

AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO GEOPOLIMÉRICO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS

Felipe de Luca Laurindo (1), Bruno do Vale Silva (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)felipelaurindo@gmail.com, (2)dovalesilva@unesc.net

RESUMO

A aderência aço-concreto é indispensável para o bom funcionamento de uma estrutura de concreto armado. Ao mesmo tempo, o grande consumo energético da produção de cimento gera uma preocupação com a sustentabilidade e o meio ambiente. Em vista disto, o presente trabalho buscou comparar a eficiência de um material usual de boa aderência com um material relativamente novo, o geopolímero. Foram realizados ensaios de aderência do tipo *push-in* em corpos de prova cilíndricos ($\varnothing 10 \times 10$ cm) moldados com concreto de cimento Portland e concreto geopolimérico, submetidos a temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C e posterior comparação com a temperatura ambiente. Foram observados a perda de massa, a integridade visual do concreto e a tensão residual de aderência. As perdas de massa não apresentaram diferença muito significativa quando comparados os concretos entre si, porém conforme a temperatura aumentava, o concreto Portland sofria mais com a ação da temperatura, ocorrendo *spalling* na temperatura de 600°C, o que não aconteceu com o Geopolímero, que reagiu de maneira diferente às diversas temperaturas, se mostrando um material de maior resistência à este fenômeno. Ainda, ao invés do arrancamento da barra, o rompimento por fendilhamento foi o mais comum entre grande parte dos corpos de prova analisados, demonstrando uma grande resistência mecânica de ambas as partes.

PALAVRAS CHAVE: *Aderência. Alta Temperatura. Concreto. Geopolímero.*

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado tem conquistado um grande mercado na área de estruturas devido a sua alta resistência e durabilidade. Este sucesso é derivado de vários fatores, tendo como um dos principais a aderência entre o aço e o concreto.

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014), elementos de concreto armado são aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre o concreto e a armadura, fazendo com que se torne indispensável uma boa resistência de aderência entre estes componentes. (BARBOSA, 2002; SILVA, 2013)

FERNANDES (2000) afirma que o comportamento da aderência é fortemente influenciado pelas ações às quais o elemento está submetido. Em situações

extremas de deterioração, como quando ocorre a degradação do concreto devido à ação de elevadas temperaturas, é razoável admitir que o comportamento de aderência se altera, pois o material se degrada e esforços diferenciais e deletérios surgem na região circundante à barra de aço (CAETANO, 2008).

Tendo o comportamento de degradação do concreto é um dos principais fatores que afetam a aderência da estrutura submetida à altas temperaturas, se mostra interessante o estudo da influência deste fator em outros tipos de concretos, como é o caso do geopolímero. Segundo MENGER (2015), o termo “geopolímero” foi patenteado por Davidovits em 1976 nos Estados Unidos, para designar esses cimentos, que quando sofrem a ativação alcalina, passam por uma reação de hidratação de alumino-silicatos.

COSTA (2012) afirma que quando comparados com o concreto convencional, obtido de cimento Portland, os concretos geopoliméricos apresentam uma melhor resistência ao fogo.

Ainda, a produção de 1 tonelada de cimento gera diretamente 0,55 tonelada de CO₂ químico e requer a combustão de combustível a base de carbono gerando um adicional de 0,40 toneladas de CO₂, simplificando 1 tonelada de CO₂ para a produção de 1 tonelada de cimento. (...) Na química do geopolímero, é reduzida a emissão de dióxido de carbono causada pelas indústrias de cimento e concreto de 80 a 90%. (DAVIDOVITS, 1994)

Nesse contexto, o presente trabalho visa avaliar o comportamento da aderência aço-concreto geopolimérico após a aplicação de altas temperaturas e posterior comparação com o concreto Portland submetido ao mesmo tratamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental foi desenvolvido para analisar o comportamento de aderência entre o aço e o concreto geopolimérico (AG - Aderência Geopolímero) submetido à ação de altas temperaturas, e posterior comparação com o concreto Portland (AP - Aderência Portland) submetido ao mesmo tratamento.

Para análise foram fabricados 5 corpos de prova para cada variável, totalizando 40 corpos de prova para este trabalho. Cada grupo de corpos de prova foi submetido à ação de uma temperatura específica antes de ter sua aderência analisada.

Os moldes dos corpos de prova foram preenchidos com concreto geopolimérico e concreto Portland, conforme os traços apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Traços desenvolvidos nos concretos.

Concreto	Geopolimérico	Portland
Traço	1:1,2:3,8:1,2 (Metacaulim:Ativador:Areia:Brita)	1:2,3:2,7 (Cimento:Areia:Brita)
Relação a/alg.	0,75	0,4
Aditivo	-	0,7% Superplastificante

Fonte: O autor, 2015.

Na mistura do AG foi utilizado hidróxido de sódio da marca *Sigma Aldrich* com 63% de H₂O e silicato de sódio C-325 (BFC70), fornecido pela *Manchester Química S.A.*, para ativação alcalina do metacaulim fornecido pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da UNESC, areia média com diâmetro máximo do agregado (D,máx) de 2,40 mm, e brita n.0 com D,máx=9,5mm, compondo uma mistura em que a relação molar é apresentada na Tabela 2. No AP foi utilizado o cimento CPV-ARI, areia média com D,máx=2,40 mm, brita n.1 com D,máx=19mm, com uso de aditivo superplastificante, todos disponibilizados pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil - LMCC da UNESC.

Tabela 2: Relação molar da mistura de geopolímero.

Composição	
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3,2
Na ₂ O/Al ₂ O ₃	0,46
Na ₂ O/SiO ₂	0,14
Na ₂ OSiO ₂ /NaOH	1,6
H ₂ O/MK (g/g)	0,75

Fonte: MENGEL, 2015.

O traço do AP foi utilizado para obter uma resistência à compressão de 60 MPa após os 28 dias, resistência esta também para ser obtida na mistura do AG. A mistura do AP foi executada no LMCC da UNESC, com o auxílio de uma betoneira com capacidade nominal de 400 litros. O AG foi misturado no mesmo laboratório com o auxílio de um agitador mecânico.

A moldagem foi feita seguindo as recomendações de SILVA (2014), sendo o corpo de prova com dimensões de 100 mm de altura por 100 mm de diâmetro com comprimento de aderência entre o concreto e a barra igual a cinco vezes o diâmetro desta. A barra CA-50 nervurada utilizada na armadura foi da marca ArcelorMittal, de diâmetro igual a 8 mm, com resistência característica de escoamento de 500 MPa. Os corpos de prova de AP foram desmoldados 24 horas após a concretagem, e submetidos ao processo de cura submersa durante um período de 28 dias. Os de AG foram desmoldados sete dias após a concretagem devido ao processo inicial de endurecimento mais lento em temperatura ambiente. Logo após a desforma, estes foram armazenados em local com temperatura ambiente de 23°C e umidade de 80%, controladas por um termo-higrômetro digital. O processo de cura é diferente entre as tipologias pois a ativação alcalina não depende da hidratação da matriz de silicato de cálcio, como ocorre no concreto Portland.

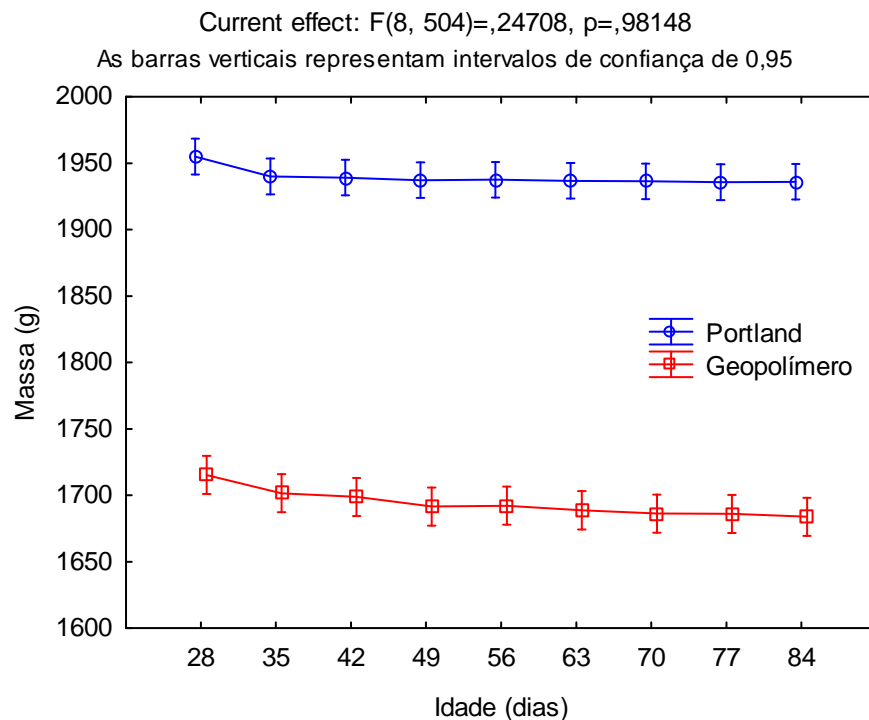
Figura 1: Corpos de prova de geopolímero (AG).



Fonte: O autor, 2015.

Após os 28 dias de cura submersa dos corpos de prova do AP, estes foram retirados da água e estocados em lugar semelhante aos anteriores (AG). Para verificar a estabilização de massa dos corpos de prova, a cada sete dias estes eram pesados em balança de precisão. Uma vez relatados os pesos estatisticamente iguais, passados 84 dias conforme Figura 2, todos os corpos de prova foram preparados para os ensaios de alta temperatura.

Figura 2: Análise de variância (ANOVA) da estabilização de massa nos corpos de prova.



Fonte: O autor, 2015.

Os ensaios de altas temperaturas foram realizados de acordo com a metodologia de Almeida et al. (2014).

Cada corpo de prova foi pesado imediatamente antes de entrar no forno, e logo após ser retirado, para verificar as perdas de massa durante a queima.

Os corpos de prova foram aquecidos a três patamares diferentes de temperaturas, sendo 200°C, 400°C e 600°C, a uma taxa de 9°C/min, mantendo depois o patamar desejado até que a temperatura do interior do corpo de prova alcançasse a temperatura externa, com variação máxima igual a 10%.

A ABNT NBR 14432 (2001) recomenda a curva de incêndio padrão da ISO 834 para descrever a elevação padronizada da temperatura em função do tempo no projeto de elementos construtivos em situação de incêndio, porém a taxa de aquecimento utilizada se fez devido às condições do equipamento utilizado.

Em todos os corpos de prova as barras de aço foram protegidas com lã de vidro para que a alta temperatura no interior do forno não chegasse à barra de aço, senão pelo concreto, como ilustrado na figura 3.

Figura 3: Barras de aço envolvidas em lã de vidro.



Fonte: O autor, 2015.

Dois termopares tipo K foram alocados na parte interna do corpo de prova e próximo à face externa do concreto, para controlar a transferência de temperatura do ambiente até a barra de aço e o tempo do fim do ensaio. Os dados de temperatura foram registrados a cada 30 segundos com o auxílio de um *data logger*. Uma vez a temperatura interna do corpo de prova se igualasse à externa, o forno era desligado e a porta do mesmo ligeiramente aberta para simular um resfriamento lento, sendo ainda registrados dados durante a primeira hora subsequente ao final do ensaio.

O equipamento utilizado nos ensaios de aquecimento foi um forno mufla Servitech de pequeno porte, modelo CT 095, com controle digital de temperatura e capacidade de aquecimento de até 1000°C e dimensões internas de 500x470x500mm.

Figura 4: Forno mufla Servitech (a); Gaiola dos corpos de prova (b).



Fonte: O autor, 2015.

Ainda, foi utilizado uma proteção de aço em forma de gaiola para que nas temperaturas mais elevadas, o possível *spalling* do concreto Portland não viesse a prejudicar o forno.

O *spalling* são pequenas explosões que ocorrem quando o concreto é submetido a temperaturas elevadas, com o aumento da pressão interna dos poros preenchidos com água. Conforme a temperatura se eleva, a água tende a se expandir, formando pressões internas no concreto. Quando estas tensões superam a resistência a tração do concreto, ocorre o lascamento brusco do mesmo causando pequenas explosões.

Após o resfriamento dos corpos de prova a cada ensaio, os mesmos foram pesados para obter a perda de massa durante a queima, em seguida embalados em papel alumínio e filme plástico para que o mesmo não reidratasse antes dos ensaios de aderência.

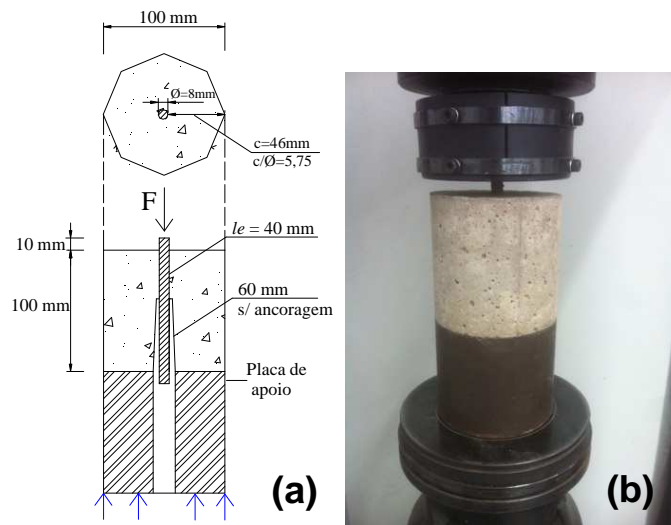
Figura 5: Corpos de prova embalados após ensaio de alta temperatura



Fonte: O autor, 2015.

Para o estudo da aderência foram feitos ensaios *push-in test*, proposto por Silva (2014). A barra de aço foi submetida a um carregamento de 32 N/s, conforme recomendação da RILEM RC6 (1983) para barras de diâmetro igual a 8 mm, tendo o gráfico do deslocamento pela força registrados por software.

Figura 6: (a) Croqui do ensaio de aderência tipo *push-in* proposto por Silva (2014) e
(b) Ensaio de aderência *Push-in*.



Fonte: (a) Silva, 2014 e (b) O autor, 2015.

O equipamento utilizado foi uma prensa EMIC modelo PC200I, com capacidade máxima de 2000 kN, acoplado ao software de leitura e obtenção de dados TESC, do Laboratório de Materiais de Construção Civil da UNESC.

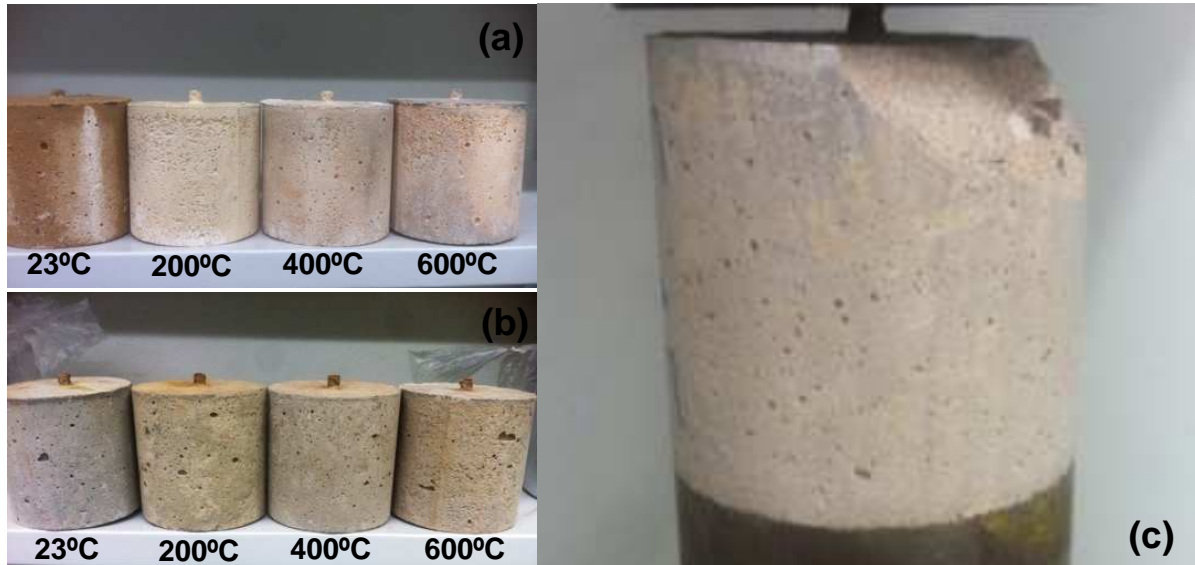
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os diferentes tipos de concreto se comportaram de maneira diferente de acordo com a temperatura submetida, iniciando pela verificação visual. Em cada temperatura, os concretos sofreram diferenças de coloração, com a ocorrência de fissuras visuais e o efeito do *spalling* no concreto Portland aos 600°C, o que não aconteceu no geopolímero.

Os AG apresentaram coloração mais avermelhada para as maiores temperaturas, enquanto os AP apresentaram diferenças menores de coloração, ficando levemente mais escuros com a exposição às maiores temperaturas.

As diferenças visuais podem ser melhor identificadas na figura 7.

Figura 7: AG pós fogo (a); AP pós fogo (b); *Spalling* no AP aos 600°C (c).



Fonte: O autor, 2015.

3.1 Perda de Massa

Os primeiros resultados analisados foram as perdas de massa. Durante o processo de queima ocorre uma grande perda de massa pela evaporação da água do concreto submetido à temperaturas acima do ponto de evaporação da mesma.

Os dados de perda de massa foram obtidos pesando os corpos de prova antes e depois do processo de queima, obtendo os percentuais de perda através da equação 1.

$$pm = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

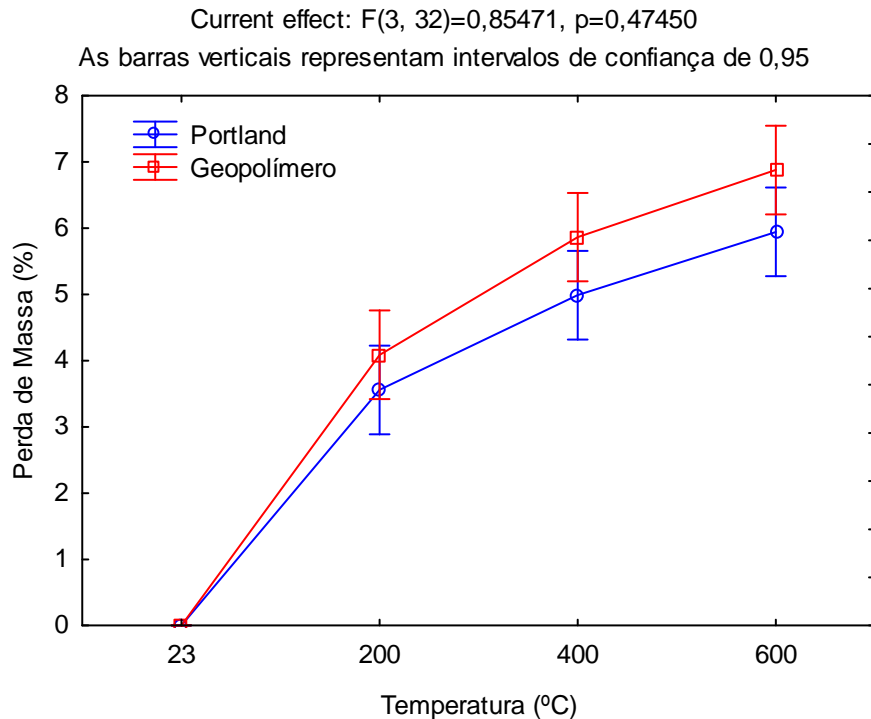
pm = perda de massa do corpo de prova (%);

m1 = massa do corpo de prova (g), antes do aquecimento;

m2 = massa do corpo de prova (g), após resfriamento;

Para verificar se os valores de perda de massa são diferentes entre cada tipologia e temperatura aplicou-se uma análise estatística de variância (ANOVA) com nível de confiança de 95%, ou seja para um fator ser significativo deve-se obter $p_{value} < 0,05$. A Figura 8 ilustra os resultados obtidos na ANOVA para a variável percentual de perda de massa, onde pode-se observar que as diferentes temperaturas e tipologias de concretos geraram perdas de massa estatisticamente iguais com $p_{value} > 0,05$.

Figura 8: Análise ANOVA dos resultados de perda de massa.



Fonte: O autor, 2015.

Com os resultados estatísticos da ANOVA, realizou-se o teste Post-hoc de Duncan para avaliar as tipologias em pares, gerando um p_{value} para cada comparação analisada, conforme indicado na Tabela 3, fornecendo dados estatisticamente iguais para valores acima de 0,05.

Tabela 3: Análise Post-hoc com de Duncan para os resultados de perda de massa.

		23	23	200	200	400	400	600	600
		AP	AG	AP	AG	AP	AG	AP	AG
23	AP	-	1,000000	0,000134	0,000062	0,000055	0,000033	0,000026	0,000023
23	AG	1,000000	-	0,000062	0,000055	0,000033	0,000026	0,000023	0,000020
200	AP	0,000134	0,000062	-	0,261611	0,005794	0,000090	0,000062	0,000026
200	AG	0,000062	0,000055	0,261611	-	0,061713	0,000856	0,000680	0,000034
400	AP	0,000055	0,000033	0,005794	0,061713	-	0,068360	0,059477	0,000558
400	AG	0,000033	0,000026	0,000090	0,000856	0,068360	-	0,867038	0,045814
600	AP	0,000026	0,000023	0,000062	0,000680	0,059477	0,867038	-	0,052534
600	AG	0,000023	0,000020	0,000026	0,000034	0,000558	0,045814	0,052534	-

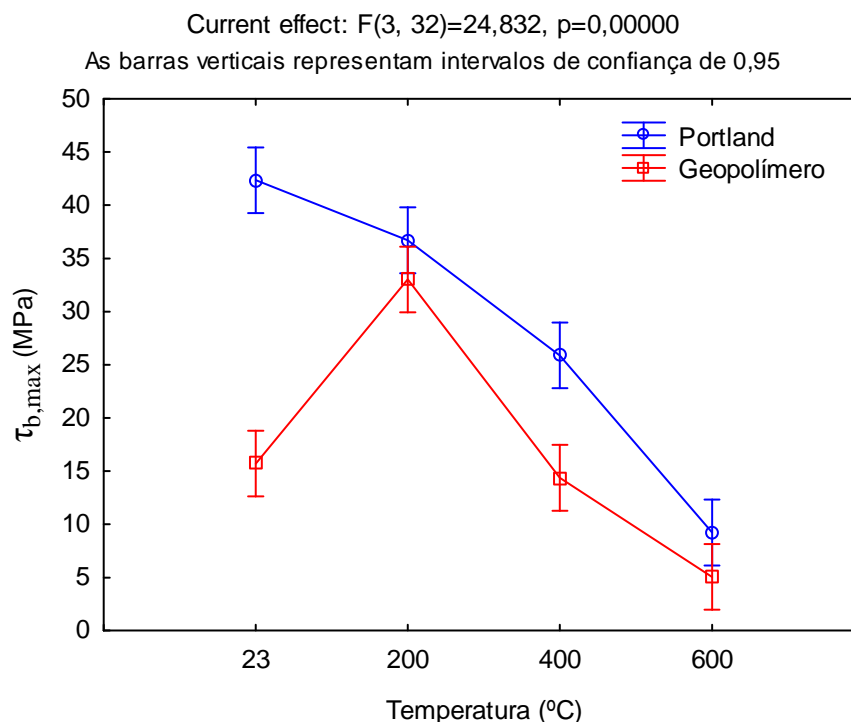
Fonte: O autor, 2015.

O teste mostrou que em ambas tipologias de concretos, os resultados foram estatisticamente iguais em todos os casos quando comparados sob a ação das mesmas temperaturas e que a perda de massa foi crescente com o aumento da temperatura para ambas tipologias. As perdas de massa médias são indicadas na Tabela 2.

3.2 Tensão de Aderência Aço-Concreto.

Os valores de aderência se mostraram de forma diferente entre as tipologias de concreto. Enquanto no AP houve uma queda da resistência conforme o aumento da temperatura de exposição, o AG apresentou um ganho de 110% de resistência aos 200°C quando comparado com a temperatura ambiente de 23°C. A partir dos 200°C, este também apresentou perda da resistência à aderência em todas as temperaturas. Para verificar a diferença de valores entre cada tipologia aplicou-se uma análise estatística de variância (ANOVA) com nível de confiança de 95%.

Figura 9: Análise ANOVA dos resultados de tensão máxima de aderência.



Fonte: O autor, 2015.

Complementarmente realizou-se o teste Post-hoc de Duncan para avaliar as tipologias em pares, conforme mostra a Tabela 4. Dentre as principais conclusões, este teste mostrou que os resultados do Geopolímero são estatisticamente iguais entre 23°C e 400°C, superiores para 200°C e inferiores para 600°C. Porém para o Portland, o aumento da temperatura provocou a diminuição da tensão de aderência em todos os patamares de temperaturas.

Tabela 4: Análise Post-hoc para os resultados de tensão máxima de aderência.

		23	23	200	200	400	400	600	600
		AP	AG	AP	AG	AP	AG	AP	AG
23C	AP	-	0,000033	0,013164	0,000243	0,000055	0,000026	0,000023	0,000020
	AG	0,000033	-	0,000055	0,000062	0,000172	0,539563	0,006756	0,000091
200	AP	0,013164	0,000055	-	0,096567	0,000083	0,000033	0,000026	0,000023
	AG	0,000243	0,000062	0,096567	-	0,002375	0,000055	0,000033	0,000026
400	AP	0,000055	0,000172	0,000083	0,002375	-	0,000069	0,000055	0,000033
	AG	0,000026	0,539563	0,000033	0,000055	0,000069	-	0,022613	0,000243
600	AP	0,000023	0,006756	0,000026	0,000033	0,000055	0,022613	-	0,060827
	AG	0,000020	0,000091	0,000023	0,000026	0,000033	0,000243	0,060827	-

Fonte: O autor, 2015.

A Tabela 5 apresenta os valores médios de aderência obtidos em cada variável.

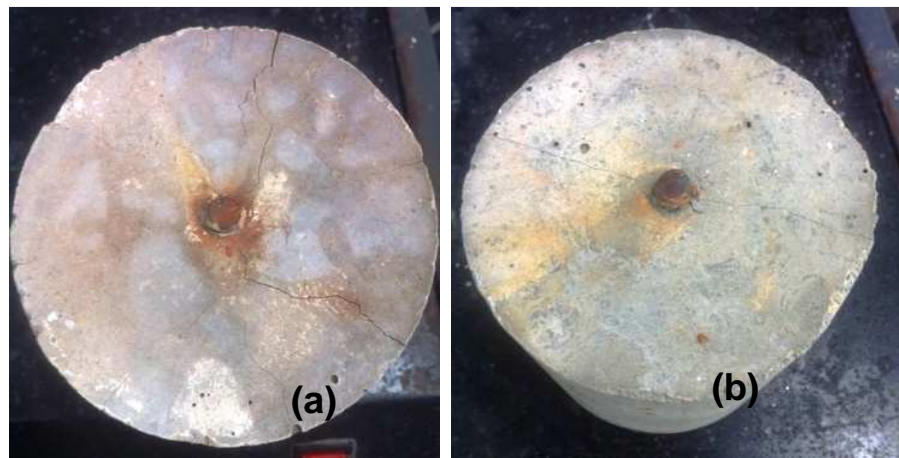
Tabela 5: Resultados de tensão de aderência em MPa.

	Temperaturas (°C)			
	23	200	400	600
AP	42,58	36,9	26,02	9,28
AG	15,8	33,2	14,46	5,08

Fonte: O autor, 2015.

Foi possível verificar ruptura por fendilhamento na maioria dos casos, em todas as temperaturas, como visto na figura 10, apresentando uma fissura ao longo de todo o diâmetro do concreto que envolve a barra de aço

Figura 10: Ruptura por fendilhamento no AG (a); Ruptura por fendilhamento no AP
(b)



Fonte: O autor, 2015.

4. CONCLUSÃO

A análise dos resultados obtidos na realização deste estudo relatou, como seu foco principal, as modificações na aderência aço-concreto submetido a diferentes temperaturas.

Ficou evidente que a resistência de aderência do concreto Portland à barra de aço diminui conforme a temperatura aumenta, com aparente deterioração do concreto aos 600°C. O concreto geopolimérico se comporta de forma diferente, uma vez que os resultados de aderência se mostraram estatisticamente iguais entre a temperatura ambiente de 23°C e 400°C, sofrendo um pico considerável quando exposto à temperatura de 200°C.

De acordo com a literatura, a partir dos 400°C a barra de aço começa a perder suas características de resistência mecânica, explicando a queda na aderência dos conjuntos submetidos à temperatura de 600°C, que comparados com os corpos de prova em temperatura ambiente, sofreram uma queda de 78% na resistência de aderência no concreto Portland e de 68% no concreto de Geopolímero.

O tipo de ruptura mais comum foi por fendilhamento, devido à boa resistência mecânica dos concretos, apresentando ruptura por arrancamento da armadura em alguns casos nos concretos submetidos aos 600°C, devido à possível grande perda de resistência mecânica desses.

O procedimento de exposição à altas temperaturas influencia diretamente na aderência aço-concreto, porém o concreto de Geopolímero se mostrou diferente ao Portland, sofrendo um percentual de perda de resistência de aderência menor que este em todos os patamares de temperatura testados.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Submeter o Geopolímero a processos de curas diferentes;
- Testar diferentes traços que proporcionem aderência similar entre os diferentes concretos na temperatura ambiente para posterior comparação;
- Analisar a influência de taxas de aquecimento mais próximas à curva padrão de incêndio ISO 834 em estruturas.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 9 p.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p.

_____. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 14 p.

_____. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 48 p.

ALMEIDA, Jacinto Manuel Antunes de et al. **Avaliação experimental de concretos com cinza de casca de arroz submetidas à ação das altas temperaturas**. In: 56º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2014, Natal. Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto. 2014.

BARBOSA, M. T. G. **Avaliação do comportamento da aderência em concretos com diferentes classes de resistência**. 2002. 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

CAETANO, Luciane Fonseca. **Estudo do comportamento da aderência em elementos de concreto armado submetidos à corrosão e elevadas temperaturas**. 2008. 178 f. Monografia (Especialização) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

COMITE EURO INTERNATIONAL DU BETON (1983) RILEM/CEB/FIP
Recommendations on reinforcement steel for reinforced concrete - CEB RC6 – Bond
test for reinforcement steel: 2. Pull-out-test, Paris: CEB, 1983. 3 p.

COSTA, António Filipe Martins. **Utilização de Geopolímeros para Protecção de Betão: Resistência a altas temperaturas.** 2012. 71 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2012.

COSTA, Carla Neves, **Aspectos Tecnológicos dos Materiais de Concreto em Altas Temperaturas,** 2000. 12p. Artigo Científico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

DAVIDOVITS, Joseph. Global warming impact on the cement and aggregates industries. **World Resource Review,** Saint-quentin, v. 6, n. 2, p.263-278, 1994.

FERNANDES, R. M. **A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto.** Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834-1:** Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements. Geneva, 1999. 25 p.

KALIFA, Pierre; MENNETEAU, François-Dominique; QUENARD, Daniel. **Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures.** Cement and Concrete Research, N° 30. Elsevier Science Ltd. Amsterdam, 2000.

MENGER, Manuela Hoffmann. **Análise da aderência entre compósitos de cimento portland e geopolimérico.** 2015. 18 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2015.

SCOTTON, Josiane Anderle, **Comportamento da Aderência Armadura-Concreto em Situações Não Usuais: Efeito de Altas Temperaturas** 2013. 98p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SILVA BV, BARBOSA MP, SILVA FILHO LCP, LORRAIN MS. Experimental investigation on the use of steel-concrete bond tests for estimating axial compressive strength of concrete: Part 1. **IBRACON Structures and Materials Journal.** 2013; 6(5): 715-736.

SILVA, B. V. **Proposição de um teste de aderência apropriado para controle tecnológico da resistência à compressão do concreto.** 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2014.