

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DANILO DA SILVA VENDRAMINI

**COMPORTAMENTO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO
CONCRETO SUBSTITUINDO PARCIALMENTE O AGREGADO
MIÚDO POR BORRACHA PROVENIENTE DE PNEUS INSERVÍVEIS**

CAMPO MOURÃO

2019

DANILO DA SILVA VENDRAMINI

**COMPORTAMENTO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO
CONCRETO SUBSTITUINDO PARCIALMENTE O AGREGADO
MIÚDO POR BORRACHA PROVENIENTE DE PNEUS INSERVÍVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof^ª. Dra. Paula Cristina de Souza

Co-orientador: Prof. Me. Paulo Henrique Rodrigues

CAMPO MOURÃO

2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

**COMPORTAMENTO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO SUBSTITUINDO
PARCIALMENTE O AGREGADO MIÚDO POR BORRACHA PROVENIENTE DE PNEUS
INSERVÍVEIS**

por

Danilo da Silva Vendramini

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 8:20h do dia 04 de junho de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof^ª. Me. Ana Raiza Ciscoto Yoshioka
(UTFPR)

Prof. Dr. Leandro Waidemam
(UTFPR)

Prof^ª. Dr^ª. Paula Cristina de Souza
(UTFPR)
Orientadora

Prof. Me. Paulo Henrique Rodrigues
(Faculdade Integrado)
Co-orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenadora do Curso de Engenharia Civil: **Prof^ª. Dr^ª. Paula Cristina de Souza**

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pelo apoio incondicional que me foi dado durante todo meu período de formação e ao longo de toda minha vida, a eles é dedicado este trabalho.

Minha gratidão a Professora Dra. Paula Cristina de Souza por aceitar fazer parte desse desafio, me guiando com um carinho e atenção que estarão sempre comigo.

Ao professor Me. Paulo Henrique Rodrigues um agradecimento especial, obrigado por fazer parte desta caminhada e pelo seu apoio incondicional sem o qual este trabalho não seria possível.

Aos meus amigos, deixo-lhes meu mais sincero obrigado por se fazerem dispostos a ajudar sempre que possível.

A equipe de técnicos do laboratório da UTFPR cujas as contribuições ajudaram na conclusão desse trabalho.

RESUMO

As comodidades provenientes do desenvolvimento urbano vêm acompanhadas de consequências, que uma vez negligenciadas geram impactos negativos notáveis. Os pneus de borracha são provenientes da evolução tecnológica e cada dia sua demanda é cada vez maior, porém a destinação deste material depois de se tornar inservível é um problema. O pneu inservível é um resíduo sólido com grande volume e de difícil armazenamento, devido a isso são necessárias novas alternativas para a sua destinação. Com o propósito de contribuir com uma alternativa sustentável, este estudo analisa o impacto nas propriedades mecânicas do concreto da substituição parcial do agregado miúdo tradicional por borracha proveniente de pneus inservíveis nas parcelas de 5%, 7,5% e 10%. A principal característica analisada é o módulo de elasticidade, entendendo-se que a borracha colabora com este parâmetro. Paralelamente, são feitas observações sobre a massa do corpo de prova e a trabalhabilidade do concreto quando submetidos as parcelas de substituição, sempre se comparando com um traço de concreto referência sem adição de borracha. Os resultados obtidos foram relevantes, tendo em vista que foi possível quantificar o impacto da borracha no concreto e os dados obtidos foram condizentes com a literatura já existente. O módulo de elasticidade junto com a massa média dos corpos de prova apresentaram reduções esperadas e o ensaio de abatimento foi afetado drasticamente com a substituição.

Palavras-chave: Concreto. Borracha. Construção Civil.

ABSTRACT

The benefits of urban development are succeeded by consequences, once overlooked bring notable negative impacts. Rubber tires come from technology evolution and every day their demand is increasing, but the destination of this material after become useless is a problem. The waste tire is a solid waste with large volume and difficult to stock, due to this new alternatives are necessary for its destination. In order to contribute with a sustainable alternative, this study analyzes the impact on mechanical proprieties of concrete with partial substitution of the traditional fine aggregate for rubber from waste tires in portions of 5%, 7.5% and 10%. The main characteristic analyzed is the modulus of elasticity, it was understood that the rubber collaborates with this parameter. At the same time, observations are made on the mass of the specimen and the workability of the concrete when subjected to the replacement portions, always being compared with a trace of reference concrete, without addition of rubber. The results obtained were relevant, it was possible to quantify the impact of the rubber on the concrete and the data obtained were consistent with the existing literature. The modulus of elasticity along with the mean mass of the specimens showed expected reductions and the slump test was affected drastically with the substitution.

Keywords: Concrete. Rubber. Civil Construction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Efeito da substituição no módulo de elasticidade	16
Figura 2 – Efeito da substituição na massa do corpo de prova.....	17

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais utilizados.....	14
Tabela 2 - Traços analisados.....	14
Tabela 3 - Resultado dos ensaios.....	15

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
$f_{c,ef}$	Resistência à compressão efetiva do concreto
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	3
2 OBJETIVOS	5
2.1 Objetivo Geral	5
2.2 Objetivos Específicos	5
3 JUSTIFICATIVA	6
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
4.1 Concreto	7
4.2 Borracha	7
4.3 Módulo de elasticidade	8
4.4 Resistencia a compressão	8
4.5 Concreto borracha	9
5 METODOLOGIA DE PESQUISA	10
5.1 Planejamento inicial	10
5.2 Caracterização de materiais	11
5.2.1 AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL	11
5.2.2 AGREGADO GRAÚDO	11
5.2.3 BORRACHA.....	11
5.3 Estudo de dosagem	11
5.3.1 DOSAGEM REFERENCIA	12
5.3.2 DOSAGEM MODIFICADA.....	12
5.4 Procedimento experimental	12
5.4.1 ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (<i>SLUMP TEST</i>).....	12
5.4.2 MODELAGEM DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO	12
5.4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	13
5.4.4 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE	13
5.4.5 PESAGEM DOS CORPOS DE PROVA	13
6 RESULTADOS	14
7 CONCLUSÃO	18
8 REFERÊNCIAS	20

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos contribuem para problemas sanitários quando não são acondicionados, coletados, transportados, tratados e dispostos adequadamente (LIMA, 2001).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a ABNT NBR 10.004:2004 que define resíduos nos estados sólidos ou semissólidos. Dentro dessa definição, encontram-se os pneus, cuja a vida útil para uso em automóveis se esgotaram e são descartados. Esses resíduos são classificados pela norma supracitada como classe-II-B, resíduo inerte por não ser solúvel em água.

No entanto, mesmo se tratando de um material inerte, o pneu precisa de uma destinação final especial devido ao impacto causado pelo seu volume, ocupando espaços nos aterros, dificultando a acomodação e a compactação dos demais resíduos sólidos (BARROS, 2012).

No Brasil, os procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo, em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada é regulamentada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Na resolução nº 416 de 2009 do CONAMA, o governo federal proíbe a importação de pneumáticos usados, e determina que fabricantes e importadores recolham e deem um fim ambientalmente adequado aos pneus que comercializam no país. Fica claro na resolução que os pneus usados devem ser preferencialmente reutilizados, reformados e reciclados antes da sua destinação final adequada (BRASIL, 2009).

Segundo dados da Reciclanip (2018) em 2017 foram recolhidas e corretamente destinadas cerca de 458 mil toneladas de pneus inservíveis. Enquanto isso no relatório de pneumáticos do IBAMA (2018) diz se ter comercializado cerca de 840 mil toneladas de novas unidades de pneumáticos em 2017. São números bem discrepantes, desta forma é possível perceber que muitos pneus ainda são descartados de maneira inadequada no país.

Para o reuso do material borracha na construção civil é preciso definir como ele se comporta em meio aos outros componentes. Sendo assim, o módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young, é um parâmetro importante que proporciona a medida de rigidez do material e está associado às propriedades mecânicas. É uma das mais relevantes propriedades do concreto para a análise dos

impactos de manutenção e desempenho das estruturas de concreto. Está ligado também às características dos agregados e a seu método de determinação (ALMEIDA, 2012).

Este trabalho avalia o desempenho quanto ao módulo de elasticidade do concreto com material reciclável quando tem seu agregado miúdo parcialmente substituído por borracha, sem tratamento prévio, em frações pré-definidas. Os ensaios foram realizados e comparados com resultados obtidos em estudos similares como os apresentados por Granzotto (2010) e Silveira *et al* (2016).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento do concreto com a substituição parcial do agregado miúdo por borracha triturada, obtida através da trituração de pneumáticos inservíveis.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização física dos insumos a serem usados na mistura do concreto, sendo eles: areia, brita e borracha;
- Dimensionar traço de concreto com f_{ck} de 20 MPa pelo método da ABCP, sem substituição de agregado miúdo;
- Dimensionar traço de concreto com substituição de agregado miúdo em massa nas quantidades de 5%, 7,5% e 10%;
- Avaliar os traços através do ensaio de abatimento do tronco de cone;
- Avaliar o impacto da substituição na massa dos corpos de prova;
- Avaliar os traços obtidos através do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias;
- Comparar os dados obtidos para os traços dimensionados.

3 JUSTIFICATIVA

Muitos são os problemas relacionados ao descarte indevido de pneus inservíveis, afinal, eles ficam sujeitos a ação do tempo e da natureza. Os depósitos irregulares desse material acabam se tornando criadouros de mosquitos transmissores de doenças, assim como: *Aedes aegypti*, transmissor da dengue e da febre amarela e, *Anopholes*, transmissor da malária (LAGARINHOS, 2011).

Segundo Jorge *et al* (2004), ao longo do tempo vêm sendo desenvolvidas formas de minimizar os impactos ambientais criados pela disposição inadequada desse resíduo, tais como reciclagem e reuso dos materiais. Essas medidas visam ampliar a vida útil dos aterros e, reduzir a extração de recursos naturais. No entanto, no Brasil, não existe fiscalização sobre o descarte de pneus inservíveis em lixões, aterros ou terrenos baldios. Este trabalho propõe uma alternativa ao reuso do pneu inservível que ocupa um grande volume e possui uma estrutura de difícil decomposição.

A utilização de pneus inservíveis como insumo construtivo vem como uma alternativa para o despejo irregular deste rejeito que vem se tornando um problema mundial. Tem-se conhecimento de que a adição de borracha ao concreto altera algumas de suas propriedades físicas como o módulo de elasticidade, contudo, prevendo o comportamento do material o uso da borracha no concreto pode ser viável, tendo em vista que o módulo de elasticidade é uma das principais variáveis de dimensionamento.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Concreto

O concreto é um material de construção proveniente da mistura de agregados, cimento e água, portanto, uma rocha artificial. Na fabricação do concreto conforme necessidade são feitos o acréscimo de adições e aditivos a mistura que influenciam nas características físicas e químicas do concreto (LEONHARDT, 1977).

Dentre as inúmeras variáveis existentes no concreto a relação entre água e cimento é uma das mais significativas pois interfere diretamente na resistência a compressão do concreto, como já comprovado pelos procedimentos experimentais de Duff Abrams (1919).

4.2 Borracha

A borracha proveniente de pneus inservíveis vem como uma alternativa ecológica de reutilizar o material ao invés de descartá-lo. O mundo já sofre com a alocação indevida desse resíduo inerte e o número de pneus descartados sobe a cada ano que passa. Devido a isso surgem estudos para sua reutilização e políticas para a sua correta destinação.

Quando se trata do critério de incorporação da borracha de pneus em concreto, as aplicações encontradas em diversos estudos são variadas. Alguns pesquisadores substituem o agregado miúdo, outros o agregado graúdo, o cimento ou incorporam como adição ou fibras. Entretanto ocorrem divergências quanto a caracterização da borracha pelos ensaios de massa unitária e massa específica (GIACOBBE, 2008).

A granulometria da borracha influencia no comportamento mecânico do concreto. Quando em pequenas quantidades as partículas menores de borracha tendem a influenciar mais no comportamento do material do que as partículas maiores. No entanto, esse comportamento se inverte quando a borracha se apresenta em grandes quantidades em meio ao concreto, como descrito em *Fatigue performance of waste rubber concrete for rigid road pavement* de Pacheco-Torres et al (2018).

4.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade mede a rigidez do material e a relação da tensão aplicada e a deformação medida. Ele é calculado de acordo com a ABNT NBR 8522:2017, aplicando uma carga axial com carregamento constante em um corpo de prova cilíndrico.

De uma forma geral para o concreto, materiais que melhoram o comportamento do módulo de elasticidade também melhoram a resistência a compressão do material, no entanto os materiais que reduzem o módulo de elasticidade também reduzem a resistência a compressão. O comportamento deste parâmetro é sensível quanto as características e ao volume dos agregados. Caso o módulo de elasticidade do agregado seja alto isso vai se refletir no módulo de elasticidade do concreto. O formato do material que compõe o agregado graúdo também influência no valor do módulo de elasticidade (SABIH e TAREFDER, 2016).

O módulo de elasticidade é um dos principais parâmetros de análise quando falamos de dimensionamento de pavimentos rígidos. É uma variável importante no projeto, controlando as deflexões gerais e as ondulações sobre as placas de concreto devido às tensões geradas pelo tráfego. (SABIH e TAREFDER, 2016).

4.4 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto é determinada conforme a ABNT NBR 5739:2018, que prescreve um método de ensaio para corpos de prova de concreto. No ensaio é posicionado um corpo de prova cilíndrico em uma prensa que aplicará um carregamento a uma velocidade constante até ocorrer uma queda de força, indicando sua ruptura.

Para Mehta e Monteiro (2014), a ruptura é atingida mesmo sem sinais visíveis de fratura externa. O corpo de prova é considerado rompido quando não suportar uma carga maior, isso devido ao estado avançado de fissuração interna atingido.

4.5 Concreto borracha

Silveira *et al* (2016) apresenta um estudo sobre a análise das propriedades mecânicas do concreto, elaborado a partir da substituição de parte do agregado miúdo por borracha de pneu triturado. Foram realizados testes experimentais em corpos de prova submetidos à compressão axial, flexão simples sob carga centrada e fadiga. As medições foram feitas em três traços de concreto:

- Concreto sem borracha, utilizado como referência;
- Concreto com borracha e consumo de cimento igual ao de referência;
- Concreto com borracha e acréscimo de cimento até a obtenção da resistência do concreto de referência.

A comparação dos resultados obtidos por Silveira *et al* (2016) mostrou que a adição de borracha provoca redução na resistência mecânica do concreto e para obter a mesma resistência do concreto convencional, foi necessário acrescentar cerca de 30% a mais de cimento ao concreto com borracha.

No estudo de Granzotto (2010), foram realizadas substituições parciais de 5%, 10% e 15% do agregado miúdo por borracha triturada com uma granulometria variada entre 0,8mm e 2,0mm. Após análise da bibliografia foi optado por não realizar nenhum tratamento antes da incorporação da borracha ao concreto, afim de minimizar custos, simplificar os métodos para tornar a reutilização economicamente viável e segundo a autora não houve consenso na bibliografia analisada quanto ao tratamento da borracha.

As conclusões de Granzotto (2010) mostram que o uso do agregado reutilizado é viável pelo ponto de vista das propriedades mecânicas avaliadas no estudo principalmente nos teores abaixo de 10% de substituição. No entanto um cuidado é necessário quando se analisa a trabalhabilidade do concreto, pois foi observado uma queda do abatimento.

5 METODOLOGIA DE PESQUISA

5.1 Planejamento inicial

Os materiais de uso comum na confecção dos corpos de provas foram provenientes da cidade de Campo Mourão – Paraná. O aglomerante utilizado foi o Cimento Portland composto com adição de material pozolânico (CP-II-Z), adquirido em uma loja de materiais de construção, enquanto os agregados tradicionais foram todos providos do estoque da UTFPR. O agregado graúdo utilizado foi uma mistura de brita 1 com brita 2, na proporção de 60% e 40%. As nomenclaturas, brita 1 e brita 2 são termos comerciais para agregados graúdos entre 9,5mm – 19mm e 19mm – 25mm respectivamente. A água utilizada no processo foi proveniente do abastecimento da UTFPR – Campo Mourão, presumindo-se ser isenta de substâncias prejudiciais à hidratação do cimento. A borracha foi cedida já em grãos triturados por uma empresa especializada em reciclagem. Optou-se por arrastar um imã sobre uma amostra de borracha triturada com o objetivo de garantir a ausência da malha de aço.

Os ensaios laboratoriais deste trabalho foram realizados nos laboratórios da UTFPR, campus Campo Mourão. Neste local, ocorreram as caracterizações de granulometria, massa específica real e o armazenamento dos materiais, bem como as dosagens e o preparo dos diferentes traços de concreto, junto aos ensaios para determinação do módulo de elasticidade dos corpos de prova.

Os traços de concreto analisados foram:

- Concreto comum (sem nenhuma substituição de agregado miúdo por borracha);
- Concreto-Borracha (com substituição de 5% do agregado miúdo por borracha);
- Concreto-Borracha (com substituição de 7,5% do agregado miúdo por borracha);
- Concreto-Borracha (com substituição de 10% do agregado miúdo por borracha).

Todos os traços foram submetidos a ensaios de módulo de elasticidade e pesagens quando atingiram a idade de 28 dias. Para cada traço confeccionado foram designados 2 corpos de prova para o ensaio de módulo de elasticidade e 1 corpo de prova para o ensaio de resistência a compressão, a fim de estimar a força aplicada para os ensaios de módulo de elasticidade.

As pesagens dos corpos de prova foram realizadas entre a retirada do tanque de cura e os ensaios, e os valores adotados para o cálculo da massa média dos corpos de prova foram os valores referentes aos corpos de prova designados ao ensaio de módulo de elasticidade.

5.2 Caracterização de materiais

5.2.1 AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL

O agregado miúdo foi caracterizado quanto a sua granulometria segundo a ABNT NBR NM 248:2003 e, segundo a ABNT NBR NM 52:2009 foi determinada a sua massa específica real.

5.2.2 AGREGADO GRAÚDO

O agregado graúdo foi caracterizado segundo a ABNT NBR NM 53:2009 para a determinação da massa específica real.

5.2.3 BORRACHA

A fim de evitar exposição da borracha a altas temperaturas dentro da estufa, ela foi seca ao sol e caracterizada quanto a sua massa específica real pela ABNT NBR 9776:1986, com a substituição da água por álcool. Quanto à composição granulométrica, ela foi caracterizada pela ABNT NBR NM 248:2003 assim como o agregado miúdo convencional.

5.3 Estudo de dosagem

A dosagem do concreto aconteceu em duas etapas. Primeiro, visando a obtenção de um traço de padrão para concreto e, posteriormente, um traço levando em consideração a substituição parcial do agregado miúdo.

5.3.1 DOSAGEM REFERÊNCIA

A dosagem do concreto foi baseada no método não experimental apresentada pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). A característica do concreto base (sem substituição) foi resistência à compressão aos 28 dias ($f_{ck,28}$) de 20 MPa.

5.3.2 DOSAGEM MODIFICADA

Após a definição do traço padrão foi feita a substituição sobre a massa da areia por borracha, as substituições foram de: 5%, 7,5% e 10%.

5.4 Procedimento experimental

Os corpos de prova foram produzidos no laboratório de materiais de UTFPR – Campo Mourão, com o auxílio de uma betoneira e compactados manualmente, conforme a ABNT NBR 5738:2016. Os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram realizados utilizando o equipamento EMIC DL 30000, pertencente ao laboratório de estruturas da UTFPR – Campo Mourão.

5.4.1 ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (*SLUMP TEST*)

A consistência do concreto é um parâmetro importante, uma vez que é ela quem define a trabalhabilidade do mesmo. Para tanto, o ensaio para determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone foi realizado conforme previsto pela ABNT NBR NM 67:1998.

5.4.2 MODELAGEM DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

A modelagem dos corpos de prova, bem como seu processo de cura seguiu os parâmetros previstos pela ABNT NBR 5738:2016. As bases dos corpos de prova foram alinhadas com o auxílio de uma retífica antes dos ensaios.

5.4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Seguindo os padrões descritos pela ABNT NBR 7215:1996, os ensaios de resistência a compressão dos corpos de prova aconteceram quando o concreto atingiu a idade de 28 dias.

5.4.4 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE

O ensaio procedeu segundo a ABNT NBR 8522:2017. Os corpos de prova foram ensaiados quando o concreto atingiu a idade de 28 dias.

5.4.5 PESAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Depois da retirada dos corpos de prova do tanque de cura, eles tiveram suas massas determinadas com o auxílio de uma balança digital. Momentos depois os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência a compressão e módulo de elasticidade.

6 RESULTADOS

Para o cálculo do traço de concreto referência utilizado no experimento foi necessário a caracterização física dos agregados. No entanto, para a massa específica real do cimento foi adotado o valor de aproximadamente 3,0g/cm³ fornecido pelo próprio fabricante InterCement, responsável pelo cimento Cauê. Os demais valores foram encontrados a partir de ensaios normalizados conforme apresentados pela tabela 1.

Tabela 1 - Materiais utilizados.

MATERIAIS	MASSA ESPECÍFICA REAL	GRANULOMETRIA	
	ρ (g/cm ³)*	ØMáx. (mm)**	Módulo de Finura
Areia	2,635	0,6	1,76
Brita 1	3,019	19	-
Brita 2	2,958	25	-
Borracha	1,219	0,3	2,58

* ρ - Massa específica

**ØMáx - Dimensão máxima característica dos agregados

Fonte: Autoria própria.

Segundo a ABNT NBR 7211:2009, responsável por especificar os requisitos mínimos para os agregados destinados ao concreto, o módulo de finura da areia é enquadrado na zona utilizável inferior e a borracha na zona ótima, atendendo aos requisitos de granulometria.

Com o objetivo de analisar as mudanças ocasionadas no concreto devido a substituição do agregado miúdo, o fator a/c foi mantido constante. Em uma análise do ensaio de abatimento de tronco de cone Silveira *et al* (2016) também mantém o mesmo fator constante. Porém, ao invés de realizar a substituição parcial do agregado por borracha moída, ele optou por adicionar borracha, e nesse ensaio é observado um aumento no valor do *slump test*. Desta forma, as diminuições nos valores deste parâmetro são apresentadas na tabela 2 divergem da análise de Silveira *et al* (2016).

Tabela 2 - Traços analisados.

TRAÇO	RELAÇÃO CIMENTO:AREIA:BRITA	TEOR DE BORRACHA (%)	TEOR ÁGUA/CIMENTO	SLUMP TEST (mm)
T1	1:2,04:3,11	0	0,514	120
T2	1:1,94:3,11	5	0,514	50
T3	1:1,89:3,11	7,5	0,514	65
T4	1:1,84:3,11	10	0,514	50

Fonte: Autoria própria.

Para os testes de módulo de elasticidade foi utilizada a ABNT NBR 8522:2017, com algumas ressalvas. Ocorreram imprevistos durante os ensaios devido a um problema com o equipamento, que ocasionou a destruição de um corpo de prova, e por problemas pontuais com algumas amostras. Como o experimento já estava pronto, com os corpos de prova já moldados e curados, foi tomada a decisão de prosseguir utilizando apenas dois corpos de prova destinados ao ensaio de módulo de elasticidade e, um corpo de prova destinado a estimativa de resistência a compressão.

Os resultados dos ensaios podem ser encontrados na tabela 3.

Tabela 3 - Resultado dos ensaios.

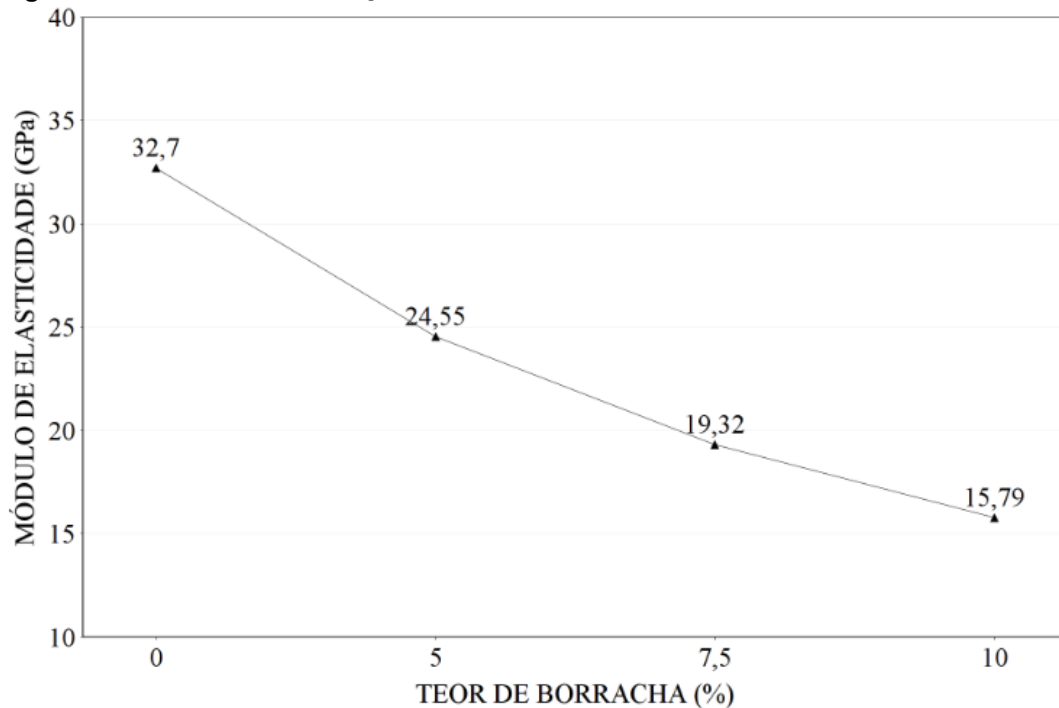
TRAÇO	TEOR DE BORRACHA (%)	MASSA DO CORPO DE PROVA (Kg)	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)
T1	0	3,863	26,47	32,70 ± 0,87
T2	5	3,601	17,17	24,55 ± 1,98
T3	7,5	3,402	12,20	19,32 ± 0,61
T4	10	3,329	8,27	15,79 ± 0,89

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados exibidos na tabela 3, é observado o impacto que a substituição da areia pela borracha causa no módulo de elasticidade, portanto pode-se afirmar que, dentro do regime elástico do material, o concreto com borracha vai deformar mais que o concreto sem borracha.

Com os dados da tabela 3 foi produzido o gráfico exposto na figura 1:

Figura 1 – Efeito da substituição no módulo de elasticidade



Fonte: Autoria própria.

Pode-se entender o comportamento com maior clareza a partir da equação de linha de tendência linear, dada pela equação 1 que possui um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9969:

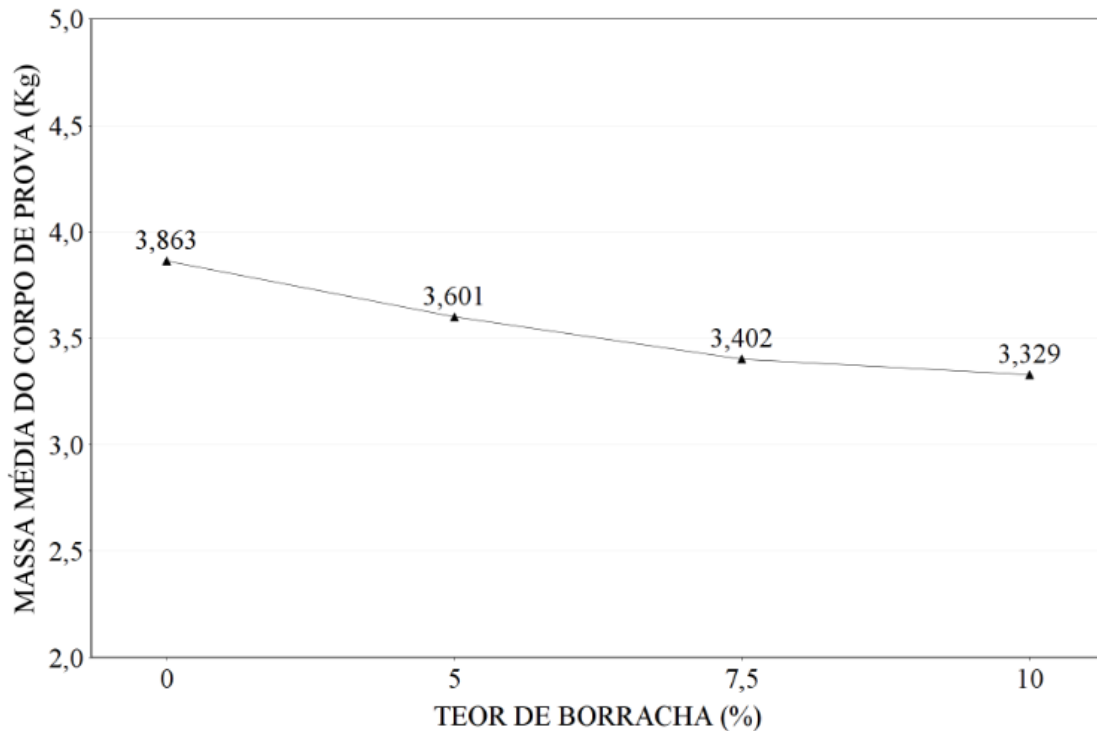
$$y = -1,7184x + 32,756 \quad (1)$$

A cada 2,5% de areia substituída o módulo de elasticidade apresenta uma queda de 13%, tomando como referência o traço sem borracha, apresentado como T1.

A queda no módulo de elasticidade com a presença de borracha no concreto é prevista na literatura, Silveira *et al* (2016) também obteve reduções com a adição de borracha no seu respectivo traço de análise.

Tomando os valores da tabela 3, a variação da massa média dos corpos de prova foi analisada de maneira semelhante, com base no teor de borracha substituído, sendo exposto na figura 2:

Figura 2 – Efeito da substituição na massa do corpo de prova



Fonte: Autoria própria.

Como na análise de módulo de elasticidade, foi calculada a equação de linha de tendência dos dados, gerando a equação 2 com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9844:

$$y = -0,0555x + 3,8611 \quad (2)$$

É notável a diminuição da massa com o aumento da borracha inserida no corpo de prova, uma queda de 4% para cada 2,5% de areia substituída. No trabalho de Granzotto (2010) foi percebido uma redução semelhante dentro do espectro de substituição até 10%, mostrando então que o resultado obtido é plausível e já era esperado.

7 CONCLUSÃO

A produção de pneus continua sendo uma realidade, por consequência o seu descarte. A procura por uma alternativa ecologicamente sustentável para o seu descarte e o desafio para minimizar os danos causados pelo consumo constante de pneus é o problema enfrentado atualmente. Com o intuito de contribuir para as futuras pesquisas sustentáveis sobre borracha triturada, essa pesquisa analisou o comportamento do concreto com a substituição parcial do agregado miúdo areia por borracha reutilizada proveniente de pneus inservíveis. É importante ressaltar que a substituição feita foi com base no peso do agregado miúdo e que os materiais utilizados para a confecção dos traços de concreto são característicos da região de Campo Mourão – Paraná.

Para o dimensionamento foi tomando como base um traço padrão calculado com o método não experimental da ABCP, utilizando um fator a/c constante a fim de analisar a implicância da substituição na trabalhabilidade do concreto. No ensaio de resistência a compressão o resultado para o traço padrão estava dentro do previsto.

O comportamento do concreto foi avaliado para identificar a influência da borracha reutilizada no módulo de elasticidade, na trabalhabilidade e na massa dos corpos de prova. Cabe a ressalva de que a estimativa da resistência à compressão foi feita utilizando apenas um corpo de prova, deste modo, seria interessante uma nova pesquisa utilizando uma metodologia semelhante para confirmar e complementar os resultados obtidos.

São necessárias mais pesquisas sobre o concreto com adição ou substituição de borracha, uma vez que a bibliografia diverge opiniões sobre o comportamento do material. Um problema encontrado são as diferenças entre a granulometria da borracha utilizada, a origem do material e seu método de classificação, cada uma dessas variáveis apresenta grande impacto no comportamento final do concreto. Como não se trata de um material usual, estudos mais aprofundados devem ser realizados para uma real previsão do comportamento.

Este estudo trouxe algumas conclusões sobre a substituição do agregado miúdo do concreto por borracha, em teores até 10%:

- O ensaio de abatimento do tronco de cone apresentou notável redução, mostrando que o concreto com borracha tem uma trabalhabilidade mais difícil quando comparado com o concreto tradicional;

- A redução significativa do módulo de elasticidade mostrou um comportamento linear;
- A massa dos corpos de prova apresentou uma pequena variação, porém quando comparado com o impacto no módulo de elasticidade e na trabalhabilidade não se mostrou tão significativa.

Com base nos dados analisados a conclusão é de que o concreto com a presença de borracha é viável para aplicação na construção civil desde que durante o dimensionamento da obra o profissional esteja ciente das vantagens e desvantagens proporcionadas pelo material. Como por exemplo, a construção de pavimentos rígidos a partir de concreto borracha pode ser de grande valia. Existem estudos sobre esse material sendo aplicado na confecção de pavimentos de concreto, entendendo-se de que o comportamento módulo de elasticidade do concreto borracha é benéfico quando submetido a cargas dinâmicas.

O concreto com borracha reutilizada pode vir a ser uma excelente alternativa para a destinação do pneu inservível, porém recomenda-se análises mais aprofundadas em relação a sua utilização, por consequência estudos futuros poderão ser focados mais no comportamento prático do material.

8 REFERÊNCIAS

- ABRAMS, D. A. **Design of Concrete Mixture**. Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute. Chicago, p. 27. 1919.
- ALMEIDA, S. M. D. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 213. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro. 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: cimento portland: determinação da resistência a compressão**. Rio de Janeiro. 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro. 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: agregados - determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: resíduos sólidos - classificação**. Rio de Janeiro. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: agregados para concreto - especificação**. Rio de Janeiro. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: agregado miúdo - determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: agregado graúdo - determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: determinação do módulo de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2018.

- BARROS, R. T. D. V. **Elementos de gestão de resíduos sólidos**. Belo Horizonte: Tessitura, 2012.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução CONAMA n. 416, de 30 de Setembro de 2009**. Brasília, p. 64-65. 2009.
- GIACOBBE, S. **Estudo do comportamento físico-mecânico do concreto de cimento portland com adição de borracha de pneus**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.
- GRANZOTTO, L. **Concreto com adições de borracha: uma alternativa ecologicamente viável**. Universidade Estadual de Maringá. Maringá, p. 132. 2010. Dissertação de Mestrado.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Site do IBAMA**, 2018. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/phocadownload/pneus/relatoriopneumaticos/ibama-relatorio-pneumaticos-2018.pdf>>. Acesso em: 1 Abril 2019.
- JORGE, R. et al. **Aproveitamento da borracha de pneus inservíveis na produção de componentes para construção**. Anais do ICTR 2004. Florianópolis: ICTR - USP. 2004. p. 1-9. ICTR 2004 - CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.
- LAGARINHOS, C. A. F. **Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 293. 2011.
- LEONHARDT, F. **Construções de concreto, vol. 1: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**. 1. ed. 2 reimpressão. Rio de Janeiro: Interciência, v. 1, 1977.
- LIMA, J. D. D. **Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. 1. ed. João Pessoa: ABES, 2001. 267 p.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, J. M. P. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- PACHECO-TORRES, R. et al. Fatigue performance of waste rubber concrete for rigid road pavements. **Construction and Building Materials**, 12 Maio 2018. 539–548.
- RECICLANIP. **Site da Reciclanip**, 2018. Disponível em: <<http://www.reciclanip.org.br/sitewp/wp->

content/uploads/2018/09/Release_Reciclanip_Relatorio-IBAMA-2018_aprovado.pdf>. Acesso em: 1 Abril 2019.

SABIH, G.; TAREFDER, R. A. Impact of variability of mechanical and thermal properties of concrete on predicted performance of jointed plain concrete pavements. **International Journal of Pavement Research and Technology**, 9, n. 6, Novembro 2016. 436-444.

SILVEIRA, P. M. et al. Estudo do comportamento mecânico do concreto com borracha de pneu. **Revista matéria**, v. 21, n. 2, p. 416-428, 2016. ISSN 1517-7076.