

DETERMINAÇÃO DO FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO CRÍTICO K_{IC} DE CONCRETOS DE CIMENTOS PORTLAND E GEOPOLIMÉRICO REFORÇADOS POR FIBRAS DE BASALTO¹

Dylmar Penteado Dias²

Resumo

Este trabalho teve por objetivo realizar um estudo comparativo de tenacidade à fratura (K_{IC}) entre dois concretos, convencional e geopolimérico, reforçados por fibras de basalto. Foram utilizadas frações volumétricas de fibras iguais a 0%, 0,5% e 1,0%. Ensaios de flexão a três pontos foram realizados em 18 corpos-de-prova de 150 mm x 150 mm x 500 mm com entalhes de 30 mm de altura por 3 mm de espessura. As resistências à compressão e à tração por compressão diametral dos concretos também foram determinadas, bem como a medida de suas consistências pelo ensaio VeBe. No estado fresco, os concretos geopoliméricos apresentaram menor trabalhabilidade do que os concretos convencionais. No entanto, no estado endurecido, os concretos geopoliméricos apresentaram melhor desempenho do que os concretos convencionais em todas as propriedades mecânicas avaliadas.

Palavras-chave: Concreto; Fibras; Fratura; Tenacidade.

DETERMINATION OF THE CRITICAL STRESS INTENSITY FACTOR K_{IC} OF CONCRETES OF PORTLAND AND GEOPOLYMERIC CEMENTS REINFORCED BY BASALT FIBERS

Abstract

This work had for objective to accomplish a comparative study of fracture toughness (K_{IC}) among two concretes, ordinary and geopolymeric, reinforced by basalt fibers. Volumetric fractions of fibers same to 0%, 0,5% and 1,0% were used. Three-point bending tests were accomplished in 18 specimens of 150 mm x 150 mm x 500 mm with notches of 30 mm of height for 3 mm of thickness. The compressive and splitting strengths of the concretes were also determined, as well as the measurement of their consistencies by VeBe test. In the fresh state, the geopolymeric concretes presented smaller workability than the ordinary ones. However, in the hardened state, the geopolymeric concretes presented better performance than the ordinary ones in all the evaluated mechanical properties.

Key-words: Concrete; Fibers; Fracture; Toughness.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Professor Associado do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, Laboratório de Engenharia Civil (LECIV/CCT/UENF).

1 INTRODUÇÃO

Uma configuração usual para a avaliação da tenacidade à fratura em materiais quase-frágeis (concretos) é o ensaio de flexão a três pontos em vigas entalhadas, pois este pode ser facilmente executado. Entretanto, a relação distância entre os apoios/altura total da viga, β , é fixa para um valor igual a 4,0, e os valores tabelados e as expressões para o cálculo do fator de intensidade de tensão crítico (K_{Ic}) são aplicáveis somente para a faixa de valores de 0,4 a 0,7 para a relação altura do entalhe/altura total da viga, α .⁽¹⁻⁴⁾

Freqüentemente, no entanto, alguns experimentos necessitam de corpos-de-prova com $\beta = L_0/h$ diferentes de 4,0, e com altura dos entalhes fora da faixa de valores citados anteriormente. Por exemplo, a realização de ensaios mais estáveis (flexão pura) pode ser facilitado com o emprego de corpos-de-prova com maiores valores de $\beta = L_0/h$ e $\alpha = a_0/h$, enquanto ensaios em condições ambientais extremas (baixas ou altas temperaturas) podem ser simplificados, caso menores valores de β e α sejam usados.⁽⁵⁾

Neste estudo foram utilizados corpos-de-prova com 150 mm x 150 mm x 500 mm, moldados de acordo com as prescrições da NBR 5738/93,⁽⁶⁾ com entalhes de 30 mm de altura por 3 mm de espessura, garantindo estado plano de deformações na extremidade do entalhe. A avaliação da tenacidade à fratura foi realizada com base nas equações recomendadas por Guinea.⁽⁵⁾

O parâmetro K_{Ic} , fator de intensidade de tensão crítico no modo I de abertura da trinca, expressa os campos de tensão e deformação em uma região em torno da ponta da trinca em um corpo homogêneo linear-elástico, em função somente da carga e da configuração da peça ensaiada. De acordo com Guinea,⁽⁵⁾ o fator de intensidade de tensão crítico (K_{Ic}) é dado por:

$$K_{Ic} = \psi \cdot \sigma_c \cdot \sqrt{h} \quad \text{com} \quad \sigma_c = \frac{6 \cdot M_{max}}{b \cdot h^2} \quad (1)$$

onde, M_{max} é o momento fletor máximo, b é a largura da viga, h é a altura total da viga e ψ é uma função de forma válida para quaisquer valores de α e para $\beta \geq 2,5$. A expressão geral da função de forma ψ é dada por:

$$\psi = \frac{\sqrt{\alpha}}{(1-\alpha)^{3/2} \cdot (1+3 \cdot \alpha)} \cdot \left[p + \frac{4}{\beta} \cdot (q-p) \right] \quad (2)$$

onde, os valores de p e q são dados por:

$$p = 1,99 + 0,83 \cdot \alpha - 0,31 \cdot \alpha^2 + 0,14 \cdot \alpha^3 \quad q = 1,9 + 0,41 \cdot \alpha + 0,51 \cdot \alpha^2 - 0,17 \cdot \alpha^3 \quad (3)$$

2 MATERIAIS

2.1 Agregados

O agregado miúdo utilizado foi uma areia quartzosa de rio, lavada, com partículas menores do que 4,8 mm, massa específica igual a 2,65 g/cm³,⁽⁷⁾ módulo de finura igual a 2,76⁽⁸⁾ e com teor de impurezas orgânicas menor que 300 ppm.⁽⁹⁾

O agregado graúdo, identificado como traquito por ensaio petrográfico, foi lavado durante o peneiramento, tinha diâmetro máximo de 19,0 mm, massa específica igual a 2,63 g/cm³,⁽⁷⁾ módulo de finura igual a 6,66⁽⁸⁾ e abrasão Los Angeles igual a 18%.⁽¹⁰⁾

Ambos agregados foram secos em estufa a 110°C por 24 horas antes de serem utilizados na confecção dos concretos.

2.2 Cimentos

O cimento Portland utilizado foi o composto com 20% de escória de alto-forno, CPIIE-32 da marca Alvorada. Sua composição potencial calculada pelo método de Bogue foi C₃S = 45,27%; C₂S = 31,30%; C₃A = 6,14% e C₄AF = 14,21%, massa específica igual a 3,04 g/cm³,⁽¹¹⁾ perda ao fogo de 6,3%,⁽¹²⁾ resíduo insolúvel igual a 1,9%,⁽¹³⁾ área específica superficial Blaine igual a 350 m²/kg,⁽¹⁴⁾ resíduo na peneira # 200 de 9,1%, expansibilidade a frio igual a 1,0 mm e tempos de início e fim de pega iguais a 2,0 horas e 4,5 horas, respectivamente.

Cimento geopolimérico é o termo químico que designa a família de polímeros que constituem os cimentos especiais à base de silico-aluminatos.⁽¹⁵⁾ Sialato é uma abreviação para óxido-aluminossilicato. A estrutura sialato utilizado neste estudo, com relação Si/Al ≥ 2,0, consiste de unidades funcionais compostas por tetraedros de SiQ₄(2Al), com o alumínio em número de coordenação IV promovendo o cruzamento das cadeias poliméricas (Figura 1).

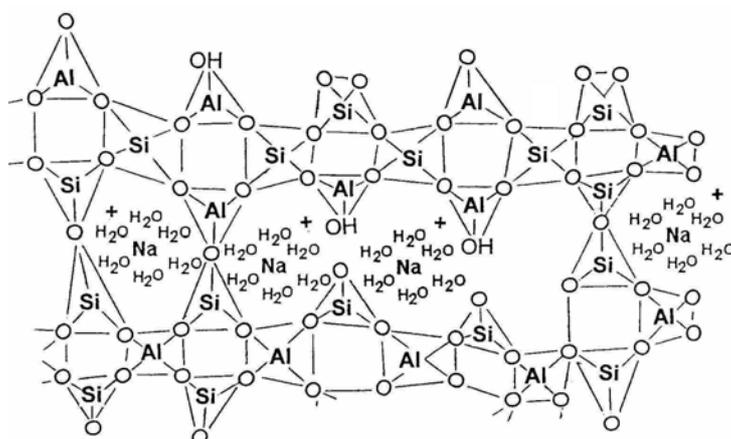


Figura 1. Estrutura tridimensional do cimento geopolimérico.⁽¹⁶⁾

Esse arranjo tridimensional com ligações cruzadas estabelece uma estrutura irregular de baixa mobilidade. Os geopolímeros possuem a fórmula empírica a seguir:



onde, M é um cátion como, por exemplo, potássio, sódio ou cálcio; n é o grau de policondensação e; z é igual a 1, 2 ou 3.

A composição química dos cimentos, obtida por meio do uso de análise semi-quantitativa por espectroscopia por dispersão de energia ("EDS") em um microscópio eletrônico de varredura da marca Jeol, modelo 5800LV, é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química dos cimentos (% em peso).

| Cimento | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | Na ₂ O | K ₂ O | SO ₃ |
|----------------------------|------------------|--------------------------------|-------|--------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| Portland ^a | 22,83 | 5,23 | 63,26 | 4,67 | 0,13 | 0,20 | 0,43 | 3,25 |
| Geopolimérico ^b | 41,45 | 14,65 | 20,23 | 1,40 | - | 3,98 | 18,29 | - |

^a Cimento anidro - dados fornecidos pelo fabricante.

^b Média de 5 análises efetuadas em diferentes locais da matriz polimerizada.

2.3 Fibras

As fibras de basalto utilizadas (Figura 2) tinham comprimento médio de 45,0 mm e diâmetro médio de 9,0 µm. A Tabela 2 mostra as principais características físicas e mecânicas destas fibras. A composição química das fibras de basalto, obtida por meio do uso de análise semi-quantitativa por espectroscopia por dispersão de energia (“EDS”) em um microscópio eletrônico de varredura da marca Jeol, modelo 5800LV, é mostrada na Tabela 3.



Figura 2. Fibras de basalto.

Tabela 2. Propriedades das fibras.

| Propriedades Físicas ^a | |
|--|------|
| Densidade (g/cm ³) | 2,7 |
| Expansão térmica linear entre 0 e 300°C (ppm/°C) | 8,0 |
| Propriedades Mecânicas ^a | |
| Resistência à tração (MPa) | 4840 |
| Módulo de elasticidade (GPa) | 89 |
| Deformação na ruptura (%) | 3,15 |

^a Dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 3. Composição química das fibras de basalto (% em peso)^a.

| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | MnO |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------------------|------|
| 69,51 | 14,18 | 3,92 | 2,41 | 5,62 | 2,74 | 1,01 | 0,55 | 0,04 |

^a Média de 5 análises efetuadas em diferentes locais de diferentes fibras.

3 MÉTODOS

O reforço dos concretos por fibras de basalto foi avaliado por meio de ensaios de resistência à flexão a três pontos, para a determinação do fator de intensidade de tensão crítico, K_{Ic} , dos compósitos. Os corpos-de-prova para os ensaios de flexão foram vigas entalhadas de 150 mm x 150 mm x 500 mm. Os apoios tinham distância entre si de 450 mm e o carregamento consistiu numa carga concentrada no meio do vão (Figura 3). Os entalhes de 3 mm x 30 mm foram feitos nas vigas por meio de disco adiamantado.

Três grupos de vigas foram ensaiadas, sendo cada grupo com V_f igual a 0%; 0,5% e 1,0%, num total de dezoito vigas. Também foram moldados três cilindros de Ø150 mm x 300 mm para os ensaios de resistência à compressão⁽¹⁷⁾ e três cilindros de Ø150 mm x 300 mm para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral.⁽¹⁸⁾

A quantidade de material empregada por m³ de concreto correspondeu a um traço, em peso, igual a 1:2,25:3,25 (aglomerante:agregado miúdo:agregado graúdo). A relação água-cimento empregada foi igual a 0,80.

Ao final do processo de mistura, os concretos foram colocados nos diferentes moldes (cilíndricos e prismáticos) e vibrados com uma frequência de 50 Hz durante

30 segundos a cada camada de 50 mm de espessura. Foram realizados ensaios de tempo VeBe⁽¹⁹⁾ para medida de consistência dos concretos.

Após 24 horas, todos os corpos-de-prova foram desmoldados. Em seguida, os corpos-de-prova de concreto de cimento Portland (CCP) foram imersos em tanque com água saturada de cal por 14 dias e, posteriormente, em câmara úmida a 20°C e umidade relativa em torno de 95%. A cura dos corpos-de-prova de concreto de cimento geopolimérico (CCG) foi feita sob as condições ambientes do laboratório.

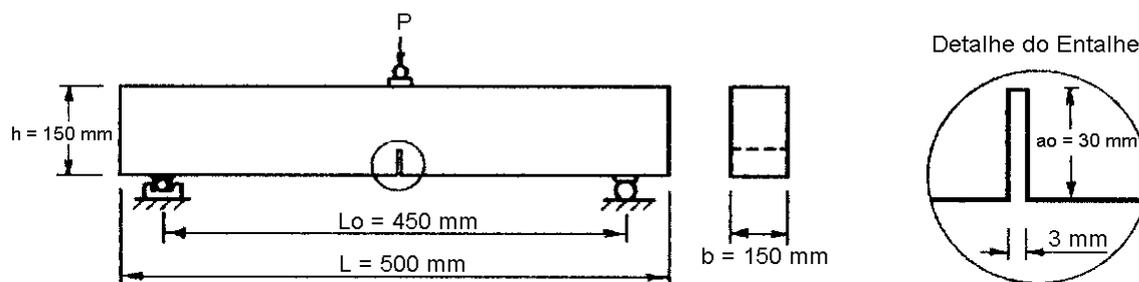


Figura 3. Esquema de ensaio e dimensões das vigas entalhadas.

Após o processo de cura, os corpos-de-prova cilíndricos foram ensaiados para a determinação das resistências à compressão e à tração por compressão diametral aos 28 dias em uma máquina universal AMSLER com capacidade de carga de 5000 kN.

Já os ensaios de flexão a três pontos aos 28 dias nas vigas entalhadas foram realizados em uma máquina universal AMSLER com capacidade de 500 kN. As vigas entalhadas foram carregadas até a ruptura num plano perpendicular à direção de vibração, com o objetivo de evitar o carregamento em planos com fibras alinhadas, provenientes do processo de adensamento.⁽²⁰⁾

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio VeBe

Uma das mais importantes propriedades do concreto no estado fresco é a sua trabalhabilidade. O concreto deve possuir trabalhabilidade suficiente para permitir que as etapas de transporte, de lançamento, de adensamento e de acabamento sejam realizadas de maneira eficiente, mantendo-o homogêneo, isto é, resistente à exsudação e à segregação.

Para concretos reforçados por fibras, especialmente para misturas muito secas, ou seja, com trabalhabilidade baixa ou muito baixa, o ensaio VeBe é o mais recomendado.⁽²¹⁾ Assim, a Figura 4 mostra os resultados dos ensaios VeBe realizados neste estudo. Nota-se que a adição das fibras de basalto ocasionou redução na trabalhabilidade das misturas (maiores valores de tempo t_{VeBe}), principalmente no CCG, pois a viscosidade deste, para um mesmo traço, é bem maior do que a do CCP.

A perda de trabalhabilidade ocorre pois ao se adicionarem fibras ao concreto está-se adicionando também uma grande área superficial que demanda água de molhagem, produzindo aumento de coesão e perda de mobilidade do compósito no estado fresco. As fibras longas de basalto também contribuíram para a redução da perda de mobilidade da mistura por dificultar a movimentação das partículas de maiores dimensões, como é o caso dos agregados.

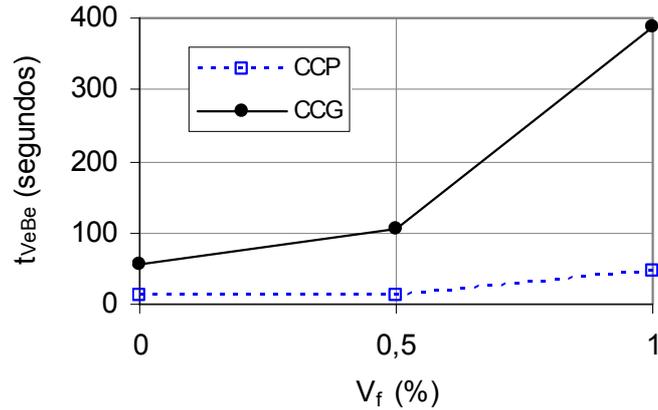


Figura 4. Tempo VeBe dos concretos em função do volume de fibras.

De acordo com a classificação prescrita por Petrucci,⁽²²⁾ todos os CCG, e também o CCP com V_f igual a 1,0%, são considerados misturas extremamente secas ($t_{VeBe} > 30$ segundos). Já os CCP com V_f iguais a 0% e 0,5% são classificados como misturas secas ($5 \text{ segundos} < t_{VeBe} < 10$ segundos). Estes resultados indicam que para se obter compacidade semelhante entre os CCG e os CCP, aqueles necessitam de maior energia de adensamento do que estes.

4.2 Resistência à Compressão (f_c)

A resistência à compressão é considerada a propriedade mais importante do concreto no estado endurecido, já que a esta os códigos nacionais e internacionais procuram associar as demais resistências e propriedades.⁽²³⁾

Contudo, o objetivo da adição de fibras ao concreto não é alterar sua resistência à compressão e sim a sua tenacidade à fratura, pois o aumento de resistência à compressão de concretos reforçados por fibras raramente excede 25%.⁽²⁴⁾ Isto pôde ser comprovado pelos valores de resistência à compressão alcançados pelos CCG com fibras e pelo CCP com V_f igual a 0,5% em relação aos seus respectivos concretos de referência, com $V_f = 0\%$ (Figura 5).

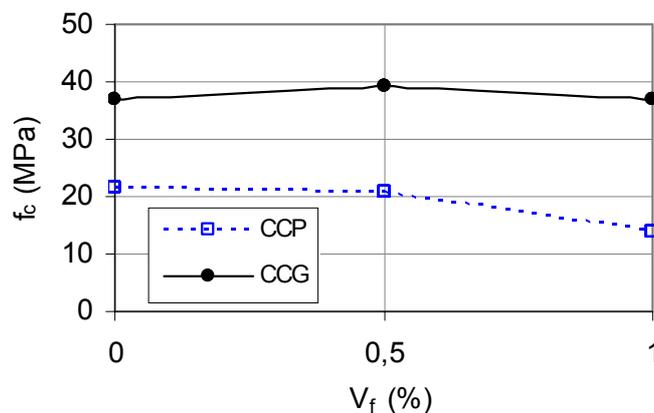


Figura 5. Resistência à compressão dos concretos em função do volume de fibras.

Alguns trabalhos ainda apontam uma redução nos valores resistência à compressão como uma consequência da má compactação obtida com o material, explicação esta atribuída à queda de aproximadamente 36% na resistência à

compressão apresentada pelo CCP com V_f igual a 1,0% em relação ao CCP sem fibras (Figura 5).

Observa-se ainda na Figura 5 que, para traços iguais, os CCG exibiram resistências à compressão bem mais elevadas do que os CCP. As resistências à compressão dos CCG foram 73%, 90% e 169% superiores àquelas apresentadas pelos CCP para volumes de fibras iguais a 0%, 0,5% e 1,0%, respectivamente.

4.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral (f_t)

A Figura 6 mostra que os CCG apresentaram resistências à tração por compressão diametral mais elevadas do que os CCP, de aproximadamente 24%, 51% e 64% para volumes de fibras iguais a 0%, 0,5% e 1,0%, respectivamente. Além disso, os ganhos de resistência à tração por compressão diametral dos CCG com fibras foram superiores àquelas apresentados pelos CCP, em relação aos seus respectivos concretos de referência. Este melhor desempenho está relacionado à elevada resistência à compressão dos CCG, pois concretos de alta resistência à compressão ($f_c \geq 40$ MPa) tendem a aderir melhor à superfície das fibras.⁽²⁵⁾ Esta melhor aderência dificulta a ocorrência dos mecanismos de deslizamento e de arrancamento das fibras da matriz, propiciando maiores ganhos de resistência à tração.

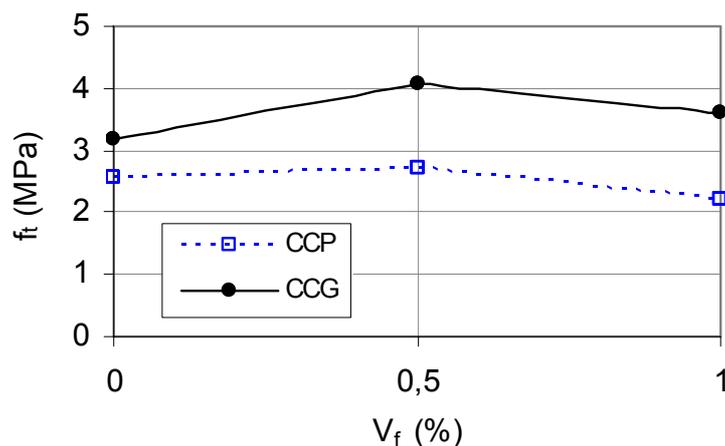


Figura 6. Resistência à tração por compressão diametral dos concretos em função do volume de fibras.

4.4 Fator de Intensidade de Tensão Crítico (K_{Ic})

Dos diversos critérios de fratura existentes, o critério de tenacidade à fratura, formulado pelo fator de intensidade de tensão – K_α ($\alpha = I, II, III$), tem fundamentos teóricos quando predomina a elasticidade linear. O valor crítico do fator de intensidade de tensão ($K_{\alpha c}$), para velocidade de carregamento e temperatura fixas, é considerado como uma constante do material e caracteriza a sua resistência à propagação da trinca, ou seja, a sua resistência à fratura frágil.

O mais importante dos modos geométricos de fratura é a tração (Modo I), pois este é o carregamento comum de muitos elementos estruturais. Além disso, os valores de K_{Ic} (trinca de tração normal), para a maioria dos materiais estruturais, são menores do que de K_{IIc} (trinca de cisalhamento plano) e K_{IIIc} (trinca de cisalhamento

antiplano). Logo, a resistência à fratura em tração é a menor, e o termo tenacidade à fratura, geralmente, é representado pelo valor de K_{Ic} .

Assim, os valores de K_{Ic} em função do volume de fibras adicionado aos concretos são mostrados na Tabela 4 e na Figura 7. O reforço por fibras descontínuas e aleatoriamente distribuídas foi capaz de controlar a propagação de fissuras na matriz, melhorando consideravelmente a capacidade de absorção de energia de ambos os concretos (CCP e CCG), ou seja, ganhos significativos de tenacidade à fratura.

Isto ocorre porque as fibras criam pontes de transferência de tensões através das fissuras, preservando uma certa capacidade portante das seções. Desta maneira, os concretos reforçados por fibras de basalto passaram de um comportamento frágil para um pseudo-dúctil.

Tabela 4. Carga crítica e fator de intensidade de tensão crítico dos concretos.

| V_f (%) | | 0 | 0,5 | 1,0 |
|-----------|---|-------------|-------------|--------------|
| CCP | P_c (kN) ^a / CV (%) ^b | 9,6 / 7,40 | 12,5 / 1,60 | 14,0 / 4,71 |
| | σ_c (MPa) ^c | 1,92 | 2,50 | 2,80 |
| | K_{Ic} (MPa·mm ^{1/2}) | 68,67 | 89,41 | 100,14 |
| CCG | P_c (kN) ^a / CV (%) ^b | 16,0 / 2,19 | 17,2 / 5,76 | 21,0 / 10,00 |
| | σ_c (MPa) ^c | 3,20 | 3,44 | 4,20 |
| | K_{Ic} (MPa·mm ^{1/2}) | 114,44 | 123,03 | 150,21 |

^a P_c = carga crítica.

^b CV = coeficiente de variação.

^c σ_c = resistência crítica à tração na flexão.

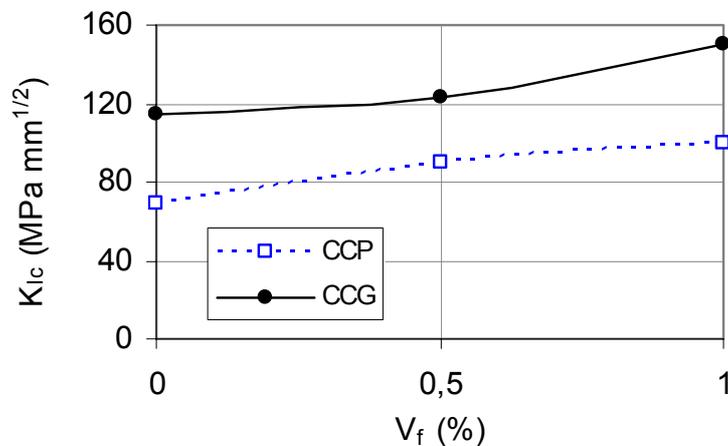


Figura 7. Fator de intensidade de tensão crítico dos concretos em função do volume de fibras.

Os ganhos de tenacidade à fratura (K_{Ic}) dos CCP foram de 30% e 46% para frações volumétricas de fibras iguais a 0,5% e 1,0%, respectivamente, em relação ao CCP de referência ($V_f = 0\%$). Já para os CCG os ganhos foram menores, 8% e 31%. No entanto, os valores de K_{Ic} dos CCG foram significativamente superiores aos dos CCP para mesmos volumes de fibras, a saber: 67% para $V_f = 0\%$, 38% para $V_f = 0,5\%$ e 50% para $V_f = 1,0\%$.

5 CONCLUSÕES

- A adição das fibras reduziu a trabalhabilidade de ambos os concretos, especialmente a do concreto geopolimérico devido a sua maior viscosidade em relação ao concreto convencional.
- As resistências à compressão e à tração por compressão diametral de ambos os concretos não foram influenciadas pela adição das fibras.
- A adição das fibras aumentou significativamente a tenacidade à fratura de ambos os concretos, modificando o comportamento de ruptura de frágil para pseudo-dúctil.
- No estado endurecido, os concretos geopoliméricos apresentaram melhor desempenho do que os concretos convencionais em todas as propriedades mecânicas avaliadas neste estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 ASTM C-93a. **Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials**. American Society for Testing and Materials, In: Annual Book of ASTM, Philadelphia-USA, 1993. p. 509-539.
- 2 ASTM C-93b. **Standard Test Method for J_{IC} , a Measure of Fracture Toughness**. American Society for Testing and Materials, In: Annual Book of ASTM, Philadelphia-USA, 1993. p. 738-752.
- 3 ESIS. **Procedure for Determining the Fracture Behaviour of Materials**. European Structural Integrity Society, Delft-The Netherlands, 1992.
- 4 RILEM TC 89 FMT. **Determination of Fracture Parameters (K_{IC}^s and $CTOD_c$) of Plain Concrete Using Three-Point Bend Tests**. RILEM Committee on Fracture Mechanics of Concrete – Test Methods. Materials and Structures, V. 23, 1990. p. 457-460.
- 5 GUINEA, G. V., PASTOR, J. P., ELICES, M. **Stress Intensity Factor, Compliance and CMOD for a General Three-Point-Bend Beam**. International Journal of Fracture, N. 89, 1998. p. 103-116.
- 6 NBR 5738 – MB2. **Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova de Concreto Cilíndricos ou Prismáticos - Método de Ensaio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1994.
- 7 NBR-9776 – MB 2643. **Agregados – Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por meio do Frasco de Chapman**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1987.
- 8 NBR 9202 – MB2145. **Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da Finura por Meio da Peneira 0,044mm (nº 325)**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1985.
- 9 NBR 7221 – MB95. **Agregados - Ensaio de Qualidade de Agregado Miúdo**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1987.
- 10 NBR 6465 – MB170. **Agregados – Determinação da Abrasão ‘Los Angeles’**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1984.
- 11 NBR 6474. **Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – determinação da Massa Específica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1998.
- 12 NBR 5743 – MB510. **Cimento Portland – Determinação de Perda ao Fogo**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1989.

- 13 NBR 5744 – MB511. **Cimento Portland – Determinação de Resíduo Insolúvel.** Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1989.
- 14 NBR 7224 – NM76. **Determinação da Finura pelo Método de Permeabilidade ao Ar (Método Blaine).** Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1998.
- 15 DAVIDOVITS, J. **Geopolymers: Man-Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement.** Journal of Materials Education, An International Journal for Material Science and Engineering, V. 16, N. 2 and 3, 1994. p. 91-139.
- 16 DIAS, D. P., SILVA, F. J., THAUMATURGO, C. **Aço-Concreto Geopolimérico: Correlação entre Tensão de Aderência e Zona de Transição.** 2.º Congresso de Ciência de Materiais do Mercosul, Joinville-SC, 2004. 10 p.
- 17 NBR 5739 – MB3. **Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1994.
- 18 NBR 7222 – MB212. **Argamassa e Concreto - Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos-de-Prova Cilíndricos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1994.
- 19 BSI 1881: PART 104. **Testing Concrete Part 104: Method for Determination of Vebe Time.** British Standard Institute (BSI), 1983.
- 20 BENTUR, A., MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites.** Elsevier Science Ltd., UK, 1990.
- 21 DIAS, D. P. **Cimentos Geopoliméricos: Estudo de Agentes Químicos Agressivos, Aderência e Tenacidade à Fratura.** Tese de Doutorado. Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro-RJ, 2001. 216 p.
- 22 PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland.** Ed. Globo, 13.º ed., Porto Alegre-RS, 1995. 308 p.
- 23 JACINTHO, A. E. P. G. A., GIONGO, J. S. **Resistência Mecânica do Concreto.** Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, V. 1, São Paulo-SP, 2005. p. 605-632.
- 24 BALAGURU, P. N., SHAH, S. P. **Fiber Reinforced Cement Composites.** McGraw-Hill, Inc. New York, USA, 1992. 530 p.
- 25 BALAGURU, P. N., RAMAKRISHNAN, V. **Properties of Fiber Reinforced Concrete: Workability, Behavior under Long-Term Loading, and Air-Void Characteristics.** ACI Materials Journal, May-June, 1988. p. 189-196.