

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Josiane Anderle Scotton

**COMPORTAMENTO DA ADERÊNCIA ARMADURA-
CONCRETO EM SITUAÇÕES NÃO USUAIS:
EFEITO DE ALTAS TEMPERATURAS**

Porto Alegre
julho 2013

JOSIANE ANDERLE SCOTTON

**COMPORTAMENTO DA ADERÊNCIA ARMADURA-
CONCRETO EM SITUAÇÕES NÃO USUAIS:
EFEITO DE ALTAS TEMPERATURAS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título

Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coorientador: Bruno do Vale Silva

Porto Alegre
julho 2013

JOSIANE ANDERLE SCOTTON

**COMPORTAMENTO DA ADERÊNCIA ARMADURA-
CONCRETO EM SITUAÇÕES NÃO USUAIS:
EFEITO DE ALTAS TEMPERATURAS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador Luiz Carlos Pinto da Silva Filho e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 01 de julho de 2013

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
Ph.D. pela University of Leeds
Orientador

Prof. Bruno do Vale Silva (UNESC)
MSc. pela Universidade Estadual Paulista
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Bruno do Vale Silva (UNESC)
MSc. pela Universidade Estadual Paulista

Eng. MSc. Luciane Fonseca Caetano (UFRGS)
MSc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Jean Marie Désir (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Rudimar e Beatriz (*in
memorian*), a minha irmã Cristiane que mesmo distante
estiveram ao meu lado me apoiando e me amando
incondicionalmente, e ao meu namorado Emerson
Marodin por toda dedicação e amor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me dado serenidade, saúde e paciência para chegar até aqui. Mesmo com tantas dificuldades, tive fé e força, que com certeza vieram dele, para lutar e realizar mais esse sonho.

Agradeço aos meus pais Rudimar e Beatriz (*in memorian*) por me darem uma ótima educação, por me incentivarem nos piores momentos e por sempre me instruírem para ser uma boa pessoa. Posso dizer que sem eles nada teria dado tão certo e parte desse sonho também é deles. Essas duas pessoas são minha fonte de inspiração para continuar lutando pelos meus sonhos, amo-os.

À minha mana Cristiane que sempre esteve ao meu lado me apoiando e juntas tivemos forças para continuar enfrentando as dificuldades que a vida propunha. Não poderia deixar de agradecer pela paciência que ela teve comigo quando me irritava por qualquer coisa.

Agradeço, em especial, ao meu namorado Emerson Marodin que sempre me deu forças quando minha vontade era desistir, sempre me ajudando a ser cada dia melhor. É a pessoa que me ajudou dia a dia com o trabalho de conclusão e que sabe de todas as angústias e alegrias, me acalmava com suas palavras e me compreendia em todos os momentos.

Aos meus dindos de batizado Rosângela e Silvino e de crisma Bernardete e Reni por todo carinho e apoio que me deram quando mais precisei. Agradeço, também, aos meus avós José e Anna por suas palavras sábias e por todo carinho, e a toda minha família que de alguma forma me ajudaram.

Ao meu orientador Luiz Carlos e coorientador Bruno por toda a ajuda, paciência e conhecimento que me foi passado. Com certeza, me ajudaram a fazer deste um trabalho melhor. Gostaria de deixar meu obrigada a toda a comunidade da Universidade Federal do Rio Grande do Sul por todo conhecimento ao longo desses anos.

A todos integrantes da família LEME que sempre estiveram dispostos a me ajudar. Gostaria de agradecer a todos meus amigos que de alguma maneira me acompanharam por esses anos.

Não é o que você faz, mas quanto amor dedica no que faz
que realmente importa.

Madre Tereza de Calcutá

RESUMO

O concreto armado por sua grande utilização é, atualmente, um dos materiais mais estudados e aprimorados. Esse compósito tem sua eficiência garantida pela boa aderência entre seus materiais constituintes: concreto e armadura, sendo os esforços de compressão absorvidos pelo concreto e os de tração pelo aço. Para tanto, algumas linhas de pesquisa vêm se destacando, como é o caso dos estudos relativos à exposição a situações extremas e novos materiais. A motivação deste trabalho deu-se, principalmente, pela escassez de dados de resistência de aderência entre o concreto e armaduras de aço, e de *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) quando exposto a altas temperaturas. Assim, o objetivo do trabalho é avaliar o comportamento da resistência de aderência residual, após a exposição a diferentes níveis de temperatura. Para tanto, são utilizados três ensaios de resistência de aderência: o primeiro normatizado pelo ACI 440.3R (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2004, p. 1-40), que é o *Pull Out Test*; e outros dois adaptados da recomendação RC6 (COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1983, p. 1-5), realizados por pesquisadores do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME), que são *Push Out Test* e *Pull Out Test Modificado*. Os corpos de prova com barras de GFRP foram expostos à temperaturas ambiente, 80 e 120° C, sendo a seguir, ensaiados à resistência de aderência pelo *Pull Out Test*. Os corpos de prova armados com aço foram expostos à temperaturas ambiente, 200, 400 e 600° C, sendo ensaiados à resistência de aderência pelo *Push Out Test*. Para o método de ensaio de resistência de aderência *Pull Out Test Modificado*, os corpos de prova foram expostos apenas à temperatura ambiente. Após a análise dos resultados obtidos nos ensaios de ruptura, para a verificação da resistência de aderência, concluiu-se que os corpos de prova com GFRP tiveram um ganho de resistência quando expostos a temperaturas de 80 e 120° C, em comparação com a temperatura ambiente. Já para os corpos de prova com aço, os resultados obtidos mostraram que a resistência de aderência é reduzida quando expostos a temperaturas de 200, 400 e 600° C, em comparação a temperatura ambiente.

Palavras-chave: Concreto Armado. Armadura de Aço. Armadura de *Glass Fiber Reinforced Polymer*. Níveis de Temperaturas. *Pull Out Test*. *Pull Out Test Modificado*. *Push Out Test*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa	22
Figura 2 – Compósito de GFRP	26
Figura 3 – Ensaio de aderência por adesão.....	34
Figura 4 – Ensaio de aderência por atrito.....	35
Figura 5 – Efeito de cunha.....	36
Figura 6 – Aderência mecânica	37
Figura 7 – Fendilhamento longitudinal do concreto.....	38
Figura 8 – Configuração esquemática da zona submetida ao maior esforço cortante	38
Figura 9 – Distribuição das tensões para corpos de prova submetidos ao ensaio de arrancamento simples	43
Figura 10 – Matriz experimental	49
Figura 11 – Formas utilizadas para o ensaio de <i>Pull Out Test</i>	53
Figura 12 – Formas utilizadas para o ensaio de <i>Pull Out Test</i> Modificado	54
Figura 13 – Formas utilizadas para o ensaio de <i>Push Out Test</i>	54
Figura 14– Ensaio de tronco de cone	55
Figura 15 – Corpos de prova curando em câmara úmida	55
Figura 16 – Preparação para exposição à temperatura para corpos de prova ensaiados pelo <i>Pull Out Test</i>	57
Figura 17 – Preparação para exposição à temperatura para corpos de prova ensaiados pelo <i>Push Out Test</i>	58
Figura 18 – Acomodação dos corpos de prova no forno, para o ensaio de 400° C	59
Figura 19 – Esquema da zona de aderência e não aderência no corpo de prova.....	60
Figura 20 – Corpo de prova sendo ensaiado pelo método do <i>Pull Out Test</i>	61
Figura 21 – Esquema da forma do ensaio de <i>Pull Out Test</i> Modificado	61
Figura 22 – Esquema da zona de aderência e não aderência no corpo de prova.....	62
Figura 23 – Ensaio de <i>Push Out Test</i>	63
Figura 24 – Corpo de prova ensaiado a resistência à compressão	63
Figura 25 – Resistência à compressão para corpos de prova de controle e expostos a 200, 400 e 600°C da 1ª concretagem	66
Figura 26 – Resistência à compressão para corpos de prova de controle e expostos a 200, 400 e 600°C da 3ª concretagem	68
Figura 27 – Resistência à compressão para corpos de prova de controle e expostos a 80 e 120°C da 2ª concretagem	70
Figura 28 – Comparação entre os métodos <i>Pull Out</i> Modificado e <i>Push Out</i>	72
Figura 29 – Resultados para o ensaio de aderência <i>Push Out Test</i> da 1ª concretagem	72

Figura 30 – Resultados para o ensaio de aderência <i>Push Out Test</i> da 3ª concretagem	74
Figura 31 – Resultados para o ensaio de aderência <i>Pull Out Test</i>	77
Figura 32 – Resistência de aderência média pelo ensaio de <i>Pull Out Test</i> , para armadura de aço e GFRP	78
Figura 33 – Análise comparativa entre resistência à compressão e de aderência da 1ª concretagem	78
Figura 34 – Análise comparativa entre resistência à compressão e de aderência da 3ª concretagem	79
Figura 35 – Análise comparativa entre resistência à compressão e de aderência da 2ª concretagem	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Especificações técnicas do cimento Portland	50
Quadro 2 – Granulometria e propriedades da areia	50
Quadro 3 – Granulometria e propriedades da brita	51
Quadro 4 – Dosagem do concreto	53
Quadro 5 – Resultados de resistência à compressão para temperatura ambiente, 200, 400 e 600°C da 1ª concretagem	65
Quadro 6 – Análise pelo método de Tukey para resistência à compressão para corpos de prova de controle e expostos a 200, 400 e 600°C, 1ª concretagem	66
Quadro 7 – Resultados de resistência à compressão para temperatura ambiente, 200, 400 e 600° C da 3ª concretagem	67
Quadro 8 – Análise pelo método de Tukey para resistência à compressão para corpos de prova de controle e expostos a 200, 400 e 600°C da 3ª concretagem	68
Quadro 9 – Resultados de resistência à compressão em temperatura ambiente, 80 e 120° C da 2ª concretagem	69
Quadro 10 – Análise pelo método de Tukey para resistência à compressão para corpos de prova de controle e expostos a 80 e 120°C da 2ª concretagem	70
Quadro 11 – Resultados da resistência de aderência para temperatura ambiente, 200, 400 e 600° C da 1ª concretagem	71
Quadro 12 – Análise pelo método de Tukey, <i>Push Out Test</i> da 1ª concretagem	73
Quadro 13 – Resultados da resistência de aderência para temperatura ambiente, 200, 400 e 600° C da 3ª concretagem	74
Quadro 14 – Análise pelo método de Tukey, <i>Push Out Test</i> da 3ª concretagem	75
Quadro 15 – Resultados da resistência de aderência para temperatura ambiente, 80 e 120° C da 2ª concretagem	76
Quadro 16 – Análise pelo método de Tukey, <i>Pull Out Test</i> , 2ª concretagem	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas das fibras	27
Tabela 2 – Especificações técnicas das armaduras de aço	52

LISTA DE SIGLAS

GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*

ACI – *American Concrete Institute*

MPa – Mega Pascal

NBR – Normatização Brasileira

FIB – *Federation Internationale du Béton*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

LEME – Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais

LAPOL – Laboratório de Materiais Poliméricos

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

ANOVA – *Analysis of Variance*

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{bd} – resistência de aderência de cálculo

η_1 – coeficiente para cálculo de tensão de aderência na armadura passiva referente a superfície da armadura

η_2 – coeficiente para cálculo de tensão de aderência na armadura passiva referente a zona em que a armadura está inserida

η_3 – coeficiente para cálculo de tensão de aderência na armadura passiva referente ao diâmetro da armadura

f_{ctd} – resistência à tração de cálculo

τ_b – tensão de aderência;

F_t – força solicitante na armadura;

u – perímetro da armadura;

l – comprimento de ancoragem.

\varnothing – diâmetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	19
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	19
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA	19
2.2.1 Objetivo principal	19
2.2.2 Objetivo secundário	19
2.3 HIPÓTESES	20
2.4 PRESSUPOSTO	20
2.5 PREMISSA	20
2.6 DELIMITAÇÕES	20
2.7 LIMITAÇÕES	21
2.8 DELINEAMENTO DA PESQUISA	21
3 CONCRETO ARMADO	24
3.1 CONCRETO	24
3.2 ARMADURA	24
3.2.1 Armaduras de aço laminado	25
3.2.1.1 Composição das armaduras de aço laminado	25
3.2.1.2 Processo de fabricação das armaduras de aço laminado	25
3.2.2 Armaduras de GFRP	26
3.2.2.1 Composição das armaduras de GFRP	26
3.2.2.2 Processo de fabricação das armaduras de GFRP	28
3.2.3 Comparação das propriedades mecânicas entre a armadura de aço e a de GFRP.....	28
3.2.3.1 Massa específica	29
3.2.3.2 Dilatação térmica	29
3.2.3.3 Resistência à tração	30
3.2.3.4 Módulo de elasticidade	30
3.2.3.5 Fluência	31
4 ADERÊNCIA ARMADURA-CONCRETO	32
4.1 MECANISMOS DE ADERÊNCIA	33
4.1.1 Aderência por adesão	33
4.1.2 Aderência por atrito	34
4.1.3 Aderência mecânica	35

4.2 MODOS DE RUPTURA DA ADERÊNCIA	37
4.2.1 Ruptura por fendilhamento e esmagamento do concreto	37
4.2.2 Ruptura por arrancamento da armadura	38
4.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A ADERÊNCIA	39
4.3.1 Conformação superficial da armadura	39
4.3.2 Diâmetro da armadura	40
4.3.3 Módulo de elasticidade	40
4.3.4 Resistência à compressão do concreto	41
4.3.5 Posição das armaduras	41
4.4 ENSAIOS DE ADERÊNCIA	42
4.5 EFEITO DE ALTAS TEMPERATURAS NA ADERÊNCIA	44
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	48
5.1 MATRIZ EXPERIMENTAL	48
5.2 MATERIAIS	49
5.2.1 Cimento	49
5.2.2 Agregado miúdo	50
5.2.3 Agregado graúdo	50
5.2.4 Água	51
5.2.5 Armaduras de aço	52
5.2.6 Armaduras de GFRP	52
5.3 DOSAGEM DO CONCRETO	52
5.4 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	53
5.5 PROCEDIMENTO DE EXPOSIÇÃO À TEMPERATURA	56
5.5.1 Procedimento de exposição à temperatura para <i>Pull Out Test</i>	56
5.5.2 Procedimento de exposição à temperatura para <i>Push Out Test</i>	57
5.6 ENSAIOS DE ADERÊNCIA	59
5.6.1 <i>Pull Out Test</i>	59
5.6.2 <i>Pull Out Test</i> Modificado	61
5.6.3 <i>Push Out Test</i>	62
5.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	63
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	64
6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO	64
6.2 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA	71
6.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DE ADERÊNCIA	78

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
REFERÊNCIAS	83
APÊNDICE A	86
APÊNDICE B	89
APÊNDICE C	93

1 INTRODUÇÃO

O ano de 1850 tornou-se um marco da Engenharia de Estruturas, pois surge na França o concreto armado, formado pela união de concreto e de aço. Com o passar dos anos esse material obteve grande destaque em obras civis e, atualmente, esse compósito é um dos mais utilizados pelo homem. A constante utilização do concreto armado deve-se tanto a fatores econômicos quanto técnicos. Relacionado ao fator econômico, o compósito possui bom custo benefício quando comparado a outros materiais estruturais e, quanto ao fator técnico, possui bom desempenho em relação à resistência mecânica. Em consequência da grande utilização desse compósito, existe a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre o seu comportamento.

Para o bom funcionamento do concreto armado é necessário que os componentes trabalhem de forma conjunta, absorvendo os esforços solicitantes de compressão e tração. Para tanto, o esforço de compressão é essencialmente absorvido pelo concreto, enquanto que, o de tração, é pelo aço. Para que a absorção de esforços ocorra de forma eficiente, é necessário que a interface de ligação entre o concreto e o aço tenha boa aderência. Esta é composta por três parcelas:

- a) adesão;
- b) atrito;
- c) mecânica.

O mecanismo de aderência por adesão ocorre por ligações físico-químicas entre o concreto e o aço, produzindo uma resistência na interface dos dois materiais, que por sua vez se opõe a tensão aplicada quando forças externas tendem a separá-los. Já, a parcela de aderência por atrito é verificada quando, no ensaio de arrancamento simples (*Pull out Test*), a resistência obtida é significativamente maior que a resistência prevista em cálculo. Outra parcela que deve ser evidenciada é a aderência mecânica, verificada quando se compara diferentes acabamentos superficiais em armaduras de aço, evidenciada pelo aumento de resistência ao arrancamento, proveniente da utilização de armaduras com nervuras ao invés de lisas. Isso acontece, pois a armadura nervurada contém saliências longitudinais que conferem ao material um maior travamento mecânico (FUSCO, 1995, p. 135-136).

O estudo desse compósito ao longo dos anos evidencia algumas áreas de pesquisa as quais se relacionam diretamente com o comportamento mecânico, que são:

- a) situações extremas como incêndio e corrosão;
- b) novos materiais;
- c) cálculo estrutural;
- d) durabilidade e controle de qualidade.

A possível escassez de materiais constituintes do concreto armado, ou até mesmo a substituição de algum componente para sua melhoria mecânica, introduzem ao meio acadêmico uma grande gama de pesquisas sobre novos materiais, as quais têm se destacado. Em substituição a armadura de aço, por exemplo, podem ser utilizadas fibras de vidro impregnadas por resina termoelástica, conhecidas como GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*). Essa armadura está sendo estudada com mais afinco, devido a sua capacidade de resistência a corrosão, diferentemente das de aço que corroem facilmente, quando agentes degradantes entram em contato com a armadura.

As armaduras de GFRP possuem alguns parâmetros que podem levar esse material a ter um bom desempenho ou não quando utilizado para armação. Pode-se citar alguns parâmetros, como por exemplo, conformação superficial, fabricação e porcentagem de fibras que influenciam diretamente nas suas propriedades e, conseqüentemente, na sua aderência com o concreto. Já para as armaduras de aço um dos principais fatores que controlam a resistência de aderência é a resistência à compressão do concreto, porém é importante salientar que a conformação superficial da barra também influenciará a resistência de aderência desse compósito.

As propriedades mecânicas das armaduras de GFRP também são afetadas quando o compósito é exposto a situações extremas de temperatura. Alguns estudos demonstram que as armaduras de GFRP apresentam uma boa resistência à corrosão, mas por outro lado, quando submetidas a incêndio, sua resistência de aderência com o concreto é reduzida. Assim, para assegurar que a estrutura de concreto armado, em situação de incêndio, tenha sua capacidade portante assegurada, a NBR 14432 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001, p. 17) indica que, por exemplo, para um edifício residencial com mais de 30 metros de altura, é necessário um tempo requerido de resistência ao fogo de, no mínimo, 120 minutos, independente do tipo de armadura utilizada.

Após o sinistro, a verificação do desempenho residual da estrutura é de fundamental importância para a segurança da edificação e de seus usuários. A análise de resistência ao fogo é necessária, pois, além de prever um possível desabamento, pondo em risco pessoas e edificações vizinhas, pode-se verificar a implantação de um adequado reforço estrutural, restituindo assim, a capacidade portante da estrutura (CAETANO, 2008, p. 59-60).

Tendo em vista a preocupação com o desenvolvimento científico das armaduras de GFRP, este trabalho tem por objetivo explanar sobre a aderência armadura-concreto, tanto para armaduras de aço quanto para as armaduras de GFRP, em temperatura ambiente e em diferentes níveis de temperatura de exposição.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual o comportamento da resistência de aderência, quando corpos de prova são ensaiados a diferentes níveis de temperatura, ao se empregar barras de GFRP e de aço para verificação da resistência de aderência?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa são divididos em principal e secundário e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a avaliação do comportamento, quanto à resistência de aderência, entre as barras e o concreto para os diferentes níveis de temperatura, quando são utilizadas armaduras aço nervurada e armaduras de GFRP sem tratamento superficial.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários desse trabalho são: análise comparativa entre as diferentes temperaturas para a resistência à compressão em relação à resistência de aderência, e a apresentação dos métodos de ensaio de resistência de aderência:

- a) *Pull Out Test*;
- b) *Pull Out Test* Modificado;
- c) *Push Out Test*.

2.3 HIPÓTESES

As hipóteses do trabalho estão relacionadas com os níveis de temperatura a que os corpos de prova foram expostos, analisando o uso de armaduras de GFRP sem tratamento superficial e aço nervurada:

- a) para armaduras de GFRP na temperatura de 80° há um aumento da resistência de aderência em torno de 75%, quando comparado com a temperatura ambiente, e para a temperatura de 120° C tem-se um aumento de 35%;
- b) para armaduras de aço na temperatura de 200° C há perda de 5% na resistência de aderência, quando comparado com a temperatura ambiente, já para 400° C há perda de 15% e para 600° C há perda de 50%.

2.4 PRESSUPOSTO

Como pressuposto considera-se que o ensaio de resistência de aderência *Pull out Test*, segundo recomendações do ACI 440.3R (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2004, p. 1-40) empregado para armadura de GFRP, também seja aplicável para a verificação da resistência de aderência para armaduras de aço. Além disso, considera-se que os ensaios *Pull Out Test* Modificado e o *Push Out Test*, adaptados e desenvolvidos pelo Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – LEME da UFRGS, são métodos de análise da resistência de aderência com resultados compatíveis ao *Pull Out Test*, pois esse ensaio mostra o comportamento relativo entre concretos na resistência de aderência.

2.5 PREMISA

O compósito tem características dependentes do tipo de armadura empregado e que a exposição a altas temperaturas causa modificações em sua microestrutura, variando o seu desempenho mecânico.

2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo da aderência armadura-concreto, utilizando-se barra de aço nervurada e GFRP sem tratamento superficial, ensaiando corpos de prova em diferentes níveis de temperatura.

2.7 LIMITAÇÕES

São limitações deste trabalho:

- a) o uso de concreto convencional com resistência característica de 30 MPa;
- b) utilizou-se armaduras de aço CA-50 de 8 e 12,5 mm de fabricação nacional;
- c) utilizou-se armaduras de GFRP de 12,5 mm que são fabricadas pelo Laboratório de Materiais Poliméricos (Lapol) da UFRGS;
- d) o aquecimento dos corpos de prova foi realizado em forno pelo sistema elétrico, sendo apenas exposto ao calor;
- e) os corpos de prova moldados com armaduras de aço, de 8 mm, foram ensaiados em temperatura ambiente e em patamares de temperatura de 200, 400 e 600°C;
- f) os ensaios de *Push Out Test* e *Pull Out Test* Modificado foram realizados em corpos de prova com barras de aço de 8 mm de diâmetro;
- g) os corpos de prova moldados com barras aço, de 12,5 mm, foram ensaiados apenas a temperatura ambiente;
- h) os corpos de prova moldados com barras de GFRP, de 12,5 mm, foram ensaiados em temperatura ambiente, 80 e 120°C;
- i) o ensaio de *Pull Out Test* foi realizado em corpos de prova com barras de GFRP e aço de 12,5 mm de diâmetro.

2.8 DELINEAMENTO DA PESQUISA

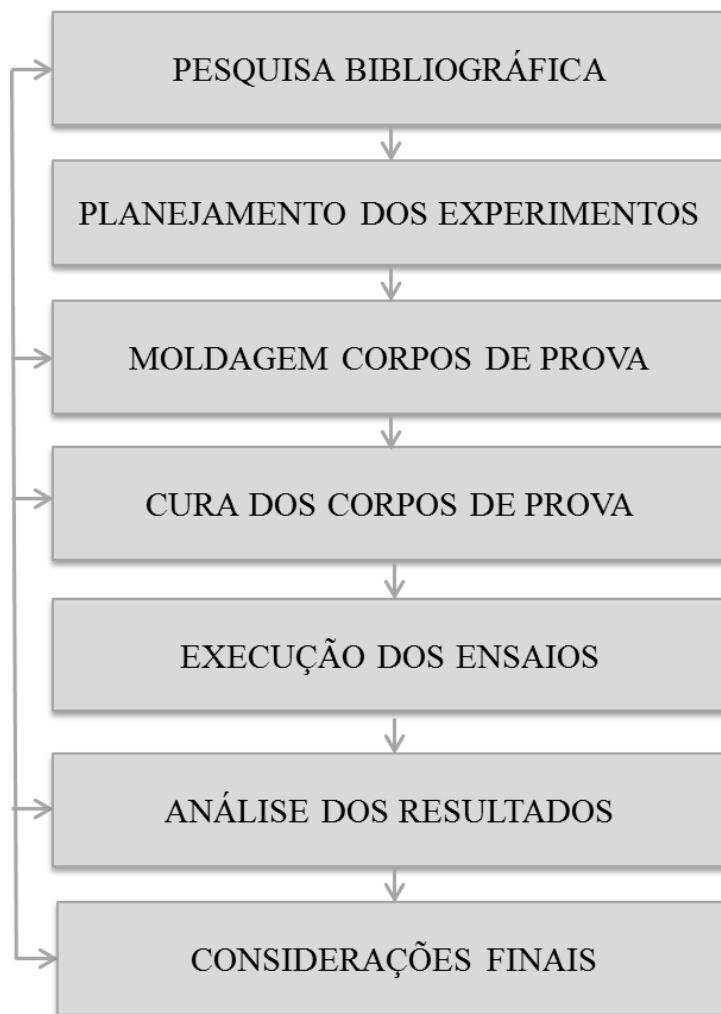
O trabalho desenvolveu-se através das seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) planejamento dos experimentos;
- c) moldagem dos corpos de prova;
- d) cura dos corpos de prova;
- e) execução dos experimentos;
- f) análise dos resultados;
- g) considerações finais.

Apresenta-se a seguir a figura 1 que mostra o relacionamento entre as etapas executivas e posteriormente a descrição detalhada de cada etapa.

Na **pesquisa bibliográfica**, analisaram-se várias publicações e trabalhos científicos, a fim de aprofundar o conhecimento sobre o tema. O embasamento teórico adquirido nessa fase do trabalho também se fez necessário para as próximas etapas, para que assim se definam os parâmetros da pesquisa e interpretação adequada dos resultados e considerações finais.

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pela autora)

O **planejamento dos experimentos** abordou os materiais utilizados na pesquisa, as variáveis a serem analisadas e os ensaios aos quais foram submetidos os corpos de prova. Nessa fase foram analisados os níveis de temperatura aos quais, cada tipo de armadura poderia ser exposto, conforme consta nas limitações.

A próxima etapa consistiu-se na **moldagem dos corpos de prova**. Foram moldados 20 corpos de prova, sendo 15 com barras de GFRP e 5 com aço, possuindo características propostas pela

ACI 440.3R (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2004, p. 1-40). Moldou-se ainda, 25 corpos de prova armados com aço, sendo 5 para os ensaios de *Pull Out Test* Modificado e 20 para o *Push Out Test*, possuindo características adaptadas da recomendação RC6 – *Bond testing for reinforced steel: Pull Out Test* (COMITE EURO-INTERNACIOL BU BÉTON, 1983, p. [1-5]). Além desses 45 citados, foram produzidos 35 corpos de prova para controle de resistência à compressão.

A **cura dos corpos de prova** foi realizada em câmara úmida, permanecendo nesse ambiente por 21 dias, a fim de realizar suas reações de hidratação e, conseqüentemente atingir a resistência à compressão. Durante a cura em câmara úmida, a temperatura permaneceu constante e os corpos de prova foram submetidos a um sistema de jateamento de água controlada por tempo. No 22º dia, retirou-se os corpos de prova da câmara úmida e estes foram acomodados em uma sala climatizada com temperatura de aproximadamente 23° C para que a saturação fosse estabilizada.

Após a cura dos corpos de prova, iniciou-se a fase de **execução dos ensaios**. Primeiramente, separou-se 5 corpos de prova para cada variável, sendo indexados com a temperatura a que seriam expostos. Depois se iniciou a exposição a altas temperaturas que foi realizada anteriormente aos ensaios de ruptura por aderência *Pull Out Test*, *Push Out Test* e *Pull Out Test* Modificado

A quarta etapa constituiu na **análise dos resultados**, quando foram aplicadas ferramentas estatísticas para que pudessem ser analisados os resultados obtidos. Nesta etapa da pesquisa foi realizada uma análise comparativa entre as diferentes variáveis propostas.

Na etapa final foram elaboradas as **considerações finais** do trabalho, sendo a etapa na qual através dos resultados obtidos, avaliaram-se os efeitos das variáveis estudadas sobre a resistência de aderência armadura-concreto. Nessa etapa, foi apresentado o comportamento da resistência de aderência.

3 CONCRETO ARMADO

O concreto armado é hoje um dos materiais compósitos mais utilizados na construção civil. Esse grande êxito é consequência do bom desempenho que seus materiais constituintes, concreto e armadura, possuem em absorver os esforços solicitantes. Essa capacidade é garantida pela aderência entre o concreto e a armadura, onde os esforços de compressão são absorvidos pelo concreto e os de tração pela armadura. Ao longo deste capítulo são abordados mais detalhadamente os materiais utilizados neste trabalho.

3.1 CONCRETO

O concreto é uma rocha artificial constituída basicamente de cimento, água, agregados miúdo e graúdo. Através da dosagem desses materiais são encontrados, na literatura, diversos tipos de concretos, alguns aprimorados para usos específicos como é o caso do concreto projetado, utilizado frequentemente em túneis, e outros utilizados nas obras civis, sendo o concreto convencional o mais utilizado.

O concreto a ser estudado nesse trabalho é o concreto convencional com resistência característica à compressão de 30 MPa aos 28 dias. Algumas das justificativas da escolha dessa resistência são explicadas pelo fato de ter grande utilização nas obras civis, além de ser uma recomendação da RC6 (COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1983, p. 1-5) por garantir que a tensão de aderência seja a mais próxima da real, o qual ocorre devido ao escorregamento da armadura em relação ao concreto.

3.2 ARMADURA

A armadura é fundamental para que a estrutura resista às tensões de tração. Existem características que podem influenciar diretamente, prejudicando ou melhorando sua eficiência, quando empregadas no concreto armado. Este capítulo aborda as características das armaduras de aço laminado e de *Glass Fiber Reinforced Polymer*-GFRP e compara suas propriedades mecânicas para o melhor entendimento do comportamento dessas armaduras em estruturas de concreto armado.

3.2.1 Armaduras de aço laminado

Na construção civil brasileira, as armaduras de aço laminado são as mais utilizadas. Seu uso é predominantemente devido às características, tanto físicas quanto mecânicas, que favorecem a sua aplicação se comparado a outros materiais, além de possuir baixo custo. A seguir é explanada a composição e o processo de fabricação do aço laminado.

3.2.1.1 Composição das armaduras de aço laminado

O aço laminado é um compósito constituído basicamente de dois materiais: o ferro e o carbono. O carbono é o responsável pela ductilidade do compósito através da sua proporção em relação ao ferro, e pode variar entre 0,008 e 2,11%. O aço pode ser conformado por laminação, extrusão, entre outros métodos. Além desses dois materiais, o aço pode conter impurezas de até 2% de seu volume. Se este teor ficar entre 2 e 5%, o aço é considerado de baixa-liga e, acima disso, de alta-liga. Existem algumas impurezas, tais como enxofre e fósforo, que devem ter seus teores abaixo de 0,005%, pois afetam sua ductilidade, deixando o compósito com ruptura frágil ou quebradiça (PEREIRA 2009, p. 8).

3.2.1.2 Processo de fabricação das armaduras de aço laminado

O processo de fabricação do aço laminado, para armaduras de reforço estrutural à tração na construção civil, é a laminação, a qual pode ser realizada a quente ou a frio. Este processo é constituído pela conformação plástica do material, no qual o compósito é conformado por ações externas, a fim de reduzir sua seção transversal. Além da redução da seção transversal do material, esta também é alongada e conformada, deixando-a com ou sem nervuras (PEREIRA, 2009, p. 10).

Segundo a NBR 7480 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996a, p. 2), são classificadas como armaduras de aço as que possuem diâmetro nominal igual ou superior a 5 mm, as quais foram produzidas, exclusivamente, pelo processo de laminação à quente. Ainda, segundo a NBR 7480 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996a, p. 5), as armaduras de aço são consideradas nervuradas quando aproximadamente 85% da área nominal da armadura contenha nervuras, e a altura destas deve ser igual ou maior que 4% do diâmetro nominal da mesma, para diâmetro da armadura superior a 10 mm. Essas características se devem ao processo de laminação e afetam diretamente na aderência, deixando o concreto devidamente travado à armadura.

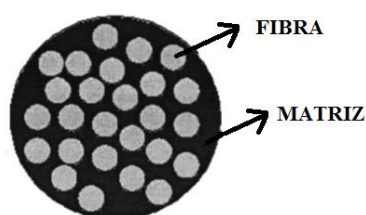
3.2.2 Armaduras de Glass Fiber Reinforced Polymer

As armaduras de GFRP são relativamente novas no âmbito nacional, em comparação a países europeus e asiáticos que já utilizavam essas armaduras ainda no período Pós-Guerra. As armaduras de GFRP são uma alternativa para as de aço, utilizadas como reforço à tração do concreto armado. A seguir, são analisadas a composição e o processo de fabricação das armaduras de GFRP.

3.2.2.1 Composição das armaduras de GFRP

As armaduras de GFRP, assim como as de aço, são um material compósito, constituídas por fibra de vidro e matriz de resina (figura 2). Este compósito é uma aglomeração de fibras estiradas envoltas por resina termoelástica, que conferem propriedades diferenciadas em comparação as armaduras de aço.

Figura 2 – Compósito de GFRP



(fonte: adaptado de KATSUKI, 2002, p. 192)

As fibras utilizadas na composição das armaduras de GFRP tem importante influência nas propriedades do compósito. Atualmente, existem três tipos de fibras, que podem ser empregadas na fabricação das armaduras, sendo elas: de carbono, aramida e vidro. As propriedades dessas fibras são apresentadas na tabela 1.

Neste trabalho, é analisada a influência na resistência de aderência para a armadura com fibra de vidro como reforço à tração do concreto armado. Segundo Couto (2007, p. 13), as fibras de vidro tem menor custo em comparação com as de aramida e carbono e podem ser de três tipos: vidro-E, vidro-S e vidro álcali resistente.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas das fibras

Propriedades	Fibra de carbono				Fibra de aramida		Fibra de vidro	
	Carbono Poliacrílico Nítril		Carbono Pitch		Kevlar 49 Twaron	Tech-nora	Vidro-E	Vidro álcali resistente
	Alta resistência	Alto módulo de elasticidade	Comum	Alto módulo de elasticidade				
Resistência à tração (MPa)	3.430	2.450-3.920	764 - 980	2.940 - 3.430	2744	3430	3.430- 3.528	1.764 - 3.430
Módulo de deformação (Gpa)	196 - 235	343-637	37 - 39	392 - 784	127	72,5	72,5 - 73,5	68,6 - 67
Alongamento (%)	1,3 - 1,8	0,4-0,8	2,1 - 2,5	0,4 - 1,5	2,3	4,6	4,8	4 -5 / 2 - 3
Massa específica (g/cm ³)	1,7 - 1,8	1,8-2,0	1,6 - 1,7	1,9 - 2,1	1,45	1,39	2,6	2,27
Diâmetro (µm)	5,0 - 8,0		9,0 - 18,0		12		8,0 - 12,0	

(fonte: adaptado de KATSUKI, 2002, p. 193)

Segundo o ACI 440 R (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1996, p. 15, tradução nossa), a fibra de vidro tem a peculiaridade de ser hidrofílica, ou seja, possui uma superfície muito ativa que absorve água, sendo facilmente degradada pelo manuseio. Em consequência dessa propriedade, após a conformação, a fibra é embebida por uma película que atua na proteção contra a umidade. Essa película, além de ter a função de proteção da fibra, também é responsável pela melhor adesão entre a fibra e a matriz polimérica. A matriz polimérica, analogamente ao concreto nas estruturas de concreto armado, possui a finalidade de transmitir os esforços de tração à armadura, além de proteger mecanicamente a armadura de agentes externos.

Segundo Katsuki et al. (2002, p. 194, tradução nossa), na fabricação das armaduras de GFRP podem ser utilizadas três tipos de resinas termoelásticas: epóxi, vinil éster e poliéster. Os autores salientam que é necessário verificar como a resina se deforma até a sua ruptura, além disso, deve existir compatibilidade entre a resina a ser empregada como matriz polimérica e a fibra, não havendo compatibilidade a eficiência é reduzida ou até mesmo anulada. Pode-se citar como exemplo as resinas epóxi que são compatíveis com as fibras de carbono, possuindo baixa deformabilidade, entretanto, para fibras de aramida e vidro, essa resina não tem resultados satisfatórios, sendo a resina de vinil éster a mais adequada.

3.2.2.2 Processo de fabricação das armaduras de GFRP

As armaduras são produzidas pelo processo de pultrusão. Segundo ACI 440 R (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1996, p. 19, tradução nossa), para a formação da armadura é necessário que todas as fibras que formam a sua seção transversal sejam colocadas simultaneamente no equipamento, no qual, através do banho que contém a resina, catalisador (ou endurecedor) e outros aditivos, as fibras sejam atraídas. Após as fibras serem envoltas pela resina, o seu excesso de resina é retirado e o compósito é colocado em fôrmas para a realização da cura e conformação da armadura. Esse processo de cura é realizado, normalmente, com uma velocidade de 0,9 m/min, dependendo da seção transversal da armadura e conformação superficial, levando um maior tempo para seções com maior dimensão.

Segundo Bakis et al.¹ (2002 apud COUTO, 2007, p. 15), para se ter um melhor desempenho frente à resistência de aderência das armaduras de GFRP, antes do compósito ficar no estado endurecido, são aplicados outros materiais que podem fazer parte da sua finalização, ou materiais que possam apenas causar uma leve deformação, aumentando a superfície de contato entre armadura e o concreto. Esses materiais podem ser entalhes, filmes texturizados (com posterior remoção), filamentos de fibras em forma de hélice, agregados finos na superfície, entre outros. Após a finalização da armadura, o volume de fibras varia entre 30 a 50% do volume total.

3.2.3 Comparação das propriedades mecânicas para armaduras de GFRP e aço

Atualmente, para reforço à tração do concreto no Brasil, as armaduras de aço são as mais utilizadas. Porém, com os avanços tecnológicos, visando à melhora do desempenho do concreto armado, as armaduras de GFRP vêm ganhando mercado, e suas propriedades mecânicas têm importante papel na introdução destes novos materiais na construção civil.

A armadura de GFRP, diferentemente da de aço, possuem característica anisotrópica, conferindo diferentes valores das suas propriedades dependendo da direção em que são

¹ BAKIS, C. E.; BANK, L.; COSENZA, E.; DAVALOS, J.; LESKO, J.; MACHIDA, A.; RIZKALLA, S.; TRIANTAFILLOU, T. Fiber-reinforced polymer composites for construction: state of-the-art review. **Journal of Composites for Construction**, v. 6, n. 2, p. 73-87, May 2002.

analisadas. Para as armaduras de GFRP, o módulo de elasticidade e sua resistência à tração tem melhor eficiência quando medidos na direção paralela à armadura. Além dessa característica, que é consequência da disposição das fibras no compósito, as propriedades das armaduras podem ser afetadas, principalmente pelo tipo de resina e fibra empregadas e também pelo processo de produção as quais foram submetidas – ACI 440R – (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1996, p. 11, tradução nossa). Essas propriedades, para a armadura de GFRP e para a de aço, são analisadas a seguir.

3.2.3.1 Massa específica

A massa específica da armadura de GFRP é de 1,5 a 2,0 g/cm³, enquanto a de aço possui em torno de 7,9 g/cm³ – ACI 440R – (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1996, p. 20, tradução nossa). A menor massa específica da armadura de GFRP influencia diretamente a logística do produto final, pois se tem menor custo de transporte e facilidade de manuseio desse material na obra, se comparado com o mesmo volume de aço que possui maior massa.

3.2.3.2 Dilatação térmica

O concreto armado possui materiais que tendem a dilatar de forma diferenciada, pois apresentam diferentes coeficientes de dilatação térmica. O concreto possui coeficiente de dilatação térmica de $1,0 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, enquanto que o aço possui um coeficiente cerca de 10% maior, sendo aproximadamente igual a $1,1 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Para temperaturas baixas o efeito dessa diferença de dilatação não provoca grandes efeitos, porém quando o concreto armado é submetido a temperaturas mais altas, o aço por dilatar mais provoca tensões de tração no concreto e se essas tensões forem maiores que a tensão de aderência pode ocorrer o deslocamento e fissuração do concreto (CAETANO, 2008, p. 60).

Segundo ACI 440 R (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1996, p. 20, tradução nossa), o coeficiente de dilatação térmica longitudinal para as armaduras de GFRP é muito próximo do coeficiente do concreto variando de $0,55 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ a $0,99 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Essa proximidade com o coeficiente de dilatação do concreto faz com que os dois materiais dilatem de forma parecida, minimizando assim as tensões geradas entre os materiais e consequentemente afetando menos a aderência entre o concreto e a armadura.

3.2.3.3 Resistência à tração

As armaduras de GFRP, diferentemente das de aço, tem sua resistência à tração influenciada pelo diâmetro da armadura. Isso ocorre pelo gradiente de tensões na armadura, fazendo com que as fibras localizadas na extremidade da armadura sejam mais solicitadas que as do centro, esse efeito é conhecido como *Shear Lag*. Portanto, armaduras com maior diâmetro tem menor resistência à tração (FAZA et al.², 1991 apud AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1996, p. 21, tradução nossa). Já para as armaduras de aço a resistência à tração é influenciada pelo seu processo de produção como destacam Morley e Royles³ (1980 apud CAETANO, 2008, p. 61).

Segundo o ACI 440 R (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1996, p. 20, tradução nossa), a resistência à tração do aço varia entre 483 e 690 MPa enquanto que para as armaduras de GFRP está entre 517 a 1207 MPa, sendo essas tensões são analisadas na direção longitudinal a armadura. Neste aspecto as armaduras de GFRP possuem um melhor desempenho mecânico que as de aço, porém deve ser levado em conta o diâmetro da armadura de GFRP visto que reduz significativamente a capacidade de resistência à tração da armadura.

3.2.3.4 Módulo de elasticidade

Analisando os módulos de elasticidade, tem-se que o módulo de elasticidade à tração é maior que à compressão, para armaduras de GFRP. Quando comparado com o aço, o módulo de elasticidade à tração das armaduras de GFRP é cerca de 25 % do módulo do aço, enquanto que das armaduras de aço é em torno de 220 GPa, o das armaduras de GFRP, está entre o intervalo de 41 a 55 GPa (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1996, p. 20, tradução nossa).

Segundo Castro (1997, p. 59), devido ao módulo de elasticidade das armaduras de GFRP serem relativamente pequeno quando comparado com o do aço, o material tem como característica ser mais flexível. Essa flexibilidade que o material possui tem como consequência a ocorrência de maior quantidade de aberturas de fissuras e grandes flechas.

² FAZA, S. S.; GANGARAO, H. V. S.; WU, W. P. Mechanical Properties of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bars for Concrete Reinforcement. **Constructed Facilities Center Report**, West Virginia University, Morgantown, p. 1-40, 1991.

³ MORLEY, P. D.; ROYLES, R. The influence of high temperature on the bond in reinforced concrete. **Fire Safety Journal**, v. 2, n. 4, p. 243-245, July 1980.

3.2.3.5 Fluência

O fenômeno de fluência é característica dos materiais estruturais, inclusive para armaduras de GFPR. Essa propriedade é referente à capacidade de deformação ao longo do tempo, na qual o material tem quando está submetido a uma tensão constante.

Para as armaduras de GFRP a fluência é um parâmetro crítico, pois após um período de tempo essas podem tem sua ruptura de forma frágil. Já para as armaduras de aço, esse parâmetro não é tão importante, pois o aço é um material de ruptura dúctil possuindo um patamar de escoamento bem definido também e pode suportar até 75% da resistência máxima à tração sem que haja ônus em sua resistência e rompimento da armadura (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1996, p. 21, tradução nossa).

4 ADERÊNCIA ARMADURA CONCRETO

A aderência armadura-concreto tem fundamental importância para que se tenha um melhor entendimento do concreto armado como material estrutural. A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 4, grifo do autor) define “[...] **elementos de concreto armado**: [são] 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.”. O concreto armado tem como seus materiais base o concreto e a armadura, esta última pode ser de origem metálica, armaduras de aço laminado, ou de origem não metálica como, por exemplo, as armaduras de GFRP. Para que o concreto armado funcione adequadamente, os esforços solicitantes na estrutura são absorvidos pelos seus materiais constituintes. Fusco (1995, p. 135) apresenta a ideia de solidarização entre o aço e o concreto e afirma que “Essa solidariedade impede que haja escorregamento relativo entre a armadura e o concreto que a envolve [...]”, e isto só é satisfatoriamente alcançado através da boa aderência entre esses materiais.

O concreto é resistente a esforços de tração e compressão, justamente porque há a transmissão de esforços devido à aderência entre esses materiais. Porém os esforços de tração são absorvidos pela armadura, já que a resistência à tração do concreto é desprezível, pois é cerca de 10% da sua resistência à compressão, e os esforços de compressão são absorvidos pelo concreto.

Segundo Cabré et al. (2000, p. 161, tradução nossa):

Se não existisse aderência, as armaduras seriam incapazes de absorver o menor esforço de tração, já que o aço deslizaria sem encontrar resistência em todo seu comprimento e não acompanharia o concreto em suas deformações, por meio de que, ao fissurar este, seguiria bruscamente a ruptura. Ao contrário, graças a aderência as armaduras são capazes de trabalhar, inicialmente, uma vez que o concreto; depois, quando este está fissurado, o faz de forma mais ou menos regularmente distribuída ao longo da peça, em virtude da aderência; e a aderência permite que o aço absorva os esforços de tração, mantendo a união entre os dois materiais nas zonas de fissuras.

Com isso, a aderência armadura concreto é de fundamental importância para que se assegure um bom desempenho mecânico do concreto armado. A eficiência da aderência, usualmente, é

quantificada por uma tensão de aderência. Segundo Cabré et al. (2000, p. 162), após o cálculo médio da tensão de aderência, é calculado o valor limite para essa tensão, a qual varia com as características mecânicas dos materiais, podendo-se citar a resistência à compressão do concreto e também a conformação superficial das armaduras.

Para o melhor entendimento da aderência, nos próximos itens são abordados os mecanismos de aderência, que são fatores relevantes para um bom comportamento mecânico do concreto-armado. São apresentados também, os modos de ruptura, os fatores que influenciam na aderência, o ensaio aplicado e o efeito da alta temperatura no concreto armado.

Este trabalho utilizará para a verificação da resistência de aderência o ensaio de *Pull Out Test*, ensaio este que não é normatizado no Brasil, porém aplicável para a determinação da resistência de aderência. Este também foi utilizado para as armaduras de GFRP, pois não existem normas para esse tipo de armadura.

O efeito de altas temperaturas é explanado com mais detalhe, pois, juntamente com as armaduras de GFRP, é um dos principais tópicos que foi analisado. Os resultados dessa análise dos efeitos das altas temperaturas em corpos de prova de concreto armado com armaduras de GFRP foi comparada com o material de referência que, no caso, foi o concreto armado, porém com a utilização de armaduras de aço.

4.1 MECANISMOS DE ADERÊNCIA

Os mecanismos de aderência nas estruturas de concreto armado são fenômenos que atuam simultaneamente na peça. Esses mecanismos podem ser divididos em três parcelas, sendo classificado em adesão, atrito e na parcela devido à aderência mecânica entre a armadura e o concreto, sendo elas detalhadas a seguir.

4.1.1 Aderência por adesão

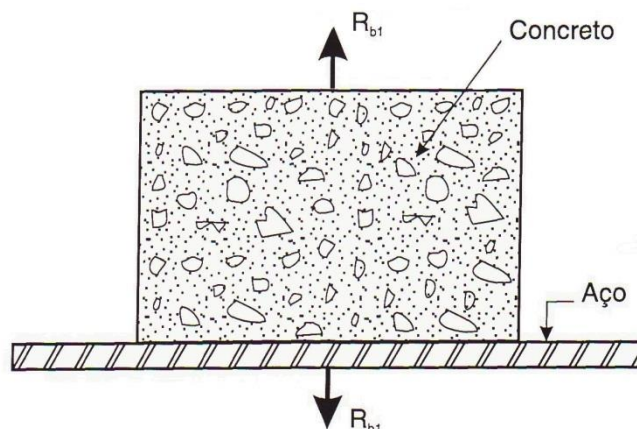
A aderência por adesão é uma das parcelas que interfere na aderência entre a armadura-concreto, sendo esta de origem físico-química. Essa parcela de aderência tem pouca relevância para a resistência de aderência, pois é formada por ligações fracas. Segundo Fusco (1995, p. 136), essas ligações ocorrem na interface entre o concreto e a armadura e são provenientes da reação de pega do cimento. Além disso, Cabré et al. (2000, p. 161, tradução

nossa) incorporam a ideia de que a resistência de aderência, desenvolvida pelo mecanismo de adesão, é decorrente de forças moleculares e capilares que se desenvolvem entre o aço e o concreto, “[...] é como se o aço absorvesse pasta cimentante, ajudado pelo efeito de retração [...]”. Segundo Quayyum (2010, p. 7), para as armaduras de GFRP esse mecanismo também acontece, porém, a adesão ocorre entre o concreto e a matriz polimérica que envolve as fibras de vidro.

A parcela de aderência por adesão é considerada ínfima frente às outras parcelas e, em muitos casos despreza-se o valor de resistência de adesão, pois a força aplicada é pequena quando realizado o ensaio de separação dos dois materiais. Segundo Caetano (2008, p. 10), “Esta parcela é fraca e não resiste a praticamente nenhum valor de deslocamento relativo, não sendo garantia de boa ligação.”.

Para quantificar essa resistência de aderência por adesão é realizado um ensaio que consiste em colocar um corpo de prova sobre uma placa de aço coberta por concreto. Após a cura do concreto, é aplicada uma força transversalmente a placa de aço e, em reação a força aplicada, tem-se a resistência de adesão R_{bt} ⁴ (figura 3).

Figura 3 – Ensaio de aderência por adesão



(fonte: FUSCO, 1995, p. 135)

4.1.2 Aderência por atrito

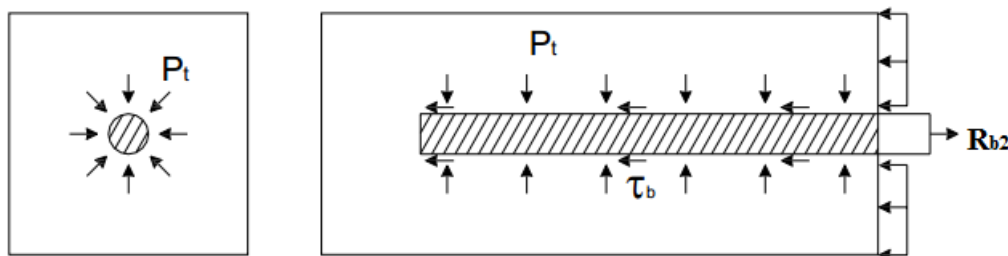
A parcela devido ao atrito, assim como a parcela de adesão, é de origem físico-química, porém esta é consequência da interface de deslizamento entre os materiais. Segundo Fusco

⁴ b provém da palavra inglesa Bond que traduzido para o português é aderência (FUSCO, 1995, p. 136).

(1995, p. 136), essa parcela é função das imperfeições da superfície da armadura, que decorrem da pressão que o concreto, através da retração, sendo exercida sobre a superfície da armadura. A retração do concreto é parcialmente inibida pela armadura, que gera forças de atrito e favorecem a solidarização entre os materiais. As forças de atrito geradas dependem do coeficiente de atrito entre o aço e o concreto, sendo função direta da rugosidade que os materiais apresentam em sua superfície.

Para que se possa quantificar a parcela de aderência por atrito, é realizado o ensaio de arrancamento simples, também conhecido como *Pull Out Test*. Este ensaio consiste em concretar um corpo de prova prismático, no qual parte da armadura é concretada simultaneamente. Após a cura do corpo de prova, é realizado o ensaio propriamente dito, em que é aplicada uma força paralela ao sentido da armadura, verificando-se assim a força de arrancamento R_{b2} , a qual pode ser visualizada na figura 4. A força R_{b2} é significativamente maior do que a força R_{b1} , obtida no ensaio de aderência por adesão, e isso se deve ao acréscimo de resistência devido ao atrito entre os materiais (FUSCO, 1995, p. 136).

Figura 4 – Ensaio de aderência por atrito



(fonte: FUSCO, 1995, p. 136)

Para as armaduras de GFRP, a parcela devido ao atrito é evidenciada após o limite da resistência de aderência por adesão ser rompido. As tensões de aderência são, então, absorvidas pelo atrito existente entre a matriz polimérica e o concreto e, transversalmente ao longo da armadura são geradas microfissuras (HASSAN; RIZKALLA, 2004, p. 833).

4.1.3 Aderência mecânica

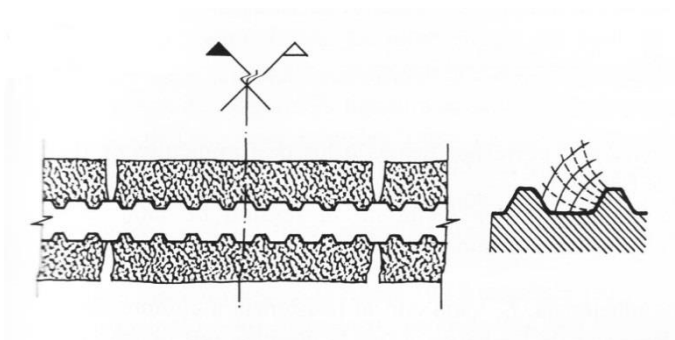
A aderência mecânica é a parcela que mais contribui na resistência de aderência. Segundo Fusco (1995, p. 136), essa parcela é responsável pela eficiente solidarização da armadura com

o concreto. Sendo de origem mecânica, essa parcela é causada pela conformação superficial da armadura. Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 40), a superfície da armadura pode ser considerada lisa, entalhada ou de alta aderência, sendo as armaduras de alta aderência também conhecidas como armaduras nervuradas.

As armaduras nervuradas possuem saliências ao longo de seu comprimento e são colocadas de maneira proposital, fazendo com que se tenha uma superfície de contato maior se comparadas às armaduras lisas. Já as armaduras ditas lisas também são influenciadas pela parcela de aderência mecânica, pois sua superfície contém irregularidades que são causadas pelo processo de conformação das armaduras.

Para se entender o funcionamento por aderência mecânica, Cabré et al. (2000, p. 161, tradução nossa) introduzem a ideia do efeito cunha, ou seja, a saliência da armadura funciona como uma barreira para o deslizamento do concreto com a armadura, conforme mostra a figura 5. Já, segundo Fusco (1995, p. 136), “Essas saliências funcionam como peças de apoio, mobilizando tensões de compressão no concreto.”.

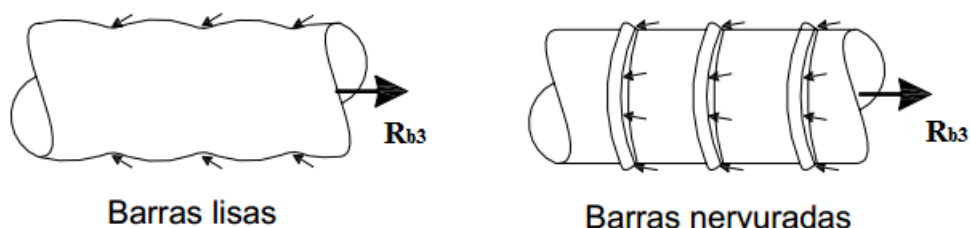
Figura 5 – Efeito de cunha



(fonte: CABRÉ et al., 2000, p. 161)

As tensões de compressão no concreto são geradas a partir do arrancamento da armadura do interior do concreto armado. O ensaio aplicado para se verificar a resistência de aderência, assim como na verificação da aderência por atrito, é o ensaio de arrancamento simples, porém nessa etapa é ensaiada uma armadura perfeitamente lisa e outra nervurada (figura 6). Ao se compararem os resultados para as duas armaduras, verifica-se a diferença de resistência por aderência, e assim tem-se a parcela de resistência por aderência mecânica, já que para armaduras perfeitamente lisas a resistência por aderência mecânica é desconsiderada.

Figura 6 – Aderência mecânica



(fonte: FUSCO, 1995, p. 136)

As armaduras de GFRP também possuem essa parcela de resistência por aderência mecânica. Isso ocorre devido ao travamento entre as saliências e rugosidades da superfície da armadura com o concreto. Com o incremento das forças aplicadas, são geradas duas componentes de força uma radial e outra paralela a direção da força de aderência (QUAYYUM, 2010, p. 7).

4.2 MODOS DE RUPTURA DA ADERÊNCIA

Os modos de ruptura por aderência podem ocorrer de diversas formas. Segundo Lutz e Gergeley⁵ (1967 apud CAETANO, 2008, p. 11), as rupturas podem ocorrer por esmagamento do concreto, através da nervura, ou por cisalhamento do consolo de concreto. Entretanto, o *Bulletim 10 da Federation Internationale du Beton – FIB*⁶ divide os modos de ruptura em fendilhamento do cobrimento de concreto e arrancamento da armadura de aço (FEDERATION INTERNACIONALE DU BETON, 2000 apud CAETANO, 2008, p. 11).

4.2.1 Ruptura por fendilhamento e esmagamento do concreto

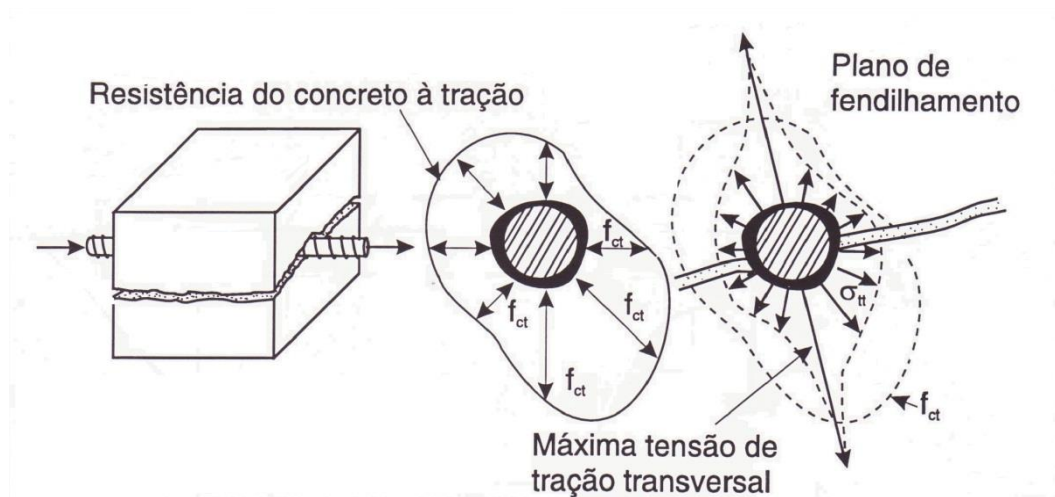
A ruptura por fendilhamento ocorre quando o corpo de prova é submetido a esforços de tração. A armadura é tracionada e, em consequência disso, é mobilizado o volume de concreto que se encontra entre as saliências ou nervuras da armadura (CAETANO, 2008, p. 12). Fusco (1995, p. 146) explica que surgem tensões transversais de tração e tensões diagonais de compressão, que se equilibram entre si. Essas tensões geram microfissuras próximo às

⁵ LUTZ, L. A.; GERGELY, P. Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete. *ACI Journal Proceedings*, v. 64, n. 11, p. 711-721, Nov. 1967.

⁶ FEDERATION INTERNACIONALE DU BÉTON: Bond of reinforced in concrete, State-of-report, Bulletin, n. 10. Ed. By Fib Task Group 4/2 bond models, Convener Ralejs Tepfers, p. 427, 2000.

saliências da armadura de aço e, conseqüentemente, geram uma superfície enfraquecida paralela ao eixo da armadura, causando o fendilhamento (figura 7).

Figura 7 – Fendilhamento longitudinal do concreto



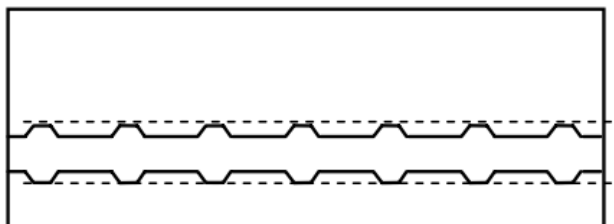
(fonte: FUSCO, 1995, p. 147)

Segundo Caetano (2008, p. 12), além da microfissuração, existe ainda o esmagamento do concreto devido a esse esforço de tração. Se essas tensões geradas forem de grandes proporções, pode ocorrer o rompimento do concreto nessa região, devido ao fato do concreto ter pouca resistência à tração.

4.2.2 Ruptura por arrancamento da armadura

A ruptura por arrancamento da armadura ocorre quando o volume de concreto que se localiza entre as saliências é rompido por tensões cisalhantes, fazendo com que a armadura, que está no interior do corpo de prova, deslize (figura 8).

Figura 8 – Configuração esquemática da zona submetida ao maior esforço cortante



(fonte: CAETANO, 2008, p. 14)

Segundo Achillides e Pilakoutas (2004, p. [11], tradução nossa), nas armaduras de GFRP diferentemente das de aço, o modo de ruptura se dá apenas por arrancamento da armadura. Para esse tipo de ruptura, se considerado o aço como armadura, tem-se como fator determinante para a resistência de aderência do compósito a resistência à compressão do concreto. Porém em armaduras de GFRP esse fator não é válido.

A resistência de aderência nas armaduras de GFRP é influenciada pela resina que é responsável pela resistência de aderência GFRP e concreto, e pela resistência de cisalhamento entre as interfaces das fibras. Entretanto, para concretos de baixa resistência à compressão (por volta de 15 MPa) o modo de ruptura assemelha-se ao modo de ruptura das armaduras de aço nervuradas, sendo a resistência à tração fator determinante para a resistência de aderência (COUTO, 2007, p. 30).

4.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A ADERÊNCIA

O comportamento da aderência entre a armadura e o concreto é influenciado por diversos fatores. Esses fatores para as armaduras de GFRP atuam de forma diferenciada justamente por possuírem propriedades físico-mecânicas diferentes das do aço. Ribeiro (2009, p. 14), evidencia a importância do processo industrial de conformação da armadura de GFRP, visto que os esforços aos quais a armadura é submetida são transferidos da resina para as fibras. Nos próximos itens, são apresentados alguns fatores que influenciam a resistência de aderência tanto para as armaduras de aço, quanto para as de GFRP.

4.3.1 Conformação superficial da armadura

Segundo Caetano (2008, p. 23), a conformação superficial das armaduras tem influência direta na resistência de aderência, pois aumenta consideravelmente a parcela por aderência mecânica. Para armaduras de aço com nervuras, “[...] o valor da resistência de aderência mecânica depende da forma e da inclinação das nervuras, da altura [...] e da distância livre entre elas [...]”.

As armaduras de GFRP, da mesma forma que as de aço, também são afetadas pela conformação superficial da armadura. As saliências existentes ao longo da armadura são

responsáveis pelas tensões, que se desenvolvem no seu entorno, e pela ancoragem por aderência mecânica (COUTO, 2007, p. 32).

4.3.2 Diâmetro da armadura

O diâmetro da seção transversal da armadura, tanto para armaduras de aço quanto para as de GFRP, influenciam na resistência de aderência da armadura com o concreto. Segundo Caetano (2008, p. 22), as armaduras de aço com maior diâmetro tendem a ser menos resistentes que as de menor, pois, por reterem maior quantidade de água em sua face inferior, criam poros e, conseqüentemente, microfissuras. Além disso, as armaduras de aço nervuradas possuem nervuras maiores, causando acúmulo de tensões no concreto que envolve a armadura.

Segundo Ametrano et al. (2011, p. 25, tradução nossa), as armaduras de GFRP também são influenciadas pelo seu diâmetro, o qual é capaz de modificar a resistência de aderência, por se tratar de um material formado por inúmeras fibras justapostas envoltas por resina, o fenômeno ocorre da mesma forma que para as armaduras de aço, que é um material homogêneo. Porém para as armaduras de GFRP, quando submetidas ao ensaio de arrancamento simples, ocorrem deformações diferenciais entre as fibras situadas no centro da armadura e as próximas da superfície, resultando uma distribuição não uniforme de tensões normais na seção. Segundo Achillides e Pilakoutas (2004, p. [17], tradução nossa), além disso, o efeito de *Poisson* tem influência em armaduras de grande comprimento, pois reduz o diâmetro da armadura, reduzindo também a resistência de aderência.

4.3.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é responsável pela deformabilidade das armaduras, sendo composto pelo módulo de elasticidade longitudinal e transversal. Segundo Castro (1997, p. 59), o módulo de elasticidade gera flechas e fissuras tornando o material mais ou menos dúctil.

As armaduras de GFRP possuem módulo de elasticidade menor se comparado com as de aço, fazendo com que o material se deforme mais. Visto que as armaduras de GFRP possuem característica anisotrópica, variando com a direção analisada, seu módulo de elasticidade na direção longitudinal é menor que na direção transversal (COUTO, 2007, p. 33).

4.3.4 Resistência à compressão do concreto

O concreto, que circunda a armadura de aço ou GFRP, afeta o modo como a ruptura se desenvolve no ensaio de arrancamento (COUTO, 2007, p. 37). Para armadura de aço com nervuras, no concreto com resistências consideradas baixas, em torno de 15 MPa, o modo de ruptura é por arrancamento da armadura, sendo resultado do cisalhamento do concreto no entorno da armadura e ao esmagamento do concreto que se aloja entre as nervuras. Porém, em concretos com resistências superiores a 30 MPa, a ruptura acontece por fendilhamento. Esse tipo de ruptura que ocorre devido às tensões radiais internas serem superiores à resistência de tração do concreto, sendo assim a resistência de aderência é limitada pela resistência à tração do concreto (RIBEIRO⁷, 1985 apud CAETANO, 2008, p. 27).

Para Achillides e Pilakoutas (2004, p. [17], tradução nossa) concretos armados com GFRP, de baixa resistência à compressão, tem sua resistência à aderência afetada pela resistência do concreto, pois a ruptura acontece na matriz do concreto. Porém para concretos acima de 30 MPa os autores afirmam que a resistência à aderência não é afetada, pois a ruptura por aderência ocorre na superfície da armadura de GFRP.

4.3.5 Posição das armaduras

Segundo o ACI 408R (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2003, p. 12, tradução nossa), a posição da armadura no interior de um elemento de concreto influencia a aderência. Armaduras colocadas na parte superior do elemento tendem a ter menor resistência de aderência do que as armaduras colocadas no inferior. A explicação para esta discrepância, que ocorre para o posicionamento da armadura no concreto é que quanto maior for o volume de concreto abaixo da armadura, maior é o acúmulo de água sob a armadura, criando poros e diminuindo, dessa forma a resistência de aderência.

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 32) leva em conta o posicionamento da armadura no concreto, dividindo o elemento estrutural em zonas de má e boa aderência, assim como, a superfície e a bitola da armadura, conforme apresentado na fórmula 1:

⁷ RIBEIRO, J. L. D. **Análise experimental dos fatores que influenciam a aderência de barras nervuradas**. 1985. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

f_{bd} = resistência de aderência de cálculo;

$\eta_1 = 1,0$ para armaduras lisas;

$\eta_1 = 1,4$ para armaduras entalhadas;

$\eta_1 = 2,25$ para armaduras nervuradas;

$\eta_2 = 1,0$ para situações de boa aderência⁸;

$\eta_2 = 0,7$ para situações de má aderência⁹;

$\eta_3 = 1,0$ para $\phi < 32$ mm;

$\eta_3 = (32 - \phi) / 100$, para $\phi \geq 32$ mm;

f_{ctd} = resistência a tração de cálculo.

4.4 ENSAIOS DE ADERÊNCIA

Não havendo normatização brasileira para o ensaio de aderência, é necessária a utilização de normas estrangeiras. As normas sobre o assunto são, entre outras, a ASTM A 944 – *Standard Test Method for Comparing Bond Strength of Steel Reinforcing Bars to Concrete Using Beam-End Specimens* – (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2005, p. 1) e a ASTM C 234 – *Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforced Steel* – (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1991, p. 153). Para os ensaios de aderência foram utilizadas as prescrições da norma ACI 440.3R (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2004, p. 1-40).

Os ensaios de aderência utilizados neste trabalho, para a verificação da resistência de aderência, são os ensaios de arrancamento simples: *Pull Out Test* e *Pull Out Test Modificado*.

⁸ Segundo a NBR-6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 31-32), são consideradas zonas de boa aderência aquelas que a posição da barra durante a concretagem estejam com inclinação maior que 45° ou menor que 45° desde que: para elementos estruturais com altura maior que 60 cm a posição esteja a no máximo 30 cm acima da face inferior, e para os com altura menor que 60 cm que a posição da armadura esteja no máximo a 30 cm abaixo da face superior.

⁹ Segundo a NBR-6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 31-32) são considerados trechos em zonas de má aderência quando não estiverem dentro dos limites citados na nota 8.

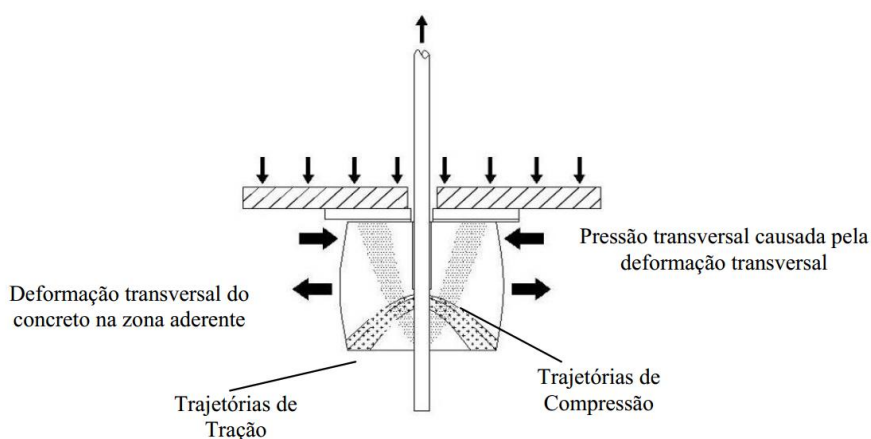
Além destes, é utilizado um novo método de ensaio nomeado *Push Out Test*, adaptado pelo Laboratório de Modelos Estruturais (LEME). Atualmente, o ensaio de *Pull Out Test*, é um dos mais utilizados para a verificação da resistência de aderência, por ser um método de fácil execução e também por ser realizado com corpos de prova de pequenas dimensões, se comparado com o ensaio de viga conhecido como *Beam Test*, facilitando assim, a realização do ensaio (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2003, p. 6, tradução nossa).

Para o *Pull Out Test*, é necessária a confecção de um corpo de prova prismático com armadura centralizada atravessando o mesmo, com geometria cúbica de dimensões iguais a 20 cm. Após a cura do corpo de prova é realizado o ensaio propriamente dito, no qual, é aplicada uma força de tração em uma de suas extremidades livres e medido o deslocamento relativo entre a armadura e o concreto na outra extremidade (CAETANO, 2008, p. 33).

Embora o *Pull Out Test* seja um dos mais tradicionais ensaios para este tipo de verificação, segundo Silva (2010, p. 58), este procedimento não é adequado para estruturas como vigas e lajes. Isso decorre da falta de complexidade das tensões resultantes do ensaio, as quais discorrem das tensões verificadas em estruturas reais de concreto armado.

De forma simplificada, as tensões que atuam no concreto, que envolve a armadura, são tensões de compressão, além de tensões laterais perpendiculares à armadura (figura 9). Essa tensão lateral propicia um melhor confinamento da armadura no concreto e conseqüentemente beneficia sua resistência de aderência e as tensões verticais são o próprio carregamento da prensa (CAETANO, 2008, p. 34).

Figura 9 – Distribuição das tensões de corpos de prova submetidos ao ensaio de arrancamento simples



(fonte: CAETANO, 2008, p. 34)

Segundo Couto (2007, p. 41), “A tensão de aderência medida no ensaio de arrancamento é a tensão média, visto a dificuldade em medir a variação desta ao longo do comprimento de ancoragem [...]”. A fórmula 2 demonstra a correlação entre a força aplicada, perímetro da armadura e ancoragem.

$$\tau_b = \frac{F_t}{u \cdot l}$$

(fórmula 2)

Onde:

τ_b = tensão de aderência média;

F_t = força solicitante na armadura;

u = perímetro da armadura;

l = comprimento de ancoragem.

Para o ACI 408R (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2003, p. 6, tradução nossa), essa tensão lateral é provocada pelo deslocamento relativo entre os materiais do compósito e não pela força aplicada. Sendo assim, não é recomendada apenas a utilização deste tipo de ensaio para parâmetros de projeto estrutural, porém, para análise da influência de variações nos materiais utilizados esse ensaio é aplicável.

Para os ensaios de aderência, *Pull Out Test* Modificado e *Push Out Test*, adaptados da recomendação do RILEM. Diferentemente, da forma cúbica do ensaio *Pull Out*, esses ensaios requerem uma forma cilíndrica do corpo de prova, que tem diâmetro igual a 10 vezes o diâmetro da armadura e altura de 10 cm. Além disso, para o *Push Out Test*, o corpo de prova ao invés de ser tracionado ele é comprimido. Esses métodos são detalhados no capítulo de materiais e métodos.

4.5 EFEITO DE ALTAS TEMPERATURAS NA ADERÊNCIA

A exposição da estrutura de concreto armado à situação de incêndio leva a uma redução da capacidade portante, porém durante esse evento é necessário que a estrutura tenha uma resistência mínima para a devida evacuação dos usuários do local, assim como adequada extinção das chamas. A NBR 14432 – Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos

Construtivos de Edificações – Procedimento – (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001, p. 4) separa os diferentes tipos de edificações, assim como características associadas a estas, para que os critérios de cálculo de resistência ao fogo sejam adequados. Nesta Norma é considerado “[...] a severidade ou potencial destrutivo dos incêndios, condicionados por fatores, entre outros, associados a: tipo de ocupação, área, profundidade do subsolo, altura da edificação, facilidade de acesso para combate ao incêndio [...]”.

Segundo Caetano (2008, p. 60):

[...] após a exposição de uma estrutura a um sinistro, é necessário verificar suas condições e avaliar se o desempenho residual permita a recuperação ou reforço da estrutura, evitando a demolição parcial ou total. Um requisito fundamental para isto é a existência de um mínimo de aderência entre o concreto e o aço, pois esta é a principal responsável pelo bom funcionamento de um elemento estrutural.

Visto que após a exposição da estrutura a altas temperaturas os materiais constituintes do concreto armado apresentam variações em suas propriedades mecânicas, ocasionando significativa redução em sua capacidade portante e de resistência de aderência armadura concreto, é necessário que a resistência de aderência armadura concreto seja analisada com cautela.

Para que se possa analisar as reduções nas propriedades dos materiais do concreto armado, corpos de prova são expostos a elevadas temperaturas e depois ensaiados pelo ensaio de *Pull-Out*. Alguns fatores podem influenciar na resistência de aderência modificando o comportamento da estrutura e são listados a seguir:

- a) temperatura de exposição à altas temperaturas;
- b) tempo de exposição;
- c) taxa de aquecimento;
- d) resistência à compressão do concreto;
- e) tipo de armadura utilizada, entre outros.

A temperatura de exposição afeta a resistência de aderência e dependendo pode melhorar ou piora-lá. Para Morley e Royles¹⁰ (1983 apud CAETANO, 2008, p. 62), o concreto armado exposto a uma temperatura de 300°C teve sua resistência de aderência aumentada. Porém para Caetano (2008, p. 62), acima de 350°C é evidente que há uma redução significativa para a

¹⁰ MORLEY, P. D.; ROYLES, R. The influence of high temperature on the bond in reinforced concrete. **Fire Safety Journal**, v. 2, n. 123, p. 67-74, June 1983.

resistência de aderência. Isso se deve ao fato que nem todo o cimento reagiu e então a temperatura faria com que parte desse cimento continuasse reagindo.

Além da temperatura o tempo no qual o concreto armado é exposto também é importante para a aderência. Chiang e Tsai¹¹ (2003 apud CAETANO, 2008, p. 62) analisaram o comportamento da resistência de aderência para diferentes tempos e temperaturas de exposição, para a temperatura de 240°C e tempos de 30 e 150 minutos a resistência residual foi de 90% e 20% respectivamente, já para a temperatura de 550°C com os mesmos tempos a resistência de aderência passou para 50% e 12%. Percebe-se com esses resultados obtidos por Chiang e Tsai que para menores temperaturas a resistência é bastante afetada pelo tempo de exposição e para temperaturas mais altas esse fator não é tão relevante, pois o compósito está em um estágio maior de degradação.

A utilização da taxa de aquecimento baixa proporciona uma melhor uniformização de temperatura do volume de concreto armado, em consequência disso a resistência pode ser melhor analisada (MORLEY; ROYLES¹² 1983 apud CAETANO, 2008, p. 62). Porém para taxas de aquecimento mais altas, tem-se uma menor temperatura no interior do corpo de prova do que na face exterior, fazendo com que existam diferenças de temperatura ao longo do corpos de prova. Em consequência desse gradiente são geradas tensões no concreto devido essa diferença de temperatura que há entre a extremidade e o centro do corpo de prova, nas quais podem influenciar na resistência de aderência.

Segundo Caetano (2008, p. 63):

Com o aumento da temperatura, os modos de ruptura sofrem variação, passando de ruptura por fendilhamento para falha por deslizamento. Esse fato é explicado pela redução da resistência à compressão do concreto, principalmente aquele localizado nas cunhas entre nervuras. [...] Quanto menor a resistência do concreto, maior a facilidade de esmagamento da cunha que fica situada entre as nervuras e, consequentemente, maior a probabilidade da ruptura se dar por fendilhamento.

Na estrutura de concreto armado, uma das funções do concreto é proteger a armadura, através do cobrimento. Porém quando o concreto está deteriorado pela incidência de altas temperaturas, o compósito fica suscetível a modificações na estrutura da armadura,

¹¹ CHIANG, C. H.; TSAI, C. L. Time-temperature analysis of bond strength of a rebar after fire expose. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 10, p. 1651-1654, Oct. 2003.

¹² MORLEY, P. D.; ROYLES, R. The influence of high temperature on the bond in reinforced concrete. **Fire Safety Journal**, v. 2, n. 123, p. 67-74, June 1983.

prejudicando a aderência entre esses materiais. Visto que diferentes tipos de armaduras para reforço estrutural à tração modificam a resistência de aderência à temperatura ambiente. Quando estes são expostos a altas temperaturas essas variações também são observadas.

O comportamento das armaduras de GFRP frente à altas temperaturas é bastante diferenciado se comparado com as armaduras de aço. A armadura de GFRP, por ser um material composto de resina e fibra de vidro, quando exposta a altas temperaturas tem seus materiais constituintes reagindo de formas diferentes, principalmente pela sua composição química. Sabe-se que pelas resinas serem formadas por carbono e hidrogênio (inflamáveis), elas são mais afetadas que as fibras de vidro.

O desempenho das armaduras de aço, quando expostas a temperaturas elevadas, é influenciado pelo processo de fabricação por encruamento ou por laminação à quente. As armaduras que são laminadas a quente tem sua tensão de escoamento reduzida, porém após o resfriamento recuperam essa tensão. Já as armaduras encruadas a frio são submetidas a deformações plásticas para que adquiram maior resistência. Essa diferenciação pode ser explicada pela reorganização dos cristais da estrutura do aço, quando exposta a temperaturas elevadas (CAETANO, 2008, p. 61).

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é abordado o programa experimental adotado neste trabalho, que tem por objetivo analisar a resistência de aderência das armaduras de GFRP e de aço quando expostas a diferentes níveis de temperatura. Para o melhor entendimento deste, são descritas as atividades realizadas antes dos ensaios propriamente ditos, assim como a caracterização dos materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova e, finalmente, é descrito o procedimento dos ensaios de exposição à temperatura e de resistência de aderência *Pull Out Test*, *Pull Out Test Modificado* e o *Push Out Test*.

5.1 MATRIZ EXPERIMENTAL

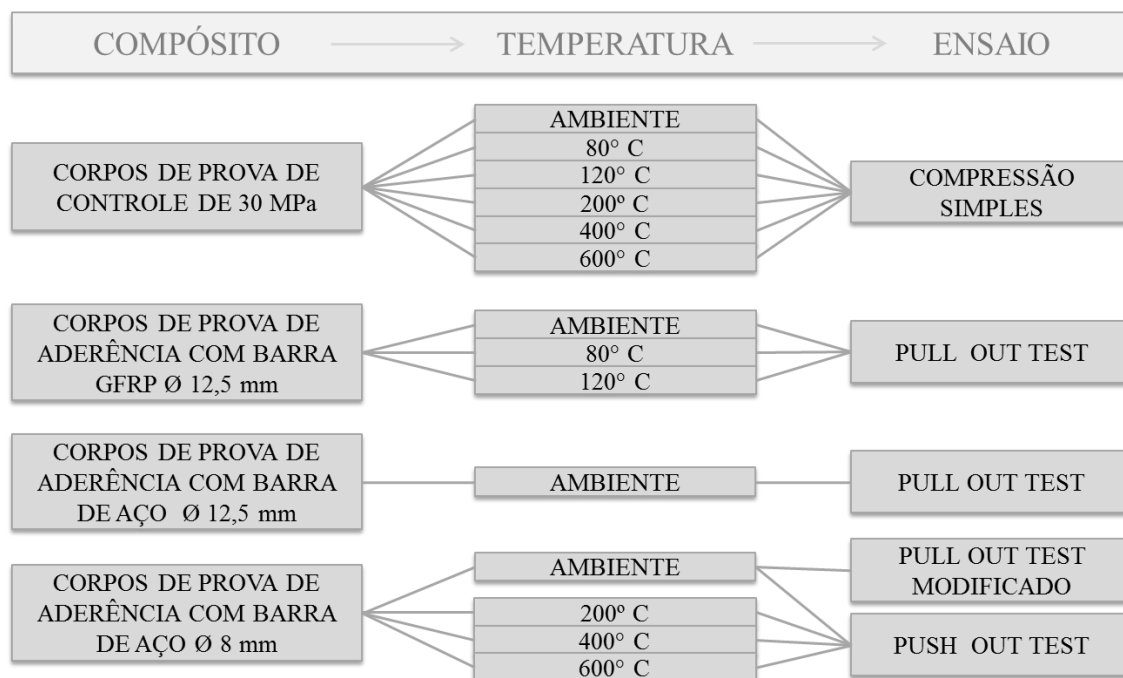
A matriz experimental contempla corpos de prova de concreto armado e concreto simples. O concreto utilizado possui resistência característica 30 MPa, conforme será detalhado no item 5.3, e as armaduras para reforço à tração são de aço nervurada e de GFRP sem tratamento superficial.

Os corpos de prova foram moldados, preparados e ensaiados pelos mesmos operadores para que se tenha um melhor controle de execução. Para cada combinação foram moldados cinco corpos de prova de uma mesma concretagem. Devido ao volume de concreto, foi necessário que se fizesse 2 concretagens, a 1ª compõe os corpos de prova de controle à compressão e de *Push Out Test* e *Pull Out Test*, a 2ª é constituída de corpos de prova de controle à compressão e de *Pull Out Test*. Após a análise dos ensaios da 1ª concretagem, decidiu-se por refazer os corpos de prova de controle à compressão e os de *Push Out Test*, sendo esta a 3ª concretagem.

Após a concretagem dos corpos de prova estes foram desmoldados e acomodados no interior de uma câmara úmida para o início da cura, que teve duração de 21 dias. Do 22º ao 28º dia os corpos de prova foram colocados em uma sala climatizada com temperatura de 23° C, para a estabilização do corpo de prova fosse alcançada. Posteriormente a essa fase deu-se o início aos ensaios de exposição a altas temperaturas e de resistência de aderência. As temperaturas aos quais os corpos de prova foram submetidos são de 200, 400 e 600°C, incluindo a temperatura ambiente, que é a temperatura de referência, para os corpos de prova com

armaduras de aço nervurada de 8 mm. Para os corpos de prova com GFRP, com 12,5 mm de diâmetro, as temperaturas de exposição foram 80°, 120°C e temperatura ambiente, utilizou-se essas temperaturas, devido a limitação de exposição à temperatura das barras de GFRP, já que a resina utilizada na fabricação volatiliza e é tóxica a temperaturas acima de aproximadamente 200°C. A figura 10 mostra a matriz experimental definida.

Figura 10 – Matriz experimental



(fonte: elaborado pela autora)

5.2 MATERIAIS

Neste capítulo são apresentados os materiais constituintes para a moldagem dos corpos de prova e suas respectivas características. Além disso, são abordados os métodos normatizados utilizados para a correta execução.

5.2.1 Cimento

O cimento utilizado para a moldagem dos corpos de prova do programa experimental apresentado foi o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI), cujo fabricante é a empresa Cimento Nacional, sendo proveniente do mesmo lote para as concretagens realizadas. As especificações técnicas do cimento estão descritas no quadro 1, conforme

dados do fabricante, são seguidas condições da NBR 5733 – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991, p. 2). Este cimento foi escolhido devido ao fato de apresentar uma maior resistência inicial se comparado com os outros cimentos presentes no mercado e em consequência disso, a desmoldagem dos corpos de prova pode ser realizada 24 horas após a concretagem.

Quadro 1 – Especificações técnicas do cimento portland

EXIGÊNCIAS FÍSICAS E MECÂNICAS					
Características e Propriedades		Unidades	Análise do Cimento	Limites	Norma
Finura	Área Específica	cm ² /g	4.401	≥ 3.000	NM 76/1998
Tempo de início de pega		min	140	≥ 60	NM 65/2002
Tempo de término de pega		min	187	≤ 600	NM 65/2002
Massa Específica		g/cm ³	3,11	-	NM 23/2001
Perda ao fogo		%	0,07	≤ 4,5	NM 18/2004
Diâmetro médio		µm	11,06		

(fonte: elaborado pela autora)

5.2.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo que foi utilizado na dosagem do concreto foi a areia natural quartzosa, procedente do Rio Jacuí. A distribuição granulométrica desse material é contínua e sua granulometria e propriedades estão descritas no quadro 2, estes valores foram obtidos em ensaios efetuados no laboratório segundo a norma brasileira NBR NM 248, no qual descreve o processo de caracterização da granulometria do material (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 3-6).

Quadro 2 – Granulometria e propriedades da areia

GRANULOMETRIA		
Abertura da peneira	% Retida	% Retido acumulado
6,3	0	0
4,75	0,15	0,15
2,36	3,84	3,99
1,18	9,96	13,94
0,6	29,88	43,82
0,3	45,25	89,07
0,15	0,13	89,21
Fundo	10,79	100
Diâmetro Máximo Característico		2,36
Módulo de Finura		2,40
Massa Específica		2,63 g/cm ³

(fonte: elaborado pela autora)

5.2.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita basáltica, procedente de mineração localizada na região de Porto Alegre/RS. A distribuição granulométrica desse material assim como suas propriedades estão apresentadas no quadro 3. Antes da utilização da brita, foi necessária a lavagem e posterior secagem do material, para que assim pudesse se aferir que o material estive livre de poeira e outros materiais indesejáveis.

Quadro 3 – Granulometria e propriedades da brita

GRANULOMETRIA		
Abertura da peneira (mm)	% Retida	% Retido acumulado
75,00	0,00%	0,00%
63,00	0,00%	0,00%
50,00	0,00%	0,00%
37,50	0,00%	0,00%
31,50	0,00%	0,00%
25,00	0,00%	0,00%
19,00	5,58%	4,77%
12,50	78,66%	80,42%
9,50	15,22%	99,29%
6,30	0,52%	99,99%
4,75	0,02%	100,00%
2,36	0,00%	100,00%
1,18	0,00%	100,00%
0,60	0,00%	100,00%
0,30	0,00%	100,00%
0,15	0,00%	100,00%
Fundo	0,00%	
Diâmetro Máximo Característico		19
Módulo de Finura		7,04
Massa Específica		2,90 g/cm ³

(fonte: elaborado pela autora)

5.2.4 Água

A água utilizada para a mistura dos agregados com o cimento é a do abastecimento local do município de Porto Alegre/RS. A água é administrada pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre/RS, o qual tem controle diário da qualidade desta.

5.2.5 Armaduras de aço

As barras de aço utilizadas para a execução dos corpos de prova de aderência são nervuradas da classe CA-50, possuindo diâmetros nominais de 8 e 12,5 mm. As especificações técnicas desse aço são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 – Especificações técnicas das armaduras de aço

BITOLA	MASSA NOMINAL	TOLERÂNCIA	SEÇÃO NOMINAL	LIMITE DE ESCOAMENTO (L.E.)	LIMITE DE RESISTÊNCIA	ALONGAMENTO
(mm)	(kg/m)	(%)	(mm ²)	(MPa)	(MPa)	(em 10 Ø)
8	0,395	±7	50,3	500	1,10 x L.E.	8
12,5	0,963	± 6	122,7	500	1,10 x L.E.	8

(fonte: adaptado de ARCELOR MITTAL AÇOS LONGOS, 2013, p. 12-13)

5.2.6 Armaduras de GFRP

O equipamento utilizado para a produção das barras de GFRP pultrudadas é da PULTRUTEC e possui capacidade de 3 toneladas de tração. Para a conformação da barra de diâmetro de 12,5 mm, sem tratamento superficial, utilizou-se uma matriz de aço P-20 com concavidade cromada, esta possui dimensões de 100x100x960 mm (largura x altura x comprimento). Para a produção da barra foi utilizado um sistema constituído de resina poliéster isoftálica, peróxido de benzoíla e monômero de estireno, que é a matriz das armaduras, carbonato de cálcio (carga), estearato de zinco (desmoldante), dióxido de titânio (pigmento) e fibra de vidro. A armadura de GFRP é procedente do Laboratório de Materiais Poliméricos (Lapol) da UFRGS.

5.3 DOSAGEM DO CONCRETO

Foi adotado, para a dosagem do concreto, a resistência característica de 30 MPa aos 28 dias. Essa resistência foi definida nesse trabalho, pois é recomendação da RC6 (COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1983, p. 1-5), além de ser corriqueiramente utilizado em obras de concreto armado

O método de dosagem utilizado foi o IPT/EPUSP. Esse método tem como parâmetros a resistência característica do concreto aos 28 dias, a consistência do concreto e a dimensão máxima dos agregados. A partir desses parâmetros obtêm-se as proporções entre cimento,

areia e brita, além da relação água/cimento, além do coeficiente α , que é o teor de argamassa seca (quadro 4).

Quadro 4 – Dosagem do concreto

DOSAGEM	TRAÇO				α	CONSUMO (kg/m ³)	
cimento:agregados	Cimento	Areia	Brita	Água/Cimento	(%)	Água	Cimento
1:6	1	2,5	3,5	0,56	50	183	326

(fonte: elaborado pela autora)

5.4 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

A moldagem dos corpos de prova foi executada no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), em ambiente climatizado. Para a execução utilizou-se uma betoneira de eixo inclinado de 400 litros de capacidade nominal, devido ao grande volume da concretagem. Na primeira concretagem foram moldados 45 corpos de prova, sendo 25 corpos de prova cilíndricos de diâmetro 100 mm e altura 100 mm, constituídos de aço de diâmetro 8 mm, e 20 de diâmetro 100 mm e altura de 200 mm, utilizados para controle de resistência de concreto simples. Na segunda concretagem moldou-se 20 corpos de prova cúbicos com arestas de 200 mm, sendo que 5 foram armados com aço de diâmetro 12,5 mm e 15 foram armados com GFRP de diâmetro 12,5 mm, além disso moldou-se mais 15 corpos de prova cilíndricos com diâmetro 100 mm e altura de 200 mm de concreto simples, para o controle tecnológico.

As formas utilizadas para a moldagem dos corpos de prova cúbicos eram metálicas, já para os cilíndricos utilizou-se formas metálicas e plásticas (figuras 11 a 13). Para a melhor desmoldagem dos corpos de prova aplicou-se óleo mineral em toda superfície interior da forma.

Figura 11 – Formas utilizadas para o ensaio de *Pull Out Test*



(fonte: foto da autora)

Figura 12 – Formas utilizadas para o ensaio de *Pull Out Test* Modificado



(fonte: foto da autora)

Figura 13 – Formas utilizadas para o ensaio de *Push Out Test*



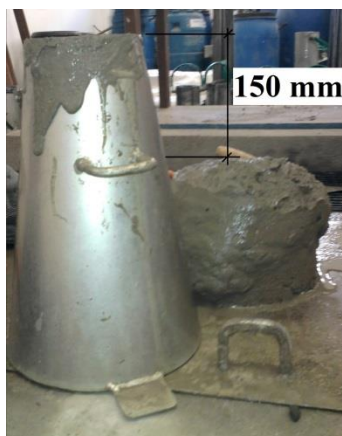
(fonte: foto da autora)

Antes das concretagens, os materiais necessários para a mistura foram pesados em balança digital com precisão de 10 gramas e acondicionados, separadamente, próximos à sala de concretagem. Antes do início da mistura, molhou-se a betoneira, pás e conchas para que fosse retirada qualquer eventual impureza, além de evitar a perda de água da mistura para a betoneira. A mistura de concreto teve a seguinte ordem de colocação na betoneira:

- a) 100% do agregado graúdo;
- b) 50% da água;
- c) 100% do cimento;
- d) 100% do agregado miúdo;
- e) colocação do restante da água.

Deixou-se a betoneira ligada até que a mistura ficasse com uma textura homogênea e tivesse uma adequada coesão. Antes da moldagem dos corpos de prova foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone (figura 14), também conhecido como *Slump Test*, que é normatizado pela NBR NM 67 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998). O abatimento obtido foi de 150 mm para todas as concretagens.

Figura 14 – Ensaio de abatimento tronco de cone



(fonte: foto da autora)

Após a realização do ensaio de abatimento, iniciou-se a moldagem dos corpos de prova. A moldagem deu-se em duas etapas, sendo que, na primeira foi colocado metade do volume de concreto na forma e, posteriormente, adensado em mesa vibratória por tempo controlado. Na segunda etapa preencheu-se o volume total da forma do corpo de prova, adensou-se da mesma maneira que na primeira etapa, sendo finalmente regularizada sua superfície superior.

Com a finalização da moldagem os corpos de prova foram acomodados em local protegidos de sol e vento para não haver exsudação de água superficial, permanecendo nesse ambiente por 24 horas, sendo a seguir realizada sua desmoldagem. Após a etapa de desmoldagem dos corpos de prova, foi colocada a identificação da autora e data da concretagem, sendo imediatamente colocados em câmara úmida onde permaneceram por 21 dias (figuras 15), e do 22º ao 28º dia os corpos de prova foram acomodados em uma sala climatizada com temperatura de 23° C, para ter sua saturação estabilizada.

Figura 15 – Corpos de prova curando em câmara úmida



(fonte: foto da autora)

5.5 PROCEDIMENTO DE EXPOSIÇÃO À TEMPERATURA

O procedimento de exposição à temperatura para corpos de prova de aderência requer alguns cuidados quanto à proteção da armadura. Utilizaram-se dois tipos de isolamento que são descritos no decorrer desse item. Além disso, são detalhados os ensaios de exposição para corpos de prova que posteriormente serão ensaiados pelo *Pull Out Test* e pelo *Push Out Test*.

Os fornos utilizados para esses ensaios são da marca SANCHIS, com capacidade térmica em torno de 1050° C. A programação dos fornos foi efetuada para simular uma taxa média de 27,4° C/min, segundo recomendações da ISO 834-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1999, paginação irregular).

5.5.1 Procedimento de exposição à temperatura para *Pull Out Test*

O procedimento de exposição à temperatura, para os corpos de prova com incorporação de GFRP e ensaiados à aderência pelo *Pull Out Test*, foram expostos a 2 níveis de temperatura, sendo 80 e 120° C. Essas temperaturas foram escolhidas, visto que as barras de GFRP apresentam comportamento adequado até temperaturas em torno de 200° C, e por questões de segurança pois a matriz polimérica, que envolve as fibras, libera substâncias tóxicas.

Antes de expor o corpo de prova à temperatura, as barras foram protegidas do contato direto com a ação de altas temperaturas, utilizando dois sistemas: lã de rocha e tecido de fibra cerâmica resistente a altas temperaturas. Dessa forma, a transferência de calor se dá do concreto para a armadura, e não ao contrário, já que em situação de incêndio, a armadura encontra-se protegida pelo concreto. O tecido de fibra de cerâmica revestiu as barras de maior comprimento, e no comprimento menor revestiu-se com lã de rocha, devido às diferentes maleabilidades que os materiais possuem (figura 16). Após a colocação da proteção nas armaduras, separaram-se 5 corpos de prova para o ensaio *Pull Out Test* e 5 para o ensaio de compressão simples, para cada nível de temperatura proposto.

Figura 16 – Preparação para exposição à temperatura de corpos de prova ensaiados pelo *Pull Out Test*



(fonte: foto da autora)

Para o ensaio, os corpos de prova foram dispostos de forma regular e acomodados sobre pequenos suportes de argamassa, de forma a receber calor em todas as faces. Em seguida, foi escolhido o programa do forno para a temperatura a ser ensaiada, já que os primeiros minutos, antes da temperatura atingir o seu patamar, são variáveis, pois a taxa de aquecimento é mantida para todas as temperaturas. Quando a temperatura atingiu o patamar escolhido, iniciou-se a contagem do tempo de exposição, sendo de 30 minutos para todos os patamares. Após os 30 minutos, o forno desligou-se automaticamente e os corpos de prova foram deixados em seu interior até a estabilização da temperatura. No apêndice A são apresentadas as curvas de resfriamento de dois ensaios para cada temperatura. Foram realizados dois ensaios para cada temperatura devido as dimensões do forno serem pequenas para se colocar 5 corpos de prova de controle à compressão e 5 de *Pull Out Test*.

5.5.2 Procedimento de exposição à temperatura para *Push Out Test*

No ensaio de exposição à temperatura para os corpos de prova armados com aço e ensaiados pelo *Push Out Test*, foram expostos a 3 níveis de temperatura: 200, 400 e 600° C. A escolha dessas temperaturas deve-se ao fato de estarem presente durante situação de incêndio.

Os corpos de prova com características estabelecidas para o ensaio de *Push Out Test* possuem boa parte da armadura embebida por concreto, porém, algumas partes são expostas ao ambiente, sendo necessária proteção, quando expostas a altas temperaturas. Para a proteção da armadura optou-se em utilizar apenas lã de rocha por ter uma maleabilidade maior, e pelo fato do comprimento do aço a ser revestido ser pequeno (figura 17). Após a colocação da proteção

nas barras, separaram-se 5 corpos de prova para o ensaio *Push Out Test* e 5 para o ensaio de compressão simples, para os níveis de temperatura de 200, 400 e 600° C.

Figura 17 – Preparação para exposição à temperatura de corpos de prova ensaiados pelo *Push Out Test*



(fonte: elaborado pela autora)

Da mesma forma que para o ensaio de *Pull Out Test* descrito anteriormente, no início do ensaio de *Push Out Test*, os corpos de prova foram dispostos de forma regular e acomodados sobre pequenos suportes de argamassa (figura 18), de forma a receber calor em todas as faces. Após, foi escolhido o programa para a temperatura a ser ensaiada, já que os primeiros minutos, antes da temperatura atingir o patamar, são variáveis, pois a taxa de aquecimento é mantida. Quando a temperatura atingiu o patamar escolhido, iniciou-se a contagem do tempo de exposição, sendo de 30 minutos para todos os patamares de temperatura. Concluído o tempo de exposição, o forno desligou-se automaticamente onde permaneceram resfriando até que a temperatura fosse adequada para a realização do ensaio de aderência, no apêndice B estão demonstradas as curvas de aquecimento e resfriamento deste ensaio.

Figura 18 – Acomodação dos corpos de prova no forno, para o ensaio de 400° C



(fonte: foto da autora)

5.6 ENSAIOS DE ADERÊNCIA

Este item aborda os três ensaios de aderência propostos anteriormente, assim como suas características e métodos de execução.

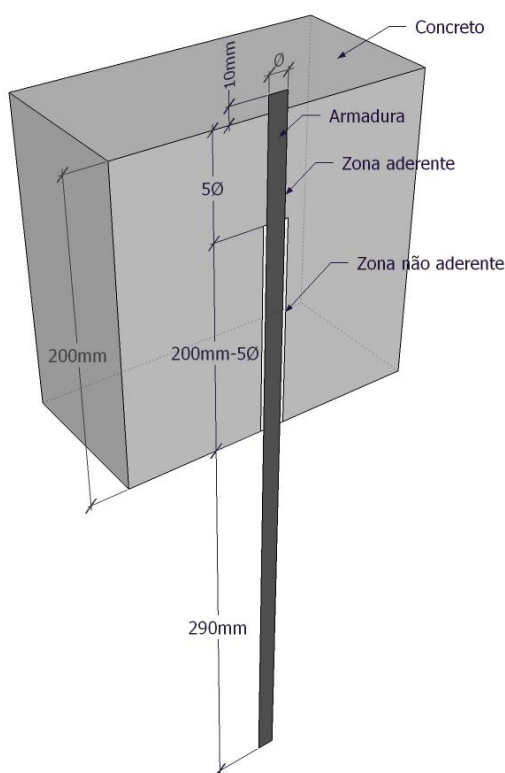
Para a realização dos ensaios de aderência, inicialmente foi verificada a temperatura dos corpos de prova, a fim de comprovar que se encontravam à temperatura ambiente (em torno de 23° C). Foi utilizada prensa da marca SHIMADZU com capacidade de 2000 kN, disponível no LEME. A velocidade de carregamento foi mantida constante em 32 N/s para o diâmetro de 8 mm e em 78 N/s para o diâmetro de 12,5 mm, ambas até à ruptura, como recomenda a RC6 (COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON, 1983, p. [4]). As medições de carga e de deslocamentos foram registradas com auxílio do software *Trapezium*.

5.6.1 Pull Out Test

Para os corpos de prova com GFRP e aço, de 12,5 mm de diâmetro, utilizou-se a recomendação da ACI 440.3R (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2004, p. 1-40). Segundo essa recomendação, os corpos de prova devem ser cúbicos e com arestas de, no mínimo, 200 mm. A barra deve ser preparada e dividida em duas zonas distintas: zona de aderência (contato do concreto com a armadura) e de não aderência (isolado por PVC). A

zona de aderência corresponde ao comprimento de 5 vezes o diâmetro da armadura, e a de não aderência é a diferença entre a altura da forma (200 mm) menos o comprimento da zona aderente (figura 19). A fim de medir o deslocamento relativo entre a barra e o concreto, deixou-se 1 cm de folga antes da contagem do comprimento não aderente. A concretagem dos corpos de prova procedeu-se no sentido longitudinal da barra, visando assegurar que o entorno desta estivesse totalmente preenchido de concreto.

Figura 19 – Esquema da zona de aderência e não aderência no corpo de prova



(fonte: elaborado pela autora)

Para o ensaio de *Pull Out Test* é utilizado um pórtico especialmente projetado para a realização do ensaio. Após a montagem do pórtico, o corpo de prova é colocado na prensa com o maior comprimento da barra voltada para baixo, este é apoiado em uma placa de reação e, então, é preso nas garras da prensa. Na parte superior do corpo de prova é colocado o LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), que é utilizado para medir o deslocamento relativo barra-concreto. Depois dessa preparação iniciou-se o carregamento, este foi realizado na mesma direção da armadura, porém, com sentido contrário, a fim de, tracionar a armadura conforme figura 20.

Figura 20 – Corpo de prova sendo ensaiado pelo método do *Pull Out Test*

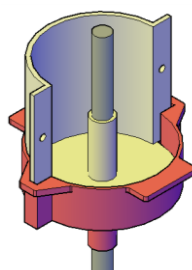


(fonte: foto da autora)

5.6.2 *Pull Out Test* Modificado

O ensaio do *Pull Out Test* Modificado é uma adaptação do *Pull Out Test* recomendado pelo RC6 (COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON, 1983, p. [1-5]). Essas alterações foram feitas por pesquisadores do LEME, com o intuito de melhorar as condições do ensaio. Uma das significantes alterações é a redução das dimensões do corpo de prova, passando de um corpo de prova cúbico para um cilíndrico com diâmetro cerca de 10 vezes o diâmetro da armadura e altura de 10 cm conforme figura 21. Para se ensaiar este método, utiliza-se o mesmo procedimento descrito anteriormente para o ensaio de *Pull Out Test*. Esse método vem se mostrando bastante satisfatório quanto à resistência de aderência e, além disso, o modo de ruptura na aderência é o deslizamento da armadura, o mesmo que acontece com corpos de prova cúbicos.

Figura 21 – Esquema da forma do *Pull Out Test* Modificado

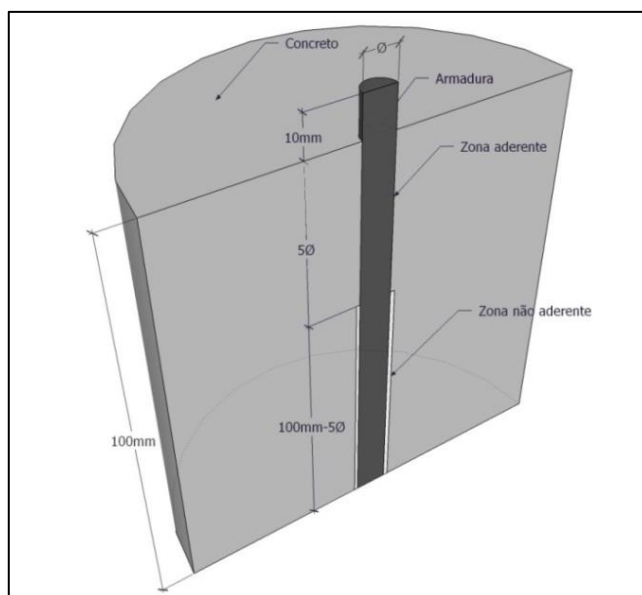


(fonte: BARBOSA et al., 2012, p. 5)

5.6.3 Push Out Test

O ensaio do *Push Out Test* também é uma adaptação, realizado pelo grupo de pesquisadores do LEME, do *Pull Out Test* recomendado pelo RC6 (COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON, 1983, p. [1-5]). Este método de ensaio possui características muito parecidas com o *Pull Out* Modificado como é o caso da geometria do corpo de prova que também é cilíndrico com diâmetro de aproximadamente 10 vezes o diâmetro da barra e com altura de 100 mm (figura 22). Porém a grande diferença entre os ensaios de *Pull Out Test* descritos anteriormente, é a forma de carregamento do corpo de prova, este é carregado de forma a comprimir a barra. O comprimento da barra também é reduzido, para evitar a flambagem desta, porém o comprimento da zona aderente se mantém 5 vezes o diâmetro da barra.

Figura 22 – Esquema da zona de aderência e não aderência no corpo de prova



(fonte: foto da autora)

O procedimento para o ensaio de *Push Out Test* em determinados pontos pode ser mais simplificado se comparado com o *Pull Out Test*. Pois além da facilidade na preparação dos moldes, pequeno volume de concreto moldado, o *Push Out Test* utiliza a compressão para o carregamento, fato que não necessita de um sistema de ancoragem como no *Pull Out Test*, o que diminui consideravelmente a preparação do ensaio (figura 23). No ensaio de *Push Out Test*, dois LVDTs são fixados junto ao corpo de prova para que a leitura do deslocamento relativo fosse registrada, utilizou-se a média aritmética entre os dois como valor de deslocamento.

Figura 23 – Ensaio de *Push Out Test*

(fonte: foto da autora)

5.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para verificar a resistência à compressão dos concretos produzidos durante as concretagens, foram moldados corpos de prova de diâmetro 100 mm e altura 200 mm segundo recomendações da NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), sendo, anteriormente, ensaiados aos níveis de temperatura de 80, 120, 200, 400 e 600 ° C, além da temperatura ambiente. Para a ruptura foi utilizada a prensa disponível no LEME, da marca SHIMADZU, com capacidade de 2.000 kN e velocidade de carregamento de 0,45 MPa/s, conforme dimensões dos corpos de prova. Para o capeamento dos corpos de prova utilizou-se NEOPRENE (figura 24), sendo este um método bastante eficiente para concretos de resistência convencional. Esse método foi escolhido, pois, além de ser prático, não utiliza água como no método de retificação, o que causaria uma possível reidratação.

Figura 24 – Corpo de prova ensaiado a resistência à compressão



(fonte: foto da autora)

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos ao longo da pesquisa. São demonstrados os resultados dos ensaios de resistência à compressão e dos ensaios de resistência de aderência. Com o intuito de analisar estatisticamente os resultados, adotou-se a metodologia de análise de variância (ANOVA-*Analysis of Variance*) através da utilização do software STATISTICA 7.0. A metodologia ANOVA analisa qual é a influência da variável temperatura na resposta tensão de resistência de aderência para corpos de prova com barras de aço e GFRP, e na resistência à compressão do concreto. Com o resultado da análise, tem-se como produto o *p-value*, utilizado como indicador das variáveis, neste caso a temperatura de exposição. Para valores menores que 0,05, indica 95% de confiança no teste. Além da análise de variância, utilizou-se o Método de Tukey que consiste na análise agrupada aos pares, gerando um *p-value* para cada comparação analisada.

6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

O controle da resistência à compressão do concreto é de grande relevância, pois influencia no comportamento da ruptura e na resistência de aderência. A moldagem dos corpos de prova, assim como os parâmetros estatísticos que foram adotados no trabalho, está estabelecida pela NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996b). Os corpos de prova, ensaiados à resistência à compressão, foram moldados simultaneamente com os de resistência de aderência e as rupturas foram realizadas aos 28 dias de idade. A resistência à compressão foi analisada após exposição em temperatura ambiente, 200, 400 e 600° C, para a primeira concretagem, conforme mostra o quadro 5.

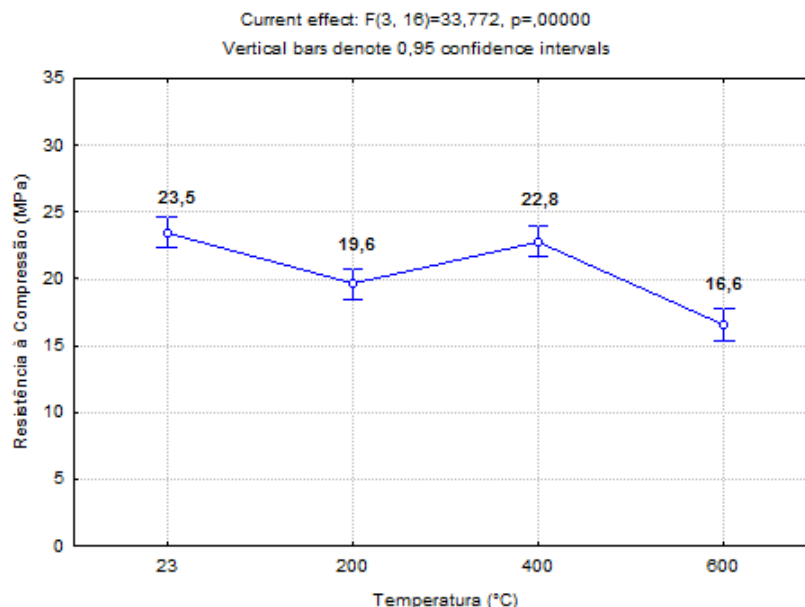
Quadro 5 – Resultados de resistência à compressão em temperatura ambiente, 200, 400 e 600° C da 1ª concretagem

Compressão							
Identificação	Temperatura Exposição	Data da Concretagem	Data da Ruptura	Resistência	Resistência Média	Fator de Resistência	Desvio Padrão
				(MPa)	(MPa)		
CP1	AMBIENTE (23°C)	06/03/2013	09/04/2013	23,5	23,5	1,00	0,88
CP2				24,5			
CP3				22,7			
CP4				22,5			
CP5				24,1			
CP1	200°C	06/03/2013	09/04/2013	17,6	19,6	0,84	1,37
CP2				19,8			
CP3				19,5			
CP4				21,4			
CP5				19,7			
CP1	400°C	06/03/2013	10/04/2013	23,0	22,8	0,97	0,82
CP2				22,1			
CP3				24,1			
CP4				22,6			
CP5				22,3			
CP1	600°C	06/03/2013	10/04/2013	15,7	16,6	0,71	1,63
CP2				16,3			
CP3				18,6			
CP4				17,7			
CP5				14,5			

(fonte: elaborado pela autora)

Analisando a influência da variação da temperatura na resistência à compressão, para os corpos de prova de controle, concretados simultaneamente, com os do ensaio de resistência de aderência por *Push Out Test* da 1ª concretagem, obteve-se no geral o valor de *p-value* igual a 0,000 (figura 25). Esse valor indica que, os corpos de prova expostos às temperaturas de 200, 400 e 600°C sofreram variação estatisticamente significativa na resistência à compressão, após exposição a essas temperaturas.

Figura 25 – Resistência à compressão para corpos de prova de controle e expostos a 200, 400 e 600°C da 1ª concretagem



(fonte: elaborado pela autora)

Pelo método de Tukey observa-se que nem todas as temperaturas de exposição tiveram influência na resistência à compressão. No quadro 6, pode-se observar que, quando comparado a resistência à compressão, após exposição à 400°C, com o corpo de prova de referência (temperatura ambiente), o valor de *p-value* é 0,8239, indicando que as resistências obtidas são estatisticamente semelhantes. Por esse método, tem-se que as resistências à compressão diminuíram quando os corpos de prova foram submetidos às temperaturas de 200, e 600°C, em relação à temperatura ambiente, sendo as reduções respectivamente, 16 e 29%. Conforme especificado anteriormente, pelo fato da resistência à temperatura de 400°C não atingir o valor esperado, decidiu-se refazer o ensaio, sendo demonstrado em seguida.

Quadro 6 – Análise pelo método de Tukey para resistência à compressão para corpos de prova de controle e expostos a 200, 400 e 600°C, 1ª concretagem

Temperatura (°C)	Resistência Média (MPa)	<i>p-value</i>			
		Ambiente	200	400	600
Ambiente	23,5		0,000840	0,823916	0,000186
200	19,6	0,000840		0,004064	0,006018
400	22,8	0,823916	0,004064		0,000186
600	16,6	0,000186	0,006018	0,000186	

(fonte: elaborado pela autora)

Os resultados para a primeira concretagem não foram satisfatórios, já que para a temperatura de exposição de 200° C, houve uma redução média de 16 % na resistência à compressão em comparação com a temperatura ambiente, e para as temperaturas de exposição de 400 e 600 °C, houve redução de apenas 3 e 29%, respectivamente. Este fato pode ter sido influenciado pelo procedimento de resfriamento dos corpos de prova. Dessa forma, os ensaios para o método Push Out Test, para as temperaturas acima, foram refeitos e são apresentados no quadro 7. Neste quadro, observa-se a retirada de dados espúrios, estes foram excluídos devido a sua grande variação em relação à média. A numeração dos corpos de prova descritos nessa tabela são referentes a colocação destes no forno, conforme figura 18 (p. 59).

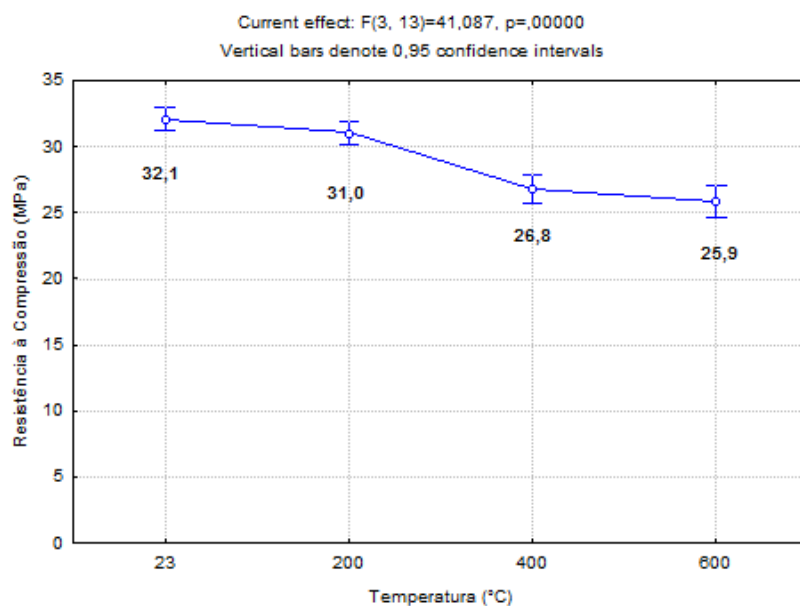
Quadro 7 – Resultados de resistência à compressão para temperatura ambiente, 200, 400 e 600° C da 3ª concretagem

Compressão							
Identificação	Temperatura Exposição	Data da Concretagem	Data da Ruptura	Resistência	Resistência Média	Fator de Resistência	Desvio Padrão
				(MPa)	(MPa)		
CP1	AMBIENTE (23°C)	16/04/2013	13/05/2013	32,1	32,1	1,00	1,37
CP2				33,6			
CP3				32,9			
CP4				32,0			
CP5				30,0			
CP1	200°C	16/04/2013	14/05/2013	30,8	31,0	0,97	0,46
CP2				31,8			
CP3				30,6			
CP4				31,1			
CP5				30,9			
CP1	400°C	16/04/2013	14/05/2013	25,6	26,8	0,83	1,01
CP2				27,6			
CP3				26,3			
CP4				-			
CP5				27,7			
CP1	600°C	16/04/2013	13/05/2013	25,8	25,9	0,81	0,57
CP2				-			
CP3				25,4			
CP4				-			
CP5				26,5			

(fonte: elaborado pela autora)

Analisando a influência da variação da temperatura na resistência à compressão, para os corpos de prova de controle concretados, simultaneamente com os do ensaio de resistência de aderência por *Push Out Test* da 3ª concretagem, obteve-se no geral o valor de *p-value* igual a 0,0001 (figura 26). Esse valor indica que os corpos de prova expostos às temperaturas de 200, 400 e 600°C sofreram variação estatisticamente significativa na resistência à compressão.

Figura 26 – Resistência à compressão para corpos de prova de controle e expostos a 200, 400 e 600°C da 3ª concretagem



(fonte: elaborado pela autora)

Pelo método de Tukey, observa-se que nem todas as temperaturas de exposição tiveram influência na resistência à compressão. No quadro 8, pode-se observar que, quando comparado a resistência à compressão, após exposição à 200°C, com o corpo de prova de referência (temperatura ambiente), o valor de *p-value* é 0,49, indicando que as resistências obtidas são estatisticamente iguais. Por esse método, tem-se que todas as resistências à compressão diminuiriam quando os corpos de prova foram submetidos às temperaturas de 200, 400 e 600°C, sendo as reduções respectivamente, 3, 17 e 19%, em relação à temperatura ambiente. Para a temperatura de 200 e 400°C, esses resultados foram satisfatórios, porém, para a temperatura de 600°C houve uma menor redução de resistência, o que não é comumente encontrado na literatura.

Quadro 8– Análise pelo método de Tukey para resistência à compressão para corpos de prova de controle e expostos a 200, 400 e 600°C da 3ª concretagem

Temperatura	Resistência Média	<i>p-value</i>			
(°C)	(MPa)	Ambiente	200	400	600
Ambiente	32,1		0,340843	0,000204	0,000202
200	31,0	0,340843		0,000269	0,000219
400	26,8	0,000204	0,000269		0,628025
600	25,9	0,000202	0,000219	0,628025	

(fonte: elaborado pela autora)

Para os corpos de prova moldados na segunda concretagem, as temperaturas de exposição foram ambiente, 80 e 120° C e os resultados são expostos no quadro 9.

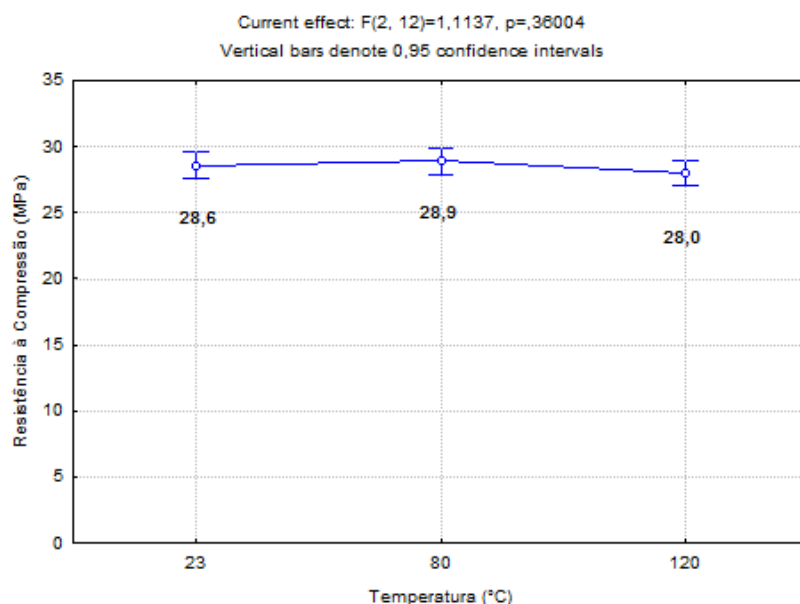
Quadro 9 – Resultados de resistência à compressão em temperatura ambiente, 80 e 120° C da 2ª concretagem

Compressão							
Identificação	Temperatura Exposição	Data da Concretagem	Data da Ruptura	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Fator de Resistência	Desvio Padrão
CP1	Ambiente (23°C)	12/03/2013	09/04/2013	30,2	28,6	1,00	0,97
CP2				28,1			
CP3				27,9			
CP4				27,9			
CP5				28,9			
CP1	80°C	12/03/2013	09/04/2013	29,8	28,9	1,01	0,91
CP2				29,2			
CP3				28,0			
CP4				29,6			
CP5				27,8			
CP1	120°C	12/03/2013	10/04/2013	27,4	28,0	0,98	1,08
CP2				28,6			
CP3				29,6			
CP4				27,3			
CP5				27,0			

(fonte: elaborado pela autora)

Analisando a influência da variação da temperatura na resistência à compressão, para os corpos de prova de controle concretados, simultaneamente com os do ensaio de resistência de aderência por *Pull Out Test* da 2ª concretagem, obteve-se no geral o valor de *p-value* igual a 0,36 (figura 27). Esse valor indica que, os corpos de prova expostos às temperaturas de 80 e 120° C não sofreram variação estatisticamente significativa na resistência à compressão.

Figura 27 – Resistência à compressão para corpos de prova de controle e expostos a 80 e 120°C da 2ª concretagem



(fonte: elaborado pela autora)

Pelo método de Tukey observa-se que, estatisticamente nenhuma das temperaturas de exposição influenciou na resistência à compressão. No quadro 10 verifica-se que, quando comparado à resistência à compressão com o corpo de prova de referência (temperatura ambiente), após exposição às temperaturas de 80 e 120°C, os valores de *p-value* são maiores que 0,05, sendo estatisticamente iguais entre si.

Quadro 10 – Análise pelo método de Tukey para resistência à compressão para corpos de prova de controle e expostos a 80 e 120°C da 2ª concretagem

Temperatura (°C)	Resistência Média (MPa)	<i>p-value</i>		
		Ambiente	80	120
Ambiente	28,6		0,878104	0,604532
80	28,9	0,878104		0,340904
120	28,0	0,604532	0,340904	

(fonte: elaborado pela autora)

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto, para a 2 e 3ª concretagens, para temperatura ambiente, estão próximos ao estabelecido na delimitação do trabalho, sendo de 30 MPa. Para os ensaios de resistência à compressão, submetida a níveis diferentes ao da temperatura ambiente, houve significativa variação.

6.2 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA

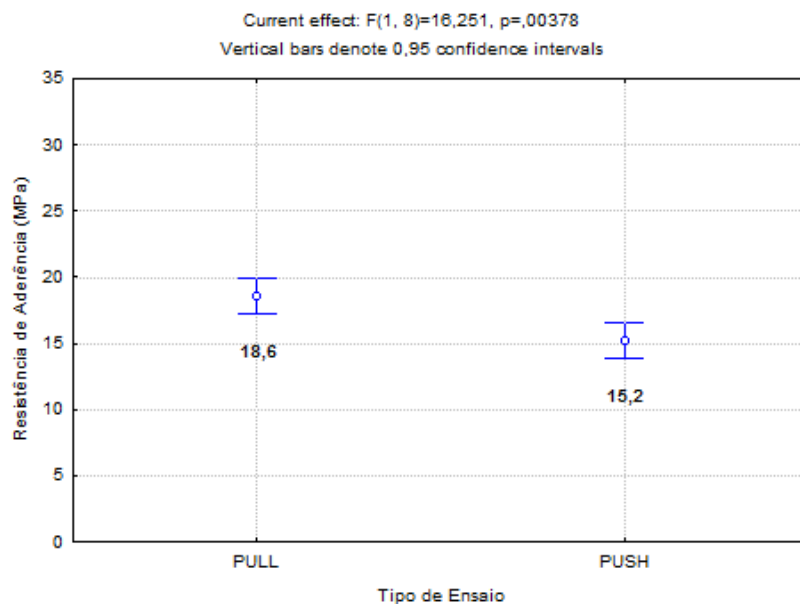
Os resultados da resistência de aderência são referentes aos ensaios de *Pull Out Test* Modificado, para temperatura ambiente, e ao ensaio de *Push Out Test*, para temperatura ambiente, 200, 400 e 600° C (quadro 11), para corpos de prova com barras de aço de 8 mm, sendo referentes a 1ª concretagem.

Quadro 11 – Resultados da resistência de aderência para temperatura ambiente, 200, 400 e 600° C da 1ª concretagem

Armaduras de Aço (Ø 8 mm)								
Identificação		Temperatura Exposição	Data da Concretagem	Data da Ruptura	Resistência de Aderência	Resistência de Aderência Média	Fator de Resistência	Desvio Padrão
					(MPa)	(MPa)		
Pull Out	CP1	AMBIENTE (23°C)	06/03/2013	03/04/2013	19,0	18,6	-	0,88
	CP2				18,5			
	CP3				17,1			
	CP4				19,4			
	CP5				18,9			
Push Out	CP1	AMBIENTE (23°C)	06/03/2013	03/04/2013	15,9	15,2	1,00	1,66
	CP2				14,2			
	CP3				14,9			
	CP4				13,3			
	CP5				17,6			
	CP1	200°C	06/03/2013	03/04/2013	12,5	14,2	0,93	1,97
	CP2				15,3			
	CP3				17,0			
	CP4				12,3			
	CP5				13,6			
	CP1	400°C	06/03/2013	03/04/2013	18,7	15,4	1,02	2,20
	CP2				15,0			
	CP3				13,9			
	CP4				13,1			
	CP5				16,5			
	CP1	600°C	06/03/2013	03/04/2013	10,4	10,8	0,71	2,24
	CP2				14,2			
	CP3				11,6			
	CP4				8,2			
	CP5				9,8			

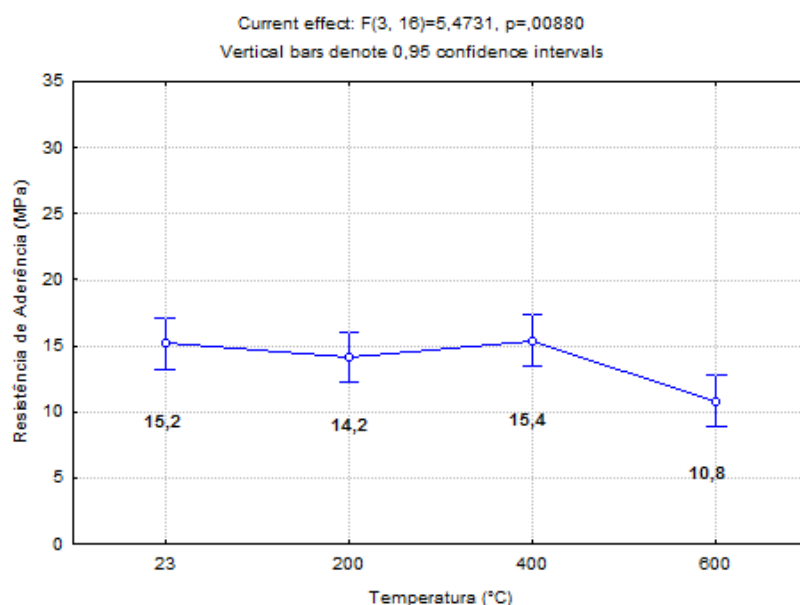
(fonte: elaborado pela autora)

Na análise estatística ANOVA para os ensaios de *Pull Out* Modificado e *Push Out*, analisados para essa classe de resistência à compressão e não sendo expostos à temperatura, se apresentam resultados estatisticamente diferentes, pois o *p-value* é igual a 0,0037 (figura 28), ou seja, menor que 0,05 e indica 95% de confiança do teste.

Figura 28 – Comparação entre os métodos *Pull Out* Modificado e *Push Out*

(fonte: elaborado pela autora)

Pelo método ANOVA, a análise dos resultados obtidos nos ensaios de aderência do método *Push Out Test*, para temperaturas de exposição de 200, 400 e 600° C, além da temperatura ambiente da 1ª concretagem, obteve-se, no geral, o valor de *p-value* igual a 0,0088 (figura 29). Esse valor demonstra que os resultados obtidos são estatisticamente diferentes entre si, e que essas temperaturas influenciam na resistência de aderência.

Figura 29 – Resultados para o ensaio de aderência *Push Out Test* da 1ª concretagem

(fonte: elaborado pela autora)

Analisando os mesmos resultados de forma a verificar a igualdade de apenas duas temperaturas por vez, pelo método de Tukey, chega-se a conclusão que nem todas as resistências de aderência são diferentes entre si, sendo diferente apenas a comparação entre a temperatura ambiente com a temperatura de 600° C (quadro 12). Comparando-se as resistências médias, após a exposição às temperaturas descritas, com a temperatura ambiente, observa-se que para 200° C houve uma redução de 7% na resistência de aderência, para 400° C houve um aumento de 2% e para 600° C tem-se 29% de redução. Por esse aumento de resistência na temperatura de 400°C, optou-se em refazer esses ensaios, em seguida demonstrados.

Quadro 12 – Análise pelo método de Tukey, *Push Out Test* da 1ª concretagem

Temperatura	Resistência Média	<i>p-value</i>			
(°C)	(MPa)	Ambiente	200	400	600
Ambiente	15,2		0,851635	0,997985	0,017211
200	14,2	0,851635		0,761614	0,081664
400	15,4	0,997985	0,761614		0,012059
600	10,8	0,017211	0,081664	0,012059	

(fonte: elaborado pela autora)

Da mesma forma que os ensaios de compressão, os ensaios de aderência foram refeitos, conforme mostra os resultados do quadro 13. Os corpos de prova de aderência tiveram um comportamento semelhante aos de compressão, obtendo perda significativa de resistência a 200°C, porém a 400°C estatisticamente não houve variação significativa. Esse fato pode estar vinculado ao procedimento de exposição à temperatura adotada.

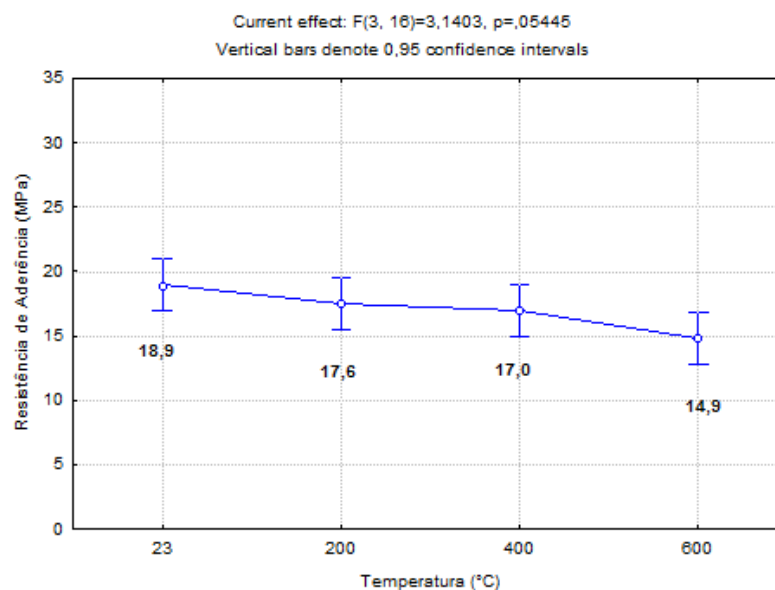
Quadro 13 – Resultados da resistência de aderência para temperatura ambiente, 200, 400 e 600° C da 3ª concretagem

Armaduras de Aço (Ø 8 mm)								
Identificação		Temperatura Exposição	Data da Concretagem	Data da Ruptura	Resistência de Aderência	Resistência de Aderência Média	Fator de resistência	Desvio Padrão
					(MPa)	(MPa)	(%)	
Push Out	CP1	AMBIENTE (23°C)	16/05/2013	13/05/2013	20,7	18,9	1,00	1,94
	CP2				18,3			
	CP3				21,2			
	CP4				16,9			
	CP5				17,5			
	CP1	200°C	16/05/2013	14/05/2013	17,1	17,6	0,93	1,86
	CP2				20,2			
	CP3				18,0			
	CP4				15,0			
	CP5				17,4			
	CP1	400°C	16/05/2013	14/05/2013	19,7	17,0	0,90	1,89
	CP2				17,6			
	CP3				16,2			
	CP4				14,6			
	CP5				16,7			
	CP1	600°C	16/05/2013	13/05/2013	12,0	14,9	0,79	2,72
	CP2				13,1			
	CP3				17,1			
	CP4				18,3			
	CP5				13,8			

(fonte: elaborado pela autora)

Analisando a influência da variação da temperatura na resistência de aderência, para os corpos de prova de *Push Out Test* da 3ª concretagem, obteve-se no geral o valor de *p-value* igual a 0,05445 (figura 30). Por ser um valor muito próximo do 0,05, pode-se dizer que esses valores são ligeiramente iguais entre si, porém, é necessário analisar pelo método de Tukey.

Figura 30 – Resultados para o ensaio de aderência *Push Out Test* da 3ª concretagem



(fonte: elaborado pela autora)

Analisando os mesmos resultados pelo método de Tukey, observa-se que as resistências de aderência não são todas estatisticamente iguais, sendo que, a comparação entre a temperatura ambiente e 600° C mostra que a resistência de aderência é diferente (quadro 14). Assim como os resultados obtidos na primeira concretagem, as resistências de aderência diminuiram. Conforme a temperatura de exposição observa-se uma redução de 7, 10 e 21%, para as temperaturas de 200, 400 e 600°C, respectivamente.

Quadro 14 – Análise pelo método de Tukey, *Push Out Test* da 3ª concretagem

Temperatura	Resistência Média	<i>p-value</i>			
(°C)	(MPa)	Ambiente	200	400	600
Ambiente	18,9		0,746870	0,482305	0,037463
200	17,6	0,746870		0,968259	0,227912
400	17,0	0,482305	0,968259		0,432641
600	14,9	0,037463	0,227912	0,432641	

(fonte: elaborado pela autora)

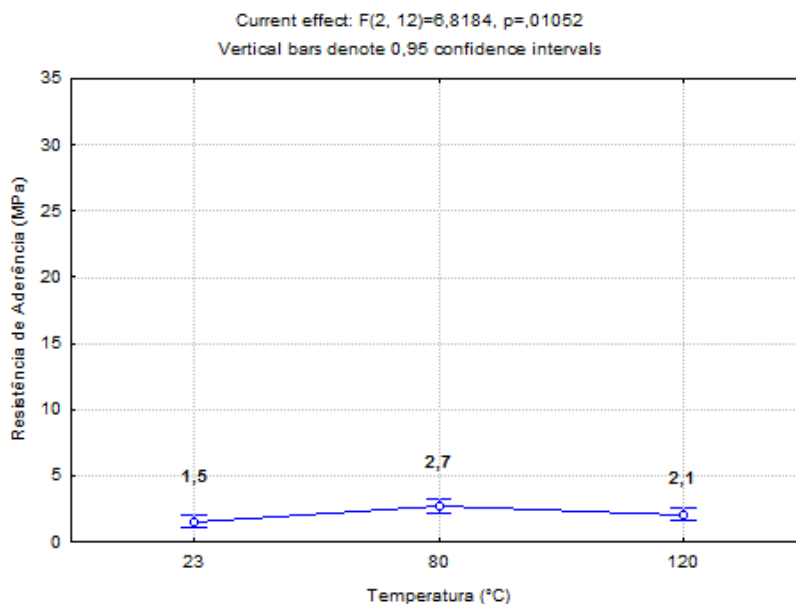
No quadro 15 são apresentados os resultados para o ensaio com corpos de prova armados com GFRP e aço de 12,5 mm de diâmetro, sendo apresentados com as respectivas temperaturas de exposição. Para a resistência de aderência, os resultados apresentam aumento da resistência, tanto para 80° C, como para 120°C, sendo respectivamente, 78 e 36% de aumento.

Quadro 15 – Resultados da resistência de aderência para temperatura ambiente, 80 e 120° C da 2ª concretagem

Armaduras de Aço e GFRP (Ø 12,5 mm)								
Identificação		Temperatura Exposição	Data da Concretagem	Data da Ruptura	Resistência de Aderência	Resistência de Aderência Média	Fator de Resistência	Desvio Padrão
					(MPa)	(MPa)		
AÇO	CP1	AMBIENTE (23°C)	12/03/2013	09/04/2013	24,2	22,3	-	1,62
	CP2				21,8			
	CP3				20,0			
	CP4				23,4			
	CP5				21,9			
GFRP	CP1	AMBIENTE (23°C)	12/03/2013	09/04/2013	1,1	1,5	1,00	0,26
	CP2				1,5			
	CP3				1,6			
	CP4				1,6			
	CP5				1,8			
	CP1	80°	12/03/2013	10/04/2013	2,1	2,7	1,78	0,72
	CP2				1,9			
	CP3				3,3			
	CP4				2,9			
	CP5				3,4			
	CP1	120°	12/03/2013	10/04/2013	2,4	2,1	1,36	0,44
	CP2				2,5			
	CP3				1,4			
	CP4				1,9			
	CP5				2,0			

(fonte: elaborado pela autora)

Na análise dos resultados obtidos nos ensaios de aderência pelo método *Pull Out Test*, para temperaturas de exposição de 80, 120°C, além da temperatura ambiente, com barra de GFRP, o valor encontrado do *p-value* é igual a 0,01052. Esse valor demonstra que, no geral, os resultados das resistências entre os diferentes níveis de temperatura são diferentes entre si, conforme figura 31.

Figura 31 – Resultados para o ensaio de aderência *Pull Out Test*

(fonte: elaborado pela autora)

A análise pelo método de Tukey, destes resultados, apresentou-se de forma diferente, mostrando que apenas quando comparado à temperatura ambiente com 80°C, o resultado é estatisticamente diferente (quadro 16). Ainda por esse método, pode-se avaliar a variação percentual do desempenho mecânico, para a temperatura de 80°C observa-se um aumento de 78% na resistência de aderência, e para 120°C observa-se um aumento de 36%.

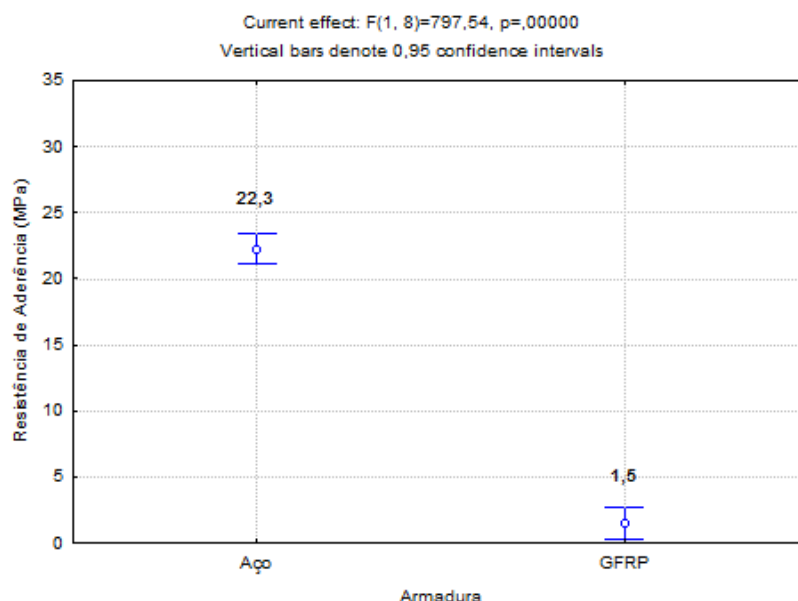
Quadro 16 – Análise pelo método de Tukey, *Pull Out Test*, 2ª concretagem

Temperatura (°C)	Resistência Média (MPa)	p-value		
		Ambiente	80	120
Ambiente	1,5		0,008180	0,242975
80	2,7	0,008180		0,158870
120	2,1	0,242975	0,158870	

(fonte: elaborado pela autora)

Na 2ª concretagem, foram moldados corpos de prova com barra de aço nervurada de 12,5 mm, sendo estas ensaiadas pelo *Pull Out Test*. A figura 32 ilustra a média da resistência de aderência da barra de aço e de GFRP, sendo observado que a resistência de aderência, para barra nervurada de aço, é significativamente maior que a de GFRP sem tratamento superficial, esta sendo cerca de 10% da resistência de aderência para barra de aço.

Figura 32 – Resistência de aderência média pelo ensaio de *Pull Out Test*, para armadura de aço e GFRP



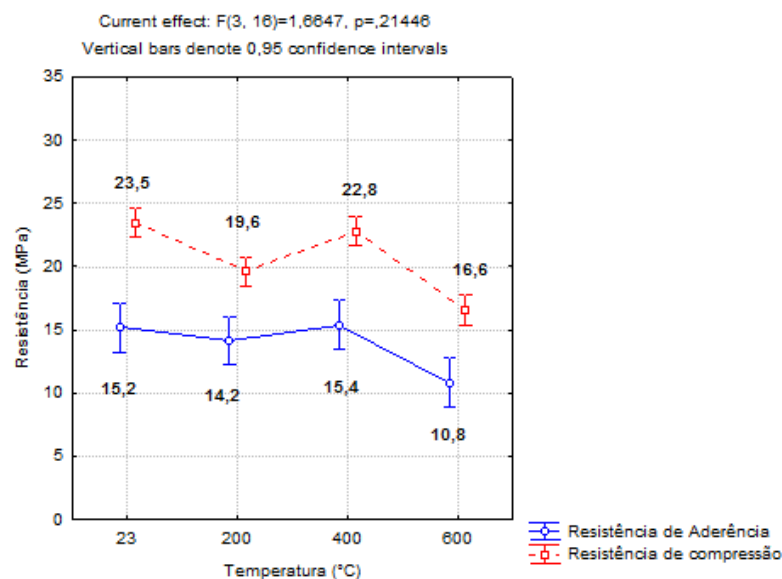
(fonte: elaborado pela autora)

Além das análises pelo método das variâncias e Tukey, realizou-se uma análise comparativa com os resultados experimentais e a equação de tensão de aderência proposta por Caetano (2008, p. 112-113). Essa equação analisa a influencia da temperatura, tipo de armadura e ensaio, além da influência da corrosão na armadura, no apêndice C será demonstrado as análises em função da temperatura de exposição entre resultados teóricos e experimentais.

6.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DE ADERÊNCIA

Analizando comparativamente os resultados dos ensaios de resistência à compressão e de resistência de aderência para a 1ª concretagem, observa-se que o comportamento do concreto simples e do concreto armado é muito parecido, quando expostos aos níveis de temperatura de 200, 400° e 600° C (figura 33). Para as temperaturas de 200, 400 e 600° C, a resistência à compressão diminuiu respectivamente 16, 3 e 29%. Para a resistência de aderência, as reduções foram de 7% (200° C), 29% (600° C), porém para 400°C houve um pequeno aumento de resistência, sendo de 2%.

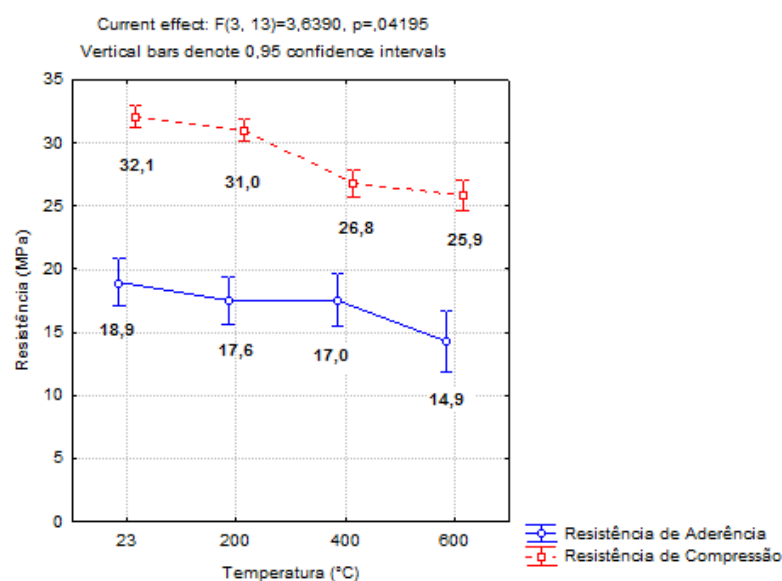
Figura 33 – Análise comparativa entre resistência à compressão e de aderência da 1ª concretagem



(fonte: elaborado pela autora)

Analisando comparativamente os resultados dos ensaios de resistência à compressão e de resistência de aderência para a 3ª concretagem, observa-se que o comportamento do concreto simples e do concreto armado diferenciou-se na temperatura de 400°C, enquanto os níveis de temperatura de 200 e 600°C se comportaram de maneira similar (figura 34). Para as temperaturas de 200, 400 e 600°C, a resistência à compressão diminuiu respectivamente 3, 19 e 17% e para a resistência de aderência as reduções foram de 7, 10 e 21% respectivamente.

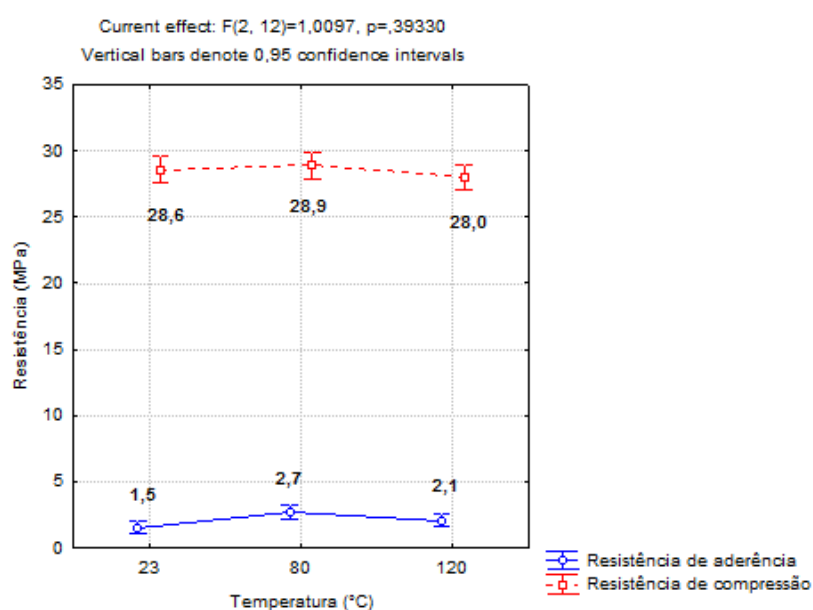
Figura 34 – Análise comparativa entre resistência à compressão e de aderência da 3ª concretagem



(fonte: elaborado pela autora)

Analisando comparativamente os resultados dos ensaios de resistência à compressão e de resistência de aderência para a 2ª concretagem, observa-se que o comportamento do concreto simples e do concreto armado diferiu nas temperaturas de 80 e 120° C (figura 35). Para as temperaturas de 80 e 120° C, a resistência à compressão não sofreu variação significativa, já para a resistência de aderência, houve significativo aumento sendo respectivamente de 76 e 38%.

Figura 35 – Análise comparativa entre resistência à compressão e de aderência da 2ª concretagem



(fonte: elaborado pela autora)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados obtidos neste trabalho, através dos ensaios de resistência de aderência, apresentou variação do desempenho da resistência de aderência quando os corpos de prova foram submetidos a níveis de temperatura diferentes da temperatura ambiente. Além disso, os métodos de ensaio de resistência de aderência *Pull Out Test Modificado* e *Push Out Test* mostraram-se compatíveis ao *Pull Out Test*.

Os corpos de prova com barras de aço de 8 mm de diâmetro e expostos à temperaturas de 200, 400 e 600° C, apresentaram, na 1ª concretagem, queda esperada da resistência de aderência para a temperatura de 200°C. Para a temperatura de 400°C, houve um aumento de desempenho quando comparado com a temperatura ambiente. Já para a temperatura de 600°C houve uma queda de 29% na resistência, sendo menor que o corriqueiramente encontrado na literatura, que é de 50%, conforme dados de CAETANO (2008, p. 114-115). Esses valores podem ter sido influenciados pelo método de resfriamento dos corpos, por isso, em seguida são apresentadas as conclusões para a 3ª concretagem, a qual é a repetição desses ensaios. Os corpos de prova de controle, ensaiados a compressão, tiveram um comportamento muito similar aos corpos de prova ensaiados para a resistência de aderência.

Na 3ª concretagem repetiram-se os ensaios de *Push Out Test* e compressão, para as temperaturas de 200, 400 e 600°C e temperatura ambiente (referência). Para a resistência de aderência houve a diminuição de temperatura em todas as resistências, porém para a temperatura de 600°C a diminuição foi de 21%, sendo esta menor que a esperada. Já para compressão a 400°C houve a maior depreciação na resistência, diferentemente do esperado, já que a maior depreciação era esperada para 600°C.

Os corpos de prova, armados com GFRP de 12,5 mm de diâmetro, da 2ª concretagem apresentaram variação na sua resistência de aderência, quando exposto a temperaturas de 80 e 120° C. Para a temperatura de 80° C houve um aumento médio de aproximadamente 78% da resistência de aderência, enquanto que para 120° C esse aumento foi de apenas 36%. Para os corpos de prova de controle, ensaiados à compressão, não houve significativa variação na resistência à compressão.

O procedimento de exposição à altas temperaturas influencia tanto na resistência à compressão como na resistência de aderência, sendo evidenciado pelas diferenças na 1ª e 3ª concretagens. O procedimento de resfriamento dos corpos de prova, assim como, o tempo de permanência dos corpos de prova no interior do forno influenciam significativamente na resistência final, tanto para a aderência como para compressão.

REFERÊNCIAS

ACHILLIDES, Z.; PILAKOUTAS, K. Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions. **Journal of Composites for Construction**, v. 8, n. 2, 2004.

Paginação irregular. Disponível em:

<http://eprints.whiterose.ac.uk/42820/2/WRRO_42820.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2012.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – **ACI 440R**. State of art report on fiber reinforced plastic (FRP) reinforcement for concrete structures. Michigan, p. 1-68, 1996.

_____. **ACI 408R**. Bond and development of stright reinforcing bars in tension. Michigan. p. 1-49, 2003.

_____. **ACI 440.3R**. Guide testm for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures. Michigan, p. 1-40, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C234**: Standard test method for comparing concretes on the basis of the bond developed with reinforced steel. Philadelphia, p. 151-157, 1991.

_____. **ASTM A9444**: standard test method for comparing bond strength of steel reinforcing bars to concrete using beam-end specimens. Philadelphia, p. 1-4, 2005.

AMETRANO, D.; HOSSAIN, K. M. A.; LACHEMI, M.; MAK, C. Bond strength and development length of GFRP bars in ultra-high performance concrete. **Materials Engineering and Research Office Ontario Ministry of Transportation**. Ontario, p. 1-89, 2011. Disponível em:

<<http://www.library.mto.gov.on.ca/webopac/getattachment.asp?passport=aaf82ebd-4e37-4f1e-985b-edd305614396&TemplateGUID=c36ec88e-067b-45b1-bbc9-cd42fe489177&RecordGUID=a7b1a85f-4c3a-4f80-9951-d2270d9d3cae&FieldGUID=eea74945-da4f-422e-800e-a53392110279&AttachmentIndex=0>>. Acesso em: 14 nov. 2012.

ARCELOR MITTAL AÇOS LONGOS. **Processo de fabricação Belgo 50 e Belgo 60**.

Disponível em: <https://www.belgo.com.br/solucoes/artigos/pdf/belgo_50_60.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 7480**: armaduras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. Rio de Janeiro, 1996a.

_____. **NBR 12665**: concreto - preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 1996b.

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

_____. **NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

BARBOSA, M. P.; DAL BOSCO, V. I.; SILVA, B. V.; SILVA FILHO, L. C. P. Comparativo experimental entre os métodos de ensaios pull-out e push-out para determinação da tensão de aderência aço-concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. **Anais...**São Paulo: Ibracon, 2012. p. 1-11. 1 CD.¹³

CABRÉ, F. M., MESEGUER, A. G., MONTOLYA, P. J. **Hormigón armado**. 14. ed. (4. tiragem). Barcelona: Editorial Gustavo Gili SL, 2000 (tiragem 2007).

CAETANO, L. F. **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, P. F. Armaduras de FRP: avaliando o módulo de elasticidade não destrutivamente. **Polímeros: ciência e tecnologia**, São Carlos, v.7, n. 2, p. 58-63, abr.-jun., 1997.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON; RILEM/ CEB/ FIP. Bond test for reinforcing steel: 2-Pull-out test. p. [1-5]. Suíça, 1983.

COUTO, I. A. **Análise teórica e experimental do comportamento da aderência do concreto e armaduras de fibra de vidro impregnada por polímero**. 2007. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 1. ed. (7. tiragem). São Paulo: Pini, 1995 (tiragem 2007).

HASSAN, T. K.; RIZKALLA, S. H. Bond mechanism of near-surface-mounted fiber-reinforced polymer bars for flexural strengthening of concrete structures **ACI Structural Journal**, Title n. 101-S82, p. 830-839, Nov.-Dec., 2004. Disponível em: <http://www.ce.ncsu.edu/srizkal/linked_files/Bond_Mechanism_of_Near-Surface-Mounted_Fiber-Reinforced_Polymer_Bars.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834-1**: Fire resistance tests – elements of building construction. Suíça, 1999.

KATSUKI, F.; MISRA, S.; MUTSUYOSHI, H.; UOMOTO, T. Use of fiber reinforced polymer composites as reinforcing material for concrete. **Journal of Materials in Civil**

¹³ No CD do 54º Congresso Brasileiro do Concreto esse artigo aparece como sendo o artigo 54CBC0738.

Engineering, v. 14, n. 3, May-June 2002. Disponível em:
[http://link.periodicos.capes.gov.br/sfxlcl41?ctx_ver=Z39.88-2004&ctx_enc=info:ofi/enc:UTF-8&ctx_tim=2012-12-11T18%3A07%3A13IST&url_ver=Z39.88-2004&url_ctx_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:ctx&rft_id=info:sid/primo.exlibrisgroup.com:primo3-Article-gale_ofa&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:&rft.genre=article&rft.atitle=Use%20of%20fiber%20reinforced%20polymer%20composites%20as%20reinforcing%20material%20for%20concrete.\(Abstract\)&rft.jtitle=Journal%20of%20Materials%20in%20Civil%20Engineering&rft.btitle=&rft.aulast=&rft.auinit=&rft.auinit1=&rft.auinitm=&rft.ausuffix=&rft.au=Uomoto%2C%20Taketo&rft.aucorp=&rft.date=20020501&rft.volume=14&rft.issue=3&rft.part=&rft.quarter=&rft.ssn=&rft.page=191&rft.epage=&rft.pages=&rft.artnum=&rft.issn=0899-1561&rft.eissn=&rft.isbn=&rft.sici=&rft.coden=&rft_id=info:doi/&rft.object_id=&svc_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:sch_svc&rft.eisbn=&rft_dat=%3Cgale_ofa%3E86472704%3C/gale_ofa%3E&rft_id=info:oai/&svc.fulltext=yes](http://link.periodicos.capes.gov.br/sfxlcl41?ctx_ver=Z39.88-2004&ctx_enc=info:ofi/enc:UTF-8&ctx_tim=2012-12-11T18%3A07%3A13IST&url_ver=Z39.88-2004&url_ctx_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:ctx&rft_id=info:sid/primo.exlibrisgroup.com:primo3-Article-gale_ofa&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:&rft.genre=article&rft.atitle=Use%20of%20fiber%20reinforced%20polymer%20composites%20as%20reinforcing%20material%20for%20concrete.(Abstract)&rft.jtitle=Journal%20of%20Materials%20in%20Civil%20Engineering&rft.btitle=&rft.aulast=&rft.auinit=&rft.auinit1=&rft.auinitm=&rft.ausuffix=&rft.au=Uomoto%2C%20Taketo&rft.aucorp=&rft.date=20020501&rft.volume=14&rft.issue=3&rft.part=&rft.quarter=&rft.ssn=&rft.page=191&rft.epage=&rft.pages=&rft.artnum=&rft.issn=0899-1561&rft.eissn=&rft.isbn=&rft.sici=&rft.coden=&rft_id=info:doi/&rft.object_id=&svc_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:sch_svc&rft.eisbn=&rft_dat=%3Cgale_ofa%3E86472704%3C/gale_ofa%3E&rft_id=info:oai/&svc.fulltext=yes). Acesso em: 30 out. 2012.

PEREIRA, R. Ajuste da composição química do aço CA-50 em usina siderúrgica semi-integrada. 2009. 36 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Tecnologia em Processos Metalúrgicos) – Curso de Graduação em Tecnologia em Processos Metalúrgicos, Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em:
www.uezo.rj.gov.br/tccs/capi/RaulPereira.pdf. Acesso em: 25 nov. 2012.

QUAYYUM, S. Bond behaviour of fibre reinforced polymer (frp) rebars in concrete. 2010. 177 f. Tesis (Master of Applied Science) – The College of Graduate Studies (Civil Engineering), The University of British Columbia, Okanagan, 2010. Disponível em:
https://circle.ubc.ca/bitstream/handle/2429/26242/ubc_2010_fall_quayyum_shahriar.pdf?sequence=1. Acesso em: 28 mar. 2013.

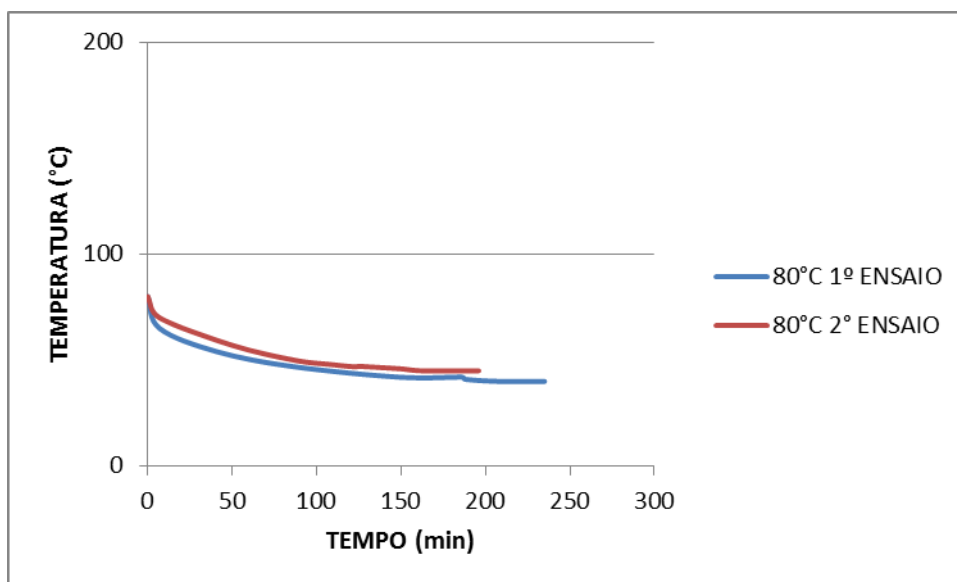
RIBEIRO, S. E. C. Análise da confiabilidade de vigas de concreto armado com plástico reforçado por fibras. 2009. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2009.

SILVA, B. V. Investigação do potencial dos ensaios APULOT e *pull out* para estimativa da resistência à compressão do concreto. 2010. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2010.

APÊNDICE A – Curva de resfriamento para temperatura de 80 e 120°C

Nesse item serão demonstradas as curvas de resfriamento para as temperaturas de 80 e 120°C. Para essas temperaturas, obtiveram-se 2 curvas para cada patamar de exposição devido a limitação geométrica do forno. No primeiro ensaio de temperatura, foram colocados 3 corpos de prova de *Pull Out Test* e 3 de controle (resistência à compressão). Após o ciclo desse ensaio, foram colocados no forno os 2 corpos de prova restantes de *Pull Out Test* e de controle finalizando os ensaios de temperatura a 80°C. Na figura A1, observa-se que, para os primeiros 50 minutos a temperatura diminui mais rapidamente, chegando até um patamar onde a temperatura tende a estabilizar.

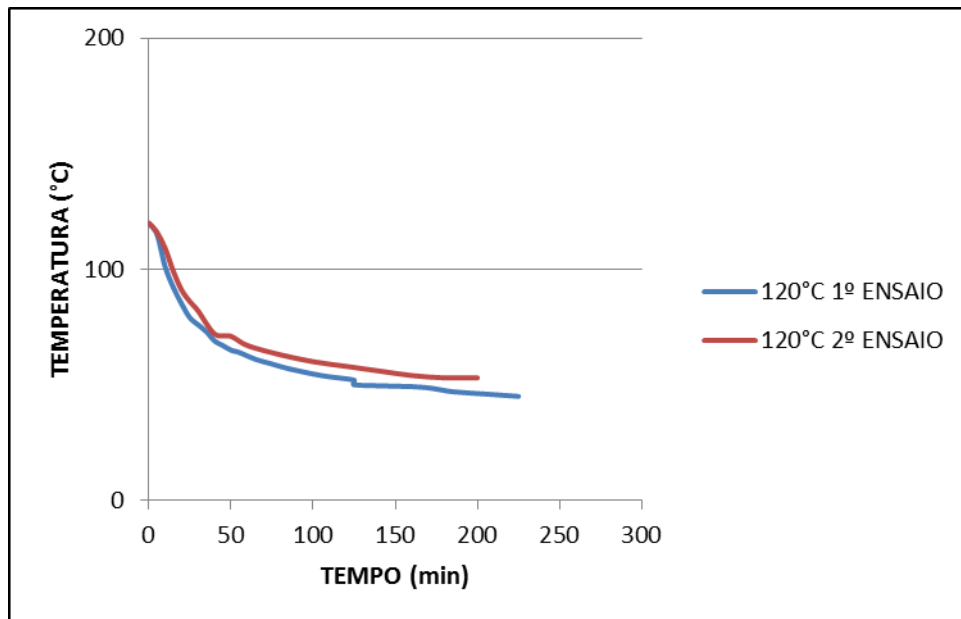
Figura A1 – Curva de resfriamento 80°C



(fonte: elaborado pela autora)

Para os ensaios com temperatura de 120°C, o procedimento de ensaio a temperatura se manteve igual ao de 80°C, alterando apenas a temperatura de exposição. A figura A2 abaixo mostra que para os 50 primeiros minutos a temperatura diminui rapidamente, diminuindo cerca de 50% de sua temperatura. Observa-se que após os 100 minutos a diminuição da temperatura em relação ao tempo era pequena, se aproximando de um patamar de estabilização, assim como para a temperatura de 80°C.

Figura A2 – Curva de resfriamento 120°C



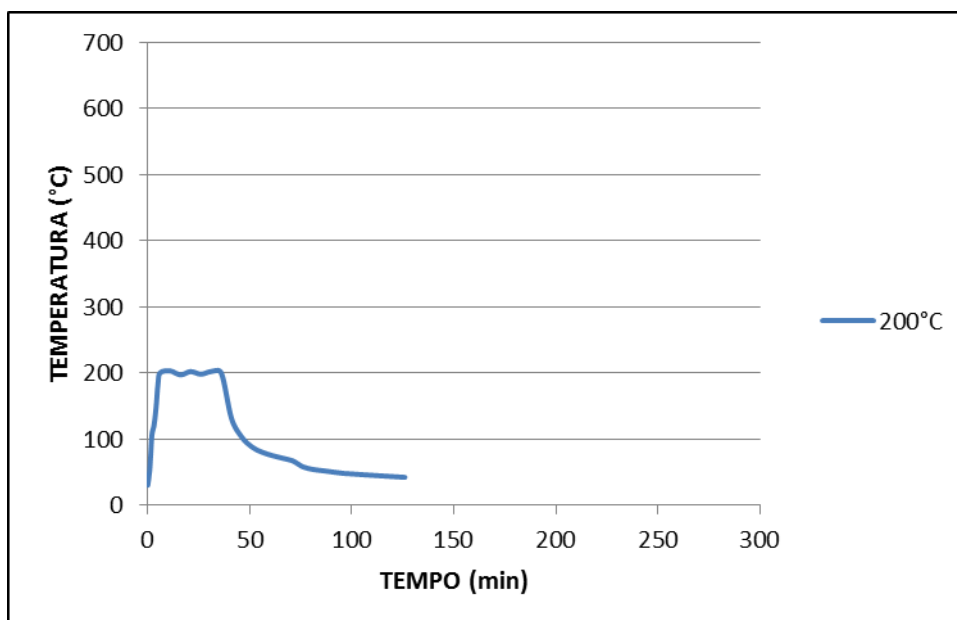
(fonte: elaborado pela autora)

**APÊNDICE B – Curva de aquecimento e resfriamento para temperaturas
de 200, 400 e 600°C**

Nesse apêndice serão demonstradas as curvas de aquecimento, patamar e resfriamento para as temperaturas de aquecimento para 200, 400 e 600°C. Para essas temperaturas, obteve-se 1 curva para cada temperatura, sendo esta composta do trecho inicial, pelo tempo de aquecimento (variável em função da temperatura de exposição), em seguida tem-se o tempo de patamar (30 minutos) e por fim, tem-se o trecho de resfriamento. As leituras de temperatura foram realizadas por minuto no trecho de aquecimento e a partir do tempo no patamar as leituras foram registradas a cada 5 minutos.

Para o ensaio de exposição a 200 °C, foram colocados 5 corpos de prova de *Push Out Test* e 5 de controle (resistência à compressão). No gráfico abaixo, observa-se que o aquecimento dos corpos de prova é rápido, sendo de 7 minutos para 200°C, após essa fase é iniciado o tempo no patamar, ficando por 30 minutos, sendo este mantido na temperatura desejada. Após o tempo no patamar, inicia-se o resfriamento dos corpos de prova, que ocorre de maneira mais abrupta nos primeiros minutos, diminuindo cerca de 50% em relação à temperatura do patamar, no tempo de 50 minutos (figura B1). Assim como os ensaios de 80 e 120°C, para essa temperatura, também é verificado uma temperatura de estabilização que é próxima a 50°C.

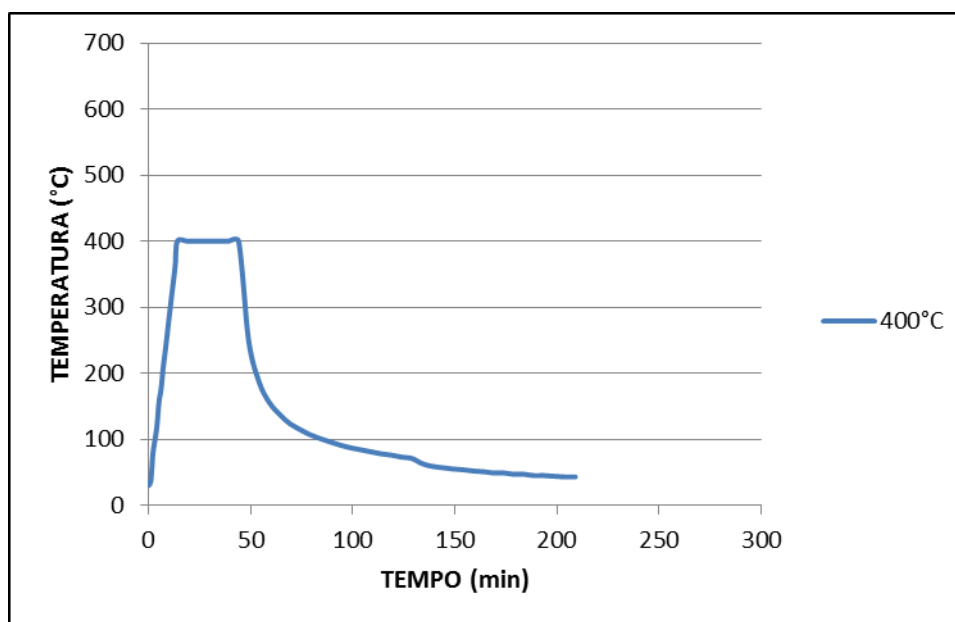
Figura B1 – Curva de aquecimento, patamar e resfriamento para 200°C



(fonte: elaborado pela autora)

Da mesma forma que para o ensaio de exposição a 200°C, para os ensaios a 400 °C, foram colocados 5 corpos de prova de *Push Out Test* e 5 de controle (resistência à compressão). No gráfico abaixo, observa-se que o aquecimento dos corpos de prova é rápido, sendo de 14 minutos para 400°C, após essa fase é iniciado o tempo no patamar, ficando por 30 minutos, sendo este mantido na temperatura desejada. Após o tempo no patamar, inicia-se o resfriamento dos corpos de prova, que ocorre de maneira mais abrupta nos primeiros minutos, sendo essa diminuição mais rápida que para a temperatura de 200°C, diminuindo cerca de 65% em relação à temperatura do patamar, para o tempo de 50 minutos. A partir do minuto 150 do gráfico, observa-se que a diminuição é pequena no intervalo de tempo, ou seja, a temperatura tende a se estabilizar (figura B2).

Figura B2 – Curva de aquecimento, patamar e resfriamento para 400°C



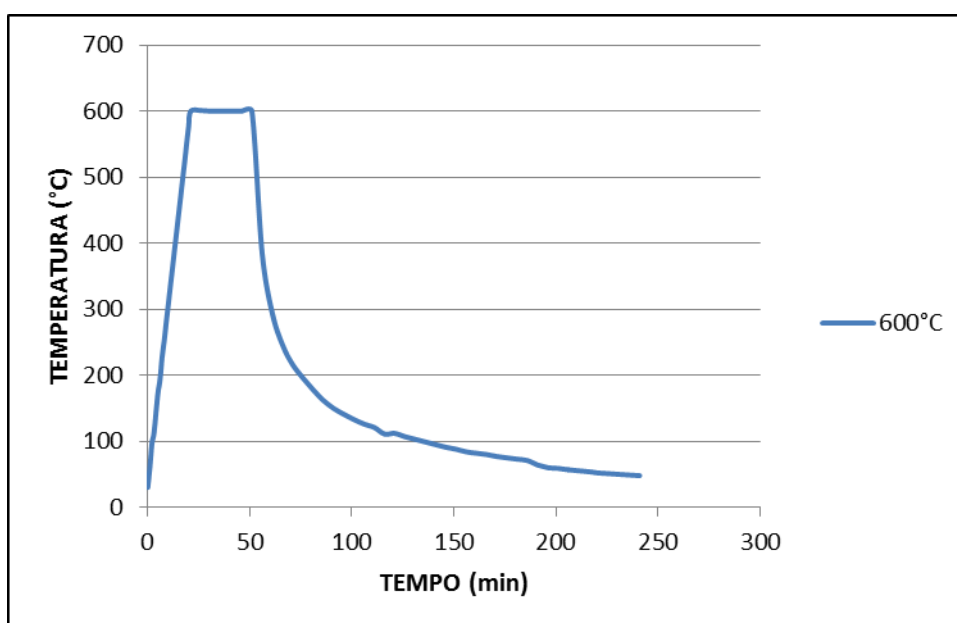
(fonte: elaborado pela autora)

Assim como os ensaios anteriormente descritos, para os ensaios a 600 °C, foram colocados 5 corpos de prova de *Push Out Test* e 5 de controle (resistência à compressão). No gráfico abaixo, observa-se que o aquecimento dos corpos de prova é rápido, sendo de 21 minutos para 600°C, após essa fase é iniciado o tempo no patamar, ficando por 30 minutos, sendo este mantido na temperatura desejada. Após o tempo no patamar, inicia-se o resfriamento dos corpos de prova, que ocorre de maneira mais abrupta nos primeiros minutos, da mesma maneira para os ensaios de 200 e 400°C, sendo essa diminuição mais rápida que para as temperaturas de 200 e 400°C, diminuindo cerca de 80% em relação à temperatura do patamar,

para o tempo de 100 minutos. A partir do minuto 200 do gráfico, observa-se que a diminuição é pequena no intervalo de tempo, ou seja, a temperatura tende a se estabilizar.

Analisando comparativamente o comportamento dos gráficos de 200, 400 e 600°C, observa-se que quanto maior a temperatura de exposição, maior é a diminuição de temperatura nos primeiros 30 minutos da curva de resfriamento. Além disso, para essas temperaturas estabilizarem a um patamar de temperatura de 50°C aproximadamente, o tempo também é maior (figura B3).

Figura B3 – Curva de aquecimento, patamar e resfriamento para 600°C



(fonte: elaborado pela autora)

APÊNDICE C – Análise comparativa teórico-experimental para tensão de aderência

Nesse apêndice será realizada uma análise comparativa entre os resultados experimentais e teóricos, segundo modelo proposto por Caetano (2008, p. 112-113). Este modelo matemático considera alguns parâmetros que degradam o compósito, estes são a temperatura e grau de corrosão. Além desses parâmetros, o modelo é função da bitola da armadura utilizada, tipo de ensaio utilizado para a verificação da resistência de aderência, tipo de nervura da armadura e resistência característica do concreto, conforme fórmula C1. Os termos codificados são adaptações realizadas para a correta aplicação da fórmula.

$$\tau_u = 10,34 \times \frac{1}{En^{0,5}} \times Ner^{0,25} \times fc_c^{0,5} \times \frac{1}{Te_c^{fc_c^{0,5}}} \times \frac{1}{\emptyset_c^{fc_c^{0,5}}} \times \left(\frac{0,3 + GC_c}{0,3 + GC_c^{1,4}} \right) \quad (\text{fórmula C1})$$

$$\emptyset_c = \frac{\emptyset}{16} \quad (\text{fórmula C2})$$

$$fc_c = \frac{fc}{30} \quad (\text{fórmula C3})$$

$$GC_c = \frac{GC}{2} \quad (\text{fórmula C4})$$

$$Te_c = 1, \text{ para } Te \leq 350^\circ C \quad (\text{fórmula C5})$$

$$Te_c = \frac{Te - 125}{225}, \text{ para } Te > 350^\circ C \quad (\text{fórmula C6})$$

Onde:

τ_u = resistência de aderência, em MPa;

En = tipo de ensaio (0,5 para arrancamento simples; 1,5 para arrancamento excêntrico);

Ner = tipo de nervura (0,5 para tipo “N”; 1,5 para tipo “n”);

f_{c_c} = resistência do concreto codificada, em MPa;

f_c = resistência do concreto, em MPa;

Te_c = temperatura de exposição codificada, em °C;

Te = temperatura de exposição, em °C;

\emptyset_c = diâmetro da armadura codificada, em mm;

\emptyset = diâmetro da armadura, em mm;

GC_c = grau de corrosão codificado, em porcentagem;

GC = grau de corrosão, em porcentagem.

Para a aplicação da fórmula alguns parâmetros foram adotados, o parâmetro para ensaio de aderência utilizado foi 0,5, embora o ensaio de *Push Out Test* não seja arrancamento simples (*Pull Out Test*), utilizou-se este o mesmo fator para verificar a capacidade de estimar da equação. O tipo de nervura utilizada foi a tipo “N” com diâmetro de 8 mm, não utilizou-se grau de corrosão para estes procedimentos, sendo considerado 0%. Após a aplicação destes parâmetros, obtiveram-se resultados muito próximos aos resultados obtidos nos ensaios experimentais, conforme figura C1.

Figura C1 – Resultados teórico-experimental para resistência de aderência

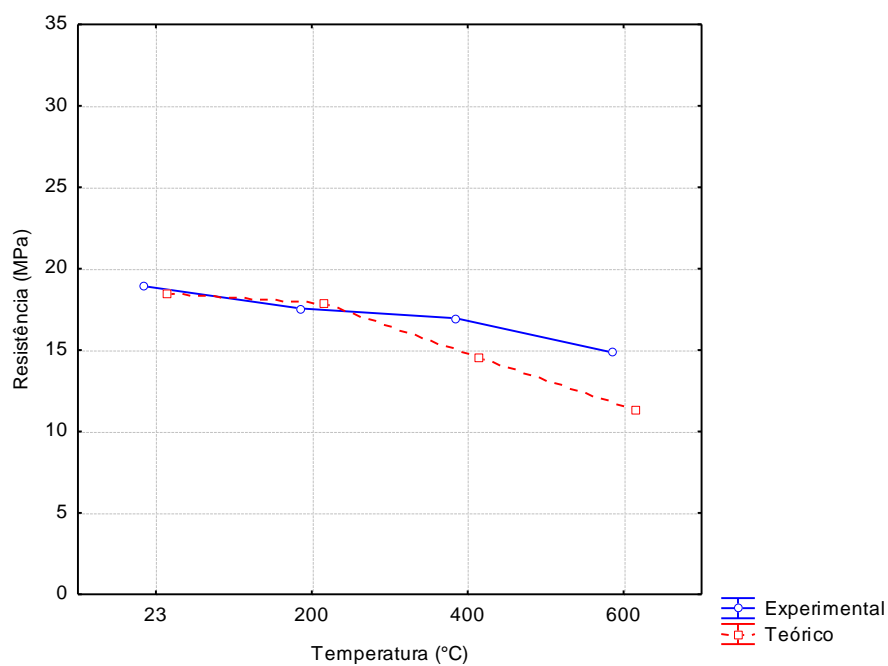
Temperatura (°C)	Resistência de Aderência (MPa)	
	Experimental	Teórico
23	18,9	18,4
200	17,6	17,9
400	17,0	14,5
600	14,9	11,3

(fonte: elaborado pela autora)

Analisando os resultados obtidos experimentalmente com os teóricos, pelo método de variância – ANOVA do software STATISTICA 7.0, observa-se na figura C2 que as curvas não apresentam diferenças significativas, sendo que a curva experimental obteve resultados superiores que a curva teórica nas temperaturas ambiente, 400 e 600°C, apenas na

temperatura de 200°C houve uma diminuição. Para minimizar essas diferenças entre teórico e experimental, além de analisar melhor o parâmetro de tipo de ensaio, seria necessário a análise de mais dados, para ajustar os coeficientes da fórmula proposta.

Figura C2 – Curva de teórico-experimental para resistência de aderência



(fonte: elaborado pela autora)