

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO SOB O EFEITO DE ALTAS TEMPERATURAS

Vanessa Aparecida Jerônimo (1), Ângela Costa Piccinini (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)vanessa-jeronimo@hotmail.com, (2)acp@unesc.net

RESUMO

O concreto armado é um material compósito formado pela interação entre o concreto e o aço e deve suas boas características à aderência entre o concreto e às barras da armadura, em que o concreto absorve os esforços de compressão e o aço os de tração, majoritariamente. Em contato com altas temperaturas, o concreto sofre alterações químicas e físicas, em que ocorre a desidratação da pasta de cimento e variações volumétricas nos agregados, ocasionando fissuração. Neste âmbito, torna-se bastante pertinente estudar a aderência entre o aço e o concreto após exposição a altas temperaturas. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo analisar o comportamento da tensão de aderência de duas classes de concreto após a exposição a diferentes níveis de temperatura. Nesta pesquisa, utilizou-se o ensaio de arrancamento direto (*Pull out test*) proposto pela RILEM CEB/FIP RC6:1983, que é o mais usual, de fácil execução e fornece dados coerentes para análise. Foram ensaiados, aos 28 e aos 90 dias de idade, corpos de prova em concreto de classes 30 MPa e 65 MPa, expostos às temperaturas ambiente (23°C), 400°C e 800°C. Além da resistência à aderência, foram avaliados o comportamento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade. A curva do comportamento da aderência foi semelhante à de compressão, em que, aos 400°C, estatisticamente, não houve variação significativa em relação a temperatura ambiente e, aos 800°C, perda expressiva de resistência em todos os casos.

Palavras-Chave: Aderência, altas temperaturas, concreto armado, ensaio de arrancamento, Pull Out Test.

1 INTRODUÇÃO

O concreto armado, de grande utilização na construção civil, é um material compósito formado pela interação entre o concreto e o aço. Para Leonhardt e Momming (1977, p. 45), “[...] o concreto armado deve suas boas características de material de construção à firme ligação por aderência entre o concreto e as barras da armadura.”. Scotton (2013, p. 16), menciona que “[...] o compósito possui bom custo benefício quando comparado a outros materiais estruturais e, e quanto ao fator técnico, possui bom desempenho em relação à resistência mecânica.”.

A ABNT NBR 6118 (2014) refere-se aos elementos de concreto armado como “[...] aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da

materialização dessa aderência. ”. Tavares *et al* (2014, p. 149) expressam que a “[...] aderência é responsável pela ancoragem da armadura no concreto e, ainda, serve para impedir o escorregamento dessa armadura nos segmentos entre fissuras, limitando a abertura destas. ”. Araújo (2014, p. 1) afirma que “[...] em virtude de sua baixa resistência à tração, o concreto fissura na zona tracionada do elemento estrutural. Desse momento em diante, os esforços de tração passam a ser absorvidos pela armadura. ”. Desse modo, impedindo as ruínas bruscas das estruturas. “Quanto maior aderência, maior a possibilidade de se obter maior número de fissuras com menor abertura individual das mesmas, o que melhora as condições de proteção da armadura. ”. (CASTRO, 2002, p. 6).

A aderência na interface aço-concreto pode ocorrer por três mecanismos: por adesão superficial, por atrito e uma parcela dominante de aderência mecânica. Porém, como citam Oliveira e Jacintho (2012, p. 2), esta divisão “[...] é unicamente didática, não sendo possível determinar-se cada componente isoladamente, devido à complexidade dos fenômenos envolvidos. ”.

Alguns autores, inclusive Araújo (2014), citam que as tensões de aderência variam ao longo da peça, entretanto, para efeito de projeto, considera-se um valor médio. Castro (2002) assegura que o conhecimento do comportamento da aderência é essencial para um correto dimensionamento das ancoragens e emendas por transpasse, cálculo dos deslocamentos considerando a contribuição do concreto tracionado, controle de fissuras e armadura mínima.

Segundo Negrão e Pimentel (2012) e Araújo (2014), vários fatores influenciam o comportamento da aderência aço-concreto, tais como: o tipo de configuração das nervuras da barra, o diâmetro da barra e o estado em que se encontra sua superfície, a disposição na hora do lançamento do concreto, a relação água cimento, as resistências mecânicas do concreto, o adensamento, a idade de ruptura, entre outros. Caetano (2008) afirma que, com o incremento da resistência do concreto, a aderência é favorecida, porém, técnicas de confinamento devem ser empregadas para controlar a tendência de estes romperem de forma frágil, como em rupturas prematuras por fendilhamento. A NBR 8953 (ABNT, 2015) classifica os concretos em grupos de resistência, o grupo I e o grupo II, podendo este último ser designado de Concreto de Alto Desempenho (CAD), ou seja, apresenta desempenho melhor do que os concretos usuais pertencentes ao grupo I, cujo limite são os concretos com resistência de 50MPa. Castro (2002, p. 2) alega que esse material “[...] não só apresenta resistência

mais elevada que os concretos usuais, mas também, dentre outras características, uma boa durabilidade e uma boa trabalhabilidade. ”.

Em situações nas quais ocorrem variações de temperatura, como é o caso dos incêndios, o aço aquece mais rápido do que o concreto devido a sua maior condutividade térmica, portanto, eles sofrem maior dilatação. As tensões de aderências são solicitadas e tentam impedir que o cobrimento arrebente (LEONHARDT e MOMMING, 1977). Nestas situações, a estrutura de concreto armado sofre redução de sua capacidade, entretanto, por critérios de segurança, é necessário que ela tenha uma resistência mínima para que o local possa ser evacuado e as chamas extintas (SCOTTON, 2013). Segundo Silva (2009) e Lima (2005), em contato com altas temperaturas, o concreto sofre alterações químicas e físicas, em que ocorre a desidratação da pasta de cimento e variações volumétricas nos agregados, ocasionando fissuração. Neste âmbito, torna-se bastante pertinente estudar a aderência aço e concreto após exposição a altas temperaturas. No que tange o comportamento da aderência em altas temperaturas, Castro (2002) postula que dois modos de ruptura podem ser tradicionalmente considerados, sendo eles a ruptura por arrancamento e a ruptura por fendilhamento.

Desta forma, o presente trabalho tem como principal objetivo avaliar os efeitos sofridos pela aderência entre o concreto de duas classes de resistência e a armadura em aço nervurado após a exposição a diferentes níveis de temperatura. Como objetivos específicos, se propõe a análise comparativa entre diferentes temperaturas para a resistência à compressão e resistência de aderência por meio do método *Pull out Test* analisando diferentes grupos e idades de concreto, com o mesmo diâmetro de armadura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil, Laboratório Experimental de Estruturas e Laboratório de Ensaio Mecânicos, situados no IPARQUE (Parque Científico e Tecnológico da Universidade do Extremo Sul Catarinense), em Criciúma (SC).

A matriz experimental contempla corpos de prova de concreto simples e concreto armado. Os concretos utilizados possuem resistência média à compressão aos 28 dias de 30 MPa e 65 MPa, ou seja, grupo I e grupo II, respectivamente. Os traços

foram definidos tendo como base as pesquisas de Scotton (2013) e Caetano (2008) e estão apresentados na Tabela 01. Para a produção do concreto, foi empregado cimento do tipo CP IV, marca Votorantim Cimentos. O agregado miúdo apresentou módulo de finura igual a 2,37, dimensão máxima característica 2,4 mm e massa específica aparente 2,36g/cm³. O agregado graúdo apresentou módulo de finura igual a 6,65, dimensão máxima característica 19 mm e massa específica aparente 3,00 g/cm³. Utilizou-se água originária da rede pública de abastecimento de Criciúma (SC) e o aditivo superplastificante Tec-flow 7000 da marca Grace, com densidade de 1,075 - 1,115 g/cm³. As armaduras utilizadas foram em aço nervurado de classe CA-50, marca Gerdal, com diâmetro de 12,5 mm e resistência característica de escoamento de 500 MPa.

Tabela 01 – Traços dos concretos

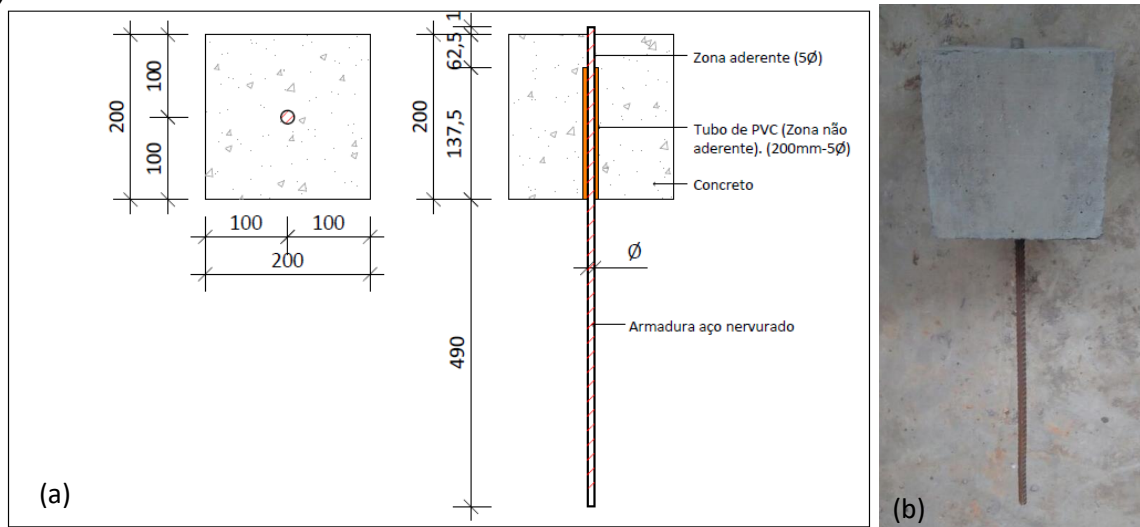
Concretos	Traço		Relação a/c	Aditivo	Grupo
	Cimento:	Areia: Brita			
C30	1: 2,5: 3,5 (110,84: 277,10: 387,94) kg		0,51 60,4 kg	0%	Grupo I
C65	1:1,34:2,16 (176,35: 236,30: 380,91) kg		0,32 56,36 kg	0,5%Cimento 0,8817 kg	Grupo II

Fonte: A autora, 2017.

O concreto foi preparado com o auxílio de uma betoneira com capacidade de 400 litros, portando, cada concretagem necessitou ser dividida em três partes devido ao grande volume necessário. Cada grupo foi moldado em um dia. Realizou-se o ensaio de abatimento de tronco de cone segundo a NBR NM 67 (ABNT, 1998) que garantiu um abatimento de 11 cm e 22,8 cm para os concretos do grupo I e do grupo II, respectivamente. A moldagem dos corpos para os ensaios de compressão axial e determinação do módulo estático de elasticidade seguiu as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2015), com moldes metálicos cilíndricos de diâmetro 10 cm. Para o ensaio *Pull out test*, foram confeccionados moldes de madeira cúbicos com aresta de 20 cm, conforme a recomendação da RILEM CEB/FIP RC6:1983 (Figura 01). As barras de aço foram limpas e preparadas de modo que as marcas de laminação não ficassem na parte aderente e a proteção do trecho não aderente foi feita com tubos de PVC. Seus trechos livres tiveram dimensões modificadas de acordo com o equipamento disponível para o ensaio. Aplicou-se desmoldante em todas as formas. O concreto foi lançando nas formas com o auxílio de uma concha. O processo de adensamento nos corpos de prova cilíndricos foi manual em 2 camadas com 12 golpes cada e para os

corpos de prova cúbicos, adensamento mecânico com vibrador do tipo agulha. Ao término da concretagem, os corpos de prova foram cobertos com lona plástica para evitar a evaporação da água presente na mistura e, após 24 horas, foram desmoldados e realocados. Devido ao grande volume, o laboratório não comportou a realização de cura úmida submersa em tanques, portanto, foi realizado o enxágue diário durante 15 dias, em que ficaram cobertos por lona plástica.

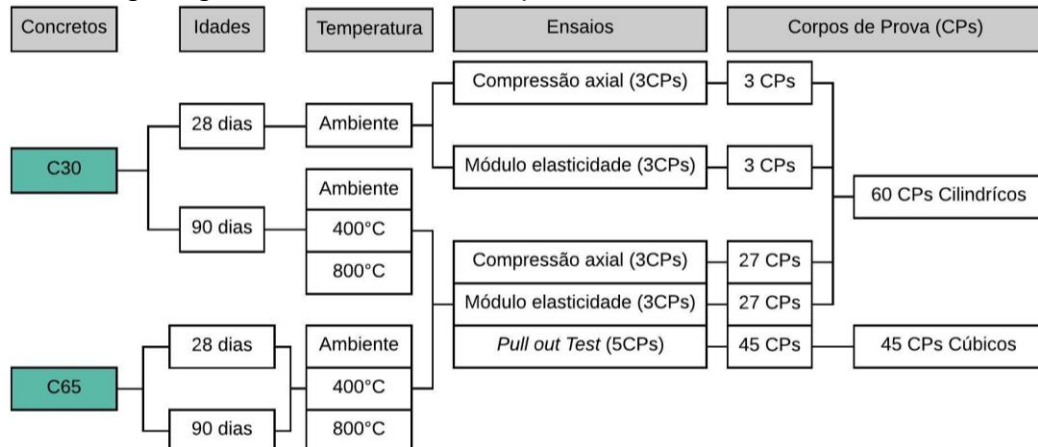
Figura 01 - Corpo de prova ensaio *Pull out test* – (a) Esquema - Dimensões em mm. (b) Foto.



Fonte: A autora, 2017.

A Figura 02 apresenta o organograma do programa experimental do estudo. Foram moldados 3 corpos de prova para cada variável dos ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade e 5 para cada variável do ensaio *Pull out test*, sendo 60 cilíndricos e 45 cúbicos. Uma parcela de cada classe foi exposta a um nível de temperatura, sendo estas: 23°C (ambiente) que é a referência para o trabalho, 400 °C e 800 °C. Não foi possível realizar os ensaios do grupo I aos 28 dias devido à manutenção nos laboratórios. A idade de 28 dias foi adotada devido às solicitações normativas e por assinalar-se como a resistência de projeto e a de 90 dias, devido ao tempo de estabilização das reações internas do concreto.

Figura 02 – Organograma com a matriz experimental



Fonte: A autora, 2017.

Os corpos de prova para o ensaio *Pull out test* possuem uma parte da armadura exposta que necessitou de proteção especial a fim de evitar a exposição direta às elevadas temperaturas, pois, nas estruturas reais, a armadura sempre se encontra envolta pelo concreto. Na exposição do grupo II, aos 28 dias, utilizou-se lã de vidro para a proteção, todavia, porém o material não teve um comportamento aceitável em alta temperatura, onde a partir da temperatura de 400 °C fundiu tornando-se vidro, em todas as outras exposições utilizou-se lã de rocha que apresentou bom comportamento de isolamento.

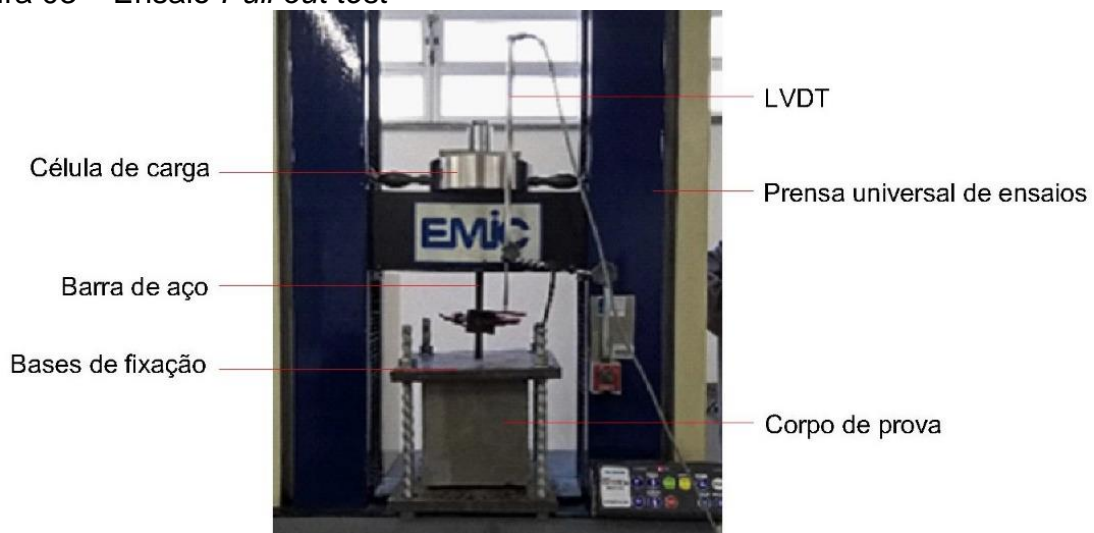
O tratamento térmico foi realizado em um forno Mufla, com controlador de temperatura da marca Novus modelo N1200. Para taxa de aquecimento adotou-se 3°C/min segundo a RILEM TC129MHT (2000) e mantido no patamar desejado por 30 minutos. Para controle tecnológico da resistência à compressão, seguiram-se as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2007). O ensaio foi realizado em uma prensa hidráulica modelo PC200I da marca EMIC, com capacidade de 200 kN acoplada a um computador com *software* TESC – Test Script, em que as amostras foram posicionadas e capeadas com Neoprene.

Segundo as determinações da NBR 8522 (ABNT, 2008), o ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão foi realizado em uma prensa servo-hidráulica da marca EMIC modelo PC200CS, com capacidade de 200 kN, acoplada a um computador, com o mesmo *software* TESC – Test Script e com extensômetros instalados para medir a deformação obtida. Adotou-se a metodologia A – Tensão σ_a fixa.

O ensaio de arrancamento direto *Pull out test* seguiu as recomendações da RILEM

CEB/FIP RC6:1983 e foi executado em uma prensa universal de ensaios da marca EMIC com capacidade para 30 toneladas. A barra de aço foi tracionada na extremidade mais longa por uma força de tração, permanecendo a outra sem tensão. Os corpos de prova foram colocados no pórtico com o maior comprimento da barra voltado para cima e preso por uma cunha (Figura 03). O deslocamento relativo entre o aço e o concreto foi medido por um dispositivo LVDT - *Linear Variable Differential Transformer* e a carga por uma célula de carga com capacidade de 250 kN acoplada a um computador com o programa *Catman Easy*. A carga de tração, cujo carregamento se deu na mesma direção da armadura só que em sentido contrário, foi aumentada até o momento em que ocorreu ruptura da ligação. A velocidade de carregamento foi de 10 mm/min, portanto não a prescrita pela RILEM CEB/FIP RC6:1983 que seria de 78,125 N/s, neste caso. No presente estudo devido a adaptação do equipamento de ensaio, não foi possível obter o controle da velocidade pela carga aplicada apenas pelo deslocamento. Com a realização deste ensaio, obtiveram-se as intensidades das forças em kN em função do deslizamento da barra de aço.

Figura 03 – Ensaio *Pull out test*



Fonte: A autora, 2017.

A tensão de aderência (σ_b) é dada de acordo com a Equação 01, em que a força de tração é dividida pela área de ancoragem. Existem diferentes modos do cálculo da aderência, Leonhardt e Momming (1977) utilizam esta mesma fórmula, porém, com a força de tração no deslocamento de 0,01 mm. Este trabalho teve como base as pesquisas de Scotton (2013) e Silva (2014) que utilizaram a média das tensões

máximas na ruptura. Segundo Silva (2014, p. 92) “[...] vale ressaltar que esse valor se trata de uma consideração de que a tensão de aderência é uniformemente distribuída, fato que não acontece na realidade. ”.

$$\tau_b = \frac{P}{\pi \varnothing l_0}$$

Equação 01

Em que: τ_b - tensão de aderência máxima; P - força de tração na ruptura; \varnothing - diâmetro da barra de aço; l_0 - comprimento do trecho aderente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram analisados, estatisticamente, por meio da técnica ANOVA (Análise de Variância) para verificar se havia ou não diferença significativa entre as variáveis estudadas. Quando esta diferença foi relevante, utilizou-se o Teste de Tukey, através do *software* Past, para avaliar quais grupos eram diferentes entre si. Ambos os testes foram realizados considerando a confiabilidade de 95%.

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

A Tabela 02 apresenta os resultados de resistência à compressão do concreto para os grupos I e II, após exposição às temperaturas:

Tabela 02 – Caracterização da resistência à compressão do grupo I e II

Grupo	T (°C)	Idade (dias)	Resistência (MPa)			Resistência média (MPa)	Desvio Padrão	CV (%)
			CP1	CP2	CP3			
I	23°C	28	32,1	36,0	33,6	33,90	1,988	5,87
I	23°C	90	45,1	40,2	36,3	40,54	4,410	10,88
I	400°C	90	40,6	29,0	35,2	34,96	5,803	16,60
I	800°C	90	11,2	15,4	12,3	12,97	2,166	16,70
II	23°C	28	58,4	60,0	66,9	61,77	4,475	7,24
II	400°C	28	74,0	69,9	64,5	69,47	4,764	6,86
II	800°C	28	30,5	22,9	32,8	28,73	5,181	18,03
II	23°C	90	72,0	75,5	73,9	73,80	1,770	2,40
II	400°C	90	78,2	70,5	71,2	73,28	4,291	5,86
II	800°C	90	30,5	25,9	38,5	31,67	6,369	20,11

Fonte: A autora, 2017.

Analisando-se os resultados de resistência à compressão, aos 28 e aos 90 dias, expostos em temperatura ambiente, para o grupo I, comparando aos 28 e aos 90 dias, aos 23°C, não apresenta alterações significativas, em que, por meio do método ANOVA, com confiabilidade de 95%, o *p-value* é de 0,076029 e o grupo II apresenta

p-value de 0,012627, indicando alterações significativas. Analisando-se a influência da variação da temperatura, obteve-se o valor de *p-value*, para o grupo I, de 0,0005781 para os 90 dias. Para o grupo II, igual à 0,000107 aos 28 dias e aos 90 dias, o *p-value* é de 0,0000393, indicando que os corpos de prova sofreram variação estatisticamente significativa na resistência à compressão.

Pelo método de Tukey, aos 90 dias, do grupo I (Tabela 03), 28 dias (Tabela 04) e 90 dias (Tabela 05) do grupo II, observa-se que nem todas as temperaturas de exposição tiveram influência na resistência à compressão. Quando comparadas, a resistência à compressão aos 23°C com a resistência aos 400°C, os resultados são estatisticamente semelhantes e, quando comparadas as expostas à temperatura de 800°C com 23°C e 400°C, observam-se diferenças significativas.

Tabela 03 – Método de Tukey para resistência à compressão, grupo I aos 90 dias.

Temperatura (°C)	Resistência Média (MPa)	<i>p-value</i>		
		23°C	400°C	800°C
23°C	40,54	-	0,3308	0,000797
400°C	34,96	2,208	-	0,002271
800°C	12,97	10,87	8,662	-

Fonte: A autora, 2017.

Tabela 04 – Método de Tukey para resistência à compressão, grupo II aos 28 dias.

Temperatura (°C)	Resistência Média (MPa)	<i>p-value</i>		
		23°C	400°C	800°C
23°C	61,77	-	0,2048	0,0005682
400°C	69,47	2,762	-	0,0003195
800°C	28,73	11,85	14,61	-

Fonte: A autora, 2017.

Tabela 05 – Método de Tukey para resistência à compressão, grupo II aos 90 dias.

Temperatura (°C)	Resistência Média (MPa)	<i>p-value</i>		
		23°C	400°C	800°C
23°C	73,80	-	0,9901	0,0002633
400°C	73,28	0,1907	-	0,000267
800°C	31,67	16,08	15,89	-

Fonte: A autora, 2017.

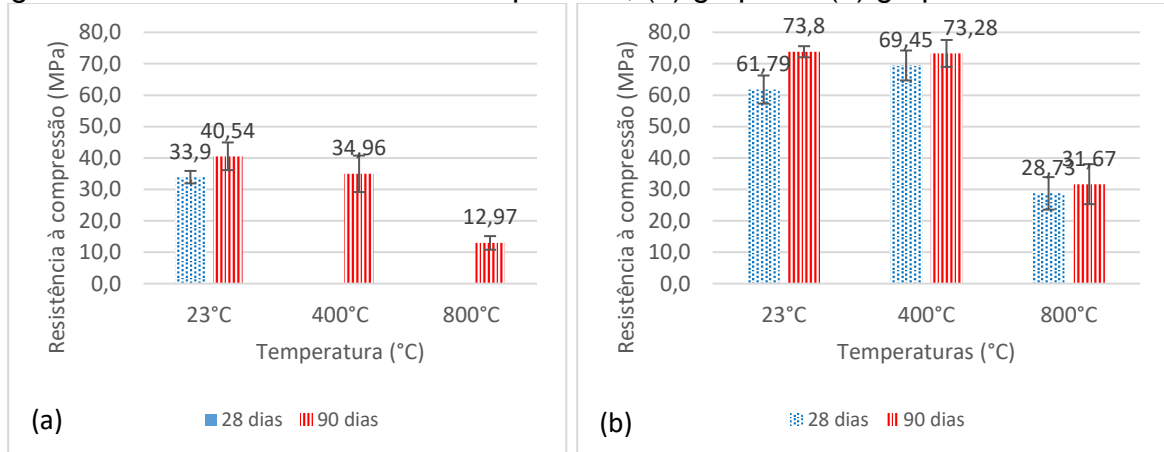
Para os 90 dias, em ambos os grupos, as resistências à compressão diminuíram quando os corpos de prova foram submetidos às temperaturas de 400 e 800 °C, sendo as reduções de 13,76 e 68 % para o grupo I e 0,70 e 57,09 % para o grupo II. Estes resultados foram satisfatórios e podem ser comprovados pela semelhança com a 3ª concretagem do trabalho de Scotton (2013). Aos 28 dias do grupo II houve um incremento da resistência de 12,47 % a 400 °C e uma redução de 53,49 % a 800°C. Estes resultados foram satisfatórios e podem ser comprovados pela semelhança com

a 1ª concretagem do trabalho de Scotton (2013).

O comportamento de todos os resultados pode ter tido influência do procedimento de resfriamento dos corpos de prova ou da posição no forno para o aquecimento.

A Figura 04 ilustra, de modo comparativo, a média e o desvio padrão da resistência à compressão do concreto entre as diferentes temperaturas e idades:

Figura 04 – Resistência média à compressão, (a) grupo I e (b) grupo II.

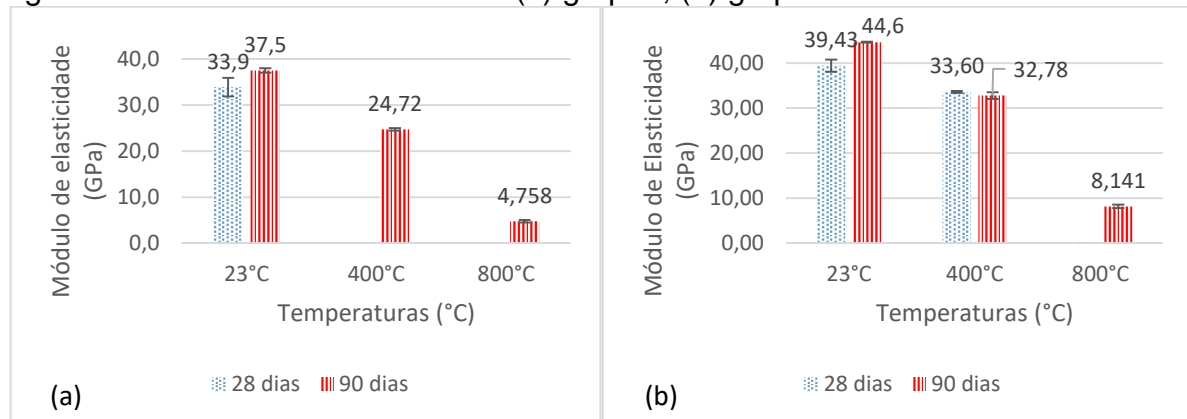


Fonte: A autora, 2017.

3.1 MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE À COMPRESSÃO

A Figura 05 ilustra, de modo comparativo, a média e o desvio padrão do módulo de elasticidade do concreto do grupo I e do grupo II, entre as diferentes temperaturas e idades. Não foi possível realizar este ensaio aos 28 dias para o concreto do grupo II, expostos à 800°C, pois os corpos de prova, para este ensaio, sofreram fissuras e lascas, ou seja, *spalling*. Para os dois grupos, percebe-se que o módulo se incrementa com o aumento da idade, em que as reações estão estabilizadas e sofrem mais com os efeitos das exposições às temperaturas quando comparados com a resistência à compressão. Os módulos de elasticidade diminuíram quando os corpos de prova foram submetidos às temperaturas de 400°C e 800°C, sendo as reduções, respectivamente, de 34,08 % e 87,31 % para os 90 dias do grupo I e 26,50 % e 81,75% para os 90 dias do grupo II. Aos 28 dias do grupo II, após a exposição aos 400 °C, houve uma redução de 14,79 %.

Figura 05 – Módulo de elasticidade: (a) grupo I; (b) grupo II.



Fonte: A autora, 2017.

3.3 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO

A tabela 06 apresenta os resultados, aos 90 dias, do ensaio de *Pull Out Test* da resistência de aderência do concreto do Grupo I, após exposição às temperaturas. Pode-se avaliar que o experimento teve média dispersão de dados.

Tabela 06 – Resultados da resistência de aderência, corpos de prova do grupo I.

T	Idade (dias)	Resistência de aderência (MPa)					τ_b (MPa)	Desvio Padrão	CV (%)
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5			
23°C	90	24,52	30,66	25,65	20,52	18,28	23,926	4,29	17,94
400°C	90	24,04	30,77	21,82	28,38	30,48	27,098	3,57	13,18
800°C	90	12,01	11,66	14,00	11,57	9,13	11,670	1,55	13,27

Fonte: A autora, 2017.

Analisando-se a influência da variação da temperatura na resistência de aderência, aos 90 dias, obteve-se, por meio do ANOVA, o valor de *p-value* igual à 0,0000679, indicando que os corpos de prova sofreram variações estatisticamente significativas. Pelo método de Tukey (Tabela 07), observa-se que nem todas as temperaturas de exposição influenciaram na aderência. Comparando a resistência à compressão aos 23°C com a resistência aos 400°C, os resultados são estatisticamente semelhantes e, com a temperatura de 800°C, possuem diferença significativa. Aos 400°C, houve um incremento da resistência de 13,26 % e aos 800°C uma redução de 51,22 %.

Tabela 07 – Análise pelo método de Tukey, *Pull Out Test* do grupo I aos 90 dias.

Temperatura (°C)	Resistência Média (MPa)	<i>p-value</i>		
		23°C	400°C	800°C
23°C	23,926	-	0,4005	0,0007719
400°C	27,098	1,898	-	0,0002555
800°C	11,670	7,325	9,222	-

Fonte: A autora, 2017.

Na Tabela 08, apresentam-se os resultados nos ensaios de *Pull Out Test* para a tensão de aderência nos corpos de prova do Grupo II.

Tabela 08 – Resultados da resistência de aderência dos corpos de prova do grupo II.

T	Idade (dias)	Resistência de aderência (MPa)					τ_b (MPa)	Desvio Padrão	CV (%)
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5			
23°C	28	30,65	26,97	29,09	33,24	30,10	30,01	2,288	7,62
400°C	28	32,83	31,14	31,00	31,17	31,62	31,55	0,751	2,38
800°C	28	25,37	18,30	19,66	18,86	18,30	20,10	2,999	14,92
23°C	90	31,29	30,32	29,53	30,81	23,62	29,11	3,139	10,78
400°C	90	30,56	33,84	32,65	15,41	27,27	27,95	7,438	26,62
800°C	90	14,42	19,62	16,47	20,04	16,72	17,45	2,350	13,46

Fonte: A autora, 2017.

Entre os 28 e 90 dias, aos 23°C, este grupo não possuiu alterações significativas, obtendo-se o *p-value* de 0,619973. Analisando-se a influência da variação da temperatura na resistência à compressão aos 28 dias, obteve-se *p-value* igual à 0,00000549 e, aos 90 dias, *p-value* igual à 0,004535, indicando que os corpos de prova sofreram variação estatisticamente significativa. Pelo método de Tukey, para os 28 dias (Tabela 09) e 90 dias (Tabela 10), observa-se que nem todas as temperaturas de exposição tiveram influência na resistência à compressão. Comparando-se a resistência de aderência aos 23°C com a de 400°C, elas são estatisticamente semelhantes e, comparando-se os resultados na temperatura de 800°C com os de 23°C e com os de 400°C, observa-se diferença significativa.

Tabela 09 – Análise pelo método de Tukey, *Pull Out Test* do grupo II aos 28 dias.

Temperatura (°C)	Resistência Média (MPa)	<i>p-value</i>		
		23°C	400°C	800°C
23°C	30,01	-	0,5334	0,0002217
400°C	31,55	1,553	-	0,0001937
800°C	20,10	9,98	11,53	-

Fonte: A autora, 2017.

Tabela 10 – Análise pelo método de Tukey, *Pull Out Test* do grupo II aos 90 dias.

Temperatura (°C)	Resistência Média (MPa)	<i>p-value</i>		
		23°C	400°C	800°C
23°C	29,11	-	0,9239	0,006774
400°C	27,95	0,538	-	0,01324
800°C	17,45	5,371	4,833	-

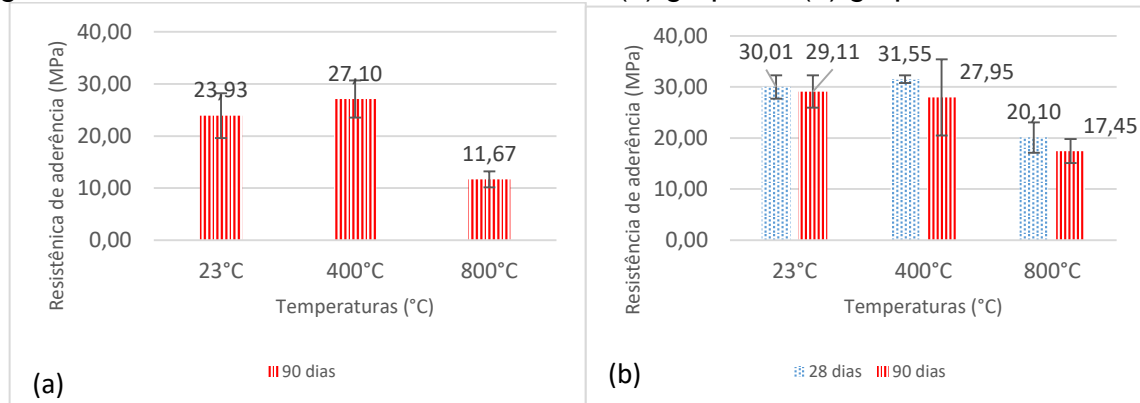
Fonte: A autora, 2017.

Aos 28 dias, houve um incremento da resistência de 5,13 %, quando expostos a 400°C e uma redução de 33,02 % a 800°C, já para os 90 dias, todas as resistências de aderência diminuíram quando os corpos de prova foram submetidos às temperaturas

de 400 e 800°C, sendo as reduções, respectivamente, de 3,98 % e 40,05 %.

Na Figura 06, ilustra-se a média e o desvio padrão da resistência de aderência dos corpos de prova dos dois grupos entre as diferentes temperaturas.

Figura 06 – Resistência média de aderência, (a) grupo I e (b) grupo II.



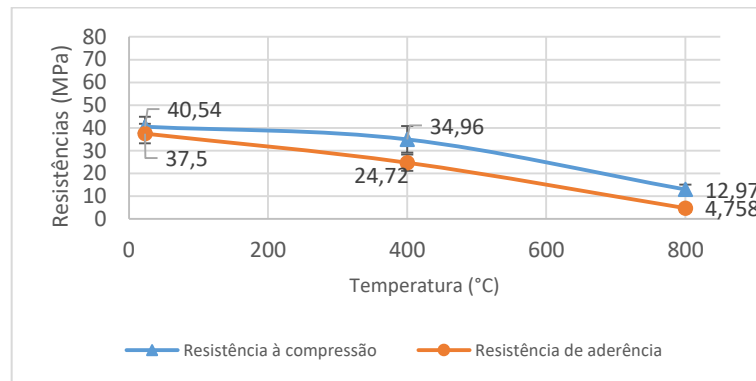
Fonte: A autora, 2017.

O fato de que as alterações significativas começam a ocorrer após a temperatura de 400 °C pode ser devido ao processo de desidratação do gel C-S-H que se inicia em 100 °C e termina próximo aos 400°C. Lima (2005, p. 70) declara que durante este processo ocorre “liberação de água e, em alguns casos, formação de silicatos anidros e óxido de cálcio. Durante o resfriamento pode ocorrer a re-hidratação parcial destes componentes. ”. O autor também cita que para amostras aquecidas acima de 600 °C e depois resfriadas, o CaO formado se re-hidrata, provocando expansões que podem contribuir para com o aparecimento de fissuras no concreto tornando-o frágil.

3.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DE ADERÊNCIA

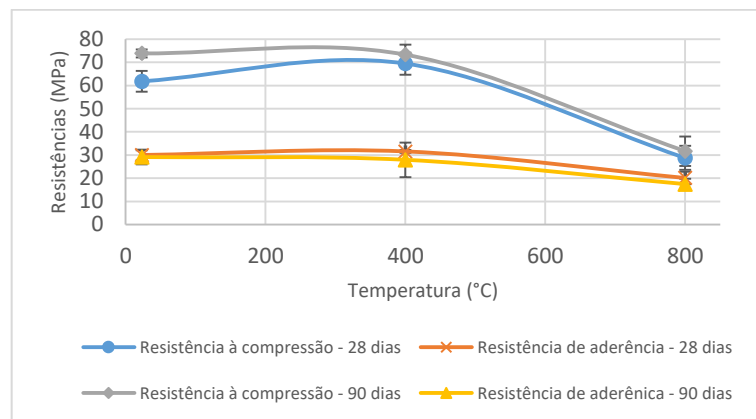
Analisando-se, comparativamente, as curvas dos ensaios de resistência à compressão e de resistência de aderência para o grupo I, na Figura 07, observa-se um comportamento similar. Para o grupo II, na Figura 08, também se percebe a similaridade do comportamento entre as diferentes idades, porém com diferença estatística significativa para resistência a compressão entre as duas idades.

Figura 07 – Análise comparativa entre resistência à compressão e de aderência, grupo I.



Fonte: A autora, 2017.

Figura 08 – Análise comparativa entre resistência à compressão e de aderência, grupo II.

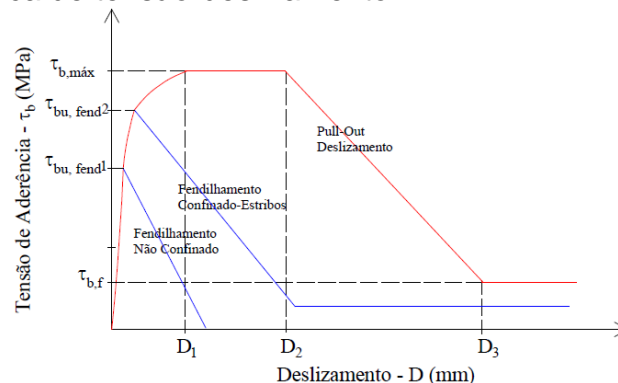


Fonte: A autora, 2017.

3.5 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA X DESLIZAMENTO

A Figura 9 apresenta uma curva modelo descrita pela *Draft Model Code da FIB* (FIB, 2010), na qual mostra o comportamento da aderência aço-concreto.

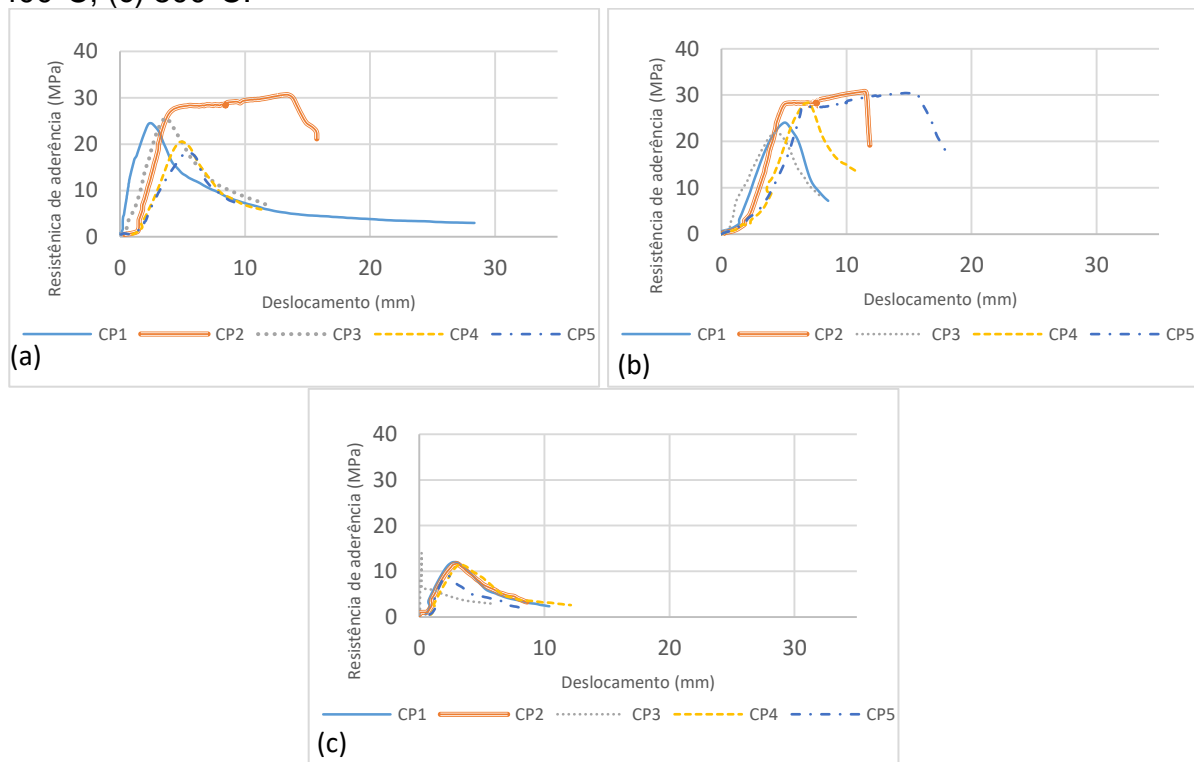
Figura 9 – Curva típica de tensão-deslizamento



Fonte: FIB, 2010.

Na Figura 10, observa-se o comportamento da curva tensão de aderência x deslocamento do concreto do grupo I aos 90 dias, após exposição às temperaturas. Como no trabalho de Silva (2014), notam-se diferenças entre o comportamento para os tipos de ruptura aço-concreto e por fendilhamento do concreto (Figura 11). Aos 23°C, o CP2 alcançou o limite de escoamento do aço no qual ocorreu o deslizamento e o restante sofreu fendilhamento não confinado. Aos 400°C, o CP2 e o CP5 atingiram o limite de escoamento do aço e houve o deslizamento e o restante sofreu fendilhamento não confinado e, aos 800°C, todos os corpos de prova sofreram fendilhamento.

Figura 10 – Tensão de aderência x deslocamento, grupo I aos 90 dias. (a) 23°C, (b) 400°C, (c) 800°C.



Fonte: A autora, 2017.

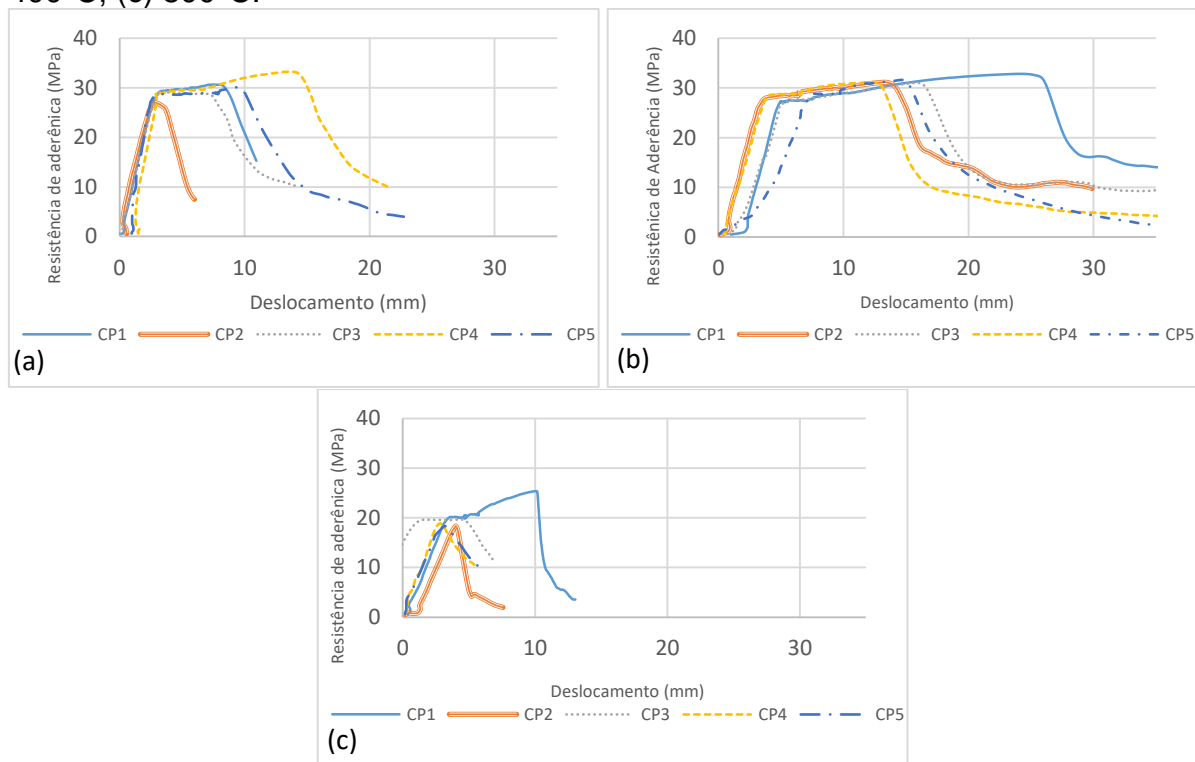
Figura 11 – Ruptura por fendilhamento



Fonte: A autora, 2017.

Na Figura 12, observa-se o comportamento da curva tensão de aderência x deslizamento do concreto do grupo II aos 28 dias, após exposição às temperaturas. Os corpos de prova alcançaram o limite de escoamento do aço em que ocorreu o deslizamento, exceto para o CP2 que sofreu fendilhamento não confinado. Aos 400°C, houve o deslizamento e escoamento do aço em todos os corpos de prova e, aos 800°C, o CP3 e o CP5 sofreram deslizamento e o restante sofreu fendilhamento.

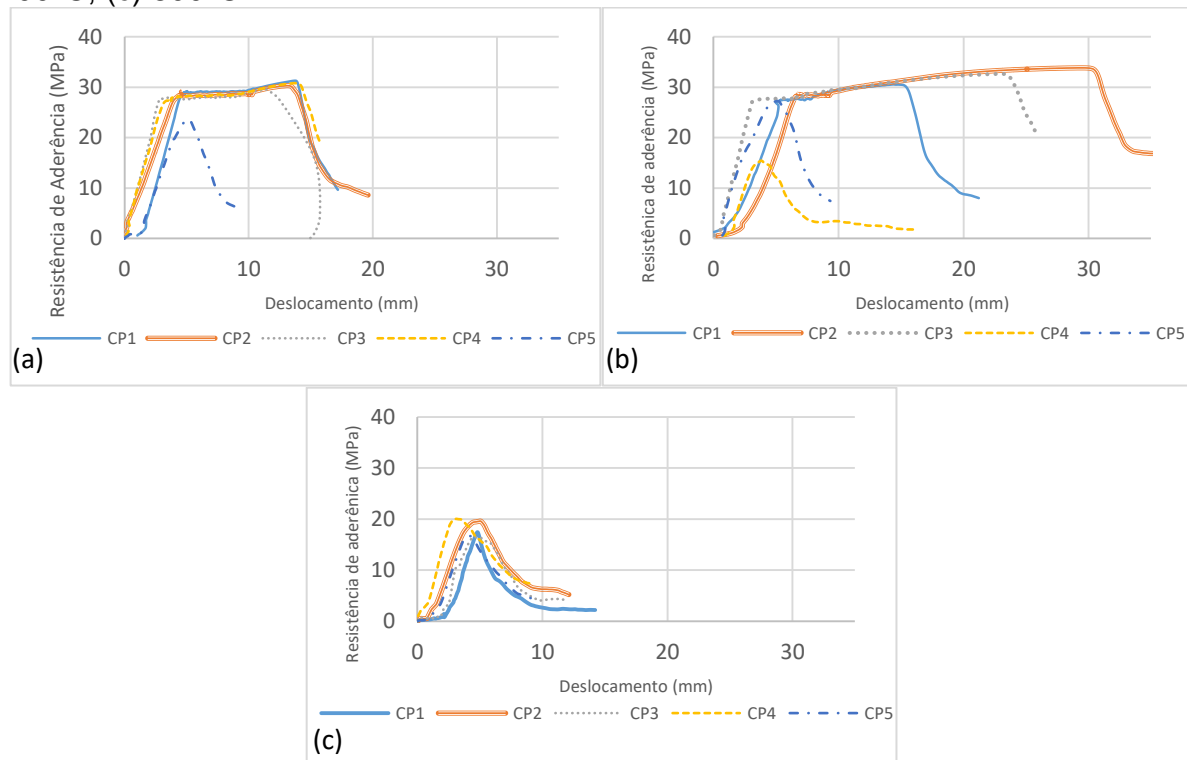
Figura 12 – Tensão de aderência x deslizamento, grupo II aos 28 dias. (a) 23°C, (b) 400°C, (c) 800°C.



Fonte: A autora, 2017.

Na Figura 13, observa-se o comportamento da curva tensão de aderência x deslizamento do concreto do grupo II aos 90 dias, após exposição às temperaturas. Aos 23°C, apenas o CP5 sofreu fendilhamento, no restante, houve deslizamento e escoamento do aço. Aos 400°C, o CP4 e o CP5 sofreram fendilhamento e houve o deslizamento no restante e, aos 800°C, todos os corpos de prova sofreram fendilhamento.

Figura 13 – Tensão de aderência x deslizamento, grupo II aos 90 dias. (a) 23°C, (b) 400°C, (c) 800°C.



Fonte: A autora, 2017.

3.6 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA CARACTERÍSTICA DE PROJETO X EFETIVA

A norma brasileira ABNT NBR 6118:2014 estabelece uma equação para determinar a tensão de aderência em projeto. Como na pesquisa não foi realizado o ensaio de tração indireta por flexão, ela admite a correlação entre a resistência à tração média e a resistência característica à compressão (f_{ck}).

Assim sendo, para o grupo I com f_{ck} de 30MPa, a resistência de aderência de cálculo é 3,26MPa e, para o grupo II com f_{ck} de 65MPa, é 5,00MPa. Em todos os grupos, mesmo após a exposição à alta temperatura, a aderência continua a atender o valor necessário previsto nos dimensionamentos dos projetos, salientando que a norma brasileira está a favor da segurança.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando-se os resultados obtidos na pesquisa, observou-se que o desempenho, tanto da resistência à compressão como da resistência à aderência, para os concretos dos dois grupos, sofre variação quando submetidos a níveis diferentes da temperatura ambiente.

A curva do comportamento da aderência foi semelhante à de compressão em relação a temperatura ambiente, em que, aos 400 °C, estatisticamente, não houve variação significativa e, aos 800 °C, com perda expressiva de resistência em todos os casos. Como cita Caetano (2008), a exposição a altas temperaturas afeta consideravelmente a aderência após os 400 °C.

A idade não teve influência significativa nas resistências de aderência dos concretos em nenhum dos grupos.

Na resistência à compressão, do grupo I, aos 90 dias, quando exposto a 400 °C e a 800 °C, houve redução, sendo, respectivamente, de 13,76 % e 68 %. Para a resistência de aderência, com comportamento semelhante, aos 400°C houve um pequeno acréscimo de 13,26 % e, aos 800 °C, houve uma redução significativa de 51,22 %.

No grupo II, aos 28 dias, a resistência à compressão, quando exposto a 400 °C, sofreu um pequeno acréscimo de 12,47 % e, a 800 °C, sofreu uma redução significativa de 53,49 %. Para a resistência de aderência, com comportamento semelhante, aos 400 °C, houve um pequeno acréscimo de 5,13 % e, a 800 °C, houve uma redução significativa de 33,02 %.

Aos 90 dias, a resistência à compressão, quando exposto a 400 °C, sofreu redução de 0,70 % e, a 800 °C, sofreu uma redução significativa de 57,09 %.

Para a resistência de aderência, com comportamento semelhante, aos 400 °C, houve redução de 3,98 % e, a 800 °C, houve uma redução significativa de 40,05 %.

O modo como ocorreu a exposição e o resfriamento dos corpos de prova pode ter influenciado na resistência final de compressão e de aderência.

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Detalhar o comportamento da aderência para outras temperaturas de exposição, para determinar, com mais exatidão, as temperaturas em que ocorre a mudança de comportamento;
- Avaliar o método com formato cilíndrico de corpo de prova, proposto no trabalho de Silva (2014);
- Avaliar a influência da cura em câmara úmida ou submersa, na resistência de aderência;
- Analisar o comportamento da aderência aço concreto frente a outras taxas de

aquecimento e se esta é uma variável significativa;

- Analisar a taxa de carregamento de força com equipamentos de precisão;
- Analisar as resistências obtidas com as preconizadas para consideração em projetos pelas normas brasileiras e internacionais.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014. 4 v. (Volume 1).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR NM 67**: Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

CAETANO, Luciane Fonseca. **Estudo do comportamento da aderência em elementos de concreto armado submetidos à corrosão e elevadas temperaturas**. 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CASTRO, C.M. **Concreto de Alto Desempenho: Estudo da Aderência com a Armadura sob Ações Repetidas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2002.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. **RILEM/CEB/FIP RC6**: Bond test for reinforcing steel: 2-Pull-out test. P. [1-5]. Suíça, 1983.

EUROPEAN COMMITTEE STANDARDIZATION. EM 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1 -1: General rules and rules for buildings. 1992. (Atual EM 1992-1-1:2004)

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE BÉTON. FIB: **Model Code 2010**. Draft Model Code. Lausanne: fib, bulletin 55, v.1. March 2010.

LEONHARDT, Fritz; MÖNNIG, Eduard. **Construções de concreto: Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Interciência, vol. 1, 1977.

LIMA, Rogério Catellan Antochaves. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. 257 f. Tese (Doutorado) - Curso de Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

NEGRÃO, D.E. e PIMENTEL, L.L. Aderência compósito x aço: influência do diâmetro da barra de aço. **Anais do XVII Encontro de Iniciação Científica e II Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação**. São Paulo , Set. 2012 .

OLIVEIRA, L. C. B e JACINTHO, A. E. P. G. A. Estudo da influencia do diâmetro da barra na aderência entre o aço e o concreto convencional. **Anais do XVII Encontro de Iniciação Científica e II Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação**. São Paulo , Set. 2012 .

RILEM TC 129 MHT: **Test Methods for Mechanical properties of concrete al high temperatures**, Part 9: Shrinkage. 2000.

SCOTTON, Josiane Andriele. **Comportamento da aderência Armadura-Concreto em situações não usuais: Efeito de altas temperaturas**. 2013. 96 f. TCC (Graduação) - Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

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

SILVA, Daiane dos Santos da. **Propriedades mecânicas residuais após incêndio de concretos usados na construção civil na grande Florianópolis**. 2009. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

TAVARES, A. J. et al. Aderência aço-concreto: simulação numérica dos ensaios de arranchamento pull-out e APULOT usando o programa ATENA. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo , v. 7, n. 1, p. 138-157, Feb. 2014 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952014000100007&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 07 Mai. 2017.