

Recebido:02/09/2018 Aprovado: 29/10/2019

Análise teórica e experimental da deflexão de vigas T pré-moldadas produzidas com concreto reciclado

Helio Guimarães Aragão (1), José Jorge Aragão (2), Paulo Roberto Lopes Lima¹(2), José

Mario Feitosa Lima (2), Monica Batista Leite (2)

Resumo. O uso de concreto reciclado em lajes pré-moldadas poderia reduzir bastante o consumo de agregado natural e minimizar o impacto ambiental do setor da construção civil. No entanto, devido ao menor módulo de elasticidade do concreto reciclado é necessário avaliar o impacto da substituição do agregado reciclado quanto aos estados limites de deformação das estruturas. Neste trabalho, vigas T foram moldadas com vigotas pré-moldadas de concreto convencional e cobertura de concreto reciclado, para simular a nervura de uma laje pré-moldada, e ensaiadas sob flexão. Três tipos de concreto foram produzidos, com agregado natural e com teores de substituição do agregado gráudo natural por 50% e 100% de agregado reciclado. Para o cálculo das deformações foi utilizado o modelo bi-linear proposto pelo CEB e equações para o módulo de elasticidade propostas por pesquisadores. Verifica-se que as vigas T com 50% de agregado reciclado apresentaram comportamento mecânico similar à viga com agregado natural, enquanto a viga com 100% de agregado reciclado apresentou menor resistência e rigidez. O modelo teórico apresentou boa aproximação com os resultados experimentais, quando a equação do módulo de elasticidade é ajustada para o concreto com agregado reciclado.

Palavras chave: resíduo de construção, deflexão, comportamento mecânico.

¹ Autor correspondente

- (1) Professor Assistente, Departamento de Tecnologia (DTEC), Universidade Estadual de Feira de Santana, Av. Transnordestina, SN, Novo Horizonte, 44030900, Feira de Santana, Bahia, Brasil. enghelioaragao@yahoo.com.br
- (2) Engenheiro Civil, Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental/DTEC, Universidade Estadual de Feira de Santana, Av. Transnordestina, SN, Novo Horizonte, 44030900, Feira de Santana, Bahia, Brasil. aragaodeoliveira@gmail.com
- (3) Professor Pleno, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental/DTEC, Universidade Estadual de Feira de Santana, Av. Transnordestina, SN, Novo Horizonte, 44030900, Feira de Santana, Bahia, Brasil. lima.prl@pq.cnpq.br
- (4) Professor Adjunto, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental /DTEC, Universidade Estadual de Feira de Santana, Av. Transnordestina, SN, Novo Horizonte, 44030900, Feira de Santana, Bahia, Brasil. lima.jmf@gmail.com
- (5) Professor Pleno, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental /DTEC, Universidade Estadual de Feira de Santana, Av. Transnordestina, SN, Novo Horizonte, 44030900, Feira de Santana, Bahia, Brasil. mleite.uefs@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

O crescimento das habitações populares tem demandado a busca de soluções de baixo custo e seguras para coberturas de concreto armado para forro ou edifícios de poucos andares. No Brasil tem sido amplamente utilizado o sistema de laje unidirecional de concreto pré-moldado, que agrega as vantagens dos sistemas pré-moldados (industrialização, melhoria da qualidade do produto, dispensa do uso de formas no local da obra, uso de pouco escoramento) com as facilidades dos sistemas moldados no local, que são disponíveis em qualquer região do país, necessitam pouco equipamento para montagem e não exige mão de obra especializada (Figueiredo Filho e Shiramizu 2002).

Este tipo de sistema de lajes unidirecionais envolve a colocação de vigas T invertidas paralelamente espaçadas em intervalos regulares que são preenchidos com elementos cerâmicos, de EPS ou de outros materiais (Lima et al. 2018). O sistema é então coberto com uma capa de concreto para formação do sistema de laje, que pode agregar nova armadura, sendo que a armadura positiva faz parte da viga T invertida. Na Figura 1 é apresentada uma seção transversal com os elementos do sistema de lajes unidirecionais.

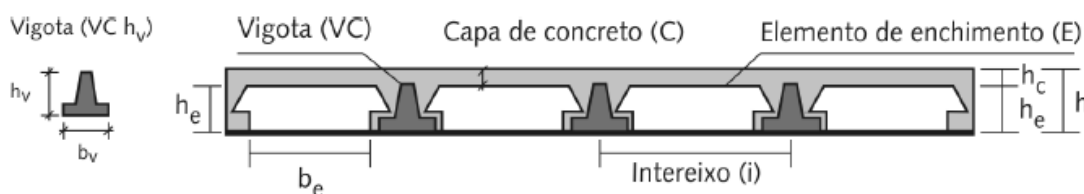


Figura 1 - Lajes com vigotas tipo trilho em concreto armado (ABNT 2002)

Construído com vãos entre 2,5 m e 3,0 m, a laje premoldada não necessita de armadura de cisalhamento e apresenta baixas deflexões para cargas de serviço. Essas características a tornam apropriada para serem produzidas com concreto reciclado contendo resíduos de construção e demolição (RCD), que tem seu uso em concreto estrutural permitido por normas de dimensionamento (Gonçalves 2007). No entanto, apesar da previsão de uso do concreto reciclado em elementos estruturais, as normas de dimensionamento de concreto armado ainda não incorporam equações que prevejam a variação do módulo de elasticidade do concreto quando da incorporação do agregado reciclado. Estudos desenvolvidos por Leite (2001), Juan e Gutiérrez (2004) e Xiao, Li and Zhang (2006) indicaram que o módulo de elasticidade do concreto pode sofrer variações em comparação com o concreto

convencional. Como resultado, a deformação dos elementos estruturais, notadamente a deflexão de vigas, poderão ser maiores com a incorporação do agregado reciclado o que exige que esse efeito seja considerado na determinação do estado limite de serviço das normas de dimensionamento estrutural.

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do teor de agregado reciclado sobre o comportamento do sistema de vigas pré-moldadas sob carga de flexão. O concreto foi produzido com 100% de agregado natural, com 100% de agregado reciclado e com uma mistura de 50% de ambos os agregados. Vigas T, compostas de viga tipo trilho invertida e concreto de cobertura, com 2,7 m de comprimento foram submetidas a ensaio de flexão em 4 pontos. Os resultados experimentais foram comparados com resultados teóricos obtidos pela aplicação do método bi-linear, incorporando equações teóricas para determinação do módulo de elasticidade do concreto reciclado.

2 MODELO TEÓRICO PARA DEFLEXÃO

2.1 Método Bi-linear

O cálculo do momento fletor e das deflexões das lajes pré-moldadas podem ser realizados como vigas biapoizadas de seção T resultante da integração da nervura com o capeamento (Di Pietro 1993; Dropa e El Debbs 2000). A mesa (b_f) deverá ser tomada com largura igual ao entreixo (distância entre vigotas, de eixo a eixo). De acordo com Flório (2003) é perfeitamente aceitável a consideração de lajes unidirecionais nervuradas pré-moldadas comportando-se como elementos independentes, já que com essa simplificação observou-se que o modelo representa de forma aproximada a realidade, justificando o emprego de um modelo matemático que consiste em um conjunto de vigas paralelas que trabalham praticamente independentes para o dimensionamento à flexão e a verificação do estado de deformação excessiva.

A deflexão de vigas pode ser determinada a partir da integração das curvaturas, as quais dependem do carregamento, do módulo elástico do material e do momento de inércia da seção. Devido à fissuração do concreto tracionado, o momento de inércia da seção varia, gerando uma relação não-linear entre momento e curvatura, como pode ser avaliado na Figura 2.

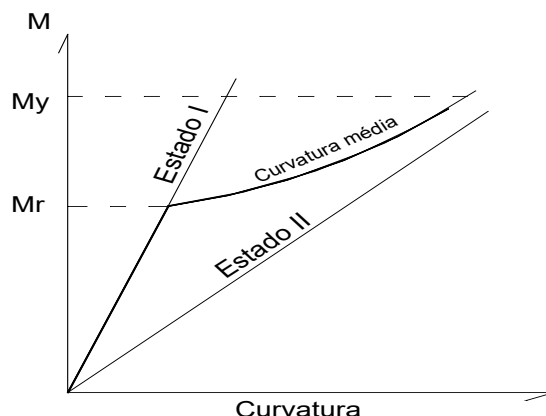


Figura 2 – Relação momento-curvatura esquemática em viga de concreto armado

A determinação da deflexão, neste caso, pode ser determinada pela integração de uma curvatura média entre o estado não-fissurado (Estado I) e o estado II (fissurado) (CEB, 1983). Assim:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_m = \frac{M}{EI_m} = (1 - \zeta) \left(\frac{1}{r}\right)_1 + \zeta \cdot \left(\frac{1}{r}\right)_2 \quad (1)$$

onde $\left(\frac{1}{r}\right)_1$ e $\left(\frac{1}{r}\right)_2$ são as curvaturas no estado I e estado II (fissurado), respectivamente, E é o módulo de elasticidade do concreto e I_m a inércia média.

Para flexão o coeficiente de repartição é dado por:

$$\zeta = \begin{cases} 0, & M \leq M_r \\ 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left(\frac{M_r}{M}\right)^2 & M_y \geq M > M_r \end{cases} \quad (2)$$

sendo M o momento de serviço, $M_r = W_c f_{ct}$ o momento de fissuração da viga. M_y é o momento correspondente ao escoamento da armadura, sendo dado por $M_y = \rho b d^2 f_y \left(1 - 0,59 \rho \frac{f_y}{f_c}\right)$, considerando viga sub-armada (Paulay e Parker 1975), onde ρ é a taxa de armadura principal, b a largura da viga, d a altura efetiva, f_y a tensão de escoamento do aço e f_c a resistência à compressão do concreto.

Na Equação (2) foram introduzidos dois coeficientes, β_1 e β_2 , para considerar o tipo de aderência da barra e a influência da duração da carga, respectivamente. Estes coeficientes são dados por:

$$\beta_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{para barras corrugadas} \\ 0,5 & \text{para barras lisas} \end{cases} \text{ e } \beta_2 = \begin{cases} 1,0 & \text{para primeiro carregamento} \\ 0,5 & \text{para carga cíclica} \end{cases}$$

Aplicando a uma estrutura em estado de carregamento o Princípio dos Trabalhos Virtuais é possível definir a deflexão, δ , a partir da curvatura deste elemento, ou seja:

$$\delta = \int_L \left(\frac{1}{r}\right) \bar{M} dx \quad (3)$$

onde $\bar{M}$ é o momento virtual devido a uma carga unitária aplicada na posição em que se deseja calcular a deflexão.

Utilizando a Equação (3) conjugada com a curvatura média, Equação (1), pode-se estabelecer a seguinte relação para o cálculo das deflexões:

$$\delta = \int \frac{1}{r_m} \cdot \bar{M} \cdot dx = \int (1 - \zeta) \left(\frac{1}{r}\right)_1 \cdot \bar{M} \cdot dx + \int \zeta \left(\frac{1}{r}\right)_2 \cdot \bar{M} \cdot dx \quad (4)$$

Sendo o coeficiente de repartição ζ dado pela Equação (2), onde o momento M , inicialmente variável ao longo do comprimento da viga, será substituído, por simplificação, pelo momento na seção mais solicitada da viga M_d .

A influência da armadura sobre a curvatura de elementos de concreto armado sobre a flexão pode ser considerada através de um coeficiente de correção:

$$\kappa_S = \frac{I_c}{I_{bx} + \alpha \cdot I_{ax}} \quad (5)$$

Assim, as deflexões no estágio I e II podem ser calculadas pelas equações:

$$\delta_I = \frac{\kappa_{S1}}{EI_c} \int M \cdot \bar{M} \cdot dx \quad (6)$$

$$\delta_{II} = \frac{\kappa_{S2}}{EI_c} \int M \cdot \bar{M} \cdot dx + \frac{\beta_1 \cdot \beta_2}{EI_c} \cdot \left(\frac{M_r}{M_d}\right)^2 [\kappa_{S1} - \kappa_{S2}] \int M \cdot \bar{M} \cdot dx \quad (7)$$

sendo $\left(\frac{1}{r}\right)_c = \frac{M}{EI_c}$ a curvatura de base, calculada com seção de concreto puro não-fissurado e I_c , I_b , I_a – momento de inércia da seção de concreto, de concreto ativo e de aço, respectivamente, com relação ao centro de gravidade correspondente; I_x , I_{bx} , I_{ax} – momento de inércia da seção total, de concreto ativo e de aço, respectivamente, com relação a linha neutra.

2.2 Avaliação do Módulo de Elasticidade do concreto reciclado

Algumas variáveis como quantidade de finos e contaminantes incorporados aos agregados reciclados, e teor de substituição destes por agregados naturais no concreto, interferem diretamente na diferença entre as propriedades mecânicas do concreto com agregados naturais e com RCD. Devido a isso, vários trabalhos, dentre os quais destacamos os de Juan e Gutiérrez (2004), Leite (2001), e Xiao. Li e Zhang (2006), têm proposto formulações no sentido de estabelecer equações para correlacionar as propriedades mecânicas do concreto com RCD.

Juan e Gutiérrez (2004) realizou programa experimental com misturas de concreto convencional e reciclado com teores de substituição de 20%, 50% e 100% dos agregados graúdos naturais por agregados provenientes de concreto reciclado. Como resultado, o autor propõe as seguintes relações para o módulo de elasticidade longitudinal:

$$E_{ci} = 8936. \sqrt[3]{f_{cm(50\%)}} \text{, para teor de substituição de 50\%} \quad (8)$$

$$E_{ci} = 7017. \sqrt[3]{f_{cm(100\%)}} \text{, para teor de substituição de 100\%} \quad (9)$$

onde $f_{cm(50\%)}$ e $f_{cm(100\%)}$ são as resistências médias à compressão para teores de substituição de 50% e 100%, respectivamente.

Leite (2001) investigou o efeito das características físicas e granulométricas dos agregados miúdos e graúdos reciclados (obtidos do beneficiamento de resíduos de construção e demolição) nas propriedades mecânicas do respectivo concreto produzido com teores de substituição, tanto para agregados graúdos como miúdos, de 0%, 11,5%, 50%, 88,5% e 100%. A partir dos resultados encontrados, a autora propôs a seguinte equação que estabelece uma relação (em função da resistência a compressão) para o Módulo de Elasticidade Longitudinal:

$$E_{ci} = (-3,48 + 4,63\sqrt{f_{cm}}).10^3 \quad (10)$$

onde f_{cm} é a resistência média à compressão.

Xiao. Li e Zhang (2006), baseado em grande número de trabalhos experimentais publicados, coletou cerca de 1200 resultados, o que possibilitou formar uma ampla base de dados. Através de análise estatística, propôs uma formulação (Equação 11) para

determinação do Módulo de elasticidade longitudinal do concreto com agregado reciclado em função da respectiva resistência a compressão. Os agregados utilizados foram formados predominantemente por concreto, tijolos britados e entulhos de alvenaria. Os agregados reciclados beneficiados substituíram os agregados graúdos naturais com teores que variaram de 10% a 100%, na confecção do concreto. O agregado miúdo usado foi areia natural, não havendo, portanto, substituição do agregado miúdo.

$$E_{ci} = \frac{10^5}{2,8 + \frac{40,1}{f_{cm}}} \quad (11)$$

Para concreto convencional, uma das equações mais utilizadas para avaliação do módulo de elasticidade é a proposta pelo CEB (1991):

$$E_{ci} = E_{co} \cdot [(f_{ck} + \Delta f)/f_{cm0}]^{1/3} \quad (12)$$

onde E_{ci} é o módulo de elasticidade tangente (MPa), $E_{co} = 2,15 \times 10^4 \text{ MPa}$, $f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$, f_{ck} é a resistência à compressão característica do concreto e $\Delta f = 8 \text{ MPa}$

O módulo de Elasticidade longitudinal secante fica definido por:

$$E_c = 0,85 E_{ci} \quad (13)$$

Uma comparação entre os modelos apresentados para o cálculo do módulo de elasticidade é apresentada na Figura 3. Verifica-se que a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência a compressão do concreto reciclado situa-se abaixo daquela prevista pelo CEB (1991) para concreto convencional, indicando a necessidade de se ajustar as equações normativas quando se tratar de estruturas com concreto reciclado.

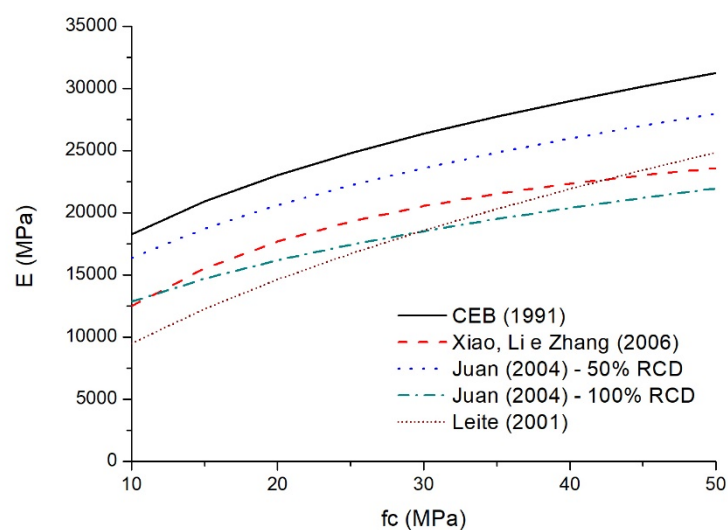


Figura 3 - Relação teórica entre módulo de elasticidade e resistência à compressão

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Agregados e cimento

O agregado miúdo natural utilizado foi formado pela combinação de duas areias disponíveis comercialmente em Feira de Santana: 60% de agregado miúdo era formado por uma areia fina, proveniente do município de Alagoinhas, denominada AMN1, e 40% por uma areia grossa proveniente do rio Jacuípe em Feira de Santana, denominada AMN2. A combinação das areias foi necessária para tornar a granulometria contínua, melhorando o empacotamento da mistura. O agregado graúdo natural (AGN) foi uma brita de origem granítica. Os resultados do ensaio de caracterização dos agregados naturais estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades dos Agregados

	AMN1	AMN2	AMR	AGN	AGR
Dimensão Máxima Característica (mm)	1,2	2,4	4,8	9,5	12,5
Módulo de Finura	1,68	2,9	2,56	5,43	6,23
Massa Específica (kg/dm³)	2,59	2,55	2,51	2,73	2,41
Massa Unitária (kg/dm³)	1,53	1,39	1,27	1,38	0,99
Absorção (%)	0,1	0,2	21,0	0,5	11,3
Material pulverulento (%)	1,7	0,7	10,4	1,2	0,7
Abrasão Los Angeles (%)	-	-	-	19,7	63,7

O resíduo de construção e demolição (RCD) utilizado para produção de agregado foi coletado em Feira de Santana. Uma amostra de 12 toneladas foi avaliada gravimetricamente: 50,1% do material era passante na peneira 4,3 mm e foi descartado; o restante do material era composto predominantemente de resíduos de concreto, argamassa e material cerâmico, como mostra a Figura 4. A fabricação do agregado reciclado foi realizada pela moagem do RCD em britador de mandíbula (Figura 5) e peneiramento mecânico, após o qual o resíduo foi classificado e dividido em agregado graúdo e miúdo.

O resultado dos ensaios de caracterização do agregado miúdo reciclado (AMR) e graúdo reciclado (AGR) encontra-se na Tabela 1, juntamente com as propriedades dos agregados naturais.

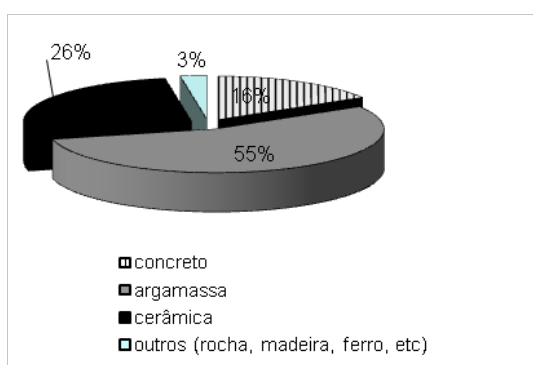


Figura 4 - Composição do resíduo



Figura 5 - Moagem em britador de mandíbula

A absorção de água do agregado reciclado foi avaliada durante 24 horas, conforme metodologia apresentada por Leite (2001). Verificou-se que o material absorve cerca de 40% da água total nos primeiros 10 minutos de imersão. Esse parâmetro é muito importante para produção de concretos com esse material, uma vez que o agregado muito poroso absorve água da mistura, podendo prejudicar a trabalhabilidade, o adensamento, bem como, reduzindo a relação a/c. Desse modo, é necessário compensar essa alta taxa de absorção do agregado reciclado no momento da produção das misturas de concreto.

As curvas granulométricas dos agregados utilizados encontram-se na Figura 6.

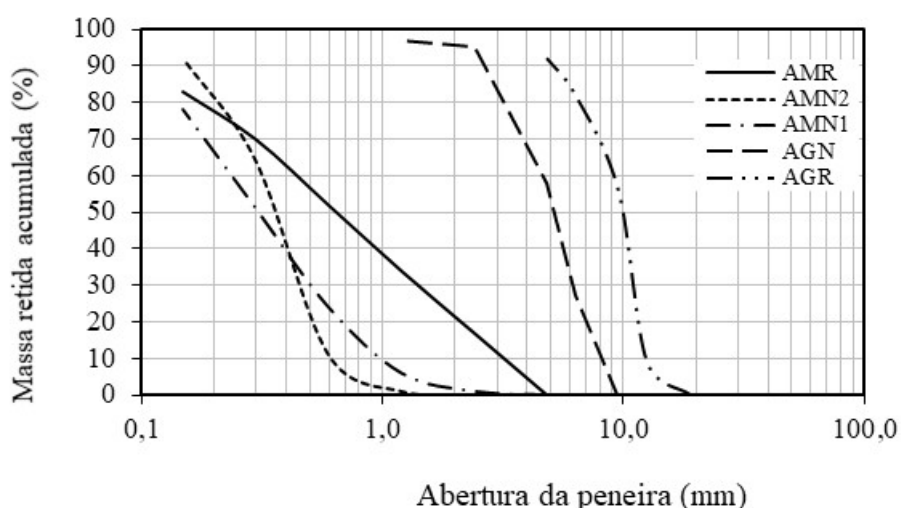


Figura 6 - Curva granulométrica dos agregados utilizados

Todos os concretos utilizados foram confeccionados com o cimento CP-V-ARI, com massa específica de $3,13 \text{ g/cm}^3$.

3.2 Concretos

Foram produzidos 3 concretos utilizando agregado natural e agregado reciclado em teores de substituição de 50 e 100%, com fator água-cimento de 0,8. Os concretos foram dosados pelo método de dosagem IPT/EPUSP. Os consumos de materiais utilizados para a produção destes concretos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidade de materiais em kg/m^3 de concreto

	Cimento	Areia Fina (60%)	Areia Lavada (40%)	AMR	AGN	AGR	Água	Água absorção	Água Total
REF	300	574	383	0	770	0	240	0	240
CR50	300	287	191	458	385	356	240	53	293
CR100	300	-	-	916	-	712	240	105	346

A quantidade de água referente à compensação foi acrescentada junto com a água de amassamento do traço executado. Os concretos foram produzidos em betoneira de eixo inclinado com capacidade de 320 litros. A execução da mistura obedeceu à seguinte sequência: 100% da brita, 50% da água, 100% do cimento; 25% da água; 100% da areia; restante da água. A mistura foi efetuada durante 8 minutos após a colocação do cimento, de

modo a garantir a sua perfeita homogeneização, principalmente quando fosse utilizado o agregado reciclado.

3.3 Produção das vigas

Para produção das vigas T, foram utilizadas vigotas comerciais tipo trilho, e para a moldagem das capas de concreto foram utilizadas formas de madeira (Figura 7a). A armação das vigotas tipo trilho era composta por barras de diâmetro igual 5,0 mm: 2 barras na parte inferior e 1 barra na parte superior, como mostra a Figura 7b. Uma armadura de distribuição foi colocada na capa de concreto com barras 5,0 mm de diâmetro a cada 20 cm.

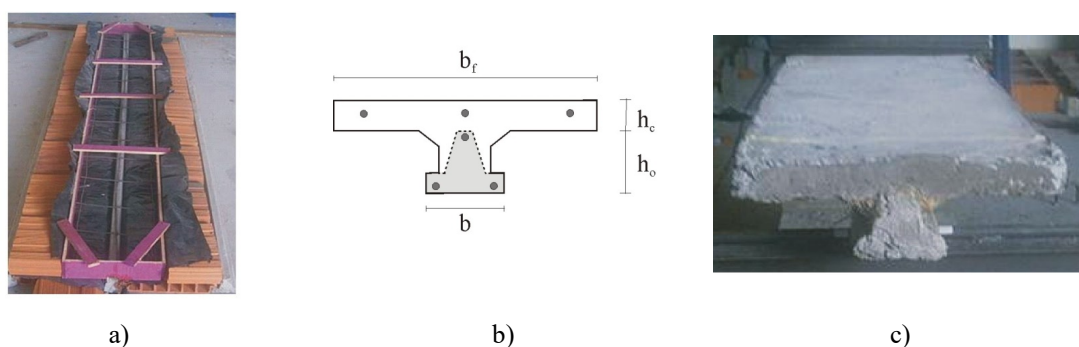


Figura 7 - Produção de vigas e lajes

Foram executadas três séries de vigas (REF, CR50 e CR100), com dimensões previstas de 30 cm de largura e 300 cm de comprimento, definindo-se um vão teórico de 270 cm, e altura total de cerca de 11 cm, moldados com os concretos apresentados na Tabela 2. Na Tabela 3 são apresentadas as dimensões reais, após o processo de moldagem, das vigas. A Figura 7c apresenta a seção da viga T após a moldagem.

Tabela 3 – Dimensões das seções transversais das vigas

Viga	b_f (mm)*	h_c (mm)*	h_o (mm)*	h (mm)	b^* (mm)
REF		43		113	91,8
CR50	330	47	70	117	90,7
CR100		40		110	91,2

*Ver Figura 7b

3.4 Métodos de Ensaio

Os corpos de prova de concreto foram moldados e curados de acordo com a prescrição da NBR 5738. Foram desmoldados após 24h e permaneceram em câmara úmida, com temperatura de $23^\circ \pm 2^\circ \text{C}$ e umidade relativa maior que 95%, até a idade do ensaio. Para avaliação do comportamento mecânico do concreto foram realizados ensaios de resistência à

compressão axial (NBR 5739), módulo de deformação (NBR 8522) e resistência a tração por compressão diametral.

Os ensaios à flexão das vigas foram realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade Estadual de Feira de Santana. A estrutura de reação das forças foi composta por pórtico metálico e uma laje de reação em concreto armado. As vigas foram submetidas a ensaio de 4 pontos, com vão de 2,7 m, como mostra a Figura 8. A força atuante foi aplicada através de um atuador hidráulico de capacidade 500 kN, com uma velocidade de carregamento igual a 2 mm/min. Um sistema digital de aquisição de dados registrou as leituras indicadas pela célula de carga com capacidade para 5 kN e pelo LVDTs de 100 mm de curso montado no meio do vão.



Figura 8 – Configuração do ensaio de flexão das vigas e indicação da fissuração

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 Concreto reciclado

A Tabela 4 apresenta os resultados médios (de três amostras), mais desvio padrão, dos ensaios de resistência à compressão (f_c), resistência à tração por compressão diametral (f_{td}) e módulo de elasticidade (E_c).

Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos concretos

Mistura	(%AMR)	(%AGR)	f_c (MPa)	f_{td} (MPa)	E_c (GPa)
REF	0	0	$22,97 \pm 0,81$	$1,97 \pm 0,15$	$27,10 \pm 0,46$
CR50	50	50	$19,30 \pm 0,36$	$1,83 \pm 0,12$	$18,93 \pm 0,21$
CR100	100	100	$21,57 \pm 1,10$	$1,69 \pm 0,12$	$14,97 \pm 1,05$

Verifica-se na Tabela 4 que há uma tendência de redução da resistência à compressão de até 16% com o aumento do teor de agregado reciclado, mas não proporcional ao teor de agregado, confirmando o que já vêm sendo observado por vários autores (Ajdukiewicz e Kliszczewic 2002; Gomez-Soberon 2002; Xiao, Sun e Falkner 2006). A intensidade da redução da resistência a compressão é influenciada por diversos parâmetros associados ao agregado (composição, forma de britagem, teor de umidade) e à dosagem (teor de agregado e fator a/c). Em função disso, alguns autores (Carneiro et al, 2014; Ajdukiewicz e Kliszczewic 2002) têm verificado, inclusive, aumento na resistência do concreto com agregado reciclado quando comparado ao concreto convencional.

Para os concretos reciclados, os resultados existentes na literatura têm indicado um redução do módulo de elasticidade com o incremento do teor de agregado graúdo reciclado presente na mistura (Leite, 2001; Xiao, Sun e Falkner 2006; Poon e Chan, 2007), com valores variando de 50–70% do concreto normal (Ajdukiewicz; Kliszczewic 2002). Analisando os resultados obtidos neste trabalho verifica-se uma redução do módulo de elasticidade de 30% e 45% com a substituição do agregado convencional por 50% e 100% de agregado reciclado, respectivamente.

Os resultados de tração por compressão diametral indicam uma redução da resistência à tração como o aumento do teor de agregado reciclado, de 7% e 14%, com a substituição do agregado convencional por 50% e 100% de agregado reciclado, respectivamente. Tal redução já foi observado por outros pesquisadores (Ajdukiewicz e Kliszczewic 2002; Topçu e Sengel, 2004).

5.2 Avaliação experimental das vigas

O comportamento experimental carga-deflexão das três vigas ensaiadas pode ser observado na figura 9. Verifica-se um comportamento típico de elementos estruturais de concreto armado submetidos a flexão que, para a viga de referência, foi dividido em três fases bem definidas: a) Fase I ou Estádio I- fase elástica-linear que se encerra quando surge a primeira fissura na viga de concreto tipo trilha, como mostra a Figura 8. No estágio I o concreto resiste às tensões de tração juntamente com a armadura e o diagrama de tensões no concreto é linear; b) Fase II - Para cargas maiores que a carga de fissuração, a partir da qual podem surgir fissuras de flexão na seção, o concreto tracionado não tem a capacidade de resistir às tensões, admitindo-se assim que toda a tração seja resistida pelo aço, essa situação é chamada de estágio II puro. A inércia dessas seções, nessa situação, são menores que as no

estádio I; c) Fase III - Na fase III o aço entra em escoamento e o elemento estrutural perde rigidez até a ruptura da viga. O ensaio realizado neste trabalho foi interrompido antes da ruptura da viga para preservar os equipamentos.

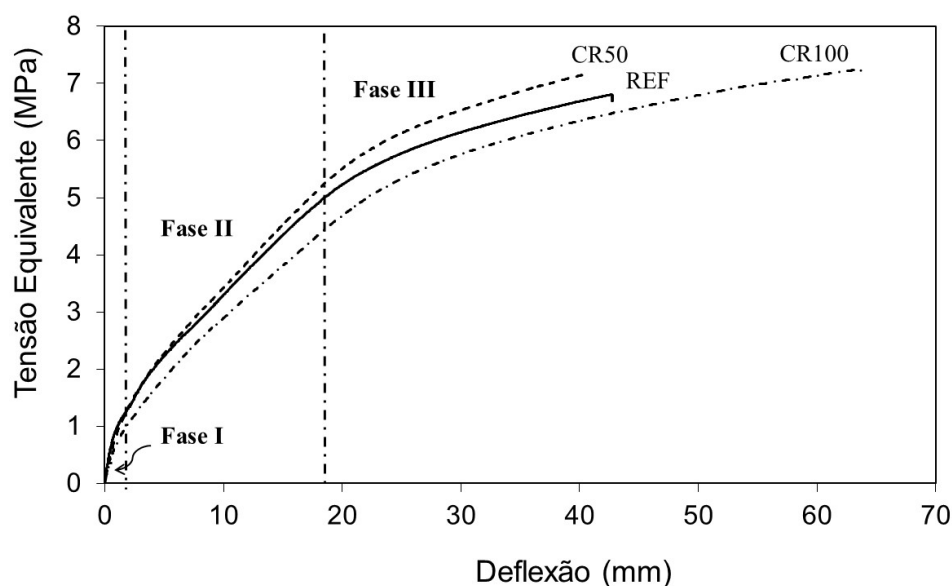


Figura 9 – Comportamento carga x deslocamento para as vigas T com concreto convencional e reciclado

A partir dos resultados experimentais foi possível identificar para as vigas estudadas o momento de fissuração (M_r) e o momento M_{serv} correspondente ao estado limite de serviço, ou seja, quando a deflexão da viga atingiu o limite de $L/350$. Neste trabalho o vão L da viga foi de 2,70 m o que resulta uma deflexão limite de 7,7 mm.

Tabela 5 - Resultados experimentais do ensaio de flexão das vigas

Viga	δ_r (mm)	M_r (kN.m)	δ_{serv} (mm)	M_{serv} (kN.m)	δ_y (mm)	M_y (kN.m)
REF	0,77	0,43	7,7	1,47	19.1	2.61
CR50	0.94	0,45	7,7	1,61	20.0	2.97
CR100	1.08	0,35	7,7	1,20	21.2	2.26

Comparando-se as dimensões das vigas, mostradas na Tabela 3, verifica-se que as alturas apresentam uma pequena diferença, da ordem de 4%, o que poderia afetar a comparação entre a capacidade portante das vigas. Para verificar essa influência, a tensão nas vigas foi calculada usando a equação clássica de Resistência dos Materiais ($\sigma = M.y/I$, onde y é a posição da linha neutra e I a inércia da viga) até uma deformação equivalente ao estado limite de serviço, como mostra a Figura 10. Observa-se a manutenção do

comportamento discutido anteriormente, com a viga CR50 indicando o melhor desempenho que as demais.

Comparando-se as vigas produzidas com diferentes concretos, observa-se que na Figura 10 que a viga RC50, produzida com 50% de agregado reciclado, apresentou comportamento similar a viga com concreto convencional (REF), dentro do estado limite de serviço. A viga RC100 produzida com o concreto RCD com 100% de substituição apresentou deslocamentos maiores que as vigas REF e RC50 para o mesmo nível de carregamento, o que pode ser associado ao menor módulo de elasticidade.

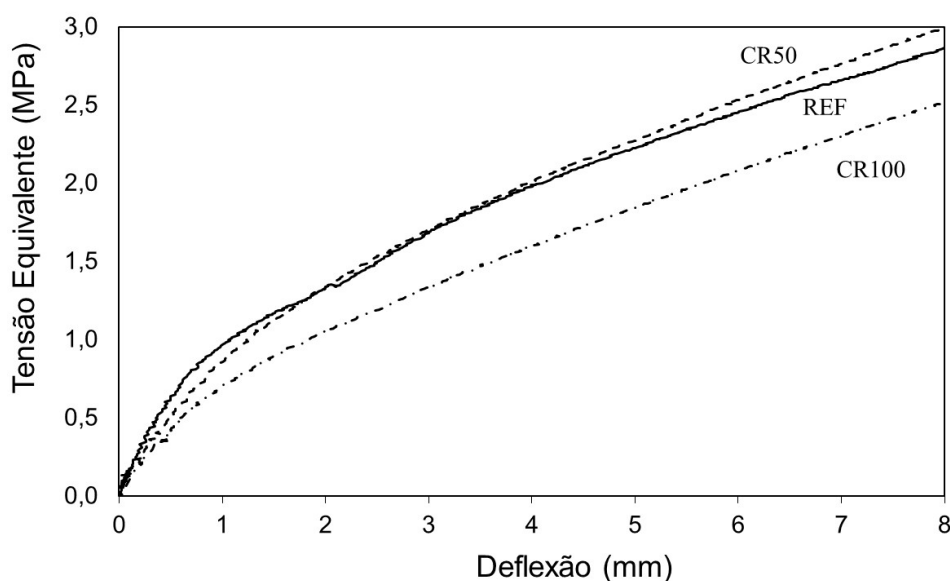


Figura 10 - Comportamento tensão-deflexão das vigas até o estado limite de deflexão

Ensaio realizado por Latterza (1998) em painéis leves de vedação produzidos com concretos reciclados de demolição e construção, também apresentaram um melhor comportamento para 50% de substituição em relação aos painéis de vedação produzidos com concreto convencional.

5.3 Modelagem da deflexão

No presente trabalho, o comportamento momento versus deflexão para a viga com agregados convencionais foi tomado como referência em todas as simulações teóricas e análises feitas posteriormente, quando em comparação com as vigas de concreto com RCD. Inicialmente, porém, foi realizada a validação do Método Bi-linear utilizando-se o módulo de elasticidade teórico do concreto previsto pelo CEB (1983) (Equação 13) como mostra a Figura 11. Verifica-se uma boa aproximação do modelo, com a curva teórica apresentando

boa aproximação com a curva experimental. A comparação entre o momento teórico de fissuração das vigas M_r , e o resultado experimental é mostrada na Tabela 6. Embora o momento de fissuração teórico fique abaixo 26,5%, o modelo representa bem o comportamento carga-deflexão para deflexões abaixo do estado limite, inclusive com flecha (7,7 mm) coincidindo com o limite admitido pelo ELS (Estado limite de serviço), pois o momento de serviço teórico igualou ao experimental. O comportamento experimental traduziu com realismo a progressiva perda de rigidez da viga, pois possui concavidade voltada para baixo, enquanto que a curva teórica bi-Linear caracteriza-se, como a própria denominação indica, comportamento de linearidade. Portanto é de se esperar que em determinadas regiões elas se afastem, para depois convergirem, nas proximidades da flecha limite definido pelo ELS. Desta forma, considera-se que o modelo teórico é adequado para o cálculo de deflexão em vigas de concreto com agregados naturais, para o ELS.

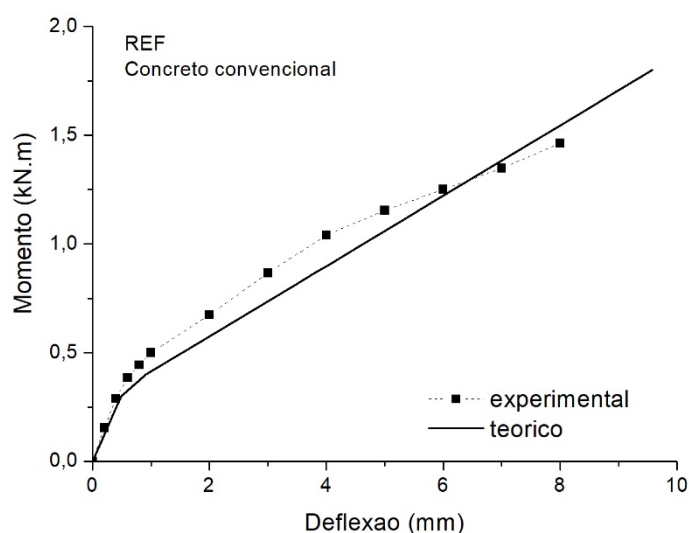


Figura 11– Viga VT1-REF - Curvas momento versus deflexão (teórica e experimental)

A comparação entre as curvas teóricas e experimentais para as vigas com concreto reciclado são apresentadas nas Figuras 12 e 13, para o concreto RC50 (com 50% de substituição) e RC100 (com 100% de substituição), respectivamente. No modelo teórico os valores de módulo de elasticidade (E_c) foram obtidos à partir das Equações (8) a (11), que incorporam a influência do agregado reciclado, utilizando-se os valores de resistência à compressão obtidos experimentalmente e apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados experimentais e das simulações teóricas das vigas

Viga	Modelo para Módulo de Elasticidade	M _r (KN.m)		M _{serv} (KN.m)	
		Teórico	Experim.	Teórico	Experim.
REF	CEB	0,34	0,43	1,47	1,47
	Juan (2004)	0,35		1,55	
RC50	Leite (2001)	0,63	0,45	1,58	1,61
	Xiao, Li and Zhang (2006)	0,33		1,48	
RC100	Juan (2004)	0,38		1,28	
	Leite (2001)	0,54	0,35	1,31	1,20
	Xiao, Li and Zhang (2006)	0,28		1,22	

Verifica-se que o modelo bi-linear consegue prever com boa aproximação o comportamento carga-deflexão das vigas de concreto contendo agregado reciclado em teores de 50% ou 100%.

Para viga RC50, observa-se na Figura 12 que no Estádio 1 (fase Elasto-linear), as curvas teóricas, segundo as propriedades de Juan (2004) e Xiao, Li and Zhang (2006), ficaram bem próximas da experimental, portanto com rigidez que reflete bem a realidade dos ensaios. Com relação ao início do processo de fissuração, observa-se, pelos dados da Tabela 6, que a curva de Juan é a que mais se aproxima da experimental, cujo momento de fissuração está abaixo 28,9% desta, enquanto a de Xiao, Li and Zhang (2006) fica abaixo da experimental 35,1%. Já utilizando o modelo de Leite (2001), o momento de fissuração ultrapassa 41% a experimental. No Estádio II o modelo teórico com esta última equação apresenta melhor comportamento, indicado um momento de serviço teórico muito próximo ao momento obtido experimentalmente, com redução de 1,7%, como mostra a Tabela. Utilizando as equações de Juan (2004) e Xiao, Li and Zhang (2006) a diferença entre o momento de serviço experimental e teórico aumentam para 4,1% 9,0%, respectivamente.

Para a viga RC100, cujo comportamento experimental sob flexão é apresentado na Figura 13, juntamente com os resultados teóricos, verifica-se que os modelos incorporando as equações de módulo de elasticidade de Xiao, Li and Zhang (2006) e Juan (204), apresentam melhor aproximação. Quanto ao início da fissuração, as curvas e os resultados da tabela 6.8 demonstram que os respectivos momentos, segundo Leite e Juan estão acima do valor experimental 54% e 9,1%, respectivamente. Já segundo Xiao, Li and Zhang (2006), este valor está abaixo do experimental 25,4%. Na fase pós-fissuração observa-se que os modelos com equações de Leite (2001) e Juan e Gutiérrez (2004), apresentam maiores

valores de momento de fissuração no estado limite de serviço, ficando, 9,36% e 6,77% acima do experimental, respectivamente. Já a curva segundo Xiao, Li and Zhang (2006), possui inclinação que também acompanha a experimental, ficando ligeiramente abaixo, ao longo do trecho que vai até o entorno do limite de deflexão, estabelecido pelo ELS. Este comportamento refletiu no valor teórico do momento de serviço, que ficou 2,25% acima do momento de serviço experimental.

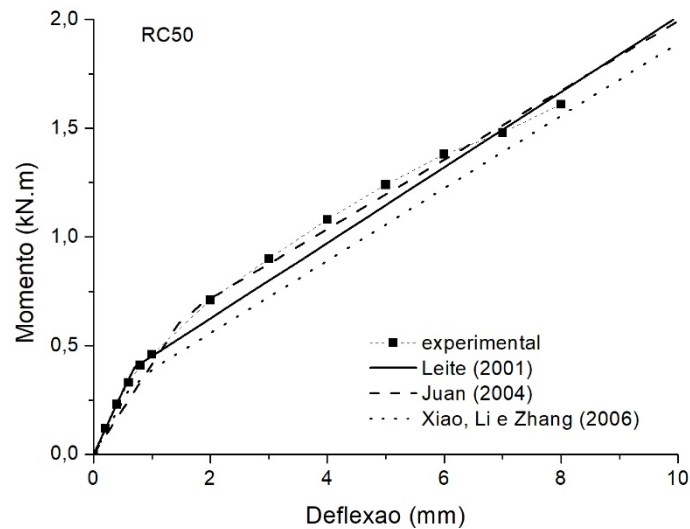


Figura 12 – Curvas momento versus deflexão (teórica e experimental) para viga RC50

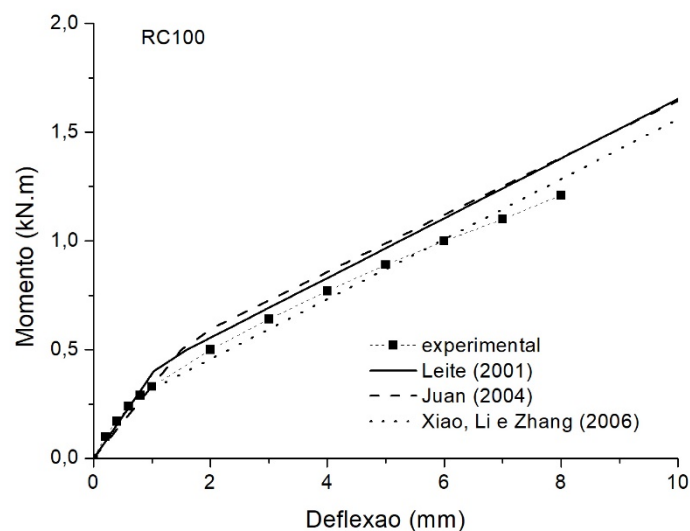


Figura 13 – Curvas momento versus deflexão (teórica e experimental) para viga RC100

6 Conclusão

Os resultados obtidos indicam que a substituição do agregado natural por agregado reciclado, obtido pelo beneficiamento de resíduo de construção e demolição, resulta em redução da resistência à compressão, da resistência à tração e, de forma mais intensa para o módulo de elasticidade que apresentou perda de até 45%. No entanto, a viga T pré-moldada produzida com concreto reciclado, obtido com substituição de 50% do agregado natural por agregado reciclado, apresentou comportamento sob flexão similar à viga com concreto convencional, quando se analisa o comportamento em serviço.

Um modelo bilinear proposto pelo CEB foi utilizado para determinação teórica do comportamento carga-deflexão das vigas de concreto armado. Verificou-se, no entanto, que, para que o modelo possa reproduzir os resultados experimentais, é necessário que a equação apropriada para concreto reciclado, proposta por Xiao, Li e Zhang (2006), seja utilizada para determinação do módulo de elasticidade do concreto.

7 Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia pelo auxílio financeiro à pesquisa e ao CNPq pela bolsa de produtividade do terceiro autor.

Referências

- Ajdukiewicz, A.; Kliszczewicz, A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*, v. 24, p.269-279.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2002) Laje pré-fabricada – Requisitos. Parte 1: Lajes unidirecionais. NBR 14859-1. Rio de Janeiro.
- Carneiro, J. A., Lima, P. R. L., Leite, M. B., & Toledo Filho, R. D. (2014). Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete. *Cement and concrete composites*. v.46, p. 65-72.
- Comite Euro-International Du Beton (CEB) (1983). Bulletin D'Information n° 158-F : Fissuration et déformations I, Lausanne : École Polytechnique de Lausanne.
- Di Pietro, J. E. (1993). Projeto, execução e produção de lajes com vigotes pré-moldados de concreto. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- Droppa Júnior A., El Debs M. K. (2000). Um estudo teórico-experimental do comportamento estrutural de vigotas e painéis com armação treliçada na fase de construção. *Anais do Congresso Brasileiro do Concreto*, 42. IBRACON, São Paulo.

- Flório, M.C. (2003). Projeto e execução de lajes unidirecionais com vigotas em concreto armado. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos.
- Gomez-Soberon J.M.V. (2002) Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregates: an experimental study. *Cement and Concrete Research*. v. 32, p.1301–11.
- Figueiredo Filho, J.R., Shiramizu, A.K.H. (2011) Manufacture and construction of buildings with precast lattice-reinforced concrete slabs *Rev. Ibracon Estrut. Mater.*, v.4., n. 1, p. 123-146.
- Juan, M.S. et. al. (2004) Influence of recycled aggregate quality on concrete properties. *Internacional RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures*, Barcelona.
- Latterza, L. D. M. (1998). Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição: um novo material para fabricação de painéis leves de vedação (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Leite, M.B. (2001). Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Porto Alegre. 270 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Lima, P. R., Barros, J. A., Roque, A. B., Fontes, C. M., & Lima, J. M. (2018). Short sisal fiber reinforced recycled concrete block for one-way precast concrete slabs. *Construction and Building Materials*, v. 187, p. 620-634.
- Paulay, T. and Park, R. (1975) Reinforced concrete structures, Singapore : John Wiley & Sons Inc.
- Poon, C., Chan, D. (2207) The use of recycled aggregate in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 50, p. 293-395.
- Topçu, B.I., SengeL, S. (2004). Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*. v. 34, n. 8, p.1307-1312.
- Xiao, J.-Zh, Li, J.-B., Zhang, Ch. (2006) On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: an overview. *Materials and structures*, v. 39, n. 6, p. 655-664.
- Xiao, J., Sun, Y., & Falkner, H. (2006). Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete. *Engineering Structures*, v. 28, n. 1, p.1-8.

Theoretical and experimental analysis of deflection of precast T-beams made from recycled concrete

Abstract

The use of recycled concrete in precast slabs could greatly reduce natural aggregate consumption and minimize the environmental impact of the construction industry. However, due to the lower modulus of elasticity of the recycled concrete, it is necessary to evaluate the impact of the recycled aggregate substitution on the deformation limit states of the structures. In this work, T beams were molded with conventional precast concrete beams and recycled concrete roof to simulate the rib of a precast slab. The T beams were tested under flexion. Three types of concrete were tested, with natural aggregate and with substitution levels of natural coarse aggregate by 50% and 100% recycled aggregate. For the calculation of the deformations we used the bi-linear model proposed by CEB and equations for the modulus of elasticity proposed by researchers. T-beams, produced with 50% recycled aggregate, showed similar mechanical behavior to the natural aggregate beam, while the 100% recycled aggregate beam presented lower strength and stiffness. The theoretical model presented a good approximation with the experimental results, when the elastic modulus equation is adjusted for recycled aggregate concrete.

Conclusion

The results indicate that the substitution of natural aggregate for recycled aggregate, obtained by processing and demolition waste, results in a reduction of compressive strength, tensile strength and, more intensely, for the elastic modulus that showed loss up to 45%. However, the precast T-beam made from recycled concrete, obtained by substituting 50% of the natural aggregate for recycled aggregate, showed similar flexural behavior to the conventional concrete beam when analyzing the in-service behavior.

A bilinear model proposed by CEB was used for the theoretical determination of the load-deflection behavior of reinforced concrete beams. However, it was found that, for the model to reproduce the experimental results, it is necessary that the appropriate equation for recycled concrete proposed by Xiao, Li and Zhang (2006) be used to determine the modulus of elasticity of the concrete.