

Aço-concreto geopolimérico: correlação entre tensão de aderência e comprimento de ancoragem

Joadelio C. Soares¹, Dylmar P. Dias², Sergio L. G. Garcia³

Trabalho recebido em 18/10/2006 e aprovado para publicação em 06/02/2007.

Resumo

O concreto armado é um importante material de construção que cada vez mais desperta a atenção dos pesquisadores, os quais, por isso, vêm elaborando pesquisas, quer sejam experimentais ou analíticas. Os tempos modernos da construção civil têm mostrado a necessidade de se desenvolver materiais cada vez mais resistentes, duráveis e, acima de tudo, que apresentem uma relação custo-benefício satisfatória. Nesse contexto surgem os cimentos geopoliméricos. De acordo com essa premissa, este trabalho visa investigar a interação aço-concreto em estruturas de concreto de cimento *portland* (CCP) e de cimento geopolimérico (CCG). Para isso, foram ensaiados blocos de concreto contendo comprimentos de ancoragens diferentes. A relação entre tensão de aderência e deslizamento foi determinada por meio de ensaios de arrancamento de barras de aço embutidas em corpos-de-prova de concreto. Os resultados relativos à tensão média de aderência (τ_{bm}) para o CCG comprovam seu excelente desempenho em relação ao CCP e ressaltam a importância das propriedades da interface aço-matriz. Dessa forma, foi possível obter uma redução máxima de 50% do comprimento de ancoragem nos ensaios de aderência. Também cálculos realizados de acordo com o CEB/FIP MODEL CODE (1990) mostraram uma significativa redução de 27% no comprimento de ancoragem para o CCG.

Palavras-chave: Comprimento de ancoragem. Concreto geopolimérico. Ensaio de arrancamento. Tensão de aderência.

¹ Aluno de mestrado em Engenharia de Civil/Estruturas da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Av. Alberto Lamego, 2000. Campos dos Goytacazes-RJ. E-mail: joadeliosoaes@yahoo.com.br.

² Prof. D. Sc. da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Av. Alberto Lamego, 2000. Campos dos Goytacazes-RJ. E-mail: dylmar@uenf.br.

³ Prof. D. Sc. da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Av. Alberto Lamego, 2000. Campos dos Goytacazes-RJ. E-mail: liluiser@uenf.br.

1. Introdução

A idéia de usar barras de aço como mecanismo de reforço surgiu em 1877 quando Hyatt relatou a possibilidade de usar aço combinado com cimento *portland* para superar a fragilidade do concreto sob a ação de tensões de tração na flexão. A partir de então, diversos pesquisadores vêm elaborando estudos envolvendo análises minuciosas tanto sobre as características dos materiais componentes quanto em relação às propriedades do concreto em seu estado fresco e endurecido, a fim de gerar técnicas e processos que possibilitem o desenvolvimento equivalente às necessidades da construção civil moderna.

Os estudos experimentais iniciais, que datam por volta de 1900, revelaram que na maioria dos casos a falha na estrutura de concreto armado não é proveniente da tensão excessiva na barra e, sim, de deslizamentos relativos entre o concreto e o aço. Por essa razão, a aderência foi reconhecida como um parâmetro crítico em projetos de concreto armado (Hyett e Moosavi 1996). Dessa forma, o conhecimento do comportamento da aderência entre os dois principais elementos que compõem o concreto armado (concreto e aço) tem grande relevância para que se obtenha a capacidade de carga e de serviço das estruturas, sendo também fator indispensável para a definição das regras de cálculo de ancoragens e de emendas por transpasse das barras, para o cálculo das deflexões e para o controle de abertura de fissuras.

A finalidade principal deste trabalho é correlacionar a tensão de aderência de barras nervuradas de aço com o comprimento de ancoragem em concretos de cimento *portland* e de cimento geopolimérico. Para isso, foram realizados ensaios experimentais de acordo com as prescrições do RILEM/CEB/FIP-RC6 (1983) em concretos de cimento *portland* e de cimento geopolimérico armado com barras de aço nervuradas.

2. Programa experimental

2.1 Materiais

Os procedimentos de caracterização dos materiais, de mistura e de moldagem, assim como de ruptura dos corpos-de-prova, foram realizados conforme as prescrições normativas e procedimentos usuais para materiais a base de cimento *portland*.

2.1.1 Agregados

O agregado graúdo proveniente de jazidas localizadas no município de Campos dos Goytacazes foi lavado durante o peneiramento e secado em estufa a 110 °C por 24h, apresentando uma massa específica de 2,57 g/cm³ e diâmetro máximo de 12,5 mm. O agregado miúdo utilizado na moldagem dos corpos de prova foi uma areia quartzosa de rio, lavada, com partículas menores do que 4,8 mm, massa específica igual a 2,69 g/cm³ obtida segundo a NBR 9776 (1982), módulo de finura igual a 2,92 (NBR 9202, 1985). A

areia foi secada em estufa durante um período de 24h a uma temperatura de 110 °C. A distribuição granulométrica, obtida segundo a NBR 7217 (1987) dos agregados miúdo e graúdo, é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1: Distribuição granulométrica dos agregados.

Agregado miúdo		Agregado graúdo	
Malha	% retida acumulada	Malha	% retida acumulada
4,8	0,00	-	-
2,4	0,60	19,0	0,00
1,2	36,40	12,5	0,35
0,6	65,40	9,5	16,09
0,3	90,60	4,8	91,84
0,15	98,60	2,4	95,37
Fundo	100,00	Fundo	100,00

2.1.2 Cimento *portland*

O cimento utilizado neste estudo foi o *portland* composto com adição de escória de alto-forno (CPIIE-32), da marca Mauá. O cimento *portland* foi usado tanto na concretagem dos blocos de referência e também como fonte de cálcio na mistura com o metacaulim para obtenção do concreto geopolimérico. A composição química (obtida por fluorescência de raios X - FRX) e as propriedades físicas do cimento *portland* estão detalhadas na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades físicas e químicas do cimento *portland*.

SiO ₂ (%)	20,10
Al ₂ O ₃ (%)	5,00
CaO (%)	59,50
Fe ₂ O ₃ (%)	3,70
MgO (%)	2,30
K ₂ O (%)	0,10
SO ₃ (%)	3,00
Cal livre	1,10
Resíduo insolúvel ^a	1,20
Perda ao fogo ^b	4,80
Área específica BLAINE (m ² ·kg ⁻¹) ^c	324,81
Área específica BET (m ² ·kg ⁻¹) ^d	222,34
Massa específica (kg·m ⁻³)	3,23
Resíduo na peneira 200 (%)	3,0
Resíduo na peneira n.º 325 (%)	-
Tempos de pega [início - fim] (h)	

^a Ensaio realizado conforme a NBR 5744 (2004).

^b Ensaio realizado conforme a NBR 5743 (2004).

^c Ensaio realizado conforme a NBR 7224 (1984).

^d Análise de superfície específica por absorção de N₂ (equipamento ASAP 2000).

2.1.3 Metacaulim

O metacaulim, utilizado como aglomerante na fabricação dos concretos geopoliméricos, foi obtido por meio da calcinação e moagem de um caulim proveniente da região sul da Bahia, o qual é comercializado pela empresa Monte Paschoal, estabelecida na cidade do Rio de Janeiro.

O material foi calcinado a 700 °C por 6h num forno mufla. Análises em laboratório mostraram que essa temperatura e tempo adotados são os mais adequados em termos de resistência mecânica dos concretos e economia de energia, ou seja, é a combinação de temperatura e tempo nas quais o metacaulim apresenta maior grau de amorficidade e, conseqüentemente, maior reatividade. Para aumentar ainda mais a reatividade, antes de ser utilizado como aglomerante na fabricação dos concretos geopoliméricos, o metacaulim foi moído durante 1/2h em moinho de bolas, obtendo-se uma superfície específica BET de 4922 m².Kg⁻¹. A Tabela 3 mostra a composição química (obtida por FRX) e as propriedades físicas do metacaulim.

Tabela 3: Propriedades físicas e químicas do metacaulim.

SiO ₂ (%)	48,40
Al ₂ O ₃ (%)	46,37
TiO ₂ (%)	1,23
Fe ₂ O ₃ (%)	2,12
K ₂ O (%)	0,29
SO ₃ (%)	1,49
Outros	0,02
Área específica BLAINE (m ² .kg ⁻¹) ^a	400
Área específica BET (m ² .Kg ⁻¹) ^b	4922
Massa específica (g.cm ⁻³) ^c	2,49

a Ensaio realizado conforme a NBR 7224 (1998).

b Análise de superfície específica por absorção de N₂ (equipamento ASAP 2000).

c Ensaio de massa específica real método de Le Chatelier (NBR 6474, 1987).

2.1.4 Ativador alcalino

Uma mistura de substâncias alcalinas (silicato de sódio alcalino e hidróxido de potássio) foi utilizada para a ativação, pela qual se obteve um módulo alcalino (MA) de 0,9. O módulo alcalino foi calculado pela equação 1.

$$MA = \frac{\%SiO_2}{\%(Na_2O + K_2O)} \quad (1)$$

O valor de MA apresenta uma relação intrínseca ao valor do pH do ativador, ou seja, uma redução no valor de MA significa um aumento no pH do ativador (Chang, 2003). Segundo Fraay *et al.* (1989), o valor do pH da solução alcalina deve ser maior que 13,3 para garantir a ativação. Assim, neste trabalho foi usado um ativador alcalino com um pH igual a 13,8 a 25 °C.

Os resultados das análises física e química do silicato de sódio alcalino e do hidróxido de potássio (dados fornecidos pelos respectivos fabricantes) utilizados na fabricação da solução alcalina são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades físicas e químicas do silicato de sódio alcalino e do hidróxido de potássio.

Silicato de sódio alcalino	
SiO ₂ (%)	32,8
Na ₂ O (%)	15,1
H ₂ O (%)	52,1
SiO ₂ / Na ₂ O	2,2
Fe (ppm)	< 120
Densidade (g/cm ³)	1,57
Viscosidade a 20°C (centipéises)	900
Hidróxido de potássio	
K ₂ O (%)	71,3

2.1.5 Barra de aço

Na confecção dos corpos-de-prova prismáticos para os ensaios de arrancamento foram utilizadas barras de aço nervuradas CA50 com diâmetro nominal de 10 mm, da marca Belgo Mineira, cuja resistência ao escoamento foi de 650 MPa, determinada por meio de ensaio de tração direta (NBR 6152, 2002). Este valor está acima do exigido pelas normas.

2.2 Procedimentos experimentais

Os ensaios de aderência foram realizados em corpos-de-prova de concretos confeccionados com cimento *portland* e com cimento geopolimérico. Para a determinação da tensão de aderência foram moldados cinco corpos-de-prova para cada tipo de matriz, de acordo com as prescrições normativas do RILEM/CEB/FIP-RC6 (1983).

A descrição e dimensões dos corpos-de-prova são mostradas na Figura 1a. Também foram moldados, para cada tipo de concreto, três cilindros de ϕ 100 mm x 200 mm para os ensaios de resistência à compressão axial, segundo a recomendação da NBR 5739 (1994), e três cilindros de ϕ 100 mm x 200 mm para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, segundo a NBR 7222 (1994). A Tabela 5 mostra a quantidade de material empregada por metro cúbico de concreto, correspondente a cada traço definido para a realização do ensaio de aderência.

Os concretos foram fabricados numa betoneira de capacidade igual a 420 L. No final da mistura, o concreto foi colocado nos diferentes moldes (cilíndricos e prismáticos) e adensado em mesa vibratória durante 30s a cada camada de 100 mm de espessura com uma frequência de 50 Hz. O mesmo procedimento foi realizado para a concretagem dos blocos com diferentes comprimentos de ancoragem. Foram realizados ensaios de abatimento do tronco de cone (NBRNM 67, 1998) e tempo Vebe (BS 1881, 1983) para ambos os concretos.

Após 24h, os corpos-de-prova de concreto de cimento *portland* (CCP) foram desmoldados e curados durante 28 dias num tanque com água e cal. Os corpos de prova de CCG também foram desmoldados após 24h e o processo de cura foi em ambiente de la-

boratório. Ressalta-se que uma das grandes vantagens do CCG em relação ao CCP é que aquele não precisa de cura úmida, pois a água no CCG funciona principalmente como agente dispersante e como catalisador da polimerização. Ressalta-se também que, após a completa polimerização do CCG, a água capilar e/ou adsorvida pode ser totalmente eliminada por aquecimento, sem que haja efeitos nocivos significativos ao produto final.

Tabela 5: Quantidade de material empregada por m^3 de concreto para o ensaio de aderência.

Material	Quantidade (kg/ m^3)
Concreto de cimento Portland (1:2:3:0,58)	
CPIIE-32	357
Agregado miúdo	714
Agregado graúdo	1071
Água	207
Concreto de cimento geopolimérico (1:2:3:0,60)	
Metacaulim	148
CPIIE-32	68
Na_2SiO_3	162
KOH	61
Agregado miúdo	709
Agregado graúdo	1063
Água	131

Os ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral foram realizados em uma prensa universal Soiltest com capacidade de carga de 1200 kN. Já os ensaios de arrancamento (ensaio de aderência) foram realizados numa máquina universal Instron 5582 com capacidade de carga de 10 kN a uma taxa de carregamento monotônico de 0,5 mm/min. A montagem utilizada nos ensaios de arrancamento está representada na Figura 1b.

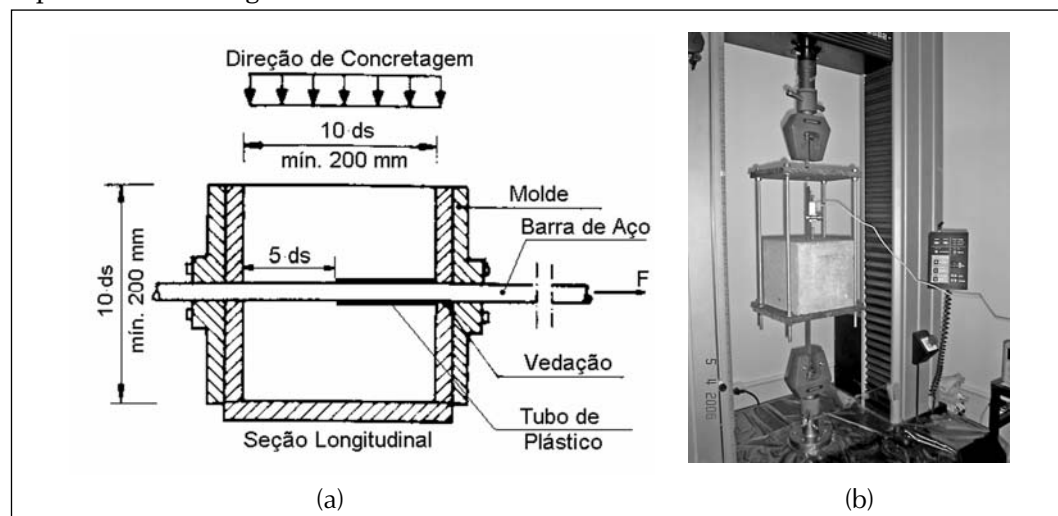


Figura 1: (a) Dimensões dos corpos-de-prova para o ensaio de aderência (ds = diâmetro da barra de aço); (b) Esquema de execução do ensaio de aderência.

3. Resultados obtidos

3.1 Trabalhabilidade dos concretos

Os valores do abatimento do tronco de cone do CCP e do CCG foram iguais a 120 mm e 50 mm, respectivamente. O tempo Vebe apresentou como resultado um valor de 10s para o CCP e 9s para o CCG. Esses valores de abatimento do tronco de cone e do tempo Vebe representam boa trabalhabilidade, mesmo sem o uso de superplastificantes. A diferença significativa entre os valores de abatimento do tronco de cone do CCG e do CCP ocorre porque aquele possui maior viscosidade que este, o que mostra que este ensaio não é o mais adequado para a determinação da trabalhabilidade dos CCG.

3.2 Resistência à compressão e à tração por compressão diametral dos concretos

As resistências médias à compressão (f_{cm}) e à tração por compressão diametral (f_{tm}), aos 28 dias de idade, do CCG e do CCP são mostradas na Tabela 6. As siglas indicam o tipo de concreto (P para cimento *portland* e G para cimento geopolimérico) e os números, o comprimento de ancoragem em milímetros. A resistência à compressão do concreto é importante nos resultados de ensaios de aderência, pois suporta as concentrações de tensões geradas pelas nervuras que ocasionam o esmagamento localizado do concreto. A resistência à tração do concreto é outro fator determinante do estado último de carregamento na ancoragem da armadura no caso da ruptura por fendilhamento de concretos convencionais ($f_{cm} \leq 40$ MPa) em ensaios de aderência.

Tabela 6: Resistências médias à compressão e à tração por compressão diametral.

Propriedade	μ (MPa) ^a	σ (MPa) ^b	CV (%) ^c
P50			
Resistência à compressão (f_{cm})	28,6	0,58	2,03
Resistência à tração por compressão diametral (f_{tm})	3,07	0,18	5,86
G50			
Resistência à compressão (f_{cm})	24,7	1,85	7,49
Resistência à tração por compressão diametral (f_{tm})	2,16	0,22	9,72
G40			
Resistência à compressão (f_{cm})	23,8	1,78	7,48
Resistência à tração por compressão diametral (f_{tm})	2,12	0,15	7,07
G25			
Resistência à compressão (f_{cm})	22,0	1,02	4,64
Resistência à tração por compressão diametral (f_{tm})	2,05	0,11	5,36

^a μ = média aritmética de três corpos-de-prova cilíndricos de ϕ 100 mm x 200 mm (28 dias).

^b σ = desvio-padrão da população finita.

^c CV = coeficiente de variação = $(\sigma/\mu) \cdot 100$.

3.3 Tensão de aderência dos concretos

Os ensaios de aderência foram realizados conforme as prescrições normativas do RILEM/CEB/FIP-RC6 (1983), as quais apresentam a variação do deslizamento (s) da barra nervurada na extremidade livre em relação ao concreto que a envolve, em função da força de arrancamento (F).

Na Fig. 2 observa-se que a morfologia das curvas corresponde àquela obtida nos ensaios de arrancamento clássico, onde o ramo ascendente mostra em seu primeiro estágio deslizamento nulo entre a barra de aço e o concreto e, em seguida, a existência de uma zona quase linear desse deslizamento relativo. O pico da curva corresponde ao valor máximo da resistência da ligação de aderência. Após o pico, as variações do deslizamento relativo apresentam um ramo descendente cuja inclinação exprime a fragilidade do comportamento da ruptura de ligação da aderência.

A Figura 2 também mostra que o início do deslizamento da barra de aço em relação ao bloco de concreto para o P50 ocorreu para uma tensão de aderência igual a 1,04 MPa. Já no G50, o deslizamento da barra de aço iniciou com uma tensão de aderência igual a 1,50 MPa, ou seja, 44% superior. Para os demais concretos (G40 e G25) as barras iniciaram os deslizamentos relativos para as tensões de aderência iguais a 1,65 MPa e 2,32 MPa, respectivamente. Até alcançar a tensão máxima de aderência ($\tau_{bm\acute{a}x}$), que é representada pelos picos das curvas, as barras continuam apresentando deslizamento relativo crescente em razão do esmagamento do concreto entre as nervuras. As tensões máximas de aderência de P50, G50, G40 e G25 foram iguais a 8,83 MPa, 10,38 MPa, 11,84 MPa e 12,60 MPa, respectivamente. Em seguida, nota-se uma queda considerável nos valores de tensão de aderência para maiores deslizamentos (ramo descendente das curvas), o que caracteriza a tensão média de aderência residual (τ_{bmr}).

A Tabela 7 mostra os valores médios das tensões de aderência (τ_{bm}) para um deslizamento relativo (s) igual a 0,1 mm, limite especificado pelo CEB/FIB MODEL CODE (1990), que representa o instante que corresponde à total perda de aderência. Na mesma tabela são apresentados os valores da relação $\tau_{bm0,1}/f_{cm}$. O valor de $\tau_{bm0,1}$ para o G50 foi 43% superior àquele apresentado pelo P50, evidenciando o melhor desempenho do CCG. Também foi observado que o valor de $\tau_{bm0,1}/f_{cm}$ para o G50 foi 60% maior àquele apresentado pelo P50. Para os outros concretos (G40 e G25), $\tau_{bm0,1}$ e $\tau_{bm0,1}/f_{cm}$ apresentaram valores superiores tanto em relação à referência (P50) quanto ao G50.

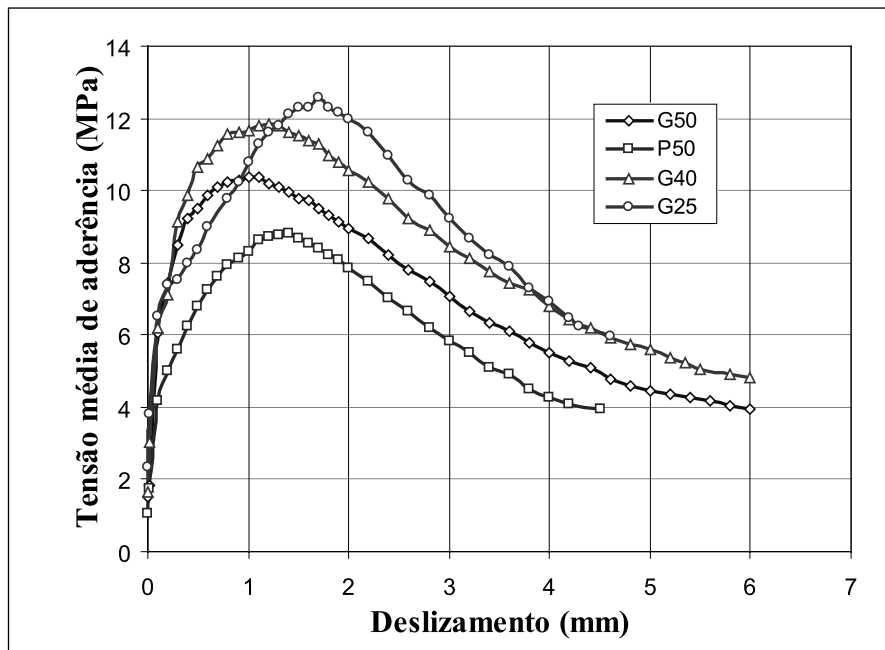


Figura 2: Curvas de tensão média de aderência do CCP e dos CCG em função do deslizamento relativo, para comprimentos de ancoragem iguais a $5d_s$, $4d_s$ e $2,5d_s$.

Tabela 7: Tensões médias de aderência (τ_{bm}) para deslizamentos relativos $s = 0,1$ mm.

Concretos	$\tau_{bm0,1}$ (MPa)	$\tau_{bm0,1}/f_{cm}$	σ (MPa) ^a	CV (%) ^b
P50	4,20	0,15	0,40	9,52
G50	6,00	0,24	0,43	7,17
G40	6,18	0,26	0,49	7,93
G25	6,43	0,29	0,42	6,53

^a σ = desvio-padrão da população finita.

^b CV = coeficiente de variação = $(\sigma/\mu) \cdot 100$.

3.4 Comprimento de ancoragem

As relações entre as tensões de aderência ($\tau_{bm0,1}$, τ_{bm} e $\tau_{bm\max}$ do CCP e dos CCG), obtidas a partir dos ensaios de aderência, e o comprimento de ancoragem, calculado de acordo com as recomendações do CEB/FIP MODEL CODE (1990), são mostradas na Fig. 3.

Observa-se que os comprimentos de ancoragem do G50 foram aproximadamente 27%, 12% e 15% inferiores àqueles apresentados pelo P50 para as tensões $\tau_{bm0,1}$, τ_{bm} e $\tau_{bm\max}$, respectivamente, ou seja, em função das maiores tensões de aderência, os CCG obtiveram, sob as mesmas condições que o CCP, menores comprimentos de ancoragem.

Para o G50, a tensão média de aderência (τ_{bm}) foi aquela que conduziu a um comprimento de ancoragem mais conservador, ou seja, dentre as tensões em questão, esta foi a que apresentou maior comprimento de ancoragem (212 mm). Para o P50, a tensão média de aderência para um deslizamento igual 0,1 mm ($\tau_{bm0,1}$) obteve um comprimento de ancoragem maior (281 mm), o que revela um valor ainda mais conservador.

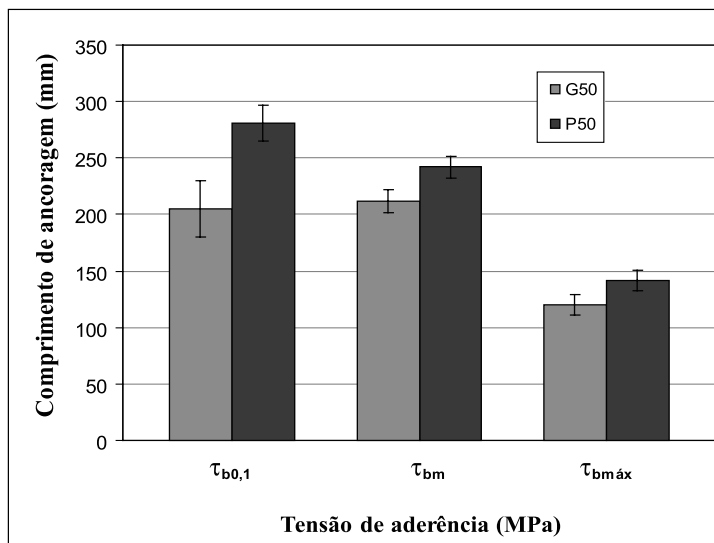


Figura 5.16: Relação entre as tensões de aderência obtidas nos ensaios de arrancamento e os comprimentos de ancoragem obtidos segundo o CEB/FIP MODEL CODE (1990).

3.5 Considerações finais

Após análise dos resultados de tensão de aderência para o CCG e para o CCP foi possível constatar a superioridade da ligação aço-CCG. Surge, então, a necessidade de se discutirem os parâmetros envolvidos ou responsáveis por esses resultados. A resistência à compressão é uma propriedade do concreto muito importante quando são realizados ensaios com barras de aço nervuradas, pois suporta as tensões concentradas geradas no concreto entre as nervuras da barra. Dessa forma, esta apresenta grande influência nos resultados de aderência nos ensaios de arrancamento. Em geral, neste estudo, os melhores resultados apresentados nos ensaios de arrancamento pelos CCG em relação ao CCP não são necessariamente justificados pela resistência à compressão, pois os valores das mesmas foram bem próximos entre si.

Estudos da correlação entre tensão de aderência e zona de transição, análises microestruturais e por varredura em linha foram realizadas em interfaces aço-matriz (Dias, 2001). Segundo a literatura, a zona de transição aço-matriz de cimento *portland* é mais fraca e porosa que o restante da matriz, pois é rica em cristais de portlandita (fase menos resistente do cimento *portland* hidratado) e pobre em C-S-H (fase mais

resistente do cimento *portland* hidratado). Conseqüentemente, essa zona de transição limita as propriedades mecânicas do concreto armado. Já as análises microestruturais realizadas na zona de transição aço-pasta de cimento geopolimérico revelaram que esta região não possui maior porosidade que o restante da matriz nem a presença de cristais de portlandita. Isso remete à conclusão de que o cimento geopolimérico desenvolve maior adesão por atrito ao aço que o cimento *portland*, em razão da maior área de contato entre ambos os materiais.

4. Conclusões

De acordo com os resultados do programa experimental, as seguintes conclusões puderam ser obtidas:

- os valores obtidos nos ensaios de abatimento de tronco de cone e tempo Vebe, tanto para o CCG como para o CCP, apresentaram boa trabalhabilidade, mesmo sem uso de superplastificantes. Apesar de o cimento geopolimérico apresentar elevada viscosidade, também possui como principal característica excelente moldabilidade;
- nos ensaios de aderência todos os concretos apresentaram o mesmo comportamento no estado último de perda de aderência aço-concreto, apresentando deslizamento livre das barras de aço sem que houvesse a ruptura do concreto;
- os resultados relativos à tensão média de aderência (τ_{bm}) para o CCG comprovam seu excelente desempenho em relação ao CCP e ressaltam a importância das propriedades da interface aço-matriz. Dessa forma, foi possível obter uma redução máxima de 27% do comprimento de ancoragem para o CCG em relação ao CCP, segundo as recomendações do CEB/FIP MODEL CODE (1990).

5. Referências

- BS 1881: PART 104 (1983). *Testing Concrete Part 104: Method for Determination of Vebe Time*. British Standard Institute (BSI).
- CEB/FIP MODEL CODE (1990). *Bond Action and Behavior for Reinforcement*. Comité Euro-International du Béton, Paris.
- CHANG, J. J. (2003). *A Study on the Setting Characteristics of Sodium Silicate-Activated Slag Pastes*. Cement and Concrete Research, n.º 33, p. 1005-1011.
- DIAS D. P. (2001). *Cimentos Geopoliméricos: Estudo de Agentes Químicos Agressivos, Aderência e Tenacidade à Fratura*. 215 p. Tese de Doutorado - IME.
- FRAAY, A. L. A., BIJEN, J. M., DE HAAN, Y. M. (1989). *The Reaction of Fly Ash in Concrete: a Critical Examination*. Cement and Concrete Research, n.º 19, p. 235-146.
- HYETT, A. J.; MOOSAVI, M. (1996). *Load Distribution Along Fully Grouted Bolts with Emphasis on Cable Reinforcement*. Int. J. Num. Analitic. Meth. Geomech, 20, p. 517-544.
- NBR 5739 – MB3 (1994). *Concreto: Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 5743 (2004). *Cimento Portland: Determinação de Perda ao Fogo*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 5744 (2004). *Cimento Portland: Determinação de Resíduo Insolúvel*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 6152 (2002) *Materiais Metálicos: Ensaio de Tração à Temperatura Ambiente*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 6474 (1987). *Cimento Portland e Outros Materiais em Pó: Determinação da Massa Específica Método de Le Chatelier*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 7217 – MB7 (1987). *Agregados: Determinação da Composição Granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 7222 – MB212 (1994). *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.

NBR 7224 – NM76 (1998). *Determinação da Finura pelo Método de Permeabilidade ao Ar (Método Blaine)*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 7477 (1982). *Determinação do Coeficiente de Conformação Superficial de Barras e Fios de Aço Destinados a Armadura de Concreto Armado*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 9202 – MB2145 (1985). *Cimento Portland e Outros Materiais em Pó: Determinação da Finura por Meio da Peneira 0,044 mm (n.º 325)*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 9776 (1982). *Agregado: Determinação da Absorção e Massa Específica do Agregado Graúdo*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), São Paulo.

NBRNM 67 (1998). *Concreto: Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

RILEM/CEB/FIP-RC6 (1983). *Bond Test for Reinforcement Steel: 2. Pull-Out Test (Revised Edition)*. CEB Manual on Concrete Reinforcement Technology, Lausanne, 3 p.

Steel-Geopolymer Concrete: Correlation between Bond Stress and Anchorage Length

Abstract

Concrete has negligible tensile capacity. However, because of its low cost and high compressive strength, it is a valuable construction material. When reinforced with steel, the result is a relatively inexpensive and ductile material. The transfer of forces across the interface by bond between concrete and steel is of fundamental importance to many aspects of reinforced concrete behavior. Special cements are being increasingly used for particular applications on building industry. The physicochemical and mechanical properties of these cements are quite different from those of ordinary Portland cement (PC). One example is the geopolymeric cement (GC). The main objective of this work was to investigate the local bond stress-slip behavior of reinforcing bars embedded in Portland and geopolymer concretes. Because of this, bond behavior was studied through pullout tests, in which the applied load and corresponding slips at the bar's free were recorded continuously throughout the test.

GC concrete showed excellent adherence values. In accordance to bond tests, it was possible to reduce 50% (from 5 mm to 2.5 mm) of the embedded length relative PC concrete. Calculations according to CEB/FIP MODEL CODE (1990) showed that it was also possible to reduce 27% of the embedded length. Low porosity of the steel-GC matrix interface was the main factor for their superior performance relative to PC concrete.

Keywords: Anchorage length. Bond stress. Geopolymer concrete. Pullout test.

1. Experimental investigation

Portland cement concrete conforming to NBR 6118 (2003) and geopolymer cement concrete were used. Sand and crushed stone were from local sources. The concrete mix design is listed in Table 5. The reinforced steel with yield strength of 650 MPa and nominal diameter rebars of 10 mm was used.

The specimens were cast in a 200 mm x 200 mm x 200 mm wood mold with reinforced steel positioned at the center. After demolding, the specimens were cured for 28 days.

The pullout test procedure used in this study basically followed the specification of RILEM/CEB/FIP-RC6 (1983). The pullout test was performed in a universal material testing machine. The average value of the LVDT reading was used to control the stroke rate of 0.5 mm/min. During the test, the loading and the displacement values were recorded using a data acquisition system.

2. Conclusions

Based on the results obtained from the present investigation, the following conclusions could be drawn:

- the slump and Vebe time tests showed that CG and CP concretes have satisfactory workability even though without using superplasticizers;
- in pullout tests, all specimens failed by slipping of the steel bar;
- GC concrete showed excellent adherence values. In accordance to bond tests, it was possible to reduce 50% (from 5 mm to 2.5 mm) of the embedded length relative PC concrete. Calculations according to CEB/FIP MODEL CODE (1990) showed that it was also possible to reduce 27% of the embedded length. Low porosity of the steel-GC matrix interface was the main factor for their superior performance relative to PC concrete.