

# Avaliação do comportamento estrutural de protótipos de lajes pré-moldadas com concreto com resíduo de borracha de pneu

*Structural behavior evaluation of precast slabs prototypes made with tire rubber residue concrete*

Ana Paula Moreno Trigo  
Jorge Luís Akasaki  
José Luiz Pinheiro Melges  
Jefferson Sidney Camacho

## Resumo

**N**o Brasil, uma significativa parte do volume de concreto produzido é usada em pilares, vigas e lajes das edificações. Desse modo, pensa-se na possibilidade de substituir parcialmente o agregado do concreto por materiais que sejam econômica e ecologicamente viáveis. Este trabalho apresenta um estudo para o reaproveitamento do resíduo proveniente da recauchutagem de pneu, já que este se mostra promissor por ser gerado em abundância. A proposta é utilizá-lo como parte do agregado de concreto para lajes de forro, uma vez que essas lajes não demandam ações elevadas, quando comparadas às lajes de piso. Sendo assim, foram ensaiados, à flexão, dois protótipos de lajes pré-moldadas treliçadas unidirecionais, sendo uma delas constituída parcialmente por resíduo de borracha de pneu, e o outro não. Através dos deslocamentos verticais, das deformações no concreto e na armadura, e dos modos de ruína observados nos ensaios, foi possível avaliar o comportamento dessas lajes e verificar que a adição do resíduo de borracha de pneu não inviabiliza tecnicamente o seu uso e apresenta vantagens quanto ao aspecto ambiental, embora seja menos eficiente do ponto de vista estrutural e conduza a um maior consumo de cimento.

Ana Paula Moreno Trigo  
Escola de Engenharia de Ilha Solteira  
Universidade Estadual Paulista  
Alameda Bahia, 550  
Ilha Solteira- SP - Brasil  
CEP 15385-000  
Tel.: (18) 3743-1213  
E-mail:  
amorenotrigo@yahoo.com.br

Jorge Luís Akasaki  
Escola de Engenharia de Ilha Solteira  
Universidade Estadual Paulista  
Tel.: (18) 3743-1213  
E-mail:  
akasaki@dec.feis.unesp.br

José Luis Pinheiro Melges  
Escola de Engenharia de Ilha Solteira  
Universidade Estadual Paulista,  
Tel.: (18) 3743-1263  
E-mail:  
jlmelges@dec.feis.unesp.br

Jefferson Sidney Camacho  
Escola de Engenharia de Ilha Solteira  
Universidade Estadual Paulista,  
Tel.: (18) 3743-1212  
E-mail: jsc@dec.feis.unesp.br

Recebido em 15/05/08  
Aceito em 18/12/08

**Palavras-chave:** Concreto armado. Laje pré-moldada treliçada. Resíduo de pneu. Ensaios.

## Abstract

*A significant part of concrete produced in Brazil is used to make columns, beams and slabs in building structures. Considering that the inclusion of residues in the concrete can produce a reduction of the structural element strength, and, considering that the roof slab usually does not demand higher actions than the floor slab, it is possible to partially replace the concrete aggregate for economically and ecologically materials. The aim of this work is to present a recycling alternative for tire rubber from retreading process, using it as part of the concrete aggregate in roof slabs. Two unidirectional slab prototypes with lattice joist were tested to the flexure. One of them had some tire rubber residue and the other had not. Vertical displacements and concrete and reinforcement strains were measured with comparing clocks and electric strain gages, respectively. Based on these results and on the kind of the slab collapse, a structural analysis was made. It was observed that the addition of the rubber residue does not make impracticable its technical use and presents advantages for the environmental aspect, though it is structurally less efficient and leads to a higher cement consumption.*

**Keywords:** Reinforced concrete. Precast slab with lattice joist. Tire rubber. Tests.

## Introdução

O concreto armado é considerado o material estrutural mais aplicado em obras civis no mundo (DIAS, 2004), sendo utilizado em várias estruturas, como muros de arrimo, reservatórios, pontes e edificações compostas de pilares, vigas e lajes.

As lajes de concreto armado que mais vêm sendo empregadas nas edificações residenciais e comerciais de pequeno e médio porte são as lajes pré-moldadas treliçadas (PEREIRA, 2001), em lugar das lajes maciças. A grande vantagem da utilização desse tipo de laje em relação à laje maciça é a redução da quantidade de formas e de escoramento, diminuindo o custo total da edificação, além de ser de fácil manuseio e montagem. Aliada às suas características geométricas, há a redução do volume de concreto (DROPPA JÚNIOR, 1999).

Desenvolvida na Europa e comumente chamada de laje treliçada, essa laje é executada a partir de vigotas pré-moldadas com armadura em forma de treliça, elementos de enchimento e capa de concreto (Figura 1).

A vigota pré-moldada treliçada é obtida com a colocação de uma armadura treliçada em uma sapata de concreto, adicionando, se necessário, uma armadura complementar (Figura 2a). Devem ser dimensionadas para suportar os esforços solicitantes após a concretagem da laje e ter a rigidez necessária para resistir ao transporte e montagem. Conforme a NBR 14862:2002, a

armadura treliçada é uma estrutura formada por sistema de eletrofusão, de modo a formar duas treliças unidas pelo vértice (Figura 2b). As diagonais proporcionam rigidez ao conjunto e boas condições de transporte e manuseio. Essas treliças são padronizadas por um código TR seguido dos seguintes dígitos: os dois primeiros representam a altura da treliça, em centímetros, e os três últimos representam as bitolas, em milímetros, do banzo superior, do sinusóide e do banzo inferior respectivamente, sem a consideração das casas decimais.

Como a principal característica desse tipo de laje é a diminuição da quantidade de concreto na região tracionada, pode-se usar um material de enchimento que, além de reduzir o consumo de concreto, alivia o peso próprio da estrutura. O material de enchimento deve ser o mais leve possível, mas com resistência suficiente para suportar as operações de execução. Normalmente são utilizados blocos cerâmicos vazados (lajotas cerâmicas), blocos de concreto celular ou blocos de poliestireno expandido (isopor). A capa de concreto normalmente é confeccionada utilizando-se concreto convencional, sem nenhum tipo de adição. Entretanto, com o crescimento da conscientização ecológica e das preocupações com o meio ambiente, torna-se atraente a inserção de resíduos inertes nesse concreto, uma vez que, além de diminuir o consumo de matérias-primas, possibilita ainda o descarte de resíduos, favorecendo duplamente a questão ambiental.

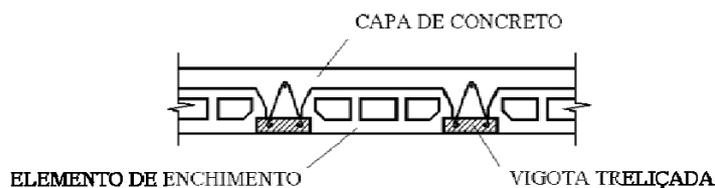


Figura 1 - Seção transversal de laje pré-moldada treliçada

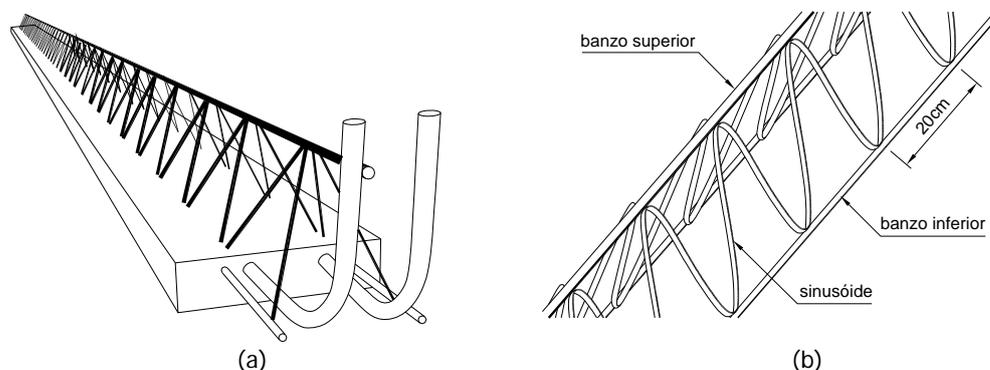


Figura 2 - Vigota pré-moldada treliçada (a) e armadura treliçada (b)

Um material que constitui um problema ambiental no mundo, mas que pode ser reaproveitado, é o resíduo de borracha proveniente da recauchutagem dos pneus inservíveis (MARQUES, 2005).

O resíduo de pneu é um problema crescente e grave de saúde pública, particularmente em países de climas tropicais, já que empilhados servem de criadouros para mosquitos transmissores de dengue, febre amarela e malária. A queima desse resíduo libera óleo pirolítico, que contém produtos químicos tóxicos e metais pesados capazes de produzir efeitos adversos à saúde, como perda de memória, deficiência no aprendizado, supressão do sistema imunológico, danos nos rins e fígado. Esse óleo pode contaminar o solo e penetrar em lençóis freáticos, provocando também a contaminação da água. Estudos demonstram que a poluição de águas causada pelo escoamento do óleo derivado da queima de pneus pode durar até 100 anos (MATTOS, 2006). Lund (1993) menciona que os pneus não podem ser dispostos em aterros sanitários, pois, devido à dificuldade de compactação, eles voltam à superfície depois de determinado tempo, reduzindo significativamente a vida útil dos aterros. Por outro lado, a trituração, que resolveria o problema da compactação, é um processo caro.

Segundo a Associação Nacional das Indústrias Pneumáticas (ANIP), de acordo com uma pesquisa realizada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), da Secretaria de Ciência, Tecnologia, Desenvolvimento Econômico e Turismo do Estado de São Paulo (USP, 2007), cerca de 22 milhões de pneus são trocados anualmente no país. Desse montante, 46,8% são pneus usados que podem retornar ao mercado para serem ainda utilizados nos veículos ou submetidos a algum tipo de reforma, e 53,2% são pneus inservíveis, que não têm mais utilização veicular. Com relação aos pneus inservíveis, 26,5% têm destinação ambientalmente adequada e regulamentada, transformando-se em combustível de fábricas de cimento, solados de sapatos e tapetes para carros. Uma alternativa para o reaproveitamento do resíduo de borracha na construção civil pode estar na sua utilização em materiais à base de cimento, que, além de satisfazer às crescentes preocupações com relação à disposição ambiental de detritos, economiza reservas finitas de agregados naturais. Pisos, blocos e guias são exemplos de artefatos de concreto que incorporam o resíduo de borracha de pneu. Segundo a ANIP, esses produtos tornam-se mais leves. Isso e o ganho de produtividade na instalação, assim como a redução nos custos de transporte, são diferenciais competitivos.

Com base nas propriedades elásticas conferidas pelo resíduo de borracha às misturas elaboradas com cimento, Fattuhi e Clark (1996), Santos (2005) e Topçu e Avcular (1997) sugerem aplicações em estruturas sujeitas aos efeitos de impacto, como, por exemplo, barreiras de proteção de rodovia, e em situações favorecidas pela baixa massa unitária da mistura, como, por exemplo, lajes de forro.

## Desenvolvimento do trabalho

O resíduo de borracha de pneu usado neste trabalho, cedido pela empresa Regigant – Recuperadora de Pneus Gigantes Ltda., foi obtido a partir da raspagem da banda de rodagem de pneus inservíveis, durante o processo de recauchutagem. Em seguida, foi peneirado em um agitador mecânico e separado de impurezas, como, por exemplo, fios de nylon e aço. A Tabela 1 apresenta o jogo de peneiras utilizado, as porcentagens retidas para cada faixa de resíduo e as suas respectivas denominações. Do volume total de resíduo de borracha fornecido, apenas 2% aproximadamente foi descartado, sendo esse material correspondente ao retido na peneira de abertura de malha de 6,3 mm.

A Figura 3 (a) apresenta uma amostra do resíduo de borracha após o peneiramento. A seguir, foram realizados os ensaios de análise granulométrica (NBRNM 248:2003) e da determinação das massas específicas absoluta (NBRNM 52:2003) e aparente (NBRNM 53:2003) dos materiais envolvidos no trabalho: areia, brita intermediária entre 0 e 1, e resíduo de borracha. Comparando-se à distribuição granulométrica da areia, pode-se notar que aproximadamente 15% do resíduo apresenta granulometria de uma areia média; outros 15% apresentam granulometria de uma areia grossa; e o restante apresenta granulometria superior à de uma areia grossa (Figura 3 (b)).

Foram feitas três diferentes dosagens de concreto denominadas de:

- (a) CSR – E 32: concreto sem resíduo, confeccionado com cimento CP II E 32 e usado na capa dos protótipos de lajes;
- (b) CCR – E 32: concreto com resíduo, confeccionado com cimento CP II E 32 e usado na capa dos protótipos de lajes. Nesse concreto, 10% do agregado miúdo, em volume, foram substituídos por resíduo de borracha;
- (c) CSR – ARI: concreto sem resíduo, confeccionado com cimento CP V ARI Plus e usado nas vigotas treliçadas dos protótipos de lajes.

Peneiras normais e auxiliares		% Retida	Denominação neste trabalho	Observação
Denominação da ABNT	Abertura (mm)			
1/4"	6,3	1,9	B. muito grossa	Não foi utilizada
Nº 8	2,38	45,9	Borracha grossa	-
Nº 16	1,19	27,2	Borracha média	-
Fundo	0,075	25,0	Borracha fina	-

Tabela 1 - Classificação granulométrica do resíduo de borracha de pneu

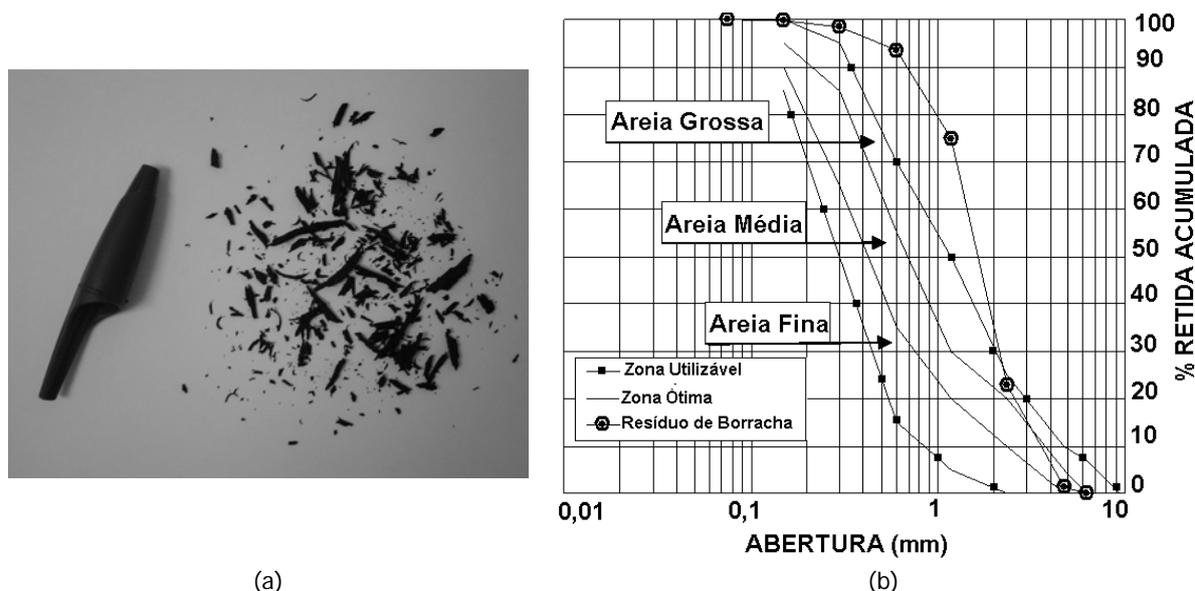


Figura 3 - Amostra de resíduo de borracha de pneu (a) e sua distribuição granulométrica (b)

O método de dosagem usado, desenvolvido pela Companhia Energética de São Paulo (CESP), baseia-se na porcentagem de areia necessária para envolver todo o agregado graúdo e dar ao concreto boa trabalhabilidade. Para cada dosagem mencionada anteriormente, foram feitos três traços a partir de três relações entre água e cimento ( $a/c$ ), com o objetivo de se obter uma relação  $a/c$  correspondente a uma resistência mínima de 20 MPa, exigida pela NBR 14859-1:2002 (TRIGO, 2008).

Para os fabricantes de vigotas treliçadas, é interessante que as peças pré-moldadas sejam desmoldadas o mais rápido possível, para diminuir o tempo de execução da laje. Com base nesse interesse é que foi escolhido o cimento CP V ARI Plus, já que ele apresenta alta resistência nas primeiras idades e possibilita tal desforma. O cimento CP II E 32 foi escolhido em função de seu maior emprego e de sua maior facilidade de aquisição na região noroeste do Estado de São Paulo.

Após a dosagem, os concretos foram caracterizados quanto à massa específica e teor de ar incorporado (NBRNM 47:2002), resistência à

compressão (NBR 5739:2007), resistência à tração (NBR 7222:1994) e módulo de elasticidade (NBR 8522:2003).

Foram estudados dois protótipos de laje, sendo um deles sem resíduo, denominado PSR, e o outro com resíduo, denominado PCR. Ambos foram constituídos por duas vigotas pré-moldadas treliçadas de 210 cm de comprimento, lajotas cerâmicas e capa de concreto. A seção transversal em “duplo T” é mostrada na Figura 4.

Na capa, é recomendada, segundo a NBR 14859-1:2002, a disposição de uma armadura de distribuição, nas direções transversal e longitudinal, composta de barras de aço de pequeno diâmetro ou em tela soldada, para o controle da fissuração e para a distribuição das tensões oriundas de ações concentradas. Essa norma recomenda, para aços classe CA 50 e CA 60, uma área de aço mínima de 0,6 cm<sup>2</sup>/m e pelo menos três barras por metro. Sendo assim, considerando-se um cobrimento lateral das armaduras igual a 2,5 cm, foi adotada, na direção transversal, uma armadura composta de 11 barras de diâmetro igual a 4,2 mm, de aço CA 60, espaçadas a cada 20,5 cm. Na direção longitudinal,

ainda com base na NBR 14859-1:2002, por estarem próximas à borda comprimida, considerou-se que as barras dos banzos superiores da treliça fizeram parte da armadura de distribuição, sendo necessário adicionar uma barra com diâmetro igual a 6,3 mm, de aço CA 50, conforme mostrado na Figura 4.

A fim de mensurar a deformação que ocorreria na armadura durante o ensaio de flexão, foi feita a instrumentação da armadura da treliça TR 08644 com dois extensômetros elétricos posicionados nos banzos inferiores de cada treliça. Em seguida, as vigotas foram moldadas utilizando-se o concreto CSR – ARI e as treliças já instrumentadas. Após 24h, as vigotas foram desmoldadas e permaneceram em câmara úmida por 7 dias. Decorrido esse período, elas foram empregadas na composição dos protótipos.

Os protótipos de laje foram confeccionados no Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural (NEPAE), da UNESP – Campus de Ilha Solteira. Após serem montados no chão, sobre uma lona plástica, foram feitos o umedecimento do conjunto, o lançamento dos concretos CSR – E 32 e CCR – E 32, o adensamento deles com vibrador de imersão e o posterior acabamento da superfície dos protótipos. A cura foi realizada em condição ambiente, no próprio local de moldagem, pelo período de 7 dias.

A manutenção da umidade foi feita por meio de constante aspersão de água. Essas etapas são mostradas na Figura 5.

Os dois protótipos de laje foram ensaiados à flexão, aos 28 dias de idade. Um total de 27 corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 10 cm x 20 cm (CPs) foram rompidos, sendo 9 CPs para cada dosagem de concreto (CSR-32, CCR-32 e CSR-ARI). Desses 9 CPs, 3 foram usados no

ensaio de resistência à compressão, 3 no ensaio de resistência à tração por compressão diametral e 3 no ensaio de módulo de elasticidade. Tais ensaios tiveram por finalidade caracterizar os concretos e averiguar se eles atendiam à NBR 14859-1:2002 quanto à resistência característica à compressão mínima de 20 MPa, aos 28 dias de idade.

Antes de serem ensaiados à flexão, os protótipos receberam uma pintura à base de cal para melhor visualização das fissuras que surgiriam durante o ensaio. Dois extensômetros elétricos foram colados na face superior de cada protótipo.

A Figura 6 mostra a posição dos extensômetros no concreto e na armadura. Além disso, foi preciso marcar as posições de apoio e de aplicação de carga, fixar dois suportes acrílicos, sendo um em cada extremidade central do vão, destinados a servir de apoio para os relógios comparadores, e, por fim, transportar os protótipos até o local de ensaio, com o auxílio da ponte rolante.

As informações de deslocamento vertical máximo (flecha) e de deformação do concreto e da armadura foram coletadas utilizando-se o sistema de aquisição de dados DAQbook 120, da Iotech, com interface com o programa DASyLab 5.0. Com base nos resultados obtidos, pôde-se avaliar a influência da adição do resíduo de borracha no comportamento dos protótipos.

O aparato usado nos ensaios de flexão, mostrado na Figura 7(a), foi composto por dois cilindros hidráulicos distanciados entre si de 60 cm, duas células de carga com capacidade de 100 kN cada uma, dois perfis “I” de dimensões 100 cm x 8 cm x 1 cm, usados para aplicar o carregamento, dois roletes de aço com diâmetros iguais a 25 mm, que funcionaram como apoios móveis, e duas bases de aço. A Figura 7(b) mostra o esquema estático usado para esses modelos.

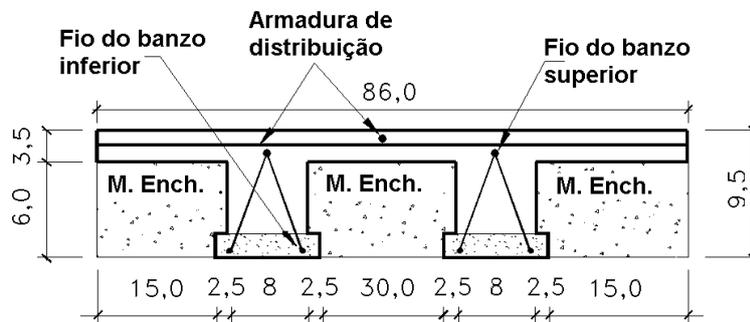
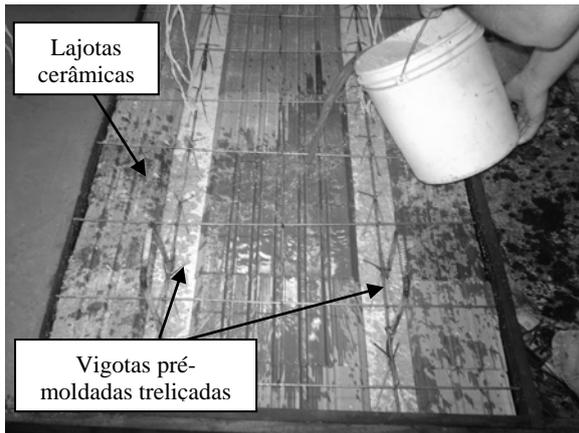


Figura 4 - Seção transversal dos protótipos: dimensões em centímetros e comprimento igual a 210 cm



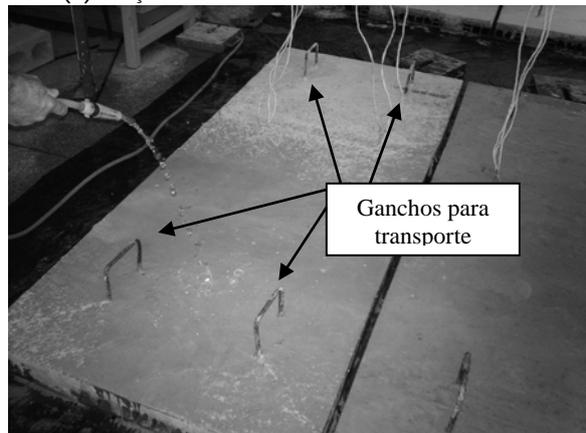
(a) umedecimento do conjunto



(b) lançamento e adensamento do concreto

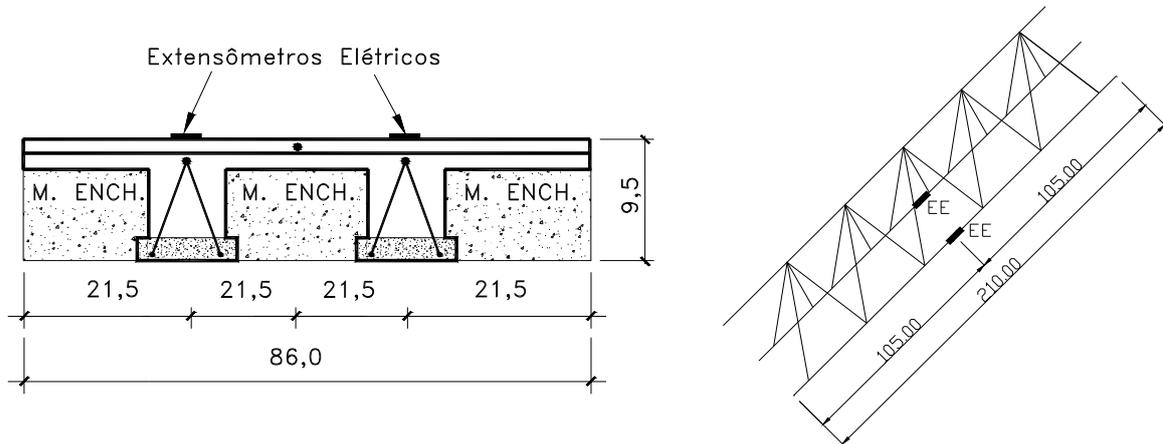


(c) acabamento da superfície



(d) cura realizada com aspersão de água

Figura 5 - Etapas referentes à confecção dos protótipos PSR e PCR



Nota: dimensões em centímetros

Figura 6 - Extensômetros elétricos EE posicionados no concreto e na armadura

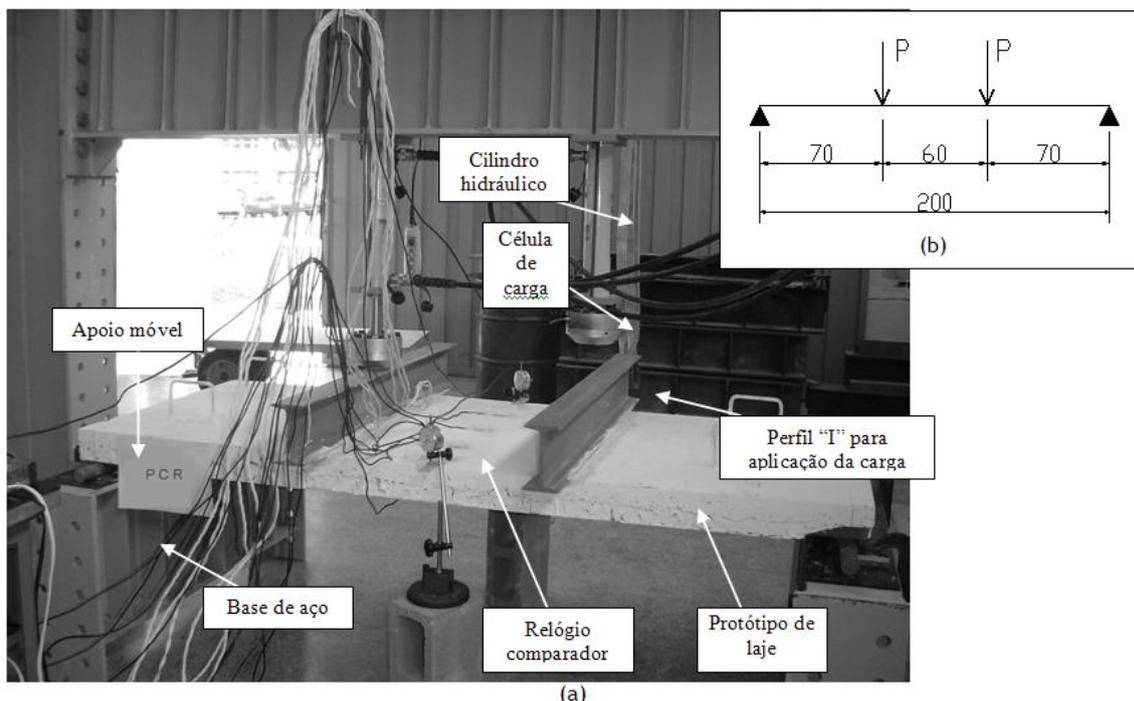


Figura 7 - Aparato para o ensaio de flexão (a) e esquema estático dos modelos ensaiados, com dimensões em centímetros (b)

O procedimento empregado no ensaio à flexão é descrito na seqüência:

(a) primeiramente foram feitos o posicionamento e o nivelamento do protótipo colocado sobre as bases de aço e roletas, de modo a se obter um vão teórico igual a 200 cm;

(b) a célula de carga e os relógios comparadores foram instalados e conectados ao sistema de aquisição de dados;

(c) para cada protótipo foram feitos dois ciclos de pré-carga visando à acomodação deles, carregando até 10% de sua carga de ruína, na velocidade de 5 kgf/s, e descarregando na mesma velocidade;

(d) para que a região central do protótipo estivesse sob flexão pura, sem a influência do esforço cortante, foram aplicadas cargas distribuídas em linha nas posições indicadas na Figura 7(b), na velocidade de 5 kgf/s;

(e) durante os ensaios, com o auxílio de uma lupa e de um pincel atômico, foram feitos os registros do surgimento e desenvolvimento das fissuras que ocorreram nas superfícies inferior e superior do protótipo;

(f) os protótipos foram ensaiados até o instante em que, embora houvesse tentativa de aplicação de carregamento, eles só apresentavam aumento de deformação, caracterizando, desse modo, uma ruína do tipo dúctil.

## Resultados, análise e discussão

Observam-se, na Tabela 2, os resultados obtidos dos ensaios de granulometria e de massa específica dos materiais. Devido à diferença de massa específica entre a borracha e o agregado convencional, o ensaio de granulometria foi feito em uma amostra de 250 g do material, e não em uma de 1 Kg, como recomenda a NBRNM 248:2003. Para a realização do ensaio de determinação da massa específica do resíduo de borracha de pneu (NBRNM 52:2003), foi necessário usar álcool, já que a densidade da borracha é próxima à da água.

Já nas Tabelas 3 e 4, podem ser observadas, respectivamente, as quantidades de materiais utilizadas em cada dosagem experimental e as médias aritméticas dos resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, massa específica e teor de ar incorporado. As características da lajota cerâmica, da armadura de distribuição e da armadura treliçada são apresentadas nas Tabelas 5, 6 e 7 respectivamente.

São mostrados, nas Figuras 8 e 9, os resultados comparativos entre os protótipos de laje sem resíduo de borracha (PSR) e com resíduo (PCR), considerando-se:

(a) o valor do deslocamento vertical, representado pela relação flecha/vão, dada pela média dos relógios comparadores (Figura 8);

(b) a deformação no concreto, dada pela média das deformações observadas nas nervuras (Figura 9(a));

(c) a deformação na armadura, dada pela média das deformações observadas na treliça (Figura 9(b)).

Nas Figuras 10 e 11 são exibidas, respectivamente, as fissuras ocorridas nos protótipos PSR e PCR.

Com relação à Figura 8, cabe mencionar que as curvas dos modelos PSR e PCR são apresentadas, respectivamente, até os momentos fletores de 288,0 kN.cm e 200,6 kN.cm, correspondentes aos instantes em que os relógios comparadores foram removidos, para segurança do equipamento. Embora sem o valor do deslocamento

correspondente, incluíram-se também, na Figura 8, os valores dos respectivos momentos de ruína.

Com base nas Tabelas 3 e 4, percebe-se que, para que o protótipo PCR (com resíduo) apresentasse uma resistência próxima de 20 MPa, foi necessário aumentar a quantidade de cimento, quando comparada à quantidade usada no protótipo PSR (sem resíduo), com resistência também prevista para 20 MPa. Destaca-se que, mesmo apresentando um consumo 18% maior de cimento, a resistência do protótipo PCR foi 18,5% menor que a do PSR. Entretanto, tal aumento no consumo e redução na resistência não inviabiliza a utilização do resíduo, já que o teor de argamassa de 55% está próximo do ideal, entre 52% e 54%.

Material	Diâmetro Máximo (mm)	Módulo de Finura	Massa Específica Absoluta (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )
Areia	2,38	2,51	2,654	1,488
Brita entre 0 e 1	19,0	6,41	2,900	1,542
Resíduos	4,75	3,91	1,090	0,348

Tabela 2 - Granulometria e massa específica dos materiais

Traço	Teor de Argamassa (%)	Consumo de Material em kg/m <sup>3</sup>					Abatimento (mm)
		Cimento	Brita	Areia	Borracha	Água	
CSR – E 32 (1:6,6)	53,6	319,1	1.060,0	844,5	–	198,0	78,0
CCR – E 32 (1:5,4)	54,8	377,1	1.030,9	734,4	33,5	200,0	79,0
CSR – ARI (1:6,8)	53,6	310,6	1.054,9	845,9	–	202,0	77,0

Tabela 3 - Dosagem dos concretos usados nos protótipos de laje

Traço	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de Ar Incorporado (%)
CSR – E 32	27,6	3,4	31,0	2,382	4,1
CCR – E 32	22,5	3,1	27,8	2,299	6,5
CSR – ARI	29,3	3,8	31,5	2,411	3,4

Tabela 4 - Resultados dos ensaios usados para caracterizar os concretos

Dimensões (altura x largura x comprimento) em cm	Peso unitário (kg)
6 x 20 x 30	3,5

Fonte: Lajes Artcon

Tabela 5 - Características físicas da lajota cerâmica

Fio/Barra	Diâmetro (cm)	Peso (kg/m)	Perímetro (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Resistência característica de escoamento (MPa)
4,2 (CA 60)	0,42	0,109	1,32	0,139	600
6,3 (CA 50)	0,63	0,245	1,88	0,312	500

Fonte: NBR 7480:1996

Tabela 6 - Características físicas do aço usado como armadura de distribuição

Designação Gerdau	Designação NBR 14862/02	Peso (Kg/m)	Altura (cm)	Banzo superior (mm)	Diagonal (mm)	Banzo inferior (mm)
TG 8 L	TR 08644	0,735	8	6,0	4,2	4,2

Fonte: Comercial Gerdau

Tabela 7 - Características da treliça - aço CA-60

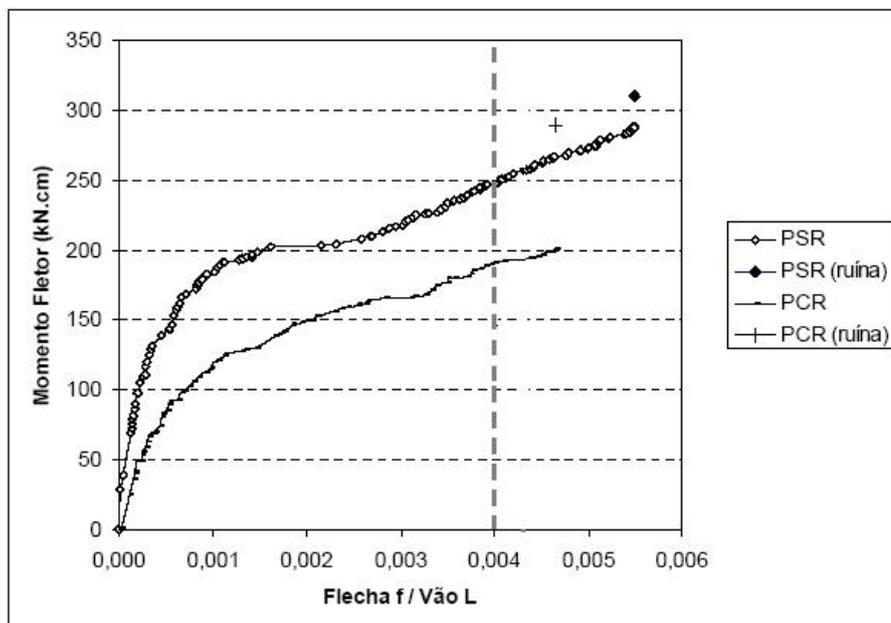


Figura 8 - Comparação da relação flecha/vão (f/L) para os protótipos PSR e PCR

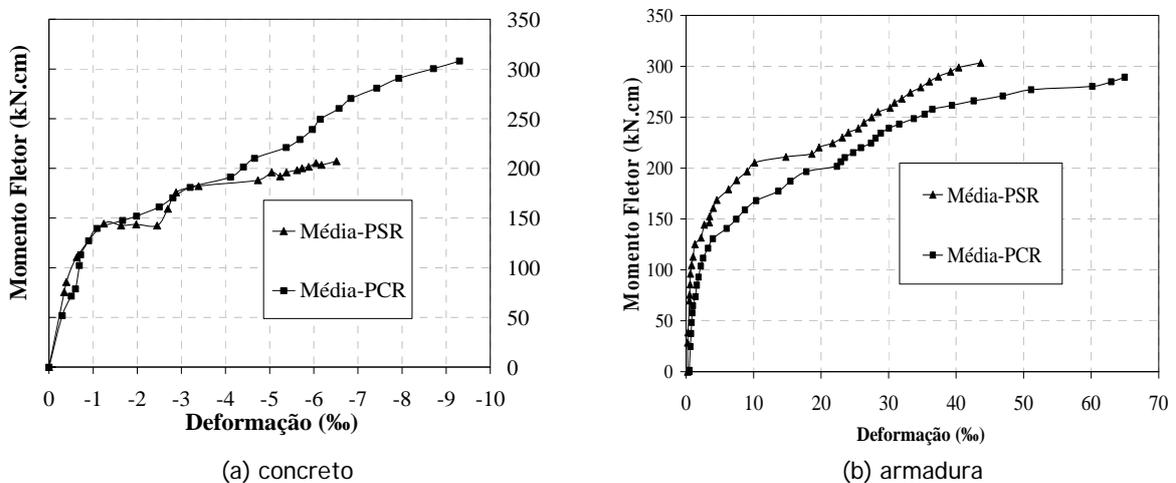


Figura 9 - Comparação das deformações no concreto (a) e na armadura (b) para os protótipos PSR e PCR

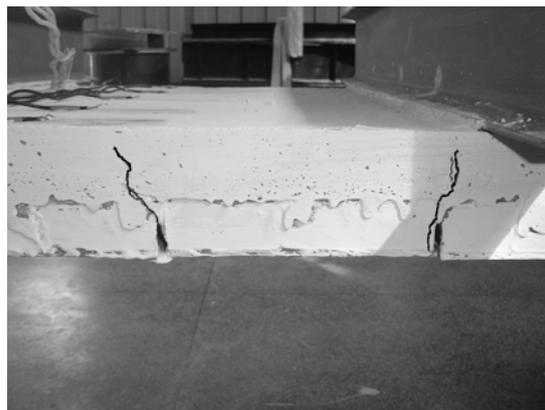
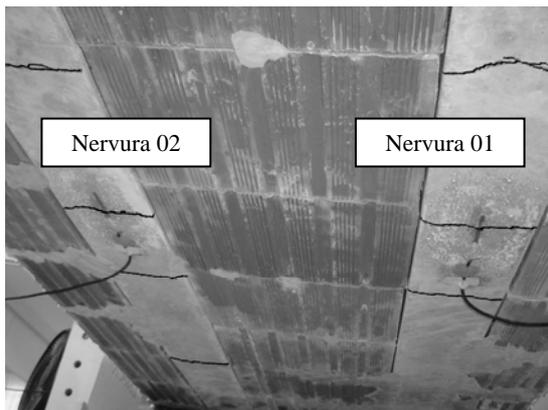


Figura 10 - Fissuras nas faces inferior e lateral do protótipo PSR, concentradas na região central e espaçadas de 27 cm

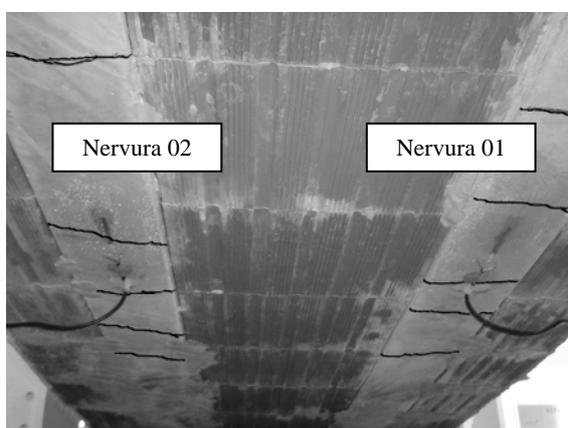


Figura 11 - Fissuras nas faces inferior e lateral do protótipo PCR, concentradas na região central e espaçadas de 25 cm

No estudo da resistência à compressão de concretos com resíduos de borracha, observa-se que, quanto maior a quantidade de resíduos usada, maior é a perda nessa propriedade, conforme observado por Benazzouk et al. (2003), Toutanji (1996), Topçu (1995), Khatib e Bayomi (1999) e Sukontasukkul e Chaikaew (2005). Além disso, o uso de resíduos de borracha proporciona concretos com menor módulo de elasticidade e maior teor de ar incorporado, propriedades essas que também influenciam na queda da resistência à compressão dos concretos. Ainda assim, a utilização do resíduo no concreto da capa de lajes pode ser interessante, já que o aumento no teor de ar incorporado proporciona diminuição na massa específica desse concreto, acarretando estruturas ligeiramente mais leves; e a menor resistência não chega a ser parâmetro restritivo para o uso do resíduo no caso de pavimentos de edifícios de baixa intensidade de sobrecarga.

Olivares et al. (2002) destacam que a adição de fibras de polipropileno e de resíduos de borracha de pneu no concreto pode provocar defeitos na

estrutura interna, acarretando reduções na capacidade de resistência. Entretanto, os autores afirmam que, após a resistência última ser extrapolada, os resíduos de borracha colaboram com o concreto, combatendo a propagação das fissuras e, assim, aumentando a tenacidade do material e o trabalho de fratura. Essa característica pode ser explicada devido à grande diferença na rigidez dos materiais, uma vez que a matriz de cimento possui módulo de elasticidade no patamar dos 30 GPa, valor cerca de 10 vezes superior ao da borracha.

Avaliando os resultados experimentais apresentados na Figura 8, sob esse aspecto, observa-se que a presença de resíduos no concreto do protótipo PCR resulta em valores de flechas superiores aos do protótipo PSR, para um mesmo momento fletor.

O fato das curvas de deformações do concreto e da armadura, presentes respectivamente nas Figuras 9a e 9b, terem uma tendência de comportamento bem semelhante, independente da presença ou não de resíduos, é um indício de que essa adição não

alterou a tendência de comportamento das lajes treliçadas. As elevadas deformações medidas no instante da ruína dos modelos confirmaram o comportamento dúctil previsto para os protótipos.

As fissuras que ocorrem ao longo das nervuras do protótipo de laje com resíduos de borracha são comparáveis às fissuras do protótipo sem resíduos, considerando-se a quantidade, tamanho de abertura e espaçamento (Figuras 10 e 11). Os dois protótipos apresentaram fissuras verticais concentradas em suas regiões centrais, que são características do ensaio à flexão. Deve-se mencionar que o aparecimento da primeira fissura no protótipo sem resíduos ocorreu para um momento fletor maior que o apresentado pelo protótipo com resíduos. Esse fato pode ser atribuído à maior deformação e à menor resistência do concreto com borracha, acarretando maior alongamento da armadura e, por conseqüência, o surgimento precoce das fissuras.

Conforme a NBR 6118:2003, no projeto de estruturas de concreto armado, devem ser considerados o estado limite último, relacionado ao colapso ou a qualquer outra forma de ruína estrutural que determine a paralisação, no todo ou em parte, do uso da estrutura, e o estado limite de serviço, relacionado à durabilidade das estruturas, à aparência, ao conforto do usuário e à boa utilização funcional delas.

Com relação ao estado limite último, a NBR 6118:2003 prevê, para os protótipos, um comportamento dúctil correspondente ao domínio 2, que, por sua vez, é caracterizado pela deformação no aço igual a 10‰ e deformação no concreto inferior a 3,5‰. Para os protótipos PSR e PCR, os momentos fletores de ruína previstos, com base nas recomendações da NBR 6118:2003, foram praticamente os mesmos, sendo iguais a 288,3 kN.cm e 286,1 kN.cm, respectivamente. Essa proximidade de valores decorre do fato de que a influência da resistência do concreto nesse domínio é pequena, uma vez que é a armadura que está com uma deformação limite convencional de 10‰. Observa-se que os valores calculados foram menores que os observados nos ensaios experimentais, iguais a 310,1 kN.cm e 289,2 kN.cm, para os protótipos PSR e PCR,

respectivamente (Figura 12). Essa análise não envolve parâmetros estatísticos e nem coeficientes de segurança, tendo a finalidade apenas de indicar que, para as condições específicas deste ensaio, apesar da inclusão do resíduo ter provocado uma diminuição da capacidade resistente do protótipo da ordem de 7%, o mesmo apresentou resistência ligeiramente superior àquela prevista pela NBR 6118:2003. Sendo assim, tem-se como um indicativo que a inclusão do resíduo não afetou o dimensionamento elaborado com base na NBR 6118:2003, sendo, portanto, viável a sua utilização do ponto de vista do comportamento estrutural ante uma avaliação da sua resistência.

Com relação ao estado limite de serviço, associado à aceitabilidade sensorial, na limitação visual, a NBR 6118:2003 estabelece um limite para a flecha máxima correspondente ao valor do vão dividido por 250. Por sua vez, esse valor corresponde, na Figura 8, a uma relação  $f/L$  igual a 0,004.

Observando-se os resultados obtidos experimentalmente para os protótipos PSR e PCR, fica claro que o momento fletor que provoca essa flecha limite sofre redução da ordem de 23% ao adicionar os resíduos, uma vez que, para essa relação  $f/L$ , os protótipos PSR e PCR estavam submetidos aos momentos fletores de 247,5 kN.cm e 190,8 kN.cm respectivamente.

Utilizando-se as recomendações da NBR 6118:2003 para o cálculo da flecha imediata em vigas de concreto armado, os valores dos momentos fletores referentes à flecha limite, para os protótipos PSR e PCR, foram, respectivamente, iguais a 195,9 kN.cm e 177,5 kN.cm (Figura 13).

Pode-se observar que, para os dois protótipos, a verificação do estado limite de serviço está a favor da segurança, uma vez que a flecha máxima permitida somente seria atingida com momentos fletores maiores que os previstos pela NBR 6118:2003. Na prática, os protótipos apresentam uma rigidez maior que a rigidez calculada segundo as recomendações da NBR 6118:2003. Nos cálculos referentes ao estado limite último e ao estado limite em serviço foram consideradas apenas as armaduras tracionadas posicionadas nas sapatas, correspondendo, na Figura 4, às áreas dos fios do banzo inferior.

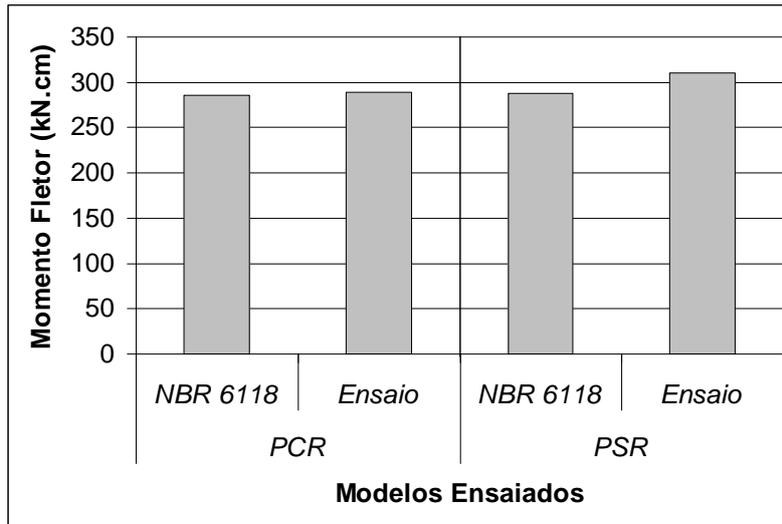


Figura 12 - Estado limite último: o momento fletor de ruína previsto pela NBR 6118:2003 é menor que o observado experimentalmente (a favor da segurança)

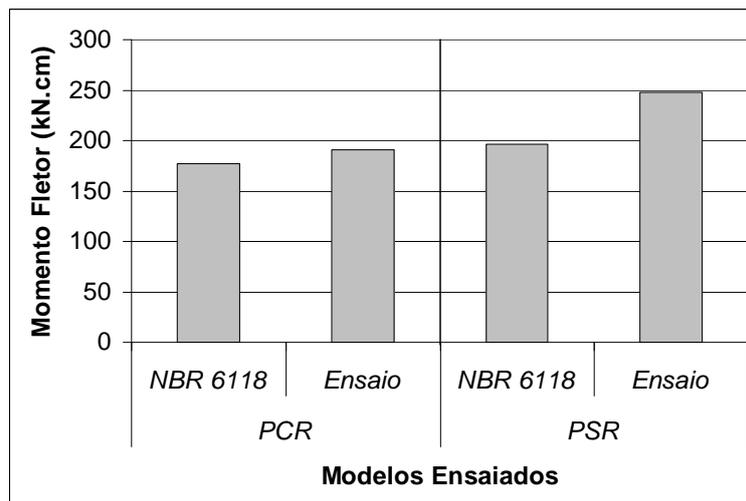


Figura 13 - Estado limite de serviço: o momento fletor que provoca a flecha máxima segundo a NBR 6118:2003 é menor que o observado experimentalmente (a favor da segurança)

## Conclusões

Pode-se afirmar que são necessários mais estudos sobre o uso de resíduos de borracha de pneus na produção de novos concretos. Com o intuito de contribuir nesse sentido, este trabalho avaliou o comportamento estrutural de protótipos de laje treliçada com resíduos de borracha para pavimentos de edifícios.

Os resultados de dosagem indicam que, para que se mantenha uma mesma resistência à compressão, a adição de resíduos de borracha de pneu nos concretos provoca um aumento no consumo de cimento e que esse aumento, por sua vez, está diretamente relacionado com o aumento no teor de ar incorporado.

Como visto na literatura, o aumento no teor de ar incorporado nos concretos com resíduos de borracha, que pode ser atribuído à potencialidade da partícula de borracha aprisionar o ar na sua superfície áspera devido à sua natureza não-polar, acarreta uma queda na resistência à compressão.

O fato da borracha ser um material que atua como vazios dentro do concreto, além de aumentar o teor de ar incorporado, faz com que as misturas de concreto apresentem baixo módulo de elasticidade, o que gera menor rigidez da estrutura e, portanto, maiores deformações.

Como uma sugestão para minimizar esse problema, pode-se estudar a possibilidade de usar adição mineral, ou mesmo aditivo que permita uma

redução na relação água/cimento, de modo a compensar a diminuição da rigidez da estrutura.

Utilizando-se a NBR 6118:2003 como uma referência para a análise do comportamento estrutural dos protótipos PCR e PSR, pode-se observar que o comportamento estrutural, tanto com relação ao estado limite último como para o estado limite de serviço, foi considerado satisfatório para os dois protótipos. Esta conclusão refere-se às condições específicas dos ensaios realizados, não podendo ser generalizada. Destaca-se que não foi feita nenhuma análise estatística dos resultados e que, para outros domínios de cálculo, como, por exemplo, o 2b e o 3, novos ensaios devem ser realizados.

Como foi visto, as curvas de deformação da armadura dos protótipos de laje sem resíduos de borracha e com resíduos são semelhantes, o que indica que a adição dos resíduos de borracha de pneu não influencia o comportamento da armadura ante as solicitações presentes na estrutura. Esse fato também foi observado nas curvas de deformação do concreto.

Portanto, embora os resultados deste trabalho não possam ser generalizados, considera-se que seja possível a fabricação do concreto da capa de lajes treliçadas com resíduo de borracha. Destaca-se, no entanto, que o concreto com resíduo é menos resistente e possui um módulo de elasticidade menor, gerando, portanto, estruturas mais flexíveis.

Considera-se que a resistência à compressão de 20 MPa, obtida com o percentual de 10% de substituição do agregado miúdo por resíduo de borracha, em volume, apresentou um consumo de cimento acima do esperado, se comparado com o concreto sem resíduo, indicando ser necessário um estudo mais aprofundado da dosagem, de modo a tornar a sua aplicação, além de vantajosa do ponto de vista ambiental, também vantajosa do ponto de vista econômico.

## Referências

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 3 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. Rio de Janeiro, 1996. 7 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14859-1**: Laje pré-

fabricada - Requisitos - Parte 1: Lajes unidirecionais. Rio de Janeiro, 2002. 5 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14862**: Armaduras treliçadas eletrossoldadas – requisitos. Rio de Janeiro, 2002. 10 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 47**: concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002. 23 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003. 9 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003. 8 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 221 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos concreto. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

BENAZZOUK, A. et al. Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behavior of cement-rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates. **Cement and Concrete Composites, Barking**, v. 25, n. 7, p. 711-720, 2003.

DIAS, R. H. **Sistemas estruturais para grandes vãos em pisos e a influência na concepção arquitetônica**. [s.n.] 2004. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq000/esp214.asp>>. Acesso em: 24 jun. 2007.

DROPPA JÚNIOR, A. **Análise estrutural de lajes formadas por elementos pré-moldados tipo vigota com armação treliçada**. 1999. 176 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

FATTUHI, N. I.; CLARK, L.A. Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. **Construction and Building Materials, Guildford**, v. 10, n. 4, p. 229-236, 1996.

KHATIB, Z. K.; BAYOMY, F. M. Rubberized Portland Cement Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, p. 206-213, 1999.

LUND, H. F. **The Mc Graw-Hill Recycling Handbook**. 2. ed. New York: Mc Graw-Hill, 1993. 976 p.

MARQUES, A. C. **Estudo da influência da adição de borracha vulcanizada em concreto à temperatura ambiente e elevada temperatura**. 2005. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

MATTOS, M. União européia não poderá mais depositar pneus em aterros e quer exportá-los para o Brasil. Envolverde: **Revista digital de meio ambiente, educação e cidadania**, São Paulo, v. 8, n. 1, 2006. Disponível em: <<http://www.envolverde.ig.com.br>>. Acesso em: 2 jun. 2007.

OLIVARES, F. H. et al. Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsfort, v. 32, n. 3, p. 1587-1596, 2002.

PEREIRA, V. F. **Lajes treliçadas**. São Paulo: TQS, 2001. (Artigo Técnico da TQS, 15). Disponível em: <<http://www.tqs.com.br/novidades/noticias/noticia.asp?id=47>>. Acesso em: 13 ago. 2007.

SANTOS, A. C. **Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneus com aplicação em placas pré-moldadas**. 2005. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2005.

SUKONTASUKKUL, P.; CHAIKAEW, C. **Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber**. **Construction and Building Materials**, no prelo.

TOPÇU, I. B. The properties of rubberized concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 2, p. 304-310, 1995.

TOPÇU, I. B.; AVCULAR, N. Analysis of rubberized concrete as a composite material. **Cement Concrete and Research**, Elmsford, v. 27, n. 2, p. 1135-1139, 1997.

TOUTANJI, H. A. The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. **Cement & Concrete Composites**, Barking, v. 18, n. 1, p. 135-139, 1996.

TRIGO, A. P. M. **Estudo de lajes com adição de resíduo de pneu**. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a:

REGIGANT – Recuperadora de Pneus Gigantes Ltda., pela doação do resíduo de borracha de pneu;

HOLCIM BRASIL, pela doação do cimento utilizado na pesquisa;

JERUEL PLASTICOS, pela doação dos espaçadores;

ARTCON LAJES, pela doação da armadura treliçada e lajotas cerâmicas utilizadas nos protótipos de lajes;

Mineração Noroeste Paulista, pela doação do agregado graúdo;

Porto de Areia São Judas Tadeu, pela doação do agregado miúdo;

CESP – Laboratório CESP de Engenharia Civil;

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão de bolsa de mestrado;

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela concessão de bolsa de iniciação científica;

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo auxílio financeiro para a execução do trabalho.