

Estudo do comportamento mecânico do concreto com borracha de pneu

On the mechanical behavior of concrete with rubber tires

Paulo Moreira Silveira¹, Maria da Consolação F. Albuquerque²,
Silmara Cassola³, Antônio Airton Bortolucci⁴,
Lenon De Paulli⁵, Fábio Maniero Della Villa⁶

^{1,2,3,5,6}Departamento de Engenharia Civil – FEIS/UNESP Al. Bahia, 550, 15.385.000, Ilha Solteira/SP

e-mail: paulo.silveira@combrape.com.br; sao@dec.feis.unesp.br; cassola@dec.feis.unesp.br;

lenonp116@hotmail.com; Fabio_manierodellavilla@yahoo.com.br

⁴ Departamento de Geotecnia – EESC/USP Av. Trabalhador Sancarlense, 400, 13.566.590, São Carlos/SP

e-mail: bortolucci@sc.usp.br

RESUMO

Este estudo trata da 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: 1) concreto sem borracha (denominado na presente pesquisa por concreto de referência); 2) concreto com borracha e consumo de cimento igual ao de referência; e 3) concreto com borracha e acréscimo de cimento até a obtenção da resistência do concreto de referência. Os resultados obtidos mostram que a adição de borracha provoca redução na resistência mecânica do concreto, o que pode reduzir as aplicações deste novo material. A presença da borracha também conferiu um menor módulo de elasticidade ao concreto, o que pode ser desejável em situações envolvendo ações de impacto, forças dinâmicas e fadiga. Além dessa vantagem, a aplicação da borracha de pneu no concreto contribui na reciclagem de um material poluente e que normalmente é descartado no meio ambiente.

Palavras-chave: concreto; borracha de pneu; propriedades mecânicas.

ABSTRACT

This study discusses the mechanical properties of concrete, elaborated from the partial replacement of fine aggregate by crushed rubber. It was made experimental tests in specimens submitted to axial compression, Young's modulus (stiffness), three-point bending flexural and fatigue. The measurements were performed on three mixtures: 1) concrete without rubber (denominated as reference concrete), 2) concrete with rubber and the consumption of cement equal of reference and 3) concrete with rubber and the addition of cement on the mixture until it obtains the same strength of the reference concrete. The results have indicated that adding rubber in concrete decreases the strength, which could reduce the application of this new material. The rubber also decreased the elastic modulus; this could improve the behavior of materials in situations involving impact actions, dynamics loads and fatigue. Furthermore, this new composite contributes on rubber tire recycling processes.

Keywords: concrete; rubber tires; mechanical properties.

1. INTRODUÇÃO

Desde a última década do século XX, mais precisamente depois da Conferência Das Nações Unidas Sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio de Janeiro, 1992), tornou-se fundamental o investimento em pesquisas científicas, em todas as áreas, com o objetivo de melhorar os modos de produção visando reduzir o desperdício de materiais, economizar energia e preservar o meio ambiente. Dentro desse contexto, a construção civil tem participação na transformação dos recursos naturais em bens materiais para a sociedade humana. Os

trabalhos de Modro et al. [24] e Heede e Belie [20] comprovam que o aproveitamento de produtos industrializados que são normalmente descartados na natureza, é um assunto essencial e atualmente muito promissor.

Uma das principais propostas desta linha de pesquisa é a elaboração de um material compósito, com a substituição de uma parte dos componentes convencionais do concreto por resíduos que são descartados em grande quantidade e causam graves danos ambientais. Em relação ao resíduo de pneu, no Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), segundo a resolução de nº 416/2009, de 30 de setembro de 2009 [15], seu artigo 3º determina que cada pneu novo comercializado para o mercado de reposição as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação adequada a um pneu inservível.

A literatura apresenta trabalhos que têm como objetivo analisar experimentalmente o comportamento mecânico do concreto modificado pela substituição de uma parte do agregado por borracha de pneu. Eiras et al [17] pesquisaram as propriedades mecânicas do concreto com 40, 50 e 60% de substituição do volume de areia por borracha. Huang et al. [22] substituíram 15% do volume de agregado grão por borracha. Ambos concluíram em suas pesquisas que a adição de borracha no concreto altera suas propriedades mecânicas, reduzindo a resistência à compressão e o módulo de elasticidade.

Entretanto, embora haja uma redução na resistência mecânica do concreto com borracha, Eiras et al [17] alcançaram o requisito mínimo de resistência mecânica para as unidades de alvenaria e concluíram em sua pesquisa que os concreto com borracha eram promissores para aplicações em construções, onde são necessárias propriedades térmicas e acústicas.

Huang et al.[22] explicaram que a queda da resistência ocorre devido à natureza hidrofóbica da borracha e da incompatibilidade entre as propriedades químicas da pasta de cimento e da borracha, tornando fraco o vínculo com o cimento. Desta forma, por ser mais leve do que a argamassa e agregados, as partículas de borracha agem como furos dentro do concreto, o que causa concentração de tensões, reduzindo significativamente a resistência. No entanto, a perda indesejada da resistência pode ser compensada pelo efeito “benéfico” das propriedades visco elástico da borracha. Ou seja, o concreto se torna mais dúctil e com melhor capacidade de absorção de energia de impacto do que o concreto convencional [17].

Um modo de estudar carga de impacto é com a realização do ensaio de fadiga, onde há carregamento e descarregamento. Cerro [14] realizou uma extensa pesquisa experimental sobre o comportamento à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentos, em concreto convencional e de auto desempenho. Em seu trabalho, a geometria do ensaio de fadiga foi flexão sob carga centrada O concreto de auto desempenho mostrou-se inferior, em relação a sua resistência à fadiga, ao concreto convencional.

Graeff et al [18], também estudaram o comportamento à fadiga de concreto com fibras de aço recicladas. A geometria do ensaio também foi flexão sob carga centrada. Foram ensaiados dois tipos de concreto: o plástico e o compactado. Para cada tipo de concreto foi acrescentado 2% e 6%, de fibras recicladas, em relação à massa do concreto. Com o objetivo de comparação, também foi ensaiado concreto com fibra de aço produzida industrialmente, ou seja, sem reciclagem. Em seu trabalho as fibras recicladas mostraram melhor desempenho à fadiga em relação ao concreto sem fibras.

Qian et al. [25] realizaram o ensaio de fadiga sob a geometria de flexão a quatro pontos usando o concreto flexível, ou seja, reforçado com fibras e comparou os resultados com um concreto plástico. Em seu trabalho, observaram que o concreto alcança o mesmo número de ciclos para uma aplicação de tensão duas vezes maior que a aplicada no concreto plástico.

O presente trabalho contribui com a análise das propriedades mecânicas do concreto modificado pela substituição de 10% do volume do agregado miúdo (areia) por borracha de pneu reciclado. Os resultados mostram a variação dos valores da resistência mecânica e do módulo de elasticidade, de acordo com diferentes traços. É apresentada também a análise da amostra em que, para compensar a perda de resistência pela adição da borracha, foi acrescentado cimento até atingir a resistência à compressão compatível ao concreto tradicional. Os resultados foram obtidos a partir de testes experimentais em corpos de prova para análise da resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, flexão simples sob carga centrada e fadiga na flexão simples sob carga centrada.

2. MATERIAIS UTILIZADOS

Para a caracterização de todos os agregados, foram feitos ensaios de acordo com as normas técnicas correspondentes. A curva granulométrica para os agregados convencionais está representada na Figura 1. As propriedades físicas destes materiais, incluindo a borracha, estão apresentadas na Tabela 1.

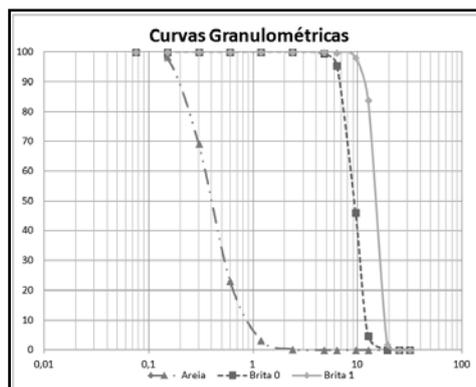


Figura 1: Curva granulométrica dos agregados convencionais: Brita 0:4,75/12,5; Brita 1: 9,5/25

Tabela 1: Caracterização dos materiais

MATERIAL	MASSA ESPECÍFICA	ABSORÇÃO	GRANULOMETRIA	
	ρ (g/cm ³)*	A (%)**	ØMáx. (mm) ***	Módulo Finura
Areia	2,604	5,0	1,20	2,86
Brita 4,75/12,5	2,840	1,10	12,5	-
Brita 9,5/25	2,880	1,77	19,0	-
Borracha	1,190	-	-	2,86

* ρ - Massa específica

** A - Absorção

*** ØMáx. – Dimensão máxima característica dos agregados

- Areia: Os ensaios de granulometria foram realizados segundo a norma NBR NM 248:2003 [4], o ensaio de massa específica segundo ABNT NM 52:2009 [10] e o ensaio de absorção do agregado miúdo de acordo com norma ABNT NM 30: 2001 [3]. No ensaio de granulometria, foi determinada a dimensão máxima característica do agregado miúdo utilizado no estudo.

- Brita: Procedeu-se aos ensaios de granulometria, segundo a norma NBR NM 248:2003 [4], e ao ensaio de massa específica e absorção do agregado graúdo de acordo com ABNT NBR NM 53:2009 [11]. Por meio do ensaio de granulometria, determinou-se a dimensão máxima característica dos agregados.

- Borracha: Efetuou-se o ensaio para determinação da massa específica segundo ABNT NBR 9776:1986 [1] com substituição da água por álcool (Figura 2). Optou-se por esta norma, com objetivo de não manter a borracha em estufa até constância de massa, a mesma foi seca ao sol antes de ser colocada no álcool. O procedimento de peneiramento da borracha não resultou na obtenção da curva granulométrica, o objetivo foi apenas a seleção do material com dimensões máximas características iguais ou inferiores às dimensões máximas características do agregado miúdo (areia).

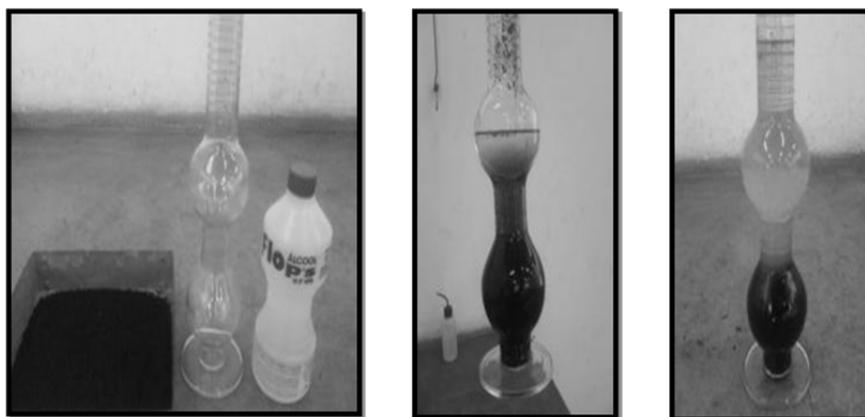


Figura 2: Frasco Chapman com borracha e álcool: determinação da massa específica da borracha

3. MÉTODO DE DOSAGEM E DOS ENSAIOS

3.1 Método de Dosagem

O método NM 45:2006 [7], foi utilizado para a determinação adequada da mistura entre os agregados, conforme descrito por Helene e Terzian [21]. A determinação da massa unitária foi feita individualmente em cada mistura de agregados, contendo diferentes teores de cada fração. A composição ideal foi escolhida com base no maior valor obtido para a massa unitária no estado compactado.

Os testes de compressão axial, módulo de elasticidade, flexão simples sob carga centrada e fadiga foram realizados em diferentes misturas, com o objetivo de comparar o concreto convencional com o concreto modificado com 10 % borracha, considerando também aumento de 5% a 30% no consumo de cimento. Desta forma, foram elaborados oito traços de concreto, todos submetidos à compressão axial. Os traços 1, 2 e 3 também foram ensaiados à flexão simples sob carga centrada e fadiga.

A Tabela 2 apresenta a distinção entre os traços, o consumo de cimento, teor de borracha, relação água cimento e mostra os ensaios realizados com a quantidade de corpos de prova utilizados em cada ensaio.

Tabela 2: Relação entre os diferentes traços e os ensaios realizados

TRAÇO	RELAÇÃO CIMENTO: AREIA: BRITA	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)	TEOR DE BORRACHA (%)	RELAÇÃO ÁGUA/ CIMENTO	ABATIMENTO (CM)	TIPO DE ENSAIO E QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA (cp)
T1	1:2,06:2,94	474 (0%)	0	0,50	7	compressão axial (3 cp) módulo de elasticidade (3 cp) flexão (6 cp) fadiga (12 cp)
T2	1:2,06:2,94	474 (0%)	10	0,50	9,5	compressão axial (3 cp) módulo de elasticidade (3 cp) flexão (6 cp) fadiga (12 cp)
T3	1:1,49:2,12	616 (30%)	10	0,47	8,6	compressão axial (3 cp) módulo de elasticidade (3 cp) flexão (3 cp) fadiga (2 cp)
T4	1:1,94:2,78	497 (5%)	10	0,47	9	compressão axial (3 cp)
T5	1:1,84:2,62	520 (10%)	10	0,45	10	compressão axial (3 cp)
T6	1:1,74:2,48	544 (15%)	10	0,42	9,8	compressão axial (3 cp)
T7	1:1,65:2,35	568 (20%)	10	0,42	9	compressão axial (3 cp)
T8	1:1,57:2,23	592 (25%)	10	0,40	8,8	compressão axial (3 cp)

O traço T1 corresponde ao corpo de prova de referência, feito com os mesmos materiais do concreto convencional: agregado miúdo (areia); agregados graúdos (4,75/12,5 e 9,5/25 – nomenclatura comercial: brita 0 e brita 1, respectivamente); cimento Portland tipo CPII-Z32 e água de amassamento proveniente de abastecimento da prefeitura municipal da cidade de Ilha Solteira (SP) e assim sendo, presume-se isenta de substâncias prejudiciais à hidratação do cimento.

O traço T2 corresponde ao concreto modificado apenas pela substituição de 10% do volume de agregado miúdo por borracha triturada na mesma dimensão máxima característica da areia.

Os traços T3, T4, T5, T6, T7 e T8 correspondem ao concreto modificado pela substituição de 10% do volume de agregado miúdo por borracha, e também pelo acréscimo de cimento nas quantidades de 30%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, respectivamente, como descrito na Tabela 2.

Após a mistura dos componentes dos concretos, foram realizados ensaios de abatimento de tronco de cone, de acordo com a ABNT NBR NM 67:1998 [2], para avaliação numérica da consistência e coesão do concreto fresco, mantendo-o num intervalo entre 8,0 a 10,0 cm, conforme foi obtido no traço T2, apresentado

na Figura 3. Este abatimento foi escolhido, pois engloba grande parte dos elementos estruturais muito armados [21].



Figura 3: Ensaio de abatimento de tronco de cone

3.2 Método de ensaio

3.2.1 Preparação dos corpos de prova

De acordo com a norma ABNT NBR 5738:2003 [5], os corpos de prova foram moldados em moldes cilíndricos de diâmetro igual a 10 cm e altura de 20 cm e moldes prismáticos de 15 cm de largura, 15 cm de altura e 50 cm de comprimento. O adensamento foi realizado em mesa vibratória, rasados. Após vinte e quatro horas foram desenformados e armazenados em câmara úmida para processo de cura por 28 dias. Em seguida, os corpos de prova cilíndricos, foram capeados na base e no topo com mistura de enxofre e cinza pozolânica, conforme ABNT NBR 5738:2003 [5].

A Figura 4 ilustra os corpos de prova prontos, a máquina utilizada para os ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade, e o detalhe dos sensores instalados no corpo de prova para este ensaio. O equipamento utilizado foi o EMIC DL 30000, classificado como classe 1, como estabelece a ABNT NBR NM ISO 7500-1:2004 [6]. A quantidade de corpos de prova ensaiados para cada traço, consta na Tabela 2.

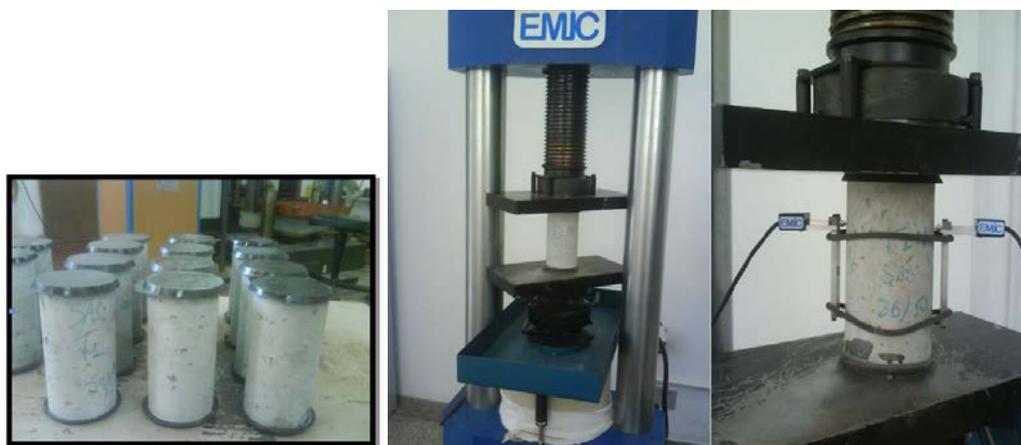


Figura 4: Corpos de prova e Máquina EMIC DL 30000 utilizada nos ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade.

3.2.2 Ensaio de compressão axial e módulo de elasticidade

Inicialmente obtêm-se o valor de resistência à compressão, conforme ABNT NBR 5739:2007 [8] em corpos-de-prova iguais aos utilizados para determinação do módulo de elasticidade, provenientes da mesma betoneada e processo de cura. A quantidade de corpos de prova para cada ensaio é apresentada na Tabela 2.

O módulo de elasticidade foi obtido de acordo com a ABNT NBR 8522:2008 [9]. Para sua determinação foram colocados sensores de deslocamento em pontos equidistantes dos extremos do corpo de prova, como mostrados na Figura 4.

A partir do valor médio da resistência à compressão (f_c), obtido do ensaio de resistência à compressão, foram determinados os níveis de carregamento para o ensaio de módulo de elasticidade, conforme descrito a seguir.

Aplicou-se o carregamento e aumentou-se a tensão de forma regular à velocidade de $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s, até que foi alcançada uma tensão de aproximadamente 30% da resistência à compressão do concreto (σ_b), obtida no ensaio de resistência à compressão, para cada material. Este nível de tensão foi mantido por 60 s. Em seguida, reduziu-se a carga à mesma velocidade do processo de carregamento até o nível da tensão básica ($\sigma_a = 0,5$ MPa). Foram realizados mais dois ciclos de pré-carga adicionais, obedecendo às mesmas velocidades de carga e descarga e mantendo as tensões extremas (σ_a e σ_b) constantes, alternadamente, durante períodos de 60 s cada.

Depois do último ciclo de pré-carga e do período de 60 s sob a tensão σ_a , registrou-se as deformações específicas lidas (ε_a) tomadas em no máximo 30 s. Os corpos de prova foram carregados novamente com a tensão σ_b à velocidade especificada e as deformações lidas (ε_b) foram registradas, tomadas em no máximo 30 s, após uma espera de 60 s.

Após efetuarem-se todas as leituras de deformação, elevou-se o carregamento no corpo de prova à velocidade especificada até que se produziu a ruptura. Se a resistência efetiva (f_{cef}) à compressão do corpo-de-prova diferisse de f_c em mais de 20%, o resultado deveria ser descartado.

O módulo de elasticidade (E_{ci}), em Giga Pascal, foi calculado pela equação 1:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \times 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^{-3} \quad (1)$$

Na qual:

σ_b = Tensão maior, em Mega Pascal ($\sigma_b = 0,3 f_c$); Sendo que, o valor f_c depende do traço analisado.

σ_a = Tensão básica, em Mega Pascal ($\sigma_a = 0,5$ MPa);

ε_b = Deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão maior;

ε_a = Deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão básica.

3.2.3 Ensaio de flexão e ensaio de fadiga

Os ensaios de flexão simples sob carga centrada e ensaios de resistência à fadiga foram realizados nos corpos de prova prismáticos após 90 dias de cura, contados a partir da moldagem, pois o ensaio de fadiga demanda considerável tempo, ou seja, seria praticamente impossível testar todos os corpos de prova no mesmo dia. A quantidade específica de corpos de prova utilizada em cada ensaio e para cada traço está mostrada na Tabela 2.

Inicialmente, os testes estavam sendo realizados de acordo com a norma brasileira NBR 12142:2010 [12], que considera a carga aplicada em 4 pontos distintos e igualmente espaçados. No entanto, estes ensaios de fadiga aplicando flexão a quatro pontos estavam resultando na perda de muitos corpos de prova. Para evitar este problema, foram realizados ensaios de flexão simples sob carga centrada conforme apresentado na norma ASTM [13]. As vigotas foram posicionadas de forma a haver uma distância de 0,05 m de ambas as extremidades aos apoios, e o ponto de aplicação de carga no centro geométrico de uma das faces. O esquema estático da viga bi apoiada está apresentado na Figura 5. A Figura 6 mostra a máquina MTS-815 (Material Test System-815) utilizada nos testes.

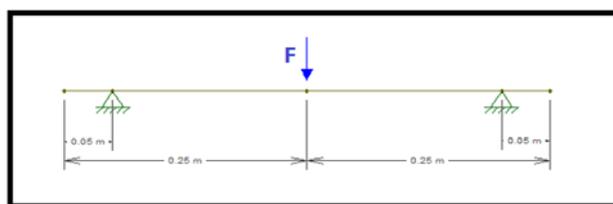


Figura 5: Posicionamento do corpo de prova e ponto de aplicação da força em relação aos apoios



Figura 6: Máquina de Ensaio Universal, MTS-815, propriedade do Depto. de Geotecnia da EESC/USP (São Carlos/SP)

O ensaio de resistência à fadiga foi realizado sob as condições previamente descritas. Cada corpo de prova foi submetido a um número de ciclos (n) de aplicação de tensões máximas ($\sigma_{\text{máx}}$) e mínimas ($\sigma_{\text{mín}}$) numa determinada frequência (f) até a ruptura. A frequência de aplicação de carga foi de 1 Hz. Para cada traço ensaiado, a tensão máxima aplicada foi determinada a partir do critério da Relação entre Tensões (RT), como mostra a equação 2, que corresponde à proximidade da tensão máxima aplicada no ensaio de fadiga com a tensão de ruptura, obtida no ensaio de flexão.

$$RT = \frac{\sigma_{\text{máx}}}{\sigma_r} \quad (2)$$

Na qual:

$\sigma_{\text{máx}}$ = tensão máxima aplicada no corpo de prova durante o ensaio de fadiga;

σ_r = tensão de ruptura do corpo de prova devido à flexão simples sob carga centrada;

Para os ensaios de fadiga foram analisados 12 corpos de prova para cada traço, divididos em 3 grupos para a análise de acordo com o critério das relações de tensões (RT), cujos valores escolhidos foram: 0,75; 0,80; 0,85. Inicialmente a RT foi de 0,75, como os ensaios estavam muito lentos, se optou por aumentar a relação de tensão para 0,80 e, posteriormente para 0,85.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos testes de compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à flexão estão organizados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados dos ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade

TRAÇO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPA)	DESVIO-PADRÃO	MÓDULO DE ELASTICIDADE MÉDIO (GPA)	DESVIO-PADRÃO	RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MPA)	DESVIO-PADRÃO
T1	32,34	± 1,26	35,758	± 0,900	4,69	0,28
T2	18,03	± 2,98	25,359	± 1,406	2,68	0,32
T3	29,7	± 1,93	32,078	± 1,122	4,25	0,41
T4	23,2	± 1,62	30,476	± 2,804	-	-
T5	24,1	± 2,12	30,503	± 0,910	-	-
T6	23,6	± 2,26	29,210	± 1,260	-	-
T7	25,9	± 2,93	31,151	± 1,444	-	-
T8	25,1	± 1,65	30,371	± 2,812	-	-

A partir dos resultados exibidos na Tabela 3, é possível observar que houve redução do módulo de elasticidade, portanto pode-se afirmar que, a um mesmo nível de tensão, dentro do regime elástico do material, o concreto com borracha deformará mais que o concreto sem borracha, o que pode ser favorável para determinadas aplicações, como quando o elemento está sujeito à impacto e cargas dinâmicas.

A Figura 7 mostra o gráfico da tensão média de ruptura calculada para os traços: concreto modificado com borracha (T2); concreto modificado com borracha e acrescido de cimento nas proporções previamente definidas (T3, T4, T5, T6, T7, T8).

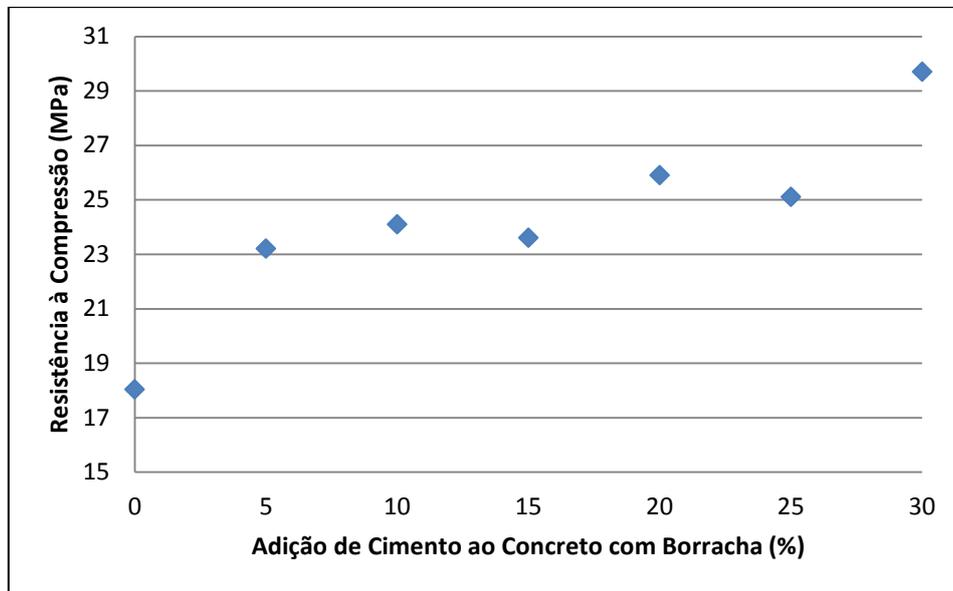


Figura 7: Gráfico da resistência à compressão para os concretos com adição de borracha

Em relação à resistência à compressão, foi observado que a adição de borracha no concreto, sem acréscimo de cimento, acarretou redução de 44% (Tabela 3). Com o acréscimo no consumo de cimento de 5% (T4) em relação ao traço T2, a variação no valor de tensão de ruptura foi igual a 28%. No entanto, o aumento no consumo de cimento de 10% e 15% (T5 e T6) causou pequena modificação de tensão em relação ao traço T4; podendo assim considerar os traços T4, T5 e T6 praticamente com mesma tensão de ruptura. Quando o aumento do consumo de cimento foi de 20%, ocorreu um acréscimo sensível na tensão de ruptura, e aumentando em 30% o consumo de cimento em relação ao traço convencional, o valor de tensão de ruptura se aproximou do valor do traço sem borracha (T1), mas ainda com valor 7% menor. Desta forma, constata-se que é necessário um expressivo aumento do consumo de cimento para que o concreto modificado com borracha apresente resistência equivalente ao concreto convencional.

A queda de resistência está de acordo com a literatura. Huang et al. [22] e Eiras et al. [17], também obtiveram queda da resistência com o acréscimo de borracha. Huang et al. [22] ao substituírem 15% do agregado graúdo por borracha obtiveram um decréscimo de 45% na resistência à compressão. Eiras et al. [17], acrescentaram, além da borracha, incorporador de ar. Com 40% de borracha em substituição ao agregado miúdo e 0,250% de incorporador de ar estes autores encontraram uma redução de 92,2 % na resistência à compressão em relação ao concreto de referência. Entretanto, nenhum dos autores não observaram o comportamento do material com o aumento do consumo de cimento.

Os resultados dos testes de flexão simples sob carga centrada estão mostrados na Tabela 3 para cada um dos 3 principais traços: T1 (de referência); T2 (com borracha); T3 (com borracha e acréscimo de 30 % de cimento, a fim de alcançar a mesma resistência do concreto sem borracha). A resistência à flexão apresentou um decréscimo de 43% para o concreto com borracha e sem acréscimo de cimento em relação ao concreto sem borracha. Com o acréscimo de 30% de cimento a resistência à flexão foi aproximadamente igual à da amostra de concreto sem borracha.

A queda dos resultados da resistência à flexão para o concreto com borracha também está de acordo com Eiras et al.[17], que acrescentaram, além da borracha, incorporador de ar. Com 40% de borracha em substituição ao agregado miúdo e 0,250% de incorporador de ar estes autores encontraram uma resistência

90,5% menor que a do seu concreto de referência. Assim como na pesquisa de Eiras et al.[17], na presente pesquisa a porcentagem da queda de resistência da compressão foi bem próxima da porcentagem de resistência à flexão.

Huang et al [22] obtiveram resistência à compressão e à tração indireta, entretanto a queda resistência à tração indireta foi de 23% bem menor que a da compressão, 45%.

Todos os corpos de prova atingiram a ruptura, no entanto a maioria dos corpos de prova do traço T3 apresentou um número de ciclos muito baixo. Para este traço, apenas 2 corpos de prova ensaiados com RT=0,85 foram considerados. A média de ciclos e o desvio padrão para cada traço, de acordo com a relação de tensão, é apresentada na Figura 8.

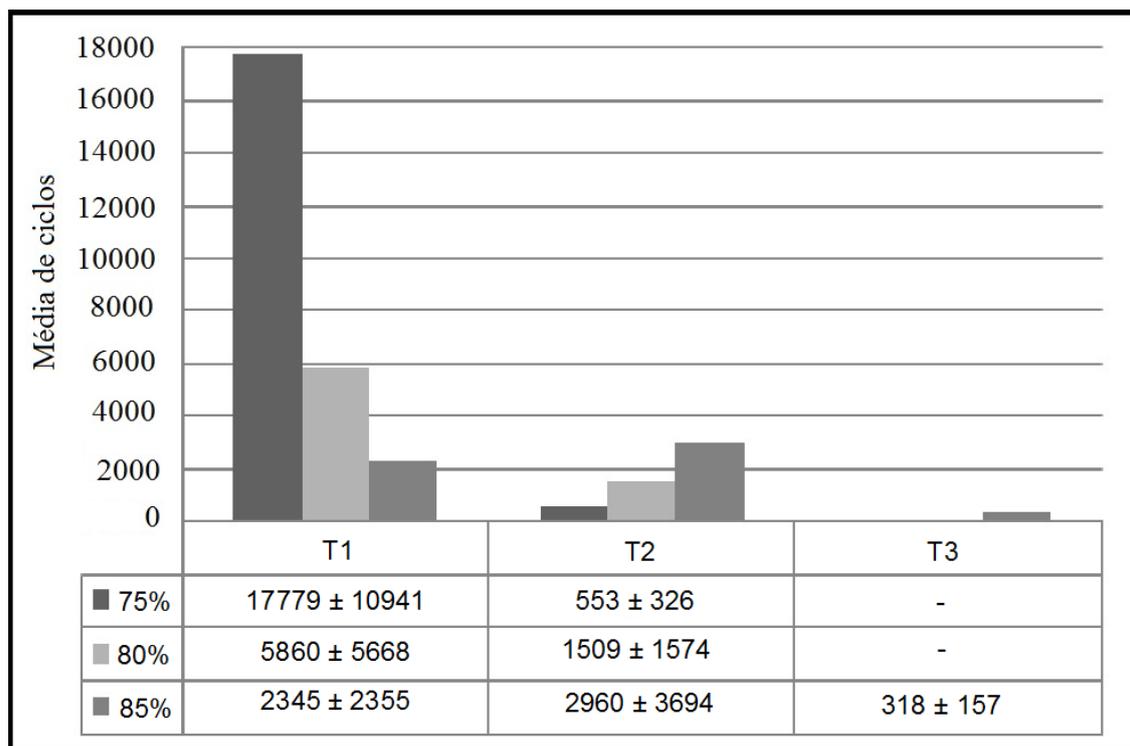


Figura 8: Resultados do ensaio de Fadiga

O gráfico da Figura 8 mostra que os corpos de prova ensaiados com o mesmo consumo de cimento, T1 e T2, a mistura sem borracha obteve maior desempenho médio em relação à fadiga para as relações de tensões iguais a 0,75 e 0,80. Com o aumento da relação de tensões para 0,85, o traço T2 apresentou melhor desempenho médio. Devido ao alto valor do desvio padrão, pode-se afirmar que este material não se mostrou sensível à variação da relação de tensões de 0,75 a 0,85, já o material sem borracha mostrou maior sensibilidade para essas variações na Relação entre Tensões, quando avaliado de 0,75 para 0,80 e 0,85. Também no ensaio de compressão e flexão sob carga centrada, o acréscimo de borracha aumentou o desvio padrão (Tabela 3). Por exemplo, no ensaio de flexão o traço T1, sem borracha, apresentou um desvio de 6% e T2, com acréscimo de borracha o desvio foi de 12%.

Além de o desvio mostrar-se maior com o acréscimo de borracha, este também foi maior para o ensaio de flexão em relação ao ensaio de compressão (Tabela 3). Por exemplo, para o corpo de prova sem borracha o desvio padrão foi de 4% para o ensaio de compressão e 6% para o ensaio de flexão com o mesmo material. Esse comportamento era esperado, já que o comportamento na flexão é ainda mais elasto-frágil. Tendo esse alto desvio padrão, pode ser que os corpos de prova à fadiga tenham rompido com um número de ciclos baixo devido à proximidade da tensão máxima aplicada com a tensão de ruptura (relação de tensões real próxima de 1,0).

Pode ser observado também que o traço T3 obteve o pior resultado dentre todos, mesmo para a RT = 0,85. Isto provavelmente aconteceu porque o acréscimo de cimento aumentou o módulo de elasticidade em relação ao T2, o que pode ter tornando o material mais rígido. Este material deve apresentar um maior índice

de vazios quando comparado ao T1, devido ao uso da borracha. Esta combinação de maior rigidez do material e maior índice de vazios pode ser a causa do fraco desempenho à fadiga.

As medições realizadas durante os testes de fadiga mostraram grande dispersão de resultados, mesmo para uma menor Relação entre Tensões, o que torna os resultados dos ensaios pouco conclusivos. Entretanto, as pesquisas mostram grande dispersão de resultados nos números de ciclos quando é realizado o ensaios de fadiga. As pesquisas de Cervo [14]; Graeff [18]; Qian et al. [25] também mostraram grande dispersão dos resultados para o ensaio de fadiga. Na Tabela 4, pode-se observar resultados de Cervo [14], para o concreto convencional saturado e ensaiado com frequência de 10Hz.

Tabela 4: Número de ciclos à fadiga, para amostras saturadas, com frequência de 10 Hz. (Cervo [14])

AMOSTRA	RELAÇÃO ENTRE TENSÕES	NÚMERO DE CICLOS (N)	LOG N
1	0,83	2030	3,307496
2	0,83	2100	3,322219
3	0,83	2900	3,462398
4	0,83	3730	3,571708
5	0,83	17420	4,241048
MÉDIA		5636±5924	3,750970

Conforme se observa na Tabela 4 a média foi de 5636 ciclos, o desvio padrão para estes corpos de prova é de 5924 ciclos. Comparando com os resultados do presente trabalho, para a relação de tensão igual a 0,85, cujos valores para o concreto de referência foi de 2345 ciclos e o concreto com borracha de 2960 ciclos, observa-se que o concreto de Cervo [14] obteve melhor desempenho. Entretanto, a relação de tensão de Cervo [14] foi menor e a frequência maior. Em relação à dispersão os resultados de Cervo [14] também apresentaram valores altos. Quanto à frequência, deve-se observar outra conclusão obtida por Cervo [14], em que uma frequência de 10 Hz atinge uma resistência à fadiga 96% superior àquela obtidas para frequência de 1 a 5 Hz. Uma ilustração desta conclusão pode ser vista na Figura 9.

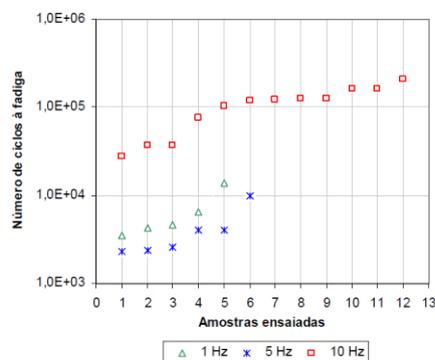


Figura 9: Número de ciclos à fadiga para a relação entre tensões $RT = 0,83$ e frequências de 1, 5 e 10 Hz (Cervo [14])

Portanto, conforme ilustrado na Figura 9, é de se esperar que uma frequência menor e uma relação de tensão maior tenha menor vida útil. As duas situações ocorreram no presente trabalho.

A Figura 10 apresenta os resultados dos ensaios de fadiga de Graeff et al. [18], onde o número de ciclos é apresentado em forma de logaritmo em função das relações de tensão. A frequência usada por Graeff et al. [18] foi de 15 Hz.

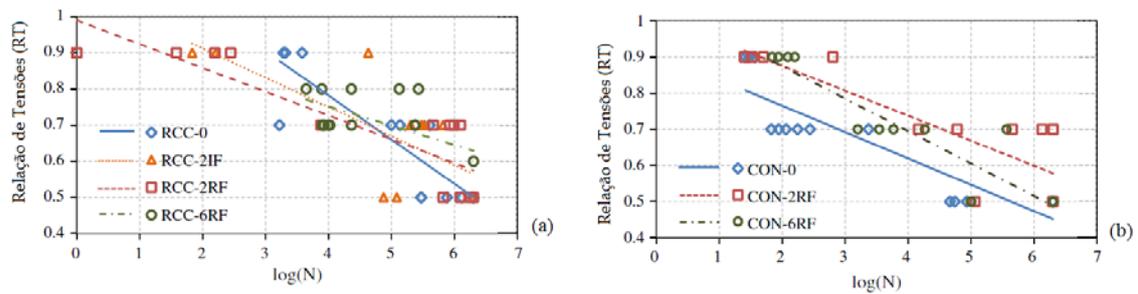


Figura 10: Relação de Tensões versus log do número de ciclos: (a) para o concreto compactado, (b) para o concreto plástico. (Graeff et al. [18])

Na Figura 10, RCC é o concreto compactado, CON é o concreto plástico, 0 indica que não foi acrescentada fibra de aço, os números 2 e 6 indicam as porcentagens em massa (em função da massa de concreto) de fibras de aço que foram acrescentadas, IF é a sigla para a fibra industrial e RF para a fibra reciclada de pneus usados. Observa-se que o número de ciclos N está em log, portanto, o número 1 representa 10 ciclos, o número 2, 100 ciclos, o número 3, 1000 ciclos e assim por diante. Então, observando, por exemplo, o CON-2RF para a relação de tensões de 0,7 se vê que houve corpo de prova que rompeu com aproximadamente 10.000 ciclos e outro com mais de 1.000.000 de ciclos, indicando desvio padrão muito alto, aparentemente maior que o do presente trabalho. A grande dispersão também pode ser notada nos concretos com fibra o mesmo pode-se observar para o RCC.

Ainda observando a Figura 10 e comparando o concreto de referência do presente trabalho (Figura 8), para a relação de tensão de 0,75, com o concreto de referência de Graeff et al [18] (CON 0), para relação de 0,70, o concreto do presente trabalho obteve melhor desempenho, embora a frequência de Graeff et al [18] fosse maior e a relação de tensão menor. O mesmo ocorreu ao fazer a comparação destes concretos para a relação de tensão de 0,9 de Graeff et al [18] com 0,85% do presente trabalho, entretanto neste caso, embora a frequência de Graeff et al [18] fosse maior, a relação de tensão do presente trabalho foi menor.

O concreto com fibra e relação de tensão de 0,7, utilizado por Graeff et al [18], obteve melhor resultado que o concreto com borracha e relação de tensão de 0,75 do presente trabalho. Entretanto a frequência da literatura citada foi maior e a relação de tensão menor.

Na Figura 11 estão apresentados os resultados do ensaio de fadiga de Qian et al [25] para o concreto flexível reforçado com fibras (ECC). Qian et al [25] também obtiveram grande espalhamento nos resultados e os resultados do ECC maior espalhamento quando comparado com o concreto convencional da Figura 11. Segundo o autor este maior espalhamento do ECC deve ser pela distribuição não uniforme das fibras.

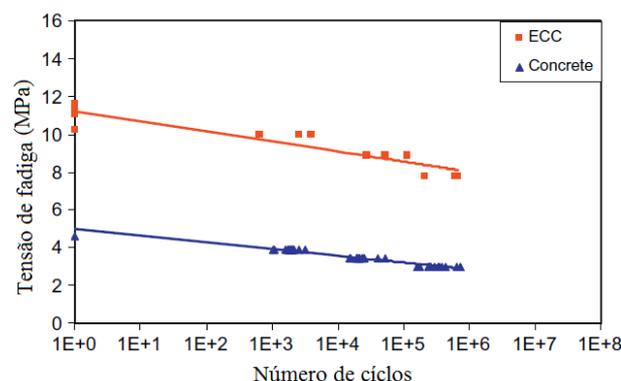


Figura 11: Relação de tensão de fadiga e número de ciclos para o concreto flexível e o concreto plástico. (Qian et al [25])

Tanto o presente trabalho quanto os trabalhos da literatura mostraram grande dispersão de resultados. De acordo com a literatura, esta dispersão pode ser explicada porque o concreto é um material heterogêneo, sendo assim a tensão de ruptura varia de um corpo de prova para o outro e, como não é possível ensaiar o mesmo corpo de prova que foi rompido, para determinar a resistência à flexão simples sob carga centrada, a relação entre tensões varia ainda mais de uma amostra para a outra. Talvez, devido a este problema, alguns autores optam por aplicar tensões mais baixas, com ciclos pré-estabelecidos, e apresentam medidas de deformação sem ruptura dos corpos de prova [16, 19, 23].

5. CONCLUSÕES

Este trabalho analisou as alterações do comportamento do concreto elaborado a partir da substituição de 10% do volume de areia (agregado miúdo) por borracha de pneu triturado.

A comparação dos resultados obtidos mostrou que a adição de borracha provoca significativa redução na resistência mecânica do concreto. Para obter a mesma resistência do concreto convencional, foi necessário acrescentar cerca de 30% a mais de cimento ao concreto com borracha, ou seja, foi necessário um expressivo aumento do consumo de cimento para que o concreto modificado com borracha apresentasse resistência equivalente ao concreto convencional.

Para a análise da fadiga, foi considerado o critério das relações de tensões (RT). Os resultados mostraram que para uma menor relação de tensão, o concreto sem borracha apresenta um número maior de ciclos antes da ruptura do que o concreto com borracha. Com o aumento dos níveis da relação de tensões, o concreto com borracha, com mesmo consumo de cimento que o concreto convencional apresentou melhor desempenho médio. Isto deve ter ocorrido, pois com uma relação de tensões maior, o concreto será mais solicitado à deformação e o concreto com borracha deve ter maior capacidade de deformação antes da ruptura.

Devido ao alto valor do desvio padrão nos ensaios de fadiga, não foi possível observar se o concreto com borracha se mostrou sensível à variação de relação de tensões, diferente do material sem borracha que mostrou maior sensibilidade para essas mesmas variações (75%, 80% e 85%). Foi observado também que o concreto com borracha e maior consumo de cimento obteve o pior resultado dentre todos. Isso deve ter ocorrido porque o acréscimo de cimento aumentou o módulo de elasticidade tornando o concreto mais rígido, e a presença da borracha deve ter aumentado o índice de vazios. Além disso, este aumento no consumo de cimento inviabiliza a proposta de redução da poluição pelo aproveitamento das sobras de pneus descartados, além de encarecer o produto final.

Por outro lado, a redução do módulo de elasticidade, constatada nos testes realizados com o concreto com borracha sem acréscimo de cimento, mostra que a presença da borracha aumenta a deformação para um mesmo nível de tensão, o que é bastante desejável em situações que envolvem ações de impacto e vibrações.

Considerando a importância da reciclagem do pneu para a redução da poluição ambiental, e também as vantagens do concreto mais dúctil, acredita-se que este estudo merece ser aprofundado. Destacam-se 2 propostas de continuidade da pesquisa: 1. Aplicação de borracha submetida a tratamento prévio para ser tão compatível ao concreto quanto a areia; 2. Desenvolvimento de modelos teóricos computacionais, que permitam a análise do concreto com diferentes composições de traço, e também sob diferentes solicitações. Em ambos os casos, a viabilidade econômica e ecológica deste concreto alternativo pode ser investigada a partir da caracterização quanto às suas propriedades térmica, acústica e de amortecimento.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776 (1986): Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1986.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67 (1998): concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 30 (2001): agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 (2003): agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 (2003): procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, 2003.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM ISO 7500-1 (2004): materiais metálicos calibração de máquinas de ensaio estático uniaxial. Parte 1: máquinas de ensaio de tração/compressão-

calibração do sistema de medição da força, 2004.

- [7] NORMA MERCOSUL NM 45:2006: Determinação da massa unitária e do volume de vazios.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 (2007): ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522 (2008): determinação do módulo elástico de elasticidade à compressão, 2008.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52 (2009): agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente, 2009.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53 (2009): agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, 2009.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142 (2010): concreto: determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.
- [13] American Society for Test Materials: standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with three point loading), 2010.
- [14] CERVO, T. C. *Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação*. São Paulo, Tese de D.Sc., Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.
- [15] CONAMA (2009). Resolução nº 416, 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e da outras providências.
- [16] DONG, J. F., WANG, Q.Y., GUAN, Z.W. “Structural behaviour of RC beams externally strengthened with FRP sheets under fatigue and monotonic loading”, *Magazine Engineering Structures*, v. 41, pp.24-33, 2012.
- [17] EIRAS, J. N., SEGOVIA, F., BORRACHERO, M.V., *et al.* “Physical and Mechanical Properties of Foamed Portland Cement Composite Containing Crumb Rubber From Worn Tyres”, *Material and Design*, v.59, pp. 550-570, 2014.
- [18] GRAEFF, A. G., PILAKOUTAS, K., NEOCLEOUS, K., *et al.* “Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres”, *Magazine Engineering Structures*, v. 45, 2012.
- [19] HAN, K. B., HONG, S.N., PARK, S.K, *et al.* “RC slabs repaired and strengthened by alumina/polymer mortar and prestressing strands in the tension zone: experimental investigation under static and fatigue loadings”, *Mechanics of Composite Materials*, v.48, n.5, 2012.
- [20] HEEDE, P. V., BELIE, N. “Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and ‘green’ concretes: Literature review and theoretical calculations”, *Cement & Concrete Composites*, v.34, n.4, 2012.
- [21] HELENE, P. R. L., TERZIAN, P. *Manual de Dosagem e controle do concreto*, Editora Pini, Brasília, DF, 1992.
- [22] HUANG B., LI, G., PANG, S., *et al.* “Investigation into waste tire rubber-filled concrete”, *Journal of Material In Civil Engeneering*, v.16, n.3, pp.187–194, 2004.
- [23] LIN, W. YODA, T., TANIGUCHIN, N., *et al.* “Fatigue tests on straight steel–concrete composite beams subjected to hogging moment”, *Journal of Constructional Steel Research*, v.80, pp.42-56, 2012.
- [24] MODRO, N.L.R., MODRO, N.R, OLIVEIRA, A.P. N., *et al.* “Avaliação de Concreto de Cimento Portland contendo Resíduos de PET” , *Revista Matéria*, v. 14, n. 1, pp. 725-736, 2009.
- [25] QIAN, S.Z., LI, V.C., ZHANG, H., *et al.* “Life cycle analysis of pavement overlays made with Engineered Cementitious Composites”, *Cement & Concrete Composites*, v.35, n.1, 2012.