

# CONCRETO DE CIMENTO GEOPOLIMÉRICO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

D. S. T. Pereira<sup>1</sup>, F. J. Silva<sup>2</sup>, C. Thaumaturgo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Doutorando, Programa de Ciências dos Materiais

<sup>2</sup>Professor, Programa de Ciências dos Materiais

Instituto Militar de Engenharia – IME – Praça General Tibúrcio, 80 – SE/4

CEP 22290-270 – Rio de Janeiro – RJ – Brazil

[diegles@ime.eb.br](mailto:diegles@ime.eb.br)

## RESUMO

*Os cimentos geopoliméricos são uma alternativa inovadora para obtenção de concretos de alto desempenho e não agressivos ao meio ambiente, pois além de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, também utilizam materiais residuais. Estes cimentos são considerados quasi-frágeis devido ao seu comportamento elástico não-linear, provocado pela relaxação e redistribuição de tensões antes da ruptura. A presença de fissuras em sua microestrutura sugere o emprego de fibras como elemento de reforço e estabilização para minimização dos campos de tensões que surgem na fase de polimerização. As fibras de aço são comumente utilizadas para melhorar as propriedades de resistência à tração e tenacidade à fratura dos concretos. Também podem atuar no controle da fissuração, além de melhorarem o comportamento pós-fissuração. Foi realizado um programa experimental para avaliar as propriedades mecânicas e as propriedades da interface fibra/matriz dos concretos reforçados com fibras. O teor de fibras de aço foi variado entre 0,0% e 2,0%.*

Palavras-chave: cimento geopolimérico, concreto, fibras de aço

## INTRODUÇÃO

Os geopolímeros ou polissialatos são polímeros inorgânicos à base de oxido-aluminossilicatos polimerizados em ambiente altamente alcalino <sup>(1)</sup>. Quando a relação Si/Al no polissialato é igual ou superior a 3, é possível obter um arranjo tridimensional

com ligações cruzadas, irregular e de baixa mobilidade. O polímero mineral com essas relações atômicas é chamado polissiloxossilato, ou PSS, e pode ser utilizado como material aglomerante em concretos e argamassas considerados como de alto desempenho <sup>(2)</sup>.

Um dos maiores desafios enfrentados pela indústria do concreto atualmente é o impacto da produção de cimento ao meio ambiente, dada a necessidade de redução de consumo de energia e de emissão de CO<sub>2</sub>. Com o objetivo de reduzir estes problemas, os cimentos geopoliméricos despontam como uma nova classe de materiais de alto desempenho e não agressivos ao meio ambiente utilizados como aglomerante mineral capaz de substituir total ou parcialmente o cimento Portland.

Nas últimas décadas, o avanço na tecnologia do concreto foi voltado principalmente ao desenvolvimento de novos materiais e componentes que resultaram no aumento da resistência e melhoria do desempenho dos concretos de cimento Portland para adequação aos novos requisitos de durabilidade das estruturas de concreto. Neste contexto, surgiram os concretos de alto desempenho (CAD) <sup>(3)</sup>.

Diversos pesquisadores mostraram que os concretos de cimento geopolimérico (CCG) apresentam propriedades físicas e mecânicas bem similares às aquelas apresentadas pelos CAD, tais como: elevada resistência mecânica <sup>(4, 5 e 6)</sup>, elevada tensão de aderência aço-concreto <sup>(5)</sup>, elevada resistência aos agentes agressivos (sulfatos e ácidos) <sup>(5)</sup> e excelente trabalhabilidade <sup>(4 e 6)</sup>.

A adição de fibras é uma eficiente maneira de melhorar as propriedades mecânicas aos esforços trativos e aumentar a tenacidade à fratura de materiais cimentícios. A utilização de concretos reforçados com fibras é limitada a aplicações com baixos teores de fibras (fração volumétrica de fibras,  $V_f$ , menor que 2%) <sup>(7)</sup>.

Este trabalho apresenta o estudo da influência da incorporação de fibras de aço nas propriedades mecânicas do concreto de cimento geopolimérico, bem como a avaliação das propriedades da interface fibra/matriz. As propriedades analisadas incluem a resistência à compressão, a resistência à tração na flexão e o índice de tenacidade. As fibras de aço foram adicionadas em teores iguais a 0,0% (matriz pura), 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O geopolímero utilizado foi do tipo M-PSS (onde M = Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> e Ca<sup>++</sup>), obtido a partir da combinação de metacaulim (como fonte principal de alumínio e silício), de cimento Portland de alto-forno (como fonte de cálcio) e de uma solução alcalina composta por hidróxido de potássio e silicato de sódio alcalino. O silicato de sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) foi utilizado como fonte extra de silício para que a relação SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no cimento geopolimérico fosse maior que 3.

O agregado miúdo utilizado foi uma areia quartzosa de rio, lavada e seca em estufa, aproveitando-se todo o material passante na peneira de 4,8 mm. Os resultados da caracterização da areia estão descritos na TAB. I.

**TAB. I:** Caracterização da areia.

<b>Método de ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Limite de norma</b>
Massa Unitária (NBR7251, 1982)	1,45 g/cm <sup>3</sup>	-
Massa Específica (NBR NM 52, 2003)	2,62 g/cm <sup>3</sup>	-
Teor de Argila (NBR 7218, 1987)	0,61 %	< 3,00 %
Materiais Pulverulentos (NBR NM 46, 2003)	0,34 %	< 3,00 %
Impurezas Orgânicas (NBR NM 49, 2001)	< 300 ppm	< 300 ppm*
Módulo de Finura (NBR 7211, 2005)	2,51	-
Dimensão Máxima (NBR 7211, 2005)	2,4 mm	-

\*Nota: A solução obtida no ensaio deve ser mais clara do que a solução-padrão.

A distribuição granulométrica da areia expressa em termos das porcentagens retidas acumuladas foi enquadrada na zona utilizável <sup>(8)</sup>.

O agregado graúdo utilizado foi uma brita, identificada como granito, por ensaio petrográfico. A brita foi lavada durante o peneiramento para eliminar o material passante na peneira de 4,8 mm e foi posteriormente seca em estufa. Os resultados da caracterização da brita estão descritos na TAB. II.

A distribuição granulométrica da brita atendeu os limites das porcentagens retidas acumuladas para a zona granulométrica d/D = 4,75/12,5 <sup>(8)</sup>.

**TAB. II:** Caracterização da brita.

<b>Método de ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Limite de norma</b>
Massa Específica (NBR NM 53, 2002)	2,75 g/cm <sup>3</sup>	-
Teor de Argila (NBR 7218, 1987)	0,21 %	< 2,00 %
Materiais Pulverulentos (NBR NM 46, 2003)	0,63 %	< 1,00 %
Módulo de Finura (NBR 7211, 2005)	5,91	-
Dimensão Máxima (NBR 7211, 2005)	9,5 mm	-
Abrasão “Los Angeles” (NBR NM51, 2001)	21,5 %	< 50,0 %

Foram utilizadas fibras de aço Wirand® de baixo teor de carbono, seção circular e ancoragem em gancho nas extremidades, que melhoram a adesão entre as fibras e o concreto. A TAB. III apresenta as características técnicas das fibras de aço.

**TAB. III:** Características técnicas das fibras de aço.

Massa específica	7850 kg/m <sup>3</sup>
Relação l/D	44
Diâmetro	0,75 mm
Comprimento	33 mm
Número de fibras por quilograma	8738
Resistência à tração do aço	> 1100 MPa
Deformação na ruptura	< 4 %
Módulo de elasticidade	210 GPa

Fonte: Maccaferri do Brasil Ltda.

A composição do traço do concreto de cimento geopolimérico referência (CCGREF) foi estabelecida de maneira a atender a resistência de dosagem ( $f_{cj} = 46,37$  MPa) e permitir a incorporação de elevados teores de fibras ( $V_f = 2,0\%$ ), sem grandes alterações na trabalhabilidade <sup>(9)</sup>. A TAB. IV apresenta as principais características da composição da mistura do traço do CCGREF.

Os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e tenacidade foram realizados conforme as recomendações das normas NBR 5739 (1994), NBR 12142 (1991) e ASTM C1018 (1994), respectivamente. Os ensaios foram realizados aos 7 dias de idade e foram moldados 4 corpos-de-prova para cada propriedade e teor de fibra analisado.

**TAB. IV:** Composição do traço do CCGREF.

<b>Tipo de concreto</b>	<b>CCGREF</b>
C (consumo de aglomerantes)	459 kg/m <sup>3</sup>
Areia	849 kg/m <sup>3</sup>
Brita	801 kg/m <sup>3</sup>
Água total	195 L/m <sup>3</sup>
a/a' (água/aglomerante)	0,42
$\alpha$ (teor de argamassa)	62%
Volume de pasta de cimento	37%

A adição da fibra de aço na betoneira foi realizada em taxas controladas, durante a mistura da brita e da solução alcalina, evitando o embolamento das fibras e a formação de nichos <sup>(10)</sup>. A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada de acordo com recomendações da NBR 5738 (2003). O adensamento dos corpos-de-prova foi realizado em mesa vibratória (vibração externa).

A avaliação das propriedades da interface fibra/matriz dos compósitos elaborados foi realizada através de imagens de elétrons secundários das superfícies de fratura dos concretos por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

As TAB. V e VI apresentam os resultados de resistência média à compressão ( $f_{cm}$ ), resistência média à tração na flexão ( $f_{ctm,f}$ ) e de tenacidade ( $I_5$ ,  $I_{10}$  e  $I_{30}$ ) dos concretos de cimento geopolimérico com  $V_f$  variando de 0,0% a 2,0%. A resistência à tração na flexão e a tenacidade dos compósitos aumentaram em função da adição de fibras de aço.

O parâmetro ER (expresso em porcentagem) indica a eficiência do teor de fibra na resistência do compósito reforçado com fibras (A).  $f_{CR}$  = resistência mecânica do concreto reforçado com fibras e  $f_{CS}$  = resistência mecânica do concreto simples.

$$ER = \frac{f_{CR} - f_{CS}}{f_{CS}} \times 100 \quad (A)$$

**TAB. V:** Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e de resistência à tração na flexão.

Mistura	$V_f$ (%)	$f_{cm}$ (MPa)	ER (%)	$f_{ctm,f}$ (MPa)	ER (%)
CCGREF	0,0	51,15	-	5,46	-
CCG05	0,5	52,73	3,09	6,09	11,54
CCG10	1,0	53,20	4,01	7,98	46,15
CCG15	1,5	51,88	1,43	9,11	66,85
CCG20	2,0	52,40	2,44	9,22	68,86

**TAB. VI:** Resultados dos Índices de Tenacidade.

Mistura	Índice de Tenacidade (ASTM C1018, 1994)		
	$I_5$	$I_{10}$	$I_{30}$
CCGREF	1,00	1,00	1,00
CCG05	6,88	9,40	22,62
CCG10	7,18	12,24	28,76
CCG15	7,62	13,28	35,23
CCG20	8,67	15,81	42,54

## RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

As fibras geralmente apresentam pequeno efeito sobre a resistência à compressão, aumentando ou diminuindo levemente a resistência dos compósitos<sup>(11)</sup>. O aumento da resistência à compressão do concreto muito raramente excede 25%<sup>(12)</sup>.

A adição de fibras ao CCG apresentou incremento da resistência à compressão em todos os teores de fibra. A maior eficiência no reforço foi obtida para o concreto CCG10 (ER = 4,01%). A FIG. 1 apresenta a variação da resistência à compressão do CCG em função do volume de fibras de aço.

A presença de fibras de aço no concreto altera o modo de fratura dos corpos-de-prova tornando-os menos frágeis, evitando a falha catastrófica destes materiais. As fibras aumentam a capacidade de deformação pós-pico resultando em um compósito que absorve mais energia antes da ruptura total do que o concreto simples<sup>(13)</sup>.

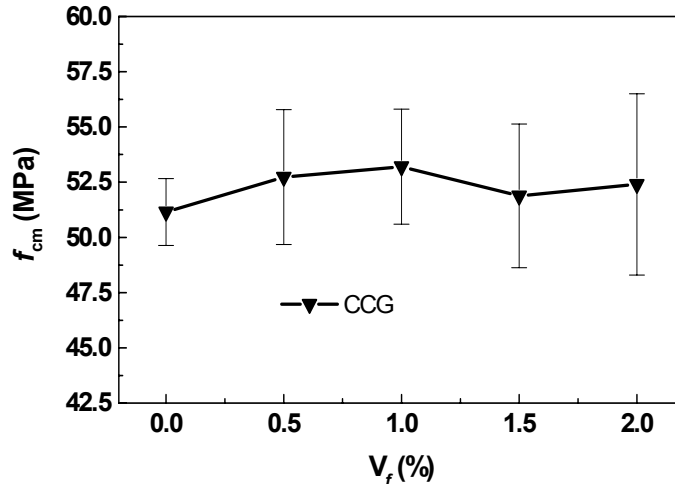


FIG. 1: Efeito do teor de fibras na resistência à compressão.

### RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

As fibras de aço geralmente têm maior efeito na resistência à tração na flexão do concreto reforçado com fibras do que em compressão ou tração por compressão diametral. O aumento na resistência à flexão é sensível, não somente ao teor de fibra, mas também ao fator de forma das fibras, a orientação das fibras e a tensão de aderência da interface fibra/matriz do concreto.

A adição de fibras ao CCG apresentou incremento da resistência à tração na flexão em todos os teores de fibra. Foi observado um valor máximo de ER = 68,86% no teor igual a 2% de fibra. A FIG. 2 apresenta a variação da resistência à tração na flexão do CCG em função do volume de fibras de aço.

A curva teor de fibras de aço X resistência à tração na flexão dos concretos foi ajustada utilizando a raiz quadrada da resistência média à compressão ( $\sqrt{f_{cm}}$ ) do concreto referência e o teor de fibras ( $V_f$ ), como descrito em (B):

$$f_{cm,f} = A\sqrt{f_{cm}} + BV_f + CV_f^2 \quad (B)$$

Portanto, substituindo  $f_{cm} = 51,15$  MPa em (B) e aplicando uma regressão polinomial de grau 2, tem-se:

$$f_{cm,f} = 5,46 + 2,69V_f - 0,35V_f^2 \quad (C)$$

Para o teor de fibras de aço igual a 0%, (C) fornece  $f_{ctm,f} = 5,46$  MPa, que foi o mesmo dado pela expressão  $(0,76\sqrt{f_{cm}})$  ou  $0,76\sqrt{51,15}$ . O coeficiente A obtido de 0,76 está um pouco abaixo de 0,9 e 1,0 encontrados por NILSON <sup>(14)</sup> e Wafa e ASHOUR <sup>(15)</sup>, respectivamente e um pouco acima de 0,68 encontrado por KHALOO e KIM <sup>(16)</sup>.

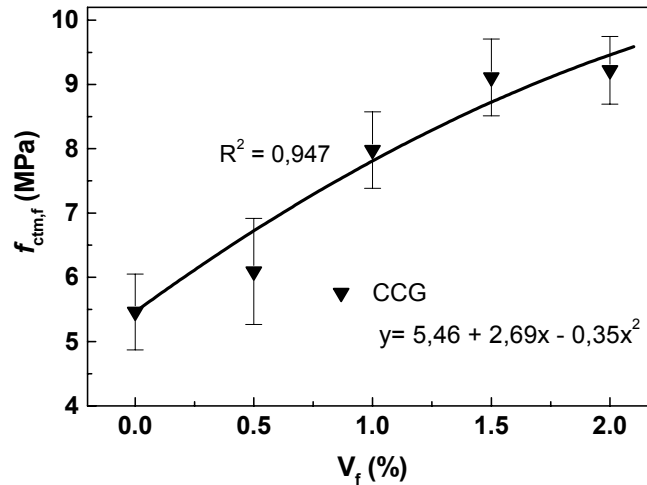


FIG. 2: Efeito do teor de fibras na resistência à tração na flexão.

O ajuste polinomial da curva  $V_f \times f_{ctm,f}$  apresentou boa compatibilidade com os resultados experimentais obtidos nos ensaios de resistência à tração na flexão ( $R^2 = 0,947 \approx 1$ ).

### ÍNDICES DE TENACIDADE

A tenacidade é a medida da capacidade de absorção de energia de um material. É utilizada para caracterizar a habilidade do material de resistir à fratura quando sujeito a deformações estáticas, carregamentos dinâmicos ou de impacto.

Foram obtidas curvas de carga-flecha médias medidas no meio do vão dos concretos reforçados com fibras de aço para avaliar a tenacidade à fratura dos compósitos (FIG. 3). Os índices de Tenacidade (I) para os concretos reforçados com fibras refletem o incremento de tenacidade à fratura em relação ao concreto simples (sem fibras), sendo determinados pela divisão da área sob a curva até a deformação especificada e a área sob a curva até a deformação correspondente à primeira fissura

( $\delta$ ). Os pontos de determinação das áreas são definidos como múltiplos da deformação ( $\delta$ ), da seguinte maneira:  $I_5$  em  $3 \delta$ ,  $I_{10}$  em  $5,5 \delta$  e  $I_{30}$  em  $15,5 \delta$ .

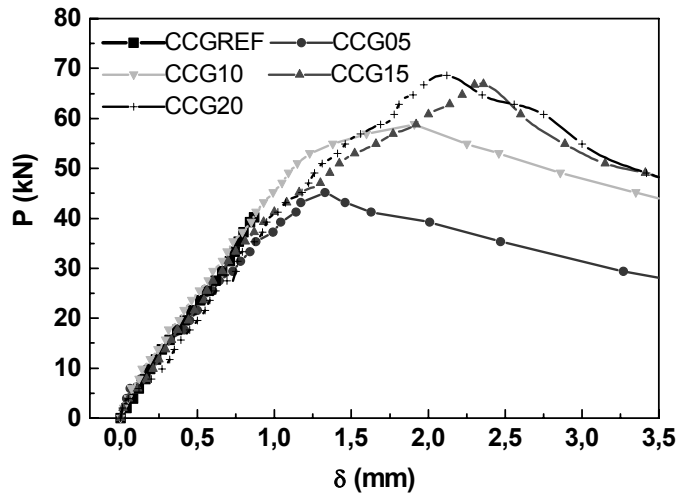


FIG. 3: Curvas carga-flecha para o CCG em função do teor de fibras.

A FIG. 4 apresenta o efeito do teor de fibra de aço nos Índices de Tenacidade do CCG. Os valores para os Índices referentes ao concreto CCGREF foram iguais a 1, devido ao seu comportamento elástico-frágil. Todos os Índices de Tenacidade aumentaram em função do teor de fibras de aço incorporado ao compósito.

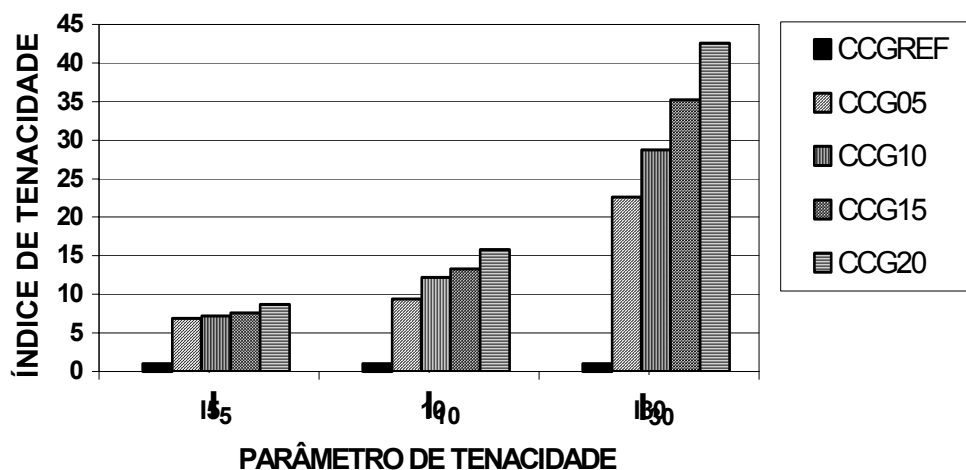


FIG. 4: Efeito do teor de fibras de aço nos Índices de Tenacidade do CCG.

O aumento da tenacidade à fratura com o aumento do teor de fibras de aço é devido ao elevado número de fibras que formam pontes de transferência de tensões nas fissuras e um padrão de propagação de fissuras mais tortuoso.

## INTERFACE FIBRA/MATRIZ

A avaliação da interface fibra/matriz dos compósitos geopoliméricos mostrou que não existem diferenças significativas de porosidade entre a região próxima à fibra e o núcleo da matriz (FIG 5 (a e b)). Este aspecto não é observado em compósitos de cimento Portland, pois a formação de cristais relativamente grandes de Portlandita formam uma região mais porosa na interface do que no núcleo da matriz e, ainda, como estes cristais são menos resistentes prejudicam a qualidade da interface limitando as propriedades mecânicas dos compósitos de cimento Portland<sup>(9)</sup>.



**FIG. 5:** Imagem de elétrons secundários da interface fibra/matriz obtidas por MEV. (a) CCG15 (75X). (b) CCG15 (1000X).

Os concretos de cimento geopolimérico podem apresentar tensões de aderência muito superiores aos dos concretos de cimento Portland devido à elevada compactidade de sua microestrutura e a inexistência de cristais fracos de Portlandita<sup>(5)</sup>.

## CONCLUSÕES

A resistência à compressão dos compósitos foi levemente superior a do concreto referência. Já a resistência à tração na flexão e a tenacidade à fratura dos compósitos foram amplamente melhoradas. A resistência à tração na flexão variou de 5,46 MPa até 9,22 MPa e os índices de tenacidade  $I_5$ ,  $I_{10}$  e  $I_{30}$  atingiram valores iguais a 8,67, 15,81 e 42,54, respectivamente, em  $V_f = 2,0\%$ . A adição de fibras de aço alterou o comportamento carga-flecha dos compósitos. Com o aumento do teor de fibras houve ganho na carga máxima de ruptura e alteração na forma do ramo descendente. Estes

aspectos foram atribuídos a capacidade de inibição da propagação de fissuras das fibras, que absorvem e dissipam parte da energia que seria utilizada na formação de novas superfícies de fratura. A avaliação microestrutural mostrou que não existem diferenças de porosidade entre a região da interface e o núcleo da matriz.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao IME pela infra-estrutura disponibilizada, as empresas Holcim Brasil S/A, Santo Antônio de Mineração e Maccaferri do Brasil Ltda. pela doação dos materiais e a FAPERJ pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

1. DAVIDOVITS, J. **Geopolymer' 88**. Proceedings of 1<sup>st</sup> International Conference on Geopolymers. vol. 1-2, 1988.
2. NEVILLE, A.; AİTCIN, P. C. **Materials and Structures**. vol. 31 p. 111 - 117,1998.
3. Alves, MF, Cremonini, RA, Dal Molin, DCC. **A comparison of mix proportioning methods for high-strength concrete**. Cement & Concrete Composites vol. 26, 2004. p.613-621.
4. THOMAZ, E. C. S. **Desempenho do concreto geopolimérico**. 108 p. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, 2000.
5. DIAS, D. P. **Cimentos Geopoliméricos: Estudo de agentes químicos agressivos, aderência e tenacidade à fratura**. 216 p. Tese de Doutorado em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, 2001.
6. RANGAN, B.V., HARDJITO, D., WALLAH, S.E., SUMAJOUW, D. M.J. **Brief review of development of geopolymer Concrete**. George Hoff Symposium, American Concrete Institute, Las Vegas, USA, 2004.
7. SHAH, S. P., SWARTZ, S. E., OUYANG, C. **Fracture mechanics of concrete- Applications of fracture to concrete, rock and other quasi-brittle materials**. Jhon Wiley & Sons. 552 p., New York,1995.
8. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7211 (EB4) - Agregado para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro. Março. 2005.
9. PEREIRA, D. S. T. **Concreto de cimento geopolimérico reforçado com fibras de aço para pavimentação**. 202 p. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, 2006.
10. FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. BT/PCC/206. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 68 p. São Paulo, 2000.
11. ACI 544.2R **Measurement of properties of fiber reinforced concrete**. American Concrete Institute, ACI Manual of Concrete Practice, p. 11, 1989.
12. BALAGURU, P. N., SHAH, S.P. **Fiber-reinforced cement composites**. New York. McGraw-Hill, p. 72-79, 1992.

13. HANNANT, D. J. **Fibre cements and fibre concretes**. Wiley-Interscience Publication: John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, 1978.
14. NILSON, A. H. **Design implications of current research on high-strength concrete**. ACI SP-87, Detroit: American Concrete Institute. p. 85 -109, 1987.
15. WAFI, F. F., ASHOUR, S. A. **Mechanical properties of high-strength fiber-reinforced concrete**. ACI Materials Journal. vol. 89, n° 5, p. 449 -455, 1992.
16. KHALOO, A. R., KIM, N. **Mechanical properties of normal to high-strength steel fiber-reinforced concrete**. Cement Concrete Aggregates. vol. 18, n° 2, p. 92 -97, 1996.
17. ACI 544.2R **Measurement of properties of fiber reinforced concrete**. American Concrete Institute, ACI Manual of Concrete Practice, p. 11, 1989.

## STEEL FIBER REINFORCED GEOPOLYMER CONCRETE

### ABSTRACT

*The geopolymer cements are an innovatory alternative to obtain high performance concretes and not aggressive to the environment, for besides reducing substantially the emissions of CO<sub>2</sub>, they also use waste materials. They are considered quasi-brittle due to non linear elastic behavior, induced by the relaxation and redistribution of tensions before the rupture. The presence of cracks in this microstructure suggest the use of fibers as an element of reinforcement and stabilization to minimize the fields of tensions that appear during the geopolymerization. The steel fibers are commonly used to improve the mechanical properties of concretes such as tensile strength and fracture toughness. They can also work in the control of the internal microcracking and in the control of the opening of the cracks, besides improving the post-crack performance of concretes. An experimental program has been accomplished to evaluate the mechanical properties and properties of the fiber/matrix interface of the composites. The steel fibers were added at the volume fractions of 0,0% until 2,0%.*

Keywords: geopolymer cement, concrete, steel fiber.