal de Classe I, com potencial para 1000 kN.

2.5.1 Resistência à compressão axial

Para o ensaio de resistência à compressão foram utilizados corpos de prova cilíndricos,

com 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, de acordo com a ABNT NBR 5739:2018 e velocidade ininterrupta de carregamento da prensa hidráulica equivalente a 0,5 MPa/s.

O ensaio de resistência à compressão ilustra-se na Figura 1.



Figura 1. Ensaio de resistência à compressão do corpo de prova

Fonte: Autores, 2020.

2.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

Para este ensaio seguiu-se as recomendações da ABNT NBR 7222:2011 (Figura 2) e velocidade ininterrupta de carregamento equivalente a 0,05 MPa/s.

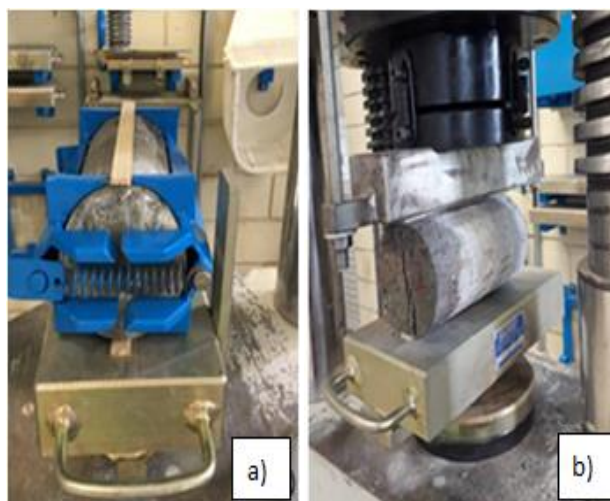


Figura 2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral – a) Estrutura de apoio para o corpo de prova e b) Ensaio de tração por compressão diametral

Fonte: Autores, 2020.

2.5.3 Módulo de elasticidade dinâmico

Sob recomendações das diretrizes, para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico foram realizados ensaios nas idades de 28 e 91 dias. Este ensaio permite a partir do

som emitido ocasionado pelo impacto de uma haste mecânica a determinação dos módulos elásticos. Neste processo o corpo de prova tende a ser posicionado em uma base conforme ilustrado na Figura 3, já a resposta acústica é obtida através de um Software nomeado como Sonelastic®.



Figura 3. Equipamento para a realização do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico
Fonte: Autores, 2020.

3 Resultados e discussões

É importante destacar que o foco desta pesquisa é a produção do CAA com substituição parcial da areia natural por resíduos de borracha de pneu, em que o concreto de referência proposto assume um caráter unicamente comparativo. Desta maneira, os resultados focam principalmente no comportamento dos traços de substituição.

3.1 Ensaio preliminar de empacotamento granular

Conforme mencionado anteriormente, foi adotado um valor de 5% de RBP para substituição da areia. Mediante ao exposto o resultado do ensaio de empacotamento entre a areia média e brita 0 seguem apresentados na Figura 4.

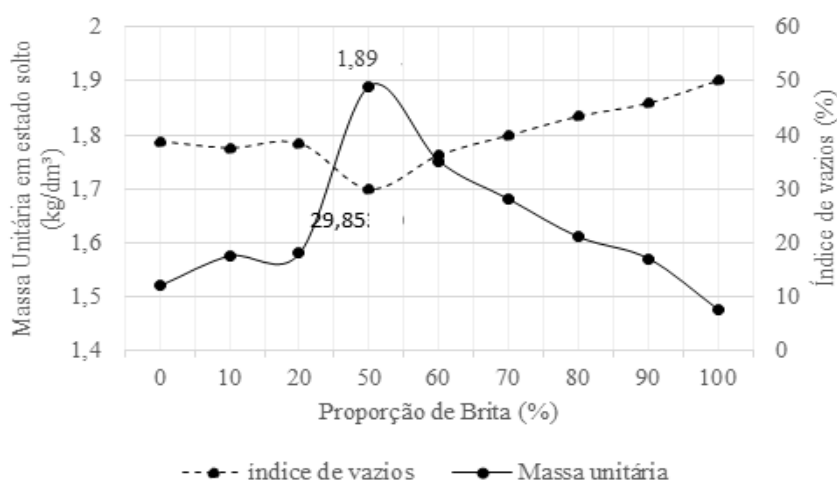


Figura 4. Empacotamento granular entre agregado graúdo e miúdo
Fonte: Autores, 2020.

Nota-se que na composição do esqueleto granular a melhor proporção entre materiais

corresponde a 50% de areia e 50% de brita, onde resulta em um índice de vazios igual a 29,85% e massa unitária igual a 1,89 Kg/dm³.

3.2 Dosagem do concreto

Segundo as relações de proporção citadas e definidas anteriormente e por meio das equações estabelecidas por Gomes (2002), obteve-se a dosagem tanto para a malha 10, quanto para a malha 40 do para o CAA em estudo. Os dados apresentam-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Consumo de materiais para os concretos autoadensáveis confeccionados (kg/m³)

Material	CAA _{#10} e CAA _{#40} (5%)	CAA _{RF}
Cimento	434,06	434,06
Agregado Miúdo	616,27	648,70
Agregado Graúdo	973,06	973,06
Sílica Ativa	43,41	43,41
Fíler Calcário	173,62	173,62
Superplastificante	8,68	8,68
Água	173,62	173,62
Resíduo	32,43	-
Água/Cimento	0,40	0,40
Sílica Ativa/Cimento	0,10	0,10
Fíler Calcário/Cimento	0,40	0,40
SP/Cimento	2%	2%

Fonte: Autores, 2020.

3.3 Concreto no estado fresco

Os resultados do CAA com as devidas substituições no estado fresco são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização dos concretos autoadensáveis no estado fresco

Propriedades	Limites NBR 5823:2017	CAA _{#10} (5%)	CAA _{#40} (5%)	CAA _{RF}
Slump-flow test, df (mm)	$660 \leq d_f \leq 750$	740	690	680
T500(s)	$> 2 \text{ s}$	5''53	6''97	5''56
Caixa L, h2/h1	$\geq 0,80$	0,975	1,03	0,96
Caixa L, t ₂₀ (s)	---	1''98	2''84	1''37
Caixa L, t ₄₀ (s)	---	4''8	5''31	3''44
Funil V, t _v (s)	$9 \leq t_v \leq 25 \text{ s}$	12''07	10''24	9''95

Fonte: Autores, 2020.

Diante dos resultados obtidos verifica-se que os concretos ensaiados se enquadram nos limites prescritos pela ABNT NBR 15823:2017. Mediante Figura 5 é possível visualizar que

todos os concretos ensaiados apresentaram boa fluidez, bom aspecto e nenhuma evidência de segregação, podendo ser utilizados para a maioria das aplicações correntes, tais como paredes, vigas, pilares etc.

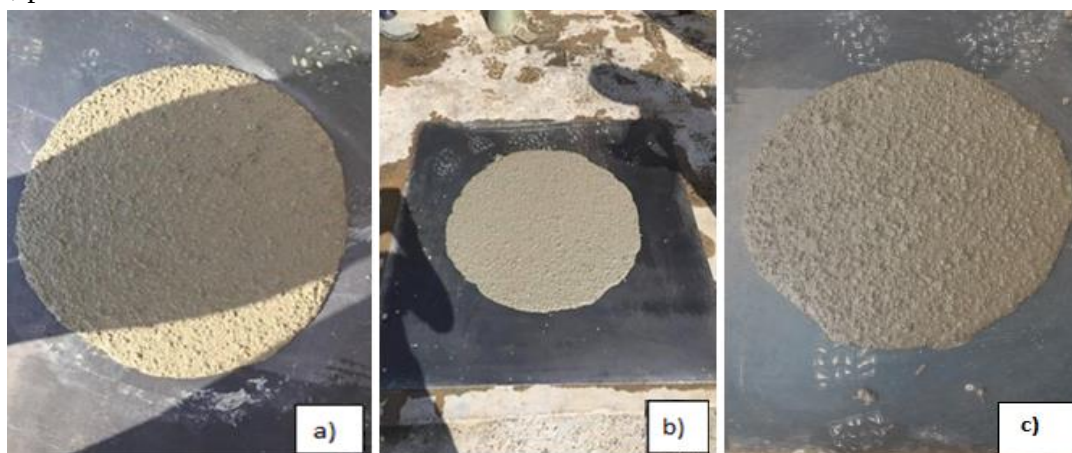


Figura 5. *Slump-flow test* do CAA – a) Concreto com substituição de 5% da malha 10, b) Concreto com substituição de 5% da malha 40 e c) Concreto de referência

Fonte: Autores, 2020.

Pode-se visualizar também que o CAA_{#10} apresentou maior fluidez do que o CAA_{#40} e CAA_{RF}, isso porque, o resíduo de borracha de pneu amplia a tensão de escoamento no concreto, em decorrência da superfície áspera e antiaderente da borracha, que contribui para uma redução do espalhamento das misturas.

Quanto aos resultados relacionados ao funil “V”, por apresentarem tempo de escoamento superior a 9 segundos sugere-se que estes sejam aplicados em vigas, pilares e outras aplicações correntes. Observou-se também que o CAARF apresentou um tempo de escoamento no funil “V” menor em relação aos outros demais, isto devido a adição da borracha nos concretos.

3.4 Concreto no estado endurecido

3.4.1 Resistência à compressão axial

Avaliou-se a resistência à compressão dos CAA de substituição produzidos em comparação ao CAA de referência. Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 3 e na Figura 6.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão em cada idade (MPa)

Ensaio	CAA _{#10} (5%)				CAA _{#40} (5%)				CAA _{RF}			
Idade	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
Média (MPa)	30,18	43,10	62,10	65,00	33,70	40,63	65,62	67,90	41,39	46,47	75,14	83,60
D.P* (MPa)	3,18	2,21	1,60	1,57	1,70	2,96	0,97	0,972	1,65	1,28	0,57	0,58
CV%*	10,54	5,13	2,58	2,40	5,06	7,274	1,48	1,48	3,98	2,75	0,76	0,69

D.P: Desvio padrão e CV: Coeficiente de variação*

Fonte: Autores, 2020.

Todos os concretos apresentaram valores maiores que o mínimo de 20 MPa, uns dos requisitos mínimos para função estrutural.

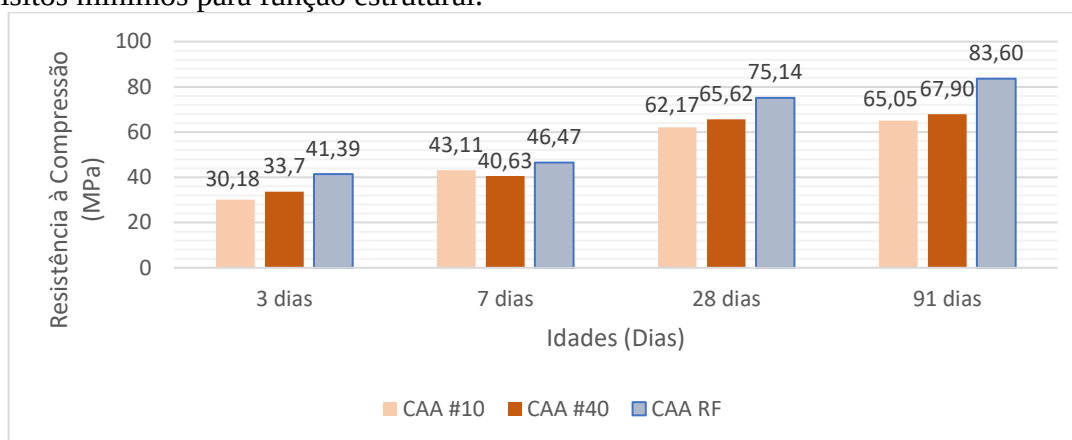


Figura 6. Comparativo de resistência à compressão dos concretos em análise

Fonte: Autores, 2020.

Em todos os concretos se verifica que a resistência aumentou conforme a maturação das idades, fato singularmente atribuído ao emprego da sílica ativa que auxilia na conservação das resistências mecânicas das amostras cimentícias.

Pode-se verificar, ao comparar os concretos com resíduos de pneu (CAA_{#10} e CAA_{#40}) que o tipo de malha não foi um fator determinante na resistência à compressão para os materiais utilizados e dosagens estabelecidas.

Entretanto, pode-se notar que em relação ao CAA_{RF}, o CAA_{#10} e CAA_{#40} apresentaram uma notória redução dos valores relativos à resistência à compressão, fato atribuído, principalmente, ao baixo módulo de elasticidade da borracha. Além disso, esse fenômeno pode ser relacionado a incapacidade do resíduo de borracha em se distribuir uniformemente na mistura, devido a sua granulometria. Najim e Hall (2002), afirmaram que a resistência à compressão do concreto com incorporação de resíduo de borracha sofre redução em razão da baixa ligação existente entre o resíduo e a pasta de cimento.

Segre e Joeques (2000) ainda complementam que a perda de resistência verificada, pode ser atribuída ao módulo de deformação elástica e à má aderência entre a pasta de cimento e a borracha. Para Giacobbe *et al.* (2008), a redução da resistência à compressão dos concretos produzidos com resíduo de pneu, está ligada à ação da borracha não absorver todo o carregamento em relação aos outros componentes, agindo como um grande vazio na massa dos concretos e admitir maior deformação lateral, induzindo à ruptura.

Para Segantini (2014) a incorporação do resíduo de borracha de pneu no concreto gera um aumento no índice de vazios, causando perda em suas propriedades mecânicas.

Todavia, os resultados encontram-se acima do mínimo exigido pela ABNT NBR 8953:2015 para concretos com fins estruturais.

3.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

Estão contidos na Tabela 4 e Figura 7 os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral dos concretos autoadensáveis produzidos em comparação ao concreto de referência.

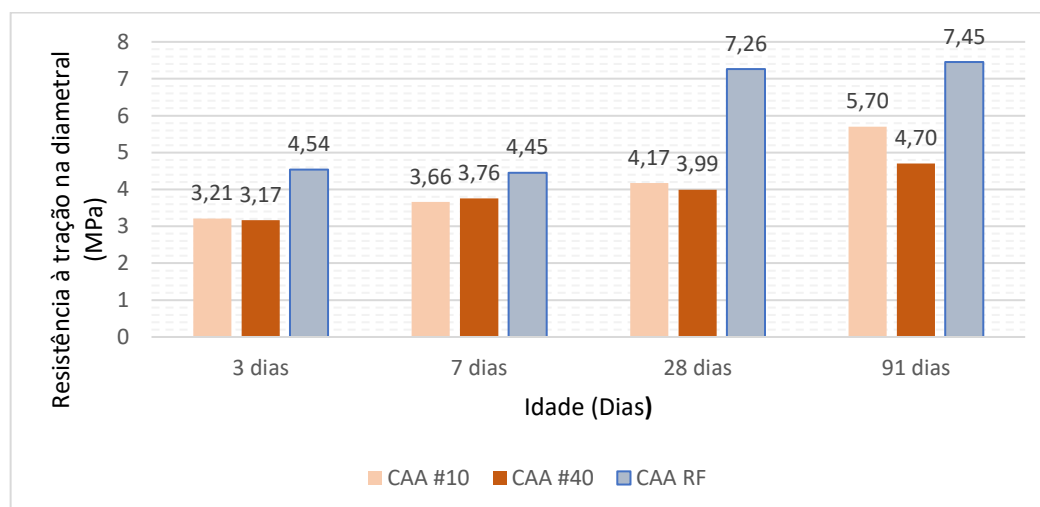
Tabela 4 – Resultados dos ensaios de resistência à tração compressão diametral

Ensaio	CAA _{#10} (5%)				CAA _{#40} (5%)				CAA _{RF}			
Idade	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
Média (MPa)	3,21	3,66	4,17	5,7	3,17	3,76	3,99	4,70	4,54	4,45	7,26	7,45
D.P* (MPa)	0,23	0,12	0,20	0,18	0,355	0,531	0,27	0,23	0,10	0,10	0,20	0,00
CV%*	7,45	3,33	4,91	3,315	11,184	14,106	6,867	5,042	3,22	2,01	2,86	0,33

D.P: Desvio padrão e CV: Coeficiente de variação*

Assim como observado no ensaio de resistência à compressão, os valores obtidos para a resistência à tração por compressão diametral dos concretos com incorporação de resíduo de pneu apresentaram uma queda em relação ao CAARF. Para o CAA_{#40} de aproximadamente 39,91% e do CAA_{RF} para o CAA_{#10} de 23,48%, respectivamente.

Para Yung, Yung, Hua (2013) e Lagarinhos e Tenório (2008) resíduos de pneus com granulometrias menores, tendem a proporcionar propriedades mecânicas superiores em comparação às granulometrias maiores, decorrentes à melhor distribuição dos agregados e preenchimento dos poros do concreto.

**Figura 7.** Comparativo de resistência à tração por compressão diametral

Com base nos resultados é evidente que o CAA_{#10} apresentou um melhor ganho de resistência conforme a maturação das idades, fato este que pode ser associado ao tamanho dos resíduos de borracha, uma vez que, o CAA_{#40} atribui-se de granulometrias maiores que o CAA_{#10}.

3.4.3 Módulo de elasticidade dinâmico

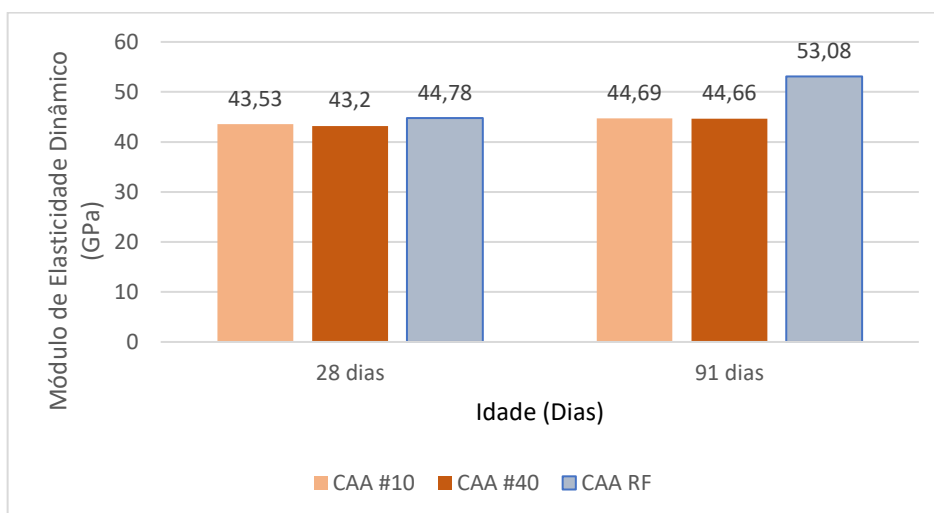
Os resultados do módulo de elasticidade dinâmico são expressos na Tabela 5 e Figura 8.

Tabela 5 – Resultados do módulo de elasticidade dinâmico

Ensaio	CAA _{#10} (5%)		CAA _{#40} (5%)		CAA _{RF}	
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
Média (GPa)	43,53	44,69	43,20	44,66	44,78	53,08
D.P* (GPa)	0,75	0,17	0,78	0,28	0,39	0,24
CV*%	1,72	0,38	1,805	0,62	0,87	0,46

D.P: Desvio padrão e CV: Coeficiente de variação*

De modo geral verifica-se que os resultados dos concretos com substituição obtidos foram relativamente próximos ao concreto de referência para a idade de 28 dias, entretanto, na idade de 91 dias, nota-se que há uma discrepância significativa de mais ou menos 8,41% com relação ao CAA_{RF}, fato este, que pode ser explicado em decorrência da quantidade de finos adicionados à mistura, ou seja, quanto maior quantidade de finos e adições, espera-se valores relativamente menores para o módulo de elasticidade.

**Figura 8.** Comparativo de módulo de elasticidade dinâmico entre os concretos

De acordo com Najime e Hall (2012) o módulo de elasticidade do concreto pode sofrer reduções com o aumento do teor de borracha e pelo tamanho da borracha. Pode-se atribuir este comportamento ao baixo módulo de elasticidade da borracha.

4 Conclusão

O objetivo desta pesquisa foi o desenvolvimento de um concreto autoadensável (CAA) que apresentasse as características e propriedades correspondentes a esse tipo de concreto sob substituição do agregado miúdo pela RBP com análise comparativa por um traço comum de CAA.

As substituições foram feitas com RBP de granulometrias diferentes, ambas com substituição parcial de 5% conforme referência do trabalho acadêmico de (ANGELIN; LINTZ; BARBOSA, 2018). É importante destacar que na pesquisa de referência foi empregado outros agregados e não apenas o RBP.

Foi seguida a dosagem proposta por Gomes (2002), que se mostrou adequada para a

composição do material.

Já as características no estado fresco seguiram o indicado pela ABNT NBR 15823:2017, para concreto autoadensável. E no que se refere ao estado endurecido, os resultados encontrados para o ensaio de resistência à compressão foram menores do que os do concreto de referência, assim como no ensaio de tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico. Contudo, os resultados encontram-se satisfatoriamente dentro dos padrões estabelecidos para CAA.

Do ponto de vista tecnológico, dos resultados obtidos entre os concretos de substituição em comparação ao concreto de referência mostrou que a adição de borracha provocou considerável redução na resistência mecânica do concreto.

Portanto, para se concluir sobre a viabilidade da utilização deste material são necessárias outras análises tais como: vida útil do material, capacidade de resistência à agentes agressivos e de proteção das armaduras e assim por diante.

Entretanto, com os resultados obtidos, nota-se que a incorporação do resíduo de borracha de pneu contribui para a diminuição deste material em locais inadequados e para a preservação de recursos naturais não-renováveis. Este resíduo por sua vez, torna-se promissor, tanto em conceito tecnológico sustentável como em conceitos de resistência.

Referências

ALMEIDA, S.L.M.M.; SILVA, V.S. Areia artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados. **In:** SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005.

ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C. Cecche; BARBOSA, L. A. G. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete modified with lightweight and recycled aggregates. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 11, n. 1, p.76-94, fev. 2018.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS - **ANIP**. Reciclanip apresenta balanço do primeiro trimestre de 2015. São Paulo: ANIP, 2015. Disponível em: < <http://www.anip.com.br> >. Acesso em: 13 nov. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605:2017**: Cimento portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro: 2001.

_____. **NBR 15823**: Concreto autoadensável. Rio de Janeiro: 2017.

_____. **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 7211**: Agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro: 2009.

_____. **NBR 7222**: Argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: 2011.

_____. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais – classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro: 2015.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: 2003.

_____. **NBR NM 45:** Agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: 2006.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: 2009.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: 2009.

BRASIL MINAS (2018). Pó de Calcário (Ficha técnica do produto). Disponível em: <http://www.brasilminas.net/produtos_item.php?id=calc%C3%A1rio>. Acesso em: 15 out.2018.

BRASIL. Resolução CONAMA N° 416, de 30 de setembro de 2008. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. DOU nº188 de 2009.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 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 República Federativa do Brasil], Brasília, n. 147, p. 3, 03 de agosto de 2010. Seção 1.

ECHIMENCO, L. Pneus usados rendem lucros. Jornal O Estado de São Paulo de 17 de abr. 2001.

EFNARC, European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. Specification and guidelines of self-compacting concrete. EFNARC, 2005.

GIACOBBE, S. Estudo do comportamento físico-mecânico do concreto de cimento Portland com adição de borracha de pneus. 106p. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

GOMES, P. C. C. Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete. Barcelona, 2002. 150f. Tese (Doutorado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.

GRACE (2018). Aditivos para concreto. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/grace/adva_cast525.pdf>. Acesso em: 24 out.2018.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S.; Tecnologias Utilizadas para a Reutilização, Reciclagem e Valorização Energética de Pneus no Brasil. **Ciência e Tecnologia**, v. 18, n° 2, p. 106-118, 2008.

LINTZ, R. C. C. Estudo da incorporação de resíduos de borracha inservíveis em concretos utilizados para a fabricação de pisos intertravados. **In:** 60ª Reunião Anual da SBPC, 2008, CAMPINAS. 2008.

MORISINI, F. A guerra dos pneus. **In:** Seminário de inauguração da casoteca latinoamericana de direito e política pública. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 2006. Cap. 1. p. 66-90.

NAJIM, K. B.; HALL, M. R. Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 521-530, 2012.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-Compacting Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**. Vol 1, N° 1, April, 2003. P 5-15.

PESSOA, J. O., PESSOA, J. O. Avaliação do sistema de logística reversa de pneus inservíveis no sul do Amazonas. **Revista Foco**, v. 10, n. 1, p. 221-237, 2017.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. São Carlos, 2011. 213f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SEGANTINI, R. B. **Análise de blocos de concreto com resíduo de borracha de pneu e metacaulim**. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho Ilha Solteira, 2014.

SEGRE, N., JOEKES, I. Use of tire rubber particles as addition to cement paste, **Cement Concrete Res.**, 30 (9), 1421-1425, 2000.

SHEN, W., SHAN, L., ZHANG, T. “Investigation on polymer – rubber aggregate modified porous concrete”, **Construction and Building Materials**, v.38, p. 667-674, 2013.

TECNOSIL (2018). Sílica Ativa (Ficha técnica do produto). Disponível em: <<http://www.tecnosilbr.com.br/produtos-aditivos-saco-soluvel-concreto/>>. Acesso em: 24 outubro.2018.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos autoadensáveis**. Dissertação de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007

TUTIKIAN, B. F. DAL MOLIN, D. CREMONINI, R. **Viabilização econômica do concreto autoadensável**. 12º Concurso Falcão Bauer. 2005

YUNG, W. H.; YUNG, L. C.; HUA, L. H. A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 665–672, 2013.

YUNPING XI, YUE Li, ZHAOHUI Xi; JAE S. Lee, Utilization of solid wastes (waste glass and rubber particles) as aggregates in concrete. **In:** International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, p. 45-54, (2004).