

# Análise preliminar de parâmetros de fratura de concretos compactados com agregados de construção e de demolição para bases de pavimentos

José Tadeu Balbo<sup>1</sup> e Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque<sup>2</sup>

**Resumo:** Parâmetros de fratura para concretos secos que em sua fabricação empreguem agregados reciclados de resíduos de construção e de demolição foram avaliados, permitindo verificar que a resistência à propagação de fissuras bem como a energia total de fratura sofrem quedas relevantes em comparação aos mesmos concretos que empregam agregados virgens de granito. Os resultados sugerem cautela no emprego desses materiais em bases de pavimentos.

[DOI:10.4237/transportes.v21i1.674](https://doi.org/10.4237/transportes.v21i1.674).

*Palavras-chave:* agregado reciclado de entulho, concreto compactado com rolo, pavimentos, fratura.

**Abstract:** Parameters of fracture tests in dry concretes employing recycled aggregates from construction waste and demolition were evaluated allowing verifying that its resistance to crack propagation as well as its total energy of fracture show significant declines compared to the same concrete manufactured with virgin granite aggregate. The results suggest caution in the use of such materials in pavement bases.

*Keywords:* rubble recycled aggregate, rolled compacted concrete, pavements, fracture.

## 1. INTRODUÇÃO

Em publicação anterior na Revista Transportes da ANPET Ricci e Balbo (2009) haviam documentado uma pesquisa sobre parâmetros de resistência e índices físicos de concretos secos (normalmente chamados em pavimentação por concretos compactados, ou CCR) produzidos com entulho reciclado a partir de resíduos de construção e de demolição (RCD). Dentre as principais conclusões que emergiram dos estudos laboratoriais, destacavam-se: (a) ao custo de apenas 9% de aumento em peso do consumo de cimento, era possível serem obtidos CCR de mesma resistência com emprego de até 50% de agregados reciclados de RCD – o estudo se pautou por resistências de dosagem de 2,5 N/mm<sup>2</sup> em tração na flexão, por ensaio de dois cutelos -; (b) havia muita porosidade nos agregados de RCD o que gerava também CCR com umidades ótimas de compactação acima da umidade do CCR de referência; (c) a substituição de 100% do agregado virgem pelo reciclado também não encaminharia para alterações importantes na resistência do concreto, embora o módulo de elasticidade decrescesse sensivelmente; os valores de módulo de elasticidade medidos então apresentavam estrita relação com a porosidade e com a massa específica dos CCR, tendo ocorrido queda expressiva em seus valores, de 31 GPa para 17 GPa, respectivamente, para o concreto com 100% de agregados virgens (graníticos) e para o concreto com 100% de agregados de RCD.

Resgatando-se sumariamente os dados anteriores, na Figura 1 observa-se o grande grau de correlação entre o mó-

dulo de elasticidade do concreto com sua porosidade (bem como com seu índice de absorção d'água), denotando queda expressiva do primeiro em função do aumento da porosidade, corroborando as expectativas de Salganik (1965) em ciências dos materiais. O fato mais curioso da pesquisa naquele momento fora a ausência de dependência entre o módulo de elasticidade e a resistência dos concretos secos reciclados (Figura 2); a resistência pouco se alterava para as misturas ao custo de 9% de incremento no consumo de cimento.

Concluía-se também, de modo otimista, que o material poderia ser empregado em camadas de pavimentos, fazendo-se a necessária e prudente ressalva, contudo, que ensaios de fadiga seriam desejáveis sobre as amostras para trazer novas luzes sobre a durabilidade dos materiais estudados sob carregamento repetido, pois “*com agregados mais frágeis e maior porosidade há possibilidades de um comportamento à fadiga menos satisfatório, que passaria a depender não apenas das ligações na interface pasta/agregado mas também da resistência do próprio agregado.*” (Ricci e Balbo, 2009).

Após fase de trabalhos iniciais, dada a natureza dos concretos estudados, teve-se a lucidez de que seria necessária a preparação de testes de fratura desses concretos pois, os ensaios de fadiga pouco teriam a dizer sobre a estrutura interna do material, muito poroso, que fatalmente multiplicaria a dispersão dos resultados, à parte a típica dispersão inerente aos testes de fadiga em concretos densos, bem como a grande quantidade de amostras requeridas. De tal sorte que foi tomada a decisão de elaboração de testes preliminares de tenacidade à fratura com os materiais daquela pesquisa, como mais esclarecedor do comportamento da microestrutura do material, permitindo a definição de sua resistência à propagação de fissuras bem como da energia total de fratura requerida para seu colapso. Este artigo apresenta os resultados obtidos, trazendo novas luzes para a compreensão do material estudado. Foram escolhidos para tais testes, que são muito morosos, apenas os concretos extremos, ou seja,

<sup>1</sup> José Tadeu Balbo, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. (e-mail: jotbalbo@usp.br).

<sup>2</sup> Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, SP, Brasil. (e-mail: sao@dec.feis.unesp.br).

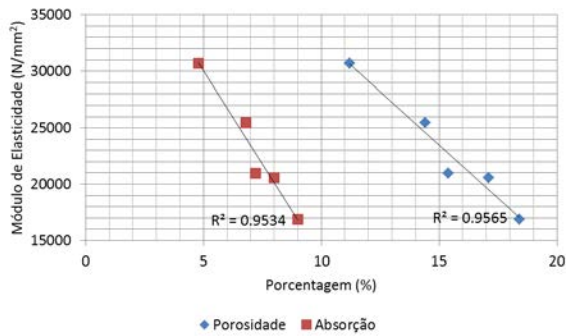


Figura 1. Variação do módulo de elasticidade em função da absorção d'água e da porosidade

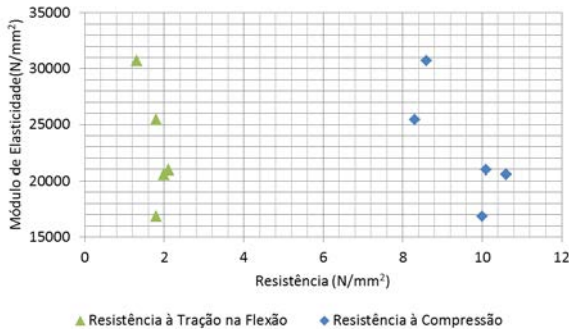


Figura 2. Relações entre resistências e módulos de elasticidade

aqueles com 100% de agregados virgens e aqueles com 100% de agregados reciclados de RCD.

## 2. METODOLOGIA DE TESTES À FRATURA E PARA SUA INTERPRETAÇÃO

Os concretos presentemente estudados são identificados por REF (CCR de referência), que consumia 110 kg/m<sup>3</sup> de ligante hidráulico e o concreto que incorporava 100% de agregados reciclados de RCD (RCD4-100%), com consumo de ligante de 125 kg/m<sup>3</sup> (13,6 % superior); esse último concreto, a título de recordação, fora preparado com reciclados de RCD de cor avermelhada com grande quantidade de partículas de origem cerâmica. Os materiais e métodos de preparação são exatamente aqueles descritos por Ricci e Balbo (2009). Os testes de tenacidade à fratura foram realizados com o ensaio de um cutelo em amostra prismática com entalhe de 25 mm em sua face inferior (a altura e largura do prisma era de 100 mm), seguindo o procedimento ASTM C1609. Os testes ocorreram sob carregamento contínuo e bastante lento, com controle do deslocamento vertical do corpo de prova (Figura 3), utilizando taxa de incremento de deformação de 5 μm/min, o que permite a determinação com exatidão da curva carga *versus* deslocamento embora leve horas (um dia de trabalho). O equipamento empregado

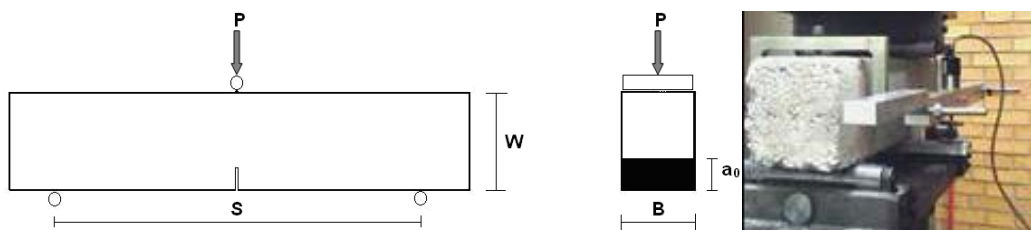


Figura 3. Arranjo para os testes de fratura

foi uma prensa universal servo-controlada. Os corpos de prova foram ensaiados após 120 dias de sua preparação e conservação em laboratório.

O comprimento da fissura das amostras prismáticas de CCR ensaiadas foi determinado tomando-se o modelo calibrado por Ferreira (2007). Para sua calibração, o comprimento normalizado da fissura (comprimento da fissura dividido pela altura da seção transversal do corpo de prova) é válido na faixa de 0,05 a 0,75. Esse tipo de calibração requer amostras de seção quadrada (altura igual à largura) e no esquema do teste a distância ou vão entre os apoios (S) deve ser maior que três vezes o tamanho da altura da viga. As amostras testadas possuíam 100 mm de altura, 100 mm de largura, 300 mm de vão livre no teste, 400 mm de comprimento total e um entalhe de 25 mm no meio do vão em sua face inferior.

### 2.1. Fator de Intensidade de Tensões (K<sub>I</sub>)

O valor de K<sub>I</sub> é determinado como função da carga aplicada, das dimensões da amostra e do comprimento da fissura conforme a seguinte equação (Ferreira, 2007):

$$K_I = \frac{1.5 \times P \times S \times \sqrt{\pi \cdot a}}{B \times \sqrt{W}} \times f(\alpha) \quad (1)$$

sendo P a carga aplicada (em Newton), B a largura da vigota de concreto, W a altura da vigota e S o vão entre os apoios (todos os comprimentos em mm); a é o comprimento instantâneo da fissura (mm) e  $\alpha = a/W$  é o comprimento normalizado da fissura para a altura W, sendo K<sub>I</sub> obtido na unidade de MPa.(m)<sup>1/2</sup>; f(α) é uma função adimensional como na sequência se esclarece.

### 2.2. Comprimento Instantâneo da Fissura (a)

A relação carga-deslocamento para a carga aplicada é dada por:

$$\delta = \frac{1.5 \times P \times S^2}{B \times W^2 \times E} V(\alpha) \quad (2)$$

sendo E o módulo de elasticidade do concreto (em MPa) e V(α) uma função adimensional dependente da geometria do teste, válido para B = W (Ferreira, 2007). Para a vigota prismática com S/W = 3, sujeita à configuração de um cutelo apenas, as funções adimensionais f(α) – como indicadas na equação (1) – e V(α) podem ser calculadas, para o intervalo 0.05 ≤ α ≤ 0.75, com base na equação:

$$f(\alpha) \text{ or } V(\alpha) = i\alpha^5 + j\alpha^4 + k\alpha^3 + l\alpha^2 + m\alpha + n \quad (3)$$

na qual α equivale a a/W e os coeficiente i, j, k, l, m and n podem ser definidos por meio de calibração numérica para uma geometria específica de corpo de prova, assumindo diferentes valores para as funções f(α) e V(α), como por

exemplo aqueles fornecidos na Tabela 1 (Ferreira 2007).

**Tabela 1.** Constantes para as funções adimensionais para a equação (3)

Parâmetro	$f(\alpha)$	$V(\alpha)$
$i$	60,398928	352,294990
$j$	-86,787007	-542,694230
$k$	47,418483	321,336060
$l$	-8,234774	-80,619223
$m$	0,092058	9,756626
$n$	0,998367	0,292978

### 2.3. Resistência à Propagação da Fissura Quasi-Estática (R)

No caso de materiais para os quais a curva-R possui inclinação crescente e que se encontram em condições de propagação de fissura quasi-estática a resistência à propagação da fissura (R) pode ser calculada a partir de sua relação o fator de intensidade de tensões instantâneo na “boca” do entalhe. Nesse compasso, R pode ser encontrado com base na equação da Mecânica de Fratura Elástico-Linear como se segue (Irwin, 1957):

$$R = \frac{K_I^2}{E} \quad (4)$$

### 2.4. Energia Total de Fratura ( $\gamma_{wof}$ )

Um critério para a determinação de valores de R confiáveis é se comparar o valor médio de R, chamado de  $R_m$  e a energia total de fratura  $\gamma_{wof}$  (Bornhauser *et al.*, 1985; Kleinlein e Hubner, 1997). Para que tal critério seja aplicado o valor de  $R_m$  foi calculado empregando-se a seguinte equação:

$$R_{mean} = \left( \frac{1}{a_f - a_0} \right) \times \int_{a_0}^{a_f} R(a) da \quad (5)$$

em que  $a_f$  é o comprimento final da fissura com propagação estável no intervalo válido ( $\alpha \leq 0.75$ ) e  $a_0$  é o comprimento original do entalhe, ao passo que  $R(a)$  é a resistência à propagação quase-estática da fissura denotada pela equação (4) como função do comprimento da fissura propriamente dito. O valor de  $2\gamma_{wof}$  é calculado a partir da área de propagação

estável da fissura na curva força *versus* deslocamento (região pós-pico da força), no intervalo válido para  $\alpha$ , admitindo-se não ocorrerem deformações permanentes.

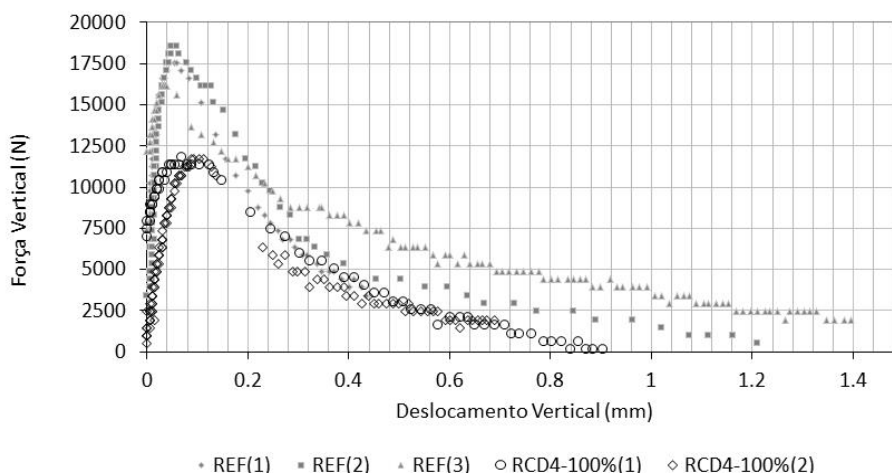
A determinação da energia total de fratura é então realizada calculando-se o trabalho exercido pela força aplicada pela prensa de ensaios no corpo de prova, empregando-se a equação de Nakayama (1985) no intervalo válido para  $\alpha$ :

$$\gamma_{wof} = \frac{(\text{Área sob a curva } P \times d)}{2A} \quad (6)$$

A integral na área de interesse da curva força *versus* deslocamento foi calculada empregando-se o programa computacional Origin 6.0. A integral sob a curva define a energia total. A energia de fratura é então determinada pela dedução da energia elástica da energia total. A energia elástica, no caso, foi calculada considerando-se não ocorrerem deformações plásticas no trecho da curva, antes do pico de força. O valor de A (área fissurada dentro do comprimento de propagação da fissura) na equação (6) foi determinado a partir da equação (3) ( $\alpha = a/W$ ), multiplicada pela largura da seção (B) da amostra.

## 3. RESULTADOS OBTIDOS PARA TESTES DE TENACIDADE À FRATURA

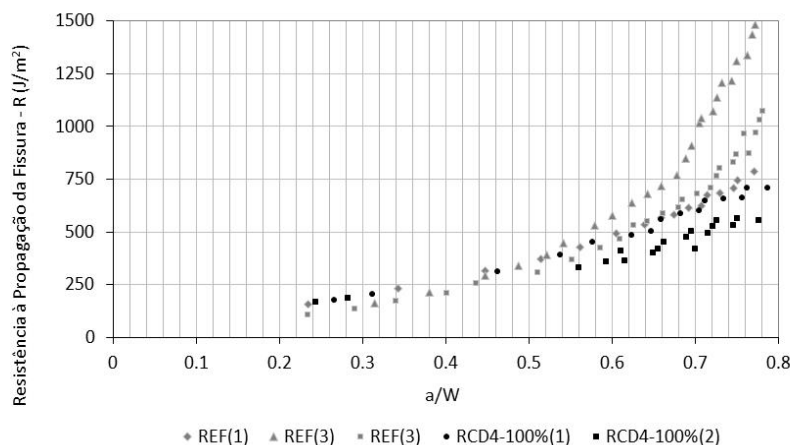
Na Figura 4 são apresentadas as curvas força *versus* deslocamento (relaxação) para as amostras dos concretos secos de referência e aquele que incorpora 100% de agregados reciclados de RCD, obtidas de modo consistente com a metodologia acima exposta. Nota-se claramente que a força-pico é maior para o REF que para o RCD4-100%; também a energia total (área abaixo da curva completa) é visivelmente maior para o REF. Dessa maneira o concreto RCD4-100% é inferior estruturalmente ao REF. Essa notável diferença de comportamento é facilmente verificável na Tabela 2 para a resistência à propagação da fissura ( $R_{mean}$ ), respectivamente de 647 J/m<sup>2</sup> para o REF e 511 J/m<sup>2</sup> para o RCD4-100%; a energia de fratura até o deslocamento de relaxação final resultou, respectivamente, 475 e 235 J/m<sup>2</sup>, i.e., 50% da energia é necessária para romper a mistura RRA4-100%. Tais resultados descortinam as relevantes desvantagens, em termos de comportamento à fratura, usando os agregados reciclados de RCD em substituição aos agregados ordinários de



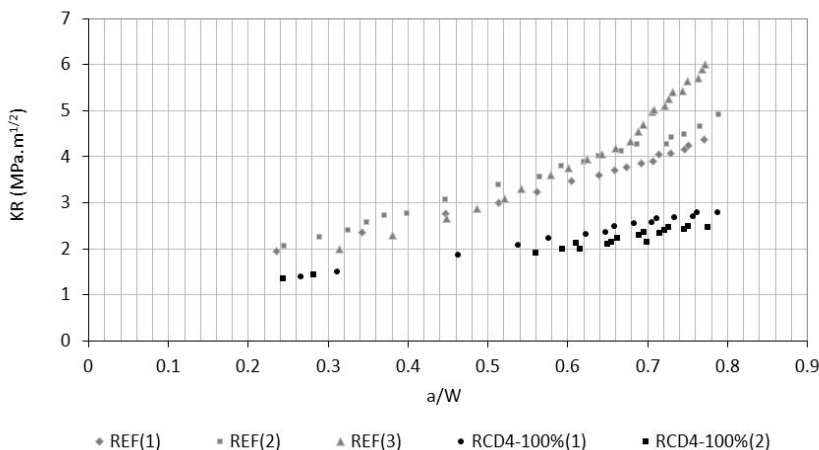
**Figura 4.** Curvas carga versus deslocamento para diferentes concretos secos (CCR)

**Tabela 2.** Parâmetros médios de tenacidade para início de abertura de fissura ( $K_{ICIP}$ ), para resistência média à propagação da fissura ( $R_m$ ) e energia de fratura ( $\gamma_{wof}$ )

Concreto seco	Deformação de início da fissura (mm)	Força para início da fissura (N)	Deformação Final (mm)	$K_{ICIP}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$R_m$ (J/m <sup>2</sup> )	$\gamma_{wof}$ (J/m <sup>2</sup> )
REF	0,1	16,000	1,51	1,89	647	475
RCD4-100%	0,1	11,600	0,96	1,37	511	235



**Figura 5.** Curvas-R para diferentes concretos secos (CCR)



**Figura 6.** Curvas- $K_R$  para diferentes concretos secos (CCR)

granito. Os resultados na Tabela 2 indicam também os valores do fator de intensidade de tensões no princípio da propagação da fissura, que é definida como sendo a tenacidade à fratura no início da propagação da fissura ( $K_{ICIP}$ ); esse parâmetro para o concreto de referência foi 38% superior que o relacionado ao caso do RCD4-100%.

As curvas-R (resistência à propagação da fissura) são apresentadas de dois modos distintos: a resistência à fissuração ( $R$ ) como função do comprimento normalizado da fissura (Figura 5) e a curva-  $K_R$  (ou curva- $K_I$ , equação (1)) como função do comprimento normalizado da fissura (Figura 6). Ao se analisar os resultados obtidos é evidente que o comportamento do concreto RCD4-100% é inferior ao REF, além do mais, ambos os materiais apresentando curvas-R e curvas-  $K_R$  com taxas crescentes; isto é indicativo de que ambos os materiais forjam aumento da resistência à fissuração na medida em que o comprimento da fissura cresce. Vários autores (como Sakai, 1987; Lemaistre, 1998) atribuem esse comportamento aos agregados graúdos do concreto e de outros compósitos, que realça a adesão entre

os grãos na superfície da fratura em formação, criando um mecanismo que dissipa a energia de propagação da fissura resultando no crescimento mais acelerado da curva-R.

Conforme sugere Sakai (1987) curvas-R crescentes atingem um valor de  $R$  constante apenas no momento em que a zona de processo atinge um tamanho pequeno em relação à seção da amostra em teste; no caso estudado, com curvas crescentes, há clara indicação de que as zonas de processo nos CCR eram grandes face ao tamanho da amostra.

#### 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS FACE AO EMPREGO DOS MATERIAIS EM PAVIMENTAÇÃO

Quando o concreto emprega agregados reciclados a partir de antigas estruturas de concreto a redução do módulo de elasticidade do concreto reciclado se reporta à ocorrência de argamassa aderida aos antigos agregados pétreos gerando daí maior porosidade nessas superfícies. No caso de concretos contendo boa quantidade de agregados reciclados

de materiais cerâmicos a redução do módulo de elasticidade se relaciona com a própria porosidade dos agregados; e a maior porosidade é recíproca de menor densidade dos grãos, conseqüentemente da mistura. Como na pesquisa original (Ricci e Balbo, 2009) observou-se resistência semelhante para os vários tipos de concreto, há de se concluir que o decréscimo do módulo de elasticidade com o aumento da porosidade reporta-se mais certamente ao segundo caso, ou seja, à natureza dos agregados.

Camadas cimentadas em pavimentos suportam às cargas aplicadas pelo tráfego aeroportuário ou rodoviário como placas em flexão no início de sua utilização. Sabe-se que quanto maior a rigidez da base cimentada maior é a tensão de tração na flexão à qual se sujeita; nesse contexto a perda de rigidez e preservação simultânea da resistência é algo tido como vantajoso ou favorável, em primeira análise. Malgrado tais características dos concretos com resíduos de RCD, à custa de muito pequeno incremento no consumo de cimento, a porosidade dos grãos, como mostraram os testes de fratura, conduz o material a mau comportamento em comparação ao concreto de referência: a energia de fratura para romper completamente o material é muito sensível a essa microestrutura de complexos grãos porosos de tal sorte que em tais concretos a energia despendida no processo é cerca da metade empregada no caso dos concretos secos com agregados virgens.

Dada tal situação, é muito factível que uma mesma carga venha a induzir e causar a coalescência de fissuras em uma camada com concretos preparados com reciclados de RCD mais prematuramente que no caso de concretos compactados convencionais. O que precavidamente nos leva à sugestão do uso desses materiais em camadas abaixo da base do pavimento, mesmo para se evitar a ocorrência, possivelmente prematura, de fissuras de reflexão para os revestimentos asfálticos (Saxena *et al.*, 2010). A outra face da moeda é que a consideração simultânea de parâmetros observados como resistências à tração na flexão, módulos de elasticidade e energia de fratura, ser indicativo de que supostamente esses concretos compactados com agregados reciclados de RCD perfaçam desempenho bem mais satisfatório que convencionais britas graduadas tratadas com cimento, com tenacidade à fratura bem mais pífia (Balbo, 2006).

O CCR estudado apresentou faixas de variação próximas ou diferentes a outros tipos de concreto já investigados do

ponto de vista de fratura, como indicados na Figura 7. Ferreira (2007) concentrou seus estudos sobre concretos de elevada resistência (HSC) incluindo ou não adoção de fibras de aço em sua formulação, às taxas de 40 kg/m<sup>3</sup> e 80 kg/m<sup>3</sup>. As curvas- $K_R$  foram então obtidas com o mesmo tipo de teste empregado no presente estudo, com valores para  $\alpha$  válidos até o limite de 0,7. A excessiva fragilidade de concretos de elevada resistência (no Brasil emprega-se também a expressão “concreto de alto desempenho”, embora questionável) faz com que os concretos presentemente avaliados sob o enfoque de fratura sejam, em certo grau, mais resistentes à fratura, como para  $\alpha=0,2$ . Em outros estudos com concretos compactados com substituição da fração areia por escória granulada de alto forno (CCR com Escória), considerado o mesmo concreto de referência aqui estudado, foram obtidos resultados pouco mais favoráveis (Albuquerque *et al.*, 2011).

O comportamento da curva-R dos concretos estudados (REF e RRA4-100%), uma curva crescente, é consistente para o caso de materiais granulares como aqueles estudados por Lemaistre (1998), Reinhart e Xu (1999) e por Ferreira (2007). Esses autores também, de forma consistente obtiveram curvas-R crescentes sem limiares, com exceção ao caso do concreto de elevada resistência estudado por Ferreira (2007); nesse caso o material, embora com resistência muito elevada, apresenta elevada fragilidade (no processo de ruptura), o que indicaria uma zona de processo da fratura possivelmente menor.

Mazzei e Rodrigues (2000) ressaltam que a forma da consistente curva-R crescente é devida à calibração da equação para o teste em flexão. Todavia, esse não parece ser o caso de curvas-R obtidas no presente estudo uma vez que a equação empregada foi aquela deduzida ou calibrada por Ferreira (2007) que em seu estudo obteve uma curva-R com evidente limiar para o caso de concreto de elevada resistência sem fibras; o comportamento diferenciado e coerente de concretos com fibras e sem fibras foi devidamente descrito pela equação empregada, sem restrições para casos extremos. O crescimento sem limiar na curva-R do RCD4-100% é devido ao tamanho da zona de processo como arguiu Sakai (1987); portanto, não é devido à calibração da equação para determinação de  $K$  como se referem Mazzei e Rodrigues (2000). Por comparação dos resultados apresentados na Figura 11 pode-se afirmar que os concretos secos

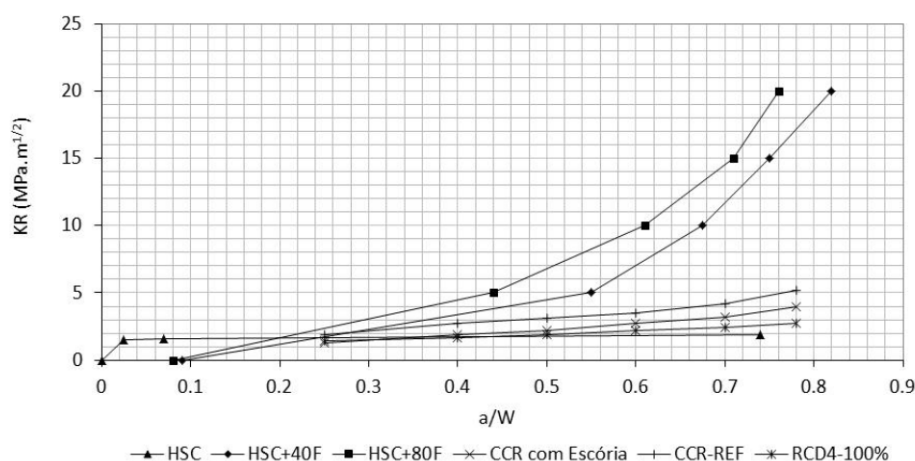


Figura 7. Curvas- $K_R$  para vários concretos já estudados

estudados, REF e RCD4-100% à fratura, apresentaram melhor desempenho quanto à abertura e propagação da fissura que o concreto de alta resistência sem fibras. Isso é tido como válido para valores de  $\alpha$  até 0,7.

O padrão crescente de curva-R dos concretos secos estudados, não tão ressaltado no caso do RCD4-100% denota algum mecanismo de relaxação para essas misturas, revelando-as algo mais resistente (à fratura) quando comparadas ao concreto plástico de elevada resistência. Aliás, já fora demonstrado por Cervo (2004) que tais concretos de elevada resistência potencialmente apresentavam “baixo” desempenho à fadiga (embora por vezes referidos como “concretos de alto desempenho”).

Apesar das dimensões das amostras não evidenciarem amplamente tal zona de processo, esta é uma limitação dos testes, embora fosse impraticável o emprego de amostras de grandes dimensões para se obter curvas-R até seus limiares. Contudo, a idéia central de estudar à fratura os concretos secos foi aquela de comparar seus mecanismos de dissipação de energia, o que foi logrado no estudo. Testes de fadiga foram descartados por proporcionarem muito pouca informação sobre a microestrutura dos materiais, além de sua habitual dispersão, especialmente com materiais heterogêneos.

Pode ser retido dos estudos que, apesar da perda de resistência estática e da capacidade de reter energia de deformação durante o processo de fissuração dos concretos compactados que incorporam reciclados de RCD, todos os valores obtidos são ainda mais favoráveis que aqueles já estudados para a BGTC (Balbo, 2006), o que leva a acreditar que tais materiais possam e devam ser cotejados em aplicações mais específicas como pisos industriais e pavimentos urbanos, até mesmo como opção às bases cimentadas tradicionais, com possíveis diminuições em passivos ambientais.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos estudos realizados, as seguintes conclusões puderam ser delineadas:

- A energia de fratura do CCR que incorpora 100% de agregados reciclados de RCD decresce relevantemente, à ordem de 50%, nas condições do estudo. Isso sugere um desempenho bastante inferior quanto à fissuração em campo desses materiais, o que pode ser tomado como a maior limitação em seu emprego, uma vez que fissuração precoce impõe também a reflexão de fissuras prematura em revestimentos asfálticos; os resultados intuitivamente evidenciam grande perda na resistência à fadiga quando há incorporação de agregados reciclados de RCD em concretos compactados;
- Do ponto de vista de microestrutura do material, a resistência à fratura resultou crescente com a propagação da fissura, sem alcançar um patamar; os materiais estudados (concretos secos) revelaram-se mais vantajosos, do ponto de vista de fratura, que concretos de elevada resistência e muito frágeis;
- O comportamento à fratura verificado para os materiais estudados relaciona-se de modo claro com a zona de processo da fratura, sendo recomendados estudos a posteriori, preferencialmente em arranjos com placas, de maneira a melhor evidenciar os efeitos das interfaces dos agregados no mecanismo de

fratura; e

- A elevada porosidade dos concretos secos com agregados reciclados de RCD tenderá a aumentar na medida em que a incorporação de agregados porosos aumente, reduzindo de modo memorável a energia necessária para o completo colapso da amostra.

São recomendados enfaticamente estudos de campo que possam a vir melhor expor o desempenho à fissuração dos materiais estudados bem como suas possíveis consequências em termos de fissuras de reflexão para camadas de misturas asfálticas além da durabilidade de pavimentos contendo tais materiais frente a aspectos estruturais e possivelmente funcionais. Somente assim serão detalhadamente conhecidas as possíveis falhas e desvantagens na aplicação desses materiais.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do estudo de concretos compactados para pavimentação com diversas alternativas de agregados reciclados, por meio do processo no. 473498/2006-5.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, M. C. F.; J. T. Balbo; E. C. Sansone e P. C. Pinto (2011) Fracture Characterization of Roller Compacted Concrete Mixtures with Blast Furnace Slag and Industrial Sand. *Int. J. Pavement Res. Technol.* v. 4, n. 4, p. 244-251.
- Balbo, J. T. (2006) Britas graduadas tratadas com cimento – uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura. *Transportes*, v. 14, n. 1, p. 45-53.
- Bornhauser, A.; K. Kromp e R. F. Pabst (1985) R-curve evaluation with ceramic materials at elevated temperatures by an energy approach using direct observation and compliance calculation of the crack length. *Journal of Materials Science*, v. 20, p. 2586-2596. DOI: [10.1007/BF00556090](https://doi.org/10.1007/BF00556090).
- Cervo, T. T. (2004) *Estudo do comportamento da fadiga de concretos de cimento para pavimentação*. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Ferreira, L. E. T. (2007) Fracture analysis of a high-strength concrete and a high-strength steel-fiber-reinforced concrete. *Mechanics of Composite Materials*, v. 43, n. 3, p. 479-486. DOI: [10.1007/s11029-007-0045-8](https://doi.org/10.1007/s11029-007-0045-8).
- Irwin, G. R. (1957) Analysis of stresses and strain near the end of a crack. *Journal of Applied Mechanics*, v. 24, p. 361-364.
- Kleinlein, F. W. e H. R. Hubner (1997) Curve evaluation with ceramic materials at elevated temperatures by an energy approach using direct observation and compliance calculation of the crack length. *Proceedings of ICF4*, Waterloo.
- Lemaistre, H. (1998) *Study of the thermal-mechanics properties of several refractors*. Thesis (PhD) École Doctorale Matériaux, Institut National de Sciences Appliquées.
- Mazzei, A. C. A. e J. A. Rodrigues (2000) Alumina-mulite-zirconia composites obtained by reaction sintering – Part II. R-Curve Behavior. *Journal of Materials Science*, v. 35, p. 2815-2824. DOI: [10.1023/A:1004765326780](https://doi.org/10.1023/A:1004765326780).
- Nakayama, J. (1985) Direct measurement of fracture energies of brittle heterogeneous materials. *Journal of American Ceramic Society*, v. 48, n. 11, p. 583-587. DOI: [10.1111/j.1151-2916.1965.tb14677.x](https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1965.tb14677.x).
- Reinhardt, H. W. e S. Xu (1999) Crack extension resistance base on the cohesive force in concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 64, n. 5, p. 563-587. DOI: [10.1016/S0013-7944\(99\)00080-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(99)00080-6).
- Ricci, G. e J. T. Balbo (2009) Resistência e elasticidade de concretos compactados com agregados reciclados de construção e de demolição para aplicações em pavimentação. *Transportes*, v. 17, n. 2, p. 27-35.
- Sakai, M. (1987) Fracture Mechanics of Refractory Materials. *Taikabutsu Overseas*, v. 8, n. 2, p. 4-12.

- Salganik, R. L. (1965) The strength of adhesive joints using the theory of cracks. *Int. Journal of Fracture Mechanics*, v. 1, p. 114–128. DOI: [10.1007/BF00186749](https://doi.org/10.1007/BF00186749).
- Saxena, P.; D. Tompkins; L. Khazanovich e J. T. Balbo (2010) Evaluation of characterization and performance modeling of cementitiously stabilized layers in MEPDG. *Transportation Research Record*, n. 2186, p. 111–119. DOI: [10.3141/2186-12](https://doi.org/10.3141/2186-12).