

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA**

**AVALIAÇÃO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA NITI-CONCRETO PARA
APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

WELINTON ROSA DA SILVA

ORIENTADORA: Dr^a Palloma Vieira Muterlle

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA
ENGENHARIA**

**PUBLICAÇÃO: FGA.DM – 057A/2018
BRASÍLIA/DF: MARÇO/2018**

I

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA**

**AVALIAÇÃO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA NITI-CONCRETO PARA
APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

WELINTON ROSA DA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA DA FACULDADE GAMA E FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA.

ORIENTADORA: Dr^a PALLOMA VIEIRA MUTERLLE

BRASÍLIA - DF

2018

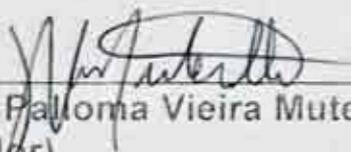
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA.

AVALIAÇÃO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA NiTi CONCRETO
PARA APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

WELINTON ROSA DA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA DA FACULDADE GAMA E FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA.

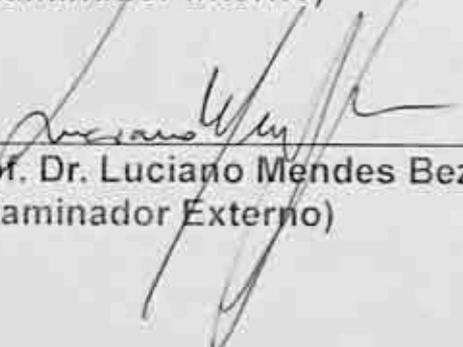
APROVADA POR:



Prof.ª Dr.ª Palloma Vieira Muterlle
(Orientador)



Prof. Dr. Jorge Luiz de Almeida Ferreira
(Examinador Interno)



Prof. Dr. Luciano Mendes Bezerra
(Examinador Externo)

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, WELINTON ROSA DA

Avaliação da tensão de aderência NiTi-Concreto para aplicações na Construção Civil, [Distrito Federal] 2018.

Nº. 86.p. 210 x 297 mm (FGA/FT/UnB, Mestre, Integridade de Materiais da Engenharia, 2018).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade UnB Gama. Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia.

1. Aderência

2. NiTi-graute

3. NiTi-CAR

4. Ensaio de Arrancamento

I. FGA/FT/UnB

II. Mestre

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, W. R. (2018). Avaliação da tensão de aderência NiTi-Concreto para Aplicações na Construção Civil. Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Integridade da Engenharia, Publicação 057A/2018, Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF, nº.86p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Welinton Rosa da Silva

TÍTULO: Avaliação da tensão de aderência NiTi-Concreto para aplicações na Construção Civil

GRAU: Mestre ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

WELINTON ROSA DA SILVA

Rua 27 QD 05 LT 01 – VALE DO SOL.

75.085-709. Anápolis, GO – Brasil.

welinton3d@hotmail.com

*A minha amada esposa Monise Mara e
minha filha Clarice Rosa.*

AGRADECIMENTOS

À Deus por tudo que tens feito e por tudo o que vais fazer, por tuas promessas e tudo o que És, eu quero te agradecer por todo o meu ser.

À minha orientadora, Professora Dr^a. Palloma Vieira Muterlle, pela ajuda, confiança e paciência.

Aos Professores do Programa de Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia, ao professor Dr. Jorge Luiz, ao professor Dr. Daniel Rosa, à professora Dr^a. Carla Anflor, ao professor Dr. Emmanuel Pacheco por tudo ministrado, ensinado e orientado.

A Sika® Brasil pelo suporte através da Imperflex de Goiânia GO, pelo fornecimento dos aditivos superplastificantes e da microsilica.

Aos técnicos de laboratório da UniEvangélica de Anápolis Rafaella e a todos que colaboraram para a realização dessa pesquisa.

À minha amada esposa Monise pela paciência em enxergar que sem estudo não alcançamos nada na vida.

Ao meu irmão Jeanisson César pelo incentivo e milhares de telefonemas atendidos em horas pouco usuais, sem você essa pesquisa não teria tido êxito.

A minha mãe Lucy e à minha filha Clarice.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Silva, Welinton Rosa da, *Avaliação da tensão de aderência NiTi-Concreto para aplicações na Construção Civil*. Brasília: Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, Brasil, 2018. Dissertação de Mestrado.

A aderência é fator determinante para a utilização do aço na construção civil, garantindo que as barras de reforço e o concreto aos 28 dias de cura consolidem tornando concreto armado. O presente estudo faz uma verificação da tensão de aderência NiTi-Concreto para aplicação no sistema estrutural de Concreto Armado. Esse trabalho apresenta os resultados de tração direta em substituição ao *Pull-Out Test* realizados com concreto e graute em barras de níquel titânio e aço, aos 28 dias de cura do concreto. Além da variação destes materiais, foram feitos tratamentos superficiais nas barras de NiTi como: jateamento de areia e aplicação de adesivo estrutural epóxi para simular o efeito das nervuras como visto em barras de aço comerciais. Os resultados obtivos através dos ensaios de tensão de aderência confirmam a viabilidade da utilização do adesivo estrutural e do jateamento de areia ao invés de barras lisas. As barras de aço convencional obtiveram os melhores resultados (cerca de 342% para o concreto e 265% para o graute). Nas barras de NiTi epóxi resultados de 64% no concreto e 47% no graute, porém se consideradas barras lisas os resultados tornam-se satisfatórios tanto no concreto quanto no graute (cerca de 145% e 105%, respectivamente) se tornando o melhor dos resultados dentre as barras de NiTi. As barras de NiTi jateado obtiveram resultados expressivos (113,95% no concreto e 102,69% no graute) atendendo as solicitações de cálculos se mostrando uma alternativa viável devido ao baixo custo. As barras lisas de NiTi obtiveram resultados de 141,86% no concreto e um resultado abaixo do solicitado de 71,53% no graute.

Palavras-chave: aderência, NiTi-Concreto, NiTi-graute, ensaio de arrancamento, epóxi, rugosidade, pseudoelasticidade.

ABSTRACT

Silva, Welinton Rosa da, *Evaluation of the NiTi-concrete for applications in civil construction*. Brasília: Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, Brasil, 2018. Dissertação de Mestrado.

Adherence is a determining factor for the use of steel in civil construction, ensuring that reinforcement bars and concrete at 28 days of curing consolidate becoming reinforced concrete. The present study makes a verification of the NiTi-Concrete adhesion stress for application in the structural system of Reinforced Concrete. This work presents the results of direct tensile in substitution to the Pull-Out Test realized with concrete and graute in bars of nickel titanium and steel, at 28 days of cure of concrete. In addition to the variation of these materials, surface treatments were done on NiTi bars such as: sand blasting and application of epoxy structural adhesive to simulate the effect of the ribs as seen in commercial steel bars. The results obtained through the adhesion stress tests confirm the viability of using structural adhesive and sandblasting instead of smooth bars. Conventional steel bars obtained the best results (about 342% for concrete and 265% for graute). In the NiTi epoxy bars, results of 64% in the concrete and 47% in the graute, but if they were considered smooth bars the results become satisfactory in both the concrete and the graute (about 145% and 105%, respectively) becoming the best of the results between the NiTi bars. The sand blasted NiTi bars obtained expressive results (113.95% in the concrete and 102.69% in the graute), taking into account the calculations requests, showing a viable alternative due to the low cost. The NiTi smooth bars obtained 141.86% results in the concrete and a result below the requested of 71.53% in the graute.

Key words: adhesion, NiTi-Concrete, NiTi-graute, pull out test, epoxy, roughness, pseudoelasticity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Típico ciclo de carregamento pseudo-elástico em ligas de memória de forma (Modificado - LAGOUDAS, 2008)	5
Figura 2.2 – Colapso do tabuleiro devido a deslocamentos excessivos nos apoios (Modificado - PEREIRA,2011)	6
Figura 2.3 – Diagrama de tensão-deformação para NiTi (adaptado por Desroches et al. 2004)	8
Figura 2.4 – E-Tower São Paulo. Fonte: http://www.galoppido.com.br . Acesso em 11/10/ 2017	10
Figura 2.5 – Aderência por adesão, adap. FUSCO (1995)	12
Figura 2.6 – Aderência mecânica, adap. FUSCO (1995)	13
Figura 2.7 – Aderência por atrito (PINHEIRO E MUZARDO,2003)	13
Figura 2.8 – Representação de Tensão de aderência (Modificado - PINHEIRO E MUZARDO, 2003)	14
Figura 2.9 – Curva teórica tensão de aderência-deslizamento (TASSIOS, 1979) ..	20
Figura 2.10 – Relação analítica tensão de aderência <i>versus</i> deslizamento carregamento monotônico (CEB-FIP MC 1990, 1991)	21
Figura 3.1 – Betoneira utilizada para misturar a massa	25
Figura 3.2 – Moldes para corpos de prova de 100mm x 200mm	26
Figura 3.3 – Corpos de prova de concreto	27
Figura 3.4 - Fôrmas para moldagem dos Corpos de Prova	28

Figura 3.5 – Detalhe da mangueira na parte inferior da barra	29
Figura 3.6 – Processo de concretagem dos Corpos de Prova	30
Figura 3.7 – Detalhe da fôrma com barras rosqueáveis	30
Figura 3.8 – Detalhe do plástico filme para cura selada	31
Figura 3.9 – Detalhe dos corpos de prova enumerados antes do início dos ensaios	31
Figura 3.10 – Fotografia do CONFOCAL da barra de NiTi jateada	32
Figura 3.11 – Fotografia do CONFOCAL da barra de NiTi com adesivo estrutural epóxi	32
Figura 3.12 – Máquina Universal de Ensaios CONTENCO®	33
Figura 3.13 - Castanhas da Máquina Universal de Ensaios aproximadamente 20 centímetros de altura	33
Figura 3.14 – Garra adaptada para ensaio de tração	34
Figura 3.15 – Corpo de prova na garra para início dos ensaios de arrancamento	34
Figura 3.16 – Esquema de apoio para material dos ensaios diretos	35
Figura 4.1 – Fotos do CONFOCAL: a) barra lisa, b) barra jateada, c) barra com epóxi e d) barra de aço convencional	37
Figura 4.2 – Gráfico Força x Deslocamento aço e concreto (a) x aço e graute (b)	38
Figura 4.3 – Adesão e fases de aderência em barras de aço do concreto x graute	39

Figura 4.4 – Deslocamentos em relação as fases de aderência em barras de aço do concreto x graute	39
Figura 4.5 – Gráfico Força x Deslocamento NiTi epóxi e concreto (a) x NiTi epóxi e graute (b)	40
Figura 4.6 – Adesão e fases de Aderência em NiTi epóxi e concreto x NiTi epóxi e graute	41
Figura 4.7 – Deslocamentos em NiTi epóxi e concreto x NiTi epóxi e graute	41
Figura 4.8 – Gráfico Força x Deslocamento NiTi jateado e Concreto (a) x NiTi jateado e graute	42
Figura 4.9 – Adesão e fases de Aderência em NiTi jateado e concreto x NiTi jateado e graute	43
Figura 4.10 – Deslocamentos em NiTi jateado e concreto x NiTi jateado e graute	43
Figura 4.11 – Gráfico Força x Deslocamento NiTi liso e concreto (a) x NiTi liso e graute	44
Figura 4.12 – Adesão e fases de Aderência em NiTi liso e concreto x NiTi liso e graute	45
Figura 4.13 – Deslocamentos em NiTi liso e concreto x NiTi liso e graute	45
Figura 4.14 – Gráfico comparativo Rugosidade Média x Tensão de Aderência	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Estudos sobre aderência entre aço e concreto.....	15
Tabela 2.2 – Valores propostos pela CEB-FIP MC 1990, 1991	21
Tabela 3.1 – Propriedades físicas e mecânicas das barras de NiTi utilizadas (CORRÊA FILHO, 2013)	23
Tabela 3.2 – Composição química das barras de NiTi utilizadas (CORRÊA FILHO, 2013)	23
Tabela 3.3 – Propriedades físicas e mecânicas das barras de aço utilizadas (GERDAU,2017)	24
Tabela 3.4 –Resistência do cimento CP V-ARI (ABNT NBR 5733, 1991)	24
Tabela 3.5 – Resistência do graute (ASTM C 349/02)	24
Tabela 3.6 –Composição do traço	25
Tabela 3.7 –Resultado do ensaio de resistência à compressão	27
Tabela 3.8 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios	28
Tabela 3.9 – Resumo dos CP's utilizados	29
Tabela 3.10 – Cálculos adaptados da NBR 6118:2014	36
Tabela 4.1 – Rugosidade Média das Barras	37
Tabela 4.2 – Fases de aderência e adesão aço concreto x graute	38
Tabela 4.3 – Deslocamentos aço concreto x graute	38
Tabela 4.4 – Fases de aderência e adesão NiTi epóxi e concreto x NiTi epóxi e graute	40
Tabela 4.5 – Deslocamentos NiTi epóxi e concreto x NiTi epóxi e graute	40

Tabela 4.6 – Fases de aderência e adesão NiTi jateado e concreto x NiTi jateado e graute	42
Tabela 4.7 – Deslocamentos NiTi jateado e concreto x NiTi jateado e graute	43
Tabela 4.8 – Fases de aderência e adesão NiTi liso e concreto x NiTi liso e graute	44
Tabela 4.9 – Deslocamentos NiTi liso e concreto x NiTi liso e graute	44
Tabela 4.10 – Tensões de Aderência	46
Tabela 4.11 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios	47
Tabela 4.12 – Comparação dos resultados com o valor esperado (%)	48
Tabela 4.13 – Resultados Tensão de Aderência e Rugosidade Média	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>Af</i>	Fase Austenítica Final
<i>CAD</i>	Concreto de Alto Desempenho
<i>CAR</i>	Concreto de Alta Resistência
<i>CEB</i>	<i>Comite Euro-International Du Béton</i>
<i>CP</i>	Corpo de Prova
<i>CuAlBe</i>	Cobre Alumínio Berílio
<i>CuAlMn</i>	Cobre Alumínio Manganês
<i>CuAlNi</i>	Cobre Alumínio Níquel
<i>DIN</i>	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
<i>EMF</i>	Efeito de Memória de Forma
F_{ck}	Resistência a Compressão do Concreto
<i>FIP</i>	<i>Fédération Internationale Du Béton</i>
<i>kN</i>	Kilo Newton
<i>LMF</i>	Liga de Memória de Forma
<i>MPa</i>	Mega Pascal
<i>NBR</i>	Norma Técnica Brasileira
<i>NDC</i>	Nitinol Devices & Components
<i>NiTi</i>	Níquel Titânio
<i>RILEM</i>	Rede Internacional de Laboratórios de Ensaios de Materiais
<i>SMA</i>	<i>Shape Memory Alloys</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

τ_b	Tensão de aderência
R_s	Força atuante na barra
\emptyset	Diâmetro da barra
l_b	Comprimento de ancoragem básico
τ_u	Tensão última de aderência
R_f	Resistência à tração na flexão
P	Carga aplicada verticalmente no centro do prisma
L	Distância entre os suportes
ELU	Estado Limite Último
F_{b1}	Força de aderência por adesão
F_{b2}	Força de aderência por atrito
σ	Tensão normal
f_{bd}	resistência de aderência de cálculo;
f_{ck}	resistência característica à compressão;
f_{ctd}	resistência à tração de cálculo;
$f_{ctk, inf}$	resistência característica à tração inferior;
f_{ctk}	resistência característica à tração;
η	coeficiente de conformação superficial;
γ_c	coeficiente de ponderação da resistência do concreto;
f_{yd}	resistência característica ao escoamento do aço.

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO GERAL	2
1.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS	2
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1. LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA	3
2.1.1. <i>SUPERELASTICIDADE OU PSEUDOELASTICIDADE</i>	4
2.1.2. <i>APLICAÇÃO DA LIGA DE NITI NA CONSTRUÇÃO CIVIL</i>	5
2.2. CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR)	8
2.3. ADERÊNCIA.....	11
2.3.1. <i>Aderência por Adesão</i>	12
2.3.2. <i>Aderência Mecânica</i>	12
2.3.3. <i>Aderência por Atrito</i>	13
2.3.4. <i>Tensões de Aderência</i>	14
2.4. RESINAS EPOXI.....	22
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	23
3.1. MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1.1. <i>Barra de NiTi</i>	23
3.1.2. <i>Aço</i>	23
3.1.3. <i>Cimento</i>	24
3.1.4. <i>Graute</i>	24
3.1.5. <i>Concreto</i>	25
3.2. FABRICAÇÃO DOS CPs DE CONCRETO	26
3.2.1. <i>Resistência à Compressão Simples</i>	27
3.3. METODOLOGIA PARA FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE ADERÊNCIA.....	28

3.4. METODOLOGIA PARA OS ENSAIOS.....	32
3.4.1. <i>ENSAIO DE RUGOSIDADE</i>	32
3.4.2. <i>ENSAIO DE ARRANCAMENTO</i>	32
3.4.3. <i>VERIFICAÇÃO DO CÁLCULO DE TENSÃO DE ADERÊNCIA DE ACORDO COM A NBR 6118:2014</i>	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1. Análise da rugosidade superficial.....	37
4.2. Ensaio de Arrancamento	38
4.2.1. <i>Barras de Aço convencional e Concreto x Barras de aço convencional e graute</i>	38
4.2.2. <i>Barras de NiTi epóxi e Concreto x Barras de NiTi epóxi e graute</i>	40
4.2.3. <i>Barras de NiTi jateado e Concreto x Barras de NiTi jateado e graute</i>	42
4.2.4. <i>Barras de NiTi lisas e Concreto x Barras de NiTi lisas e graute</i>	44
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....	50
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
5.2. TRABALHOS FUTUROS	51
REFERÊNCIAS.....	52
ANEXOS	57

1. INTRODUÇÃO

Com o crescente desenvolvimento tecnológico, têm surgido grandes avanços na área da Engenharia Civil, que tentam responder de forma adequada às exigências econômicas e da segurança estrutural que cada vez mais são argumentos de decisão nesta área da engenharia civil (PEREIRA, 2011).

Segundo REBELLO (2007) o concreto armado não é apenas uma mistura de concreto e aço mas um terceiro composto que surge de uma forte ligação entre esses dois materiais que recebe o nome de aderência, que se dá por meios mecânicos (atrito) e pelo efeito ligante propiciado pelo cimento.

O efeito conhecido como pseudo-elasticidade, descreve os materiais que recuperam suas formas isotermicamente a fim de produzir o efeito de memória de forma. Este fenômeno é essencialmente o mesmo que o de memória de forma, embora a transformação de fase para austenita A_f (temperatura austenítica final) ocorra abaixo da temperatura de funcionamento esperada (CALUÊTE, 2012).

O uso em grande escala de ligas com efeito de memória de forma em construções civis requer um intenso estudo de diversas propriedades mecânicas, o presente estudo é importante e complementar aos dados já divulgados na literatura, principalmente no que se refere à aplicação tecnológica pretendida uma vez que construções civis estão sempre sujeitas há algum tipo de esforço (NASCIMENTO, 2008).

SAIID *et al* (2007) estudaram o comportamento do NiTi com elementos de concreto armado com reposição total e parcial do aço na estrutura, a fim de estudar a capacidade da pseudoelasticidade do NiTi para recuperar deformações e dissipar energia quando usado com concreto.

A principal vantagem de usar materiais com efeito de memória de forma como fibra longa do concreto é o fato de que ele pode recuperar deformações absorvendo energia de forma contínua, diferente do aço. Este fato foi evidenciado por Shajil *et al.* (2013), em um trabalho onde várias experiências com vigas reforçadas com fibra de NiTi foram realizadas. No entanto, a geometria dos fios e barras de NiTi utilizados como fibras, apresentaram vários problemas de ligação com o concreto que devem ser resolvidos. Como sugerido por Czaderski (2005), uma maneira de resolver esta questão é o uso de fios e cabos para melhorar a ligação entre as ligas de memória

de forma e concreto. Embora esses estudos tenham apontado algum potencial de uso do NiTi, a tensão de aderência do NiTi quando usado em combinação com concreto é pouco conhecida e precisa ser estudada.

Dentre as aplicações das ligas de NiTi na construção destacam-se: mecanismos de absorção de energia em ação sísmica; mecanismos de transferências de esforços em vibrações de tráfego rodoviário, ferroviária ou pedonal; ação do vento; funcionamento de equipamentos (PEREIRA, 2011).

Nos estudos de Silva (2015), foi verificado que a relação da aderência com comprimento de ancoragem de barras de NiTi em concreto através de ensaios de arrancamento com resultados de 32 a 47% de tensão inferior às barras lisas de aço. Também observou-se que a barra lisa de aço convencional possui uma rugosidade cerca de vinte e três vezes maior que a barra lisa de NiTi polida e quatro vezes maior que a barra lisa de NiTi jateada, devido ao fato de ser formada uma camada de óxido na superfície do aço convencional.

Esta pesquisa propõe verificar a aderência de uma barra metálica de liga de níquel-titânio pseudoelástica fazendo alguns tratamentos mecânicos visando aprimorar a aderência e dar continuidade ao trabalho de SILVA (2015), e avaliar os resultados com a finalidade de possíveis aplicações em diversas áreas da construção civil, fazendo o ensaio de arrancamento adaptado em uma máquina de tração comparando aos modelos teóricos e práticos.

1.1. OBJETIVO GERAL

Verificar a aderência através de ensaio de arrancamento numa máquina universal de ensaios em barras de NiTi-Concreto para aplicação no sistema estrutural de Concreto Armado.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a tensão de aderência da barra lisa de NiTi com a barra acabada superficialmente;
- Analisar a tensão de aderência entre barras de NiTi aderidas em concreto e barras de NiTi aderidas em graute.
- Analisar a tensão de aderência entre barras de aço aderidas em concreto e barras de aço aderidas em graute.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação é composta de 5 capítulos. O capítulo 1 apresenta as os objetivos do presente trabalho. O capítulo 2 mostra a revisão da literatura utilizado no desenvolvimento da dissertação, abordando sobre as propriedades e aplicação das ligas de NiTi. No capítulo 2 também é abordado sobre o concreto de alta resistência, sobre aderência e tensões de aderência. Os materiais e métodos utilizados para atingir os objetivos propostos são apresentados no capítulo 3, dando ênfase à fabricação dos corpos de prova e adaptação da garra para os ensaios. No capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões obtidos com cada ensaio aplicado e comparando os resultados aos diferentes tipos de concreto e barras utilizadas. O capítulo 5 apresenta as considerações finais obtidas com o trabalho, alinhadas com os objetivos que foram propostos anteriormente.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA

As ligas com memória de forma (LMF), também conhecidas como *SMA* (*Shape Memory Alloys*) são materiais metálicos que têm a capacidade de, depois de sujeitas a deformações, voltar ao seu estado inicial como resultado do aumento de temperatura, aumento de pressão ou outras condições de tensão. Os efeitos de memória de forma ocorrem devido a mudanças na estrutura cristalina do material, que são dependentes da temperatura e/ou da tensão às quais estas ligas podem estar sujeitas. (FERNANDES, 2003).

Essas ligas possuem duas fases sólidas: Martensita (fase sólida que ocorrem à baixa temperatura) e Austenita (fase sólida que ocorrem à alta temperatura). As características desses materiais estão intimamente ligadas à transformação de fase sólido-sólido que ocorrem em um estado sólido metaestável de algumas ligas. Essa mudança ocorre sem difusão e é chamada transformação martensítica. A temperatura com que essas transformações ocorrem nas ligas com efeito de memória de forma, podem ser escolhidas entre -150°C e 200°C , dependendo da composição e da constituição microestrutural (SCHWARTZ, 2009).

Dentre as ligas mais utilizadas destacam-se as ligas NiTi, CuAlNi, CuAlBe e CuAlMn, onde as ligas NiTi apresentam melhores propriedades termoelásticas, como a recuperação de forma e pseudoelasticidade. Devido estas propriedades,

esta liga se apresenta promissora para uso na construção civil, ainda pela sua grande capacidade de dissipação de energia permite a imposição de grandes deformações, apresenta um excelente ciclo de histerese, que é de grande importância para o equilíbrio dos esforços que ocorrem principalmente na ligação viga-pilar, região que apresenta bastante sensibilidade na ocorrência de sismos. Esta liga também possui excelente capacidade para suportar elevado número de ciclos de carga/descarga (resistência à fadiga) e boa resistência à corrosão (CALUÊTE, 2012).

As ligas NiTi são bastante populares pelas suas propriedades de memória de forma e também pelo seu efeito pseudoelástico que lhes permite uma recuperação de forma até 80%. Estas ligas podem ser aplicadas em várias áreas como a medicina ou a aeronáutica por serem bastante resistentes à corrosão e pela sua biocompatibilidade. São também bastante dúcteis em comparação com outras ligas e apresentam uma solubilidade de outros metais que não o níquel ou o titânio (FERNANDES, 2003).

2.1.1. SUPERELASTICIDADE OU PSEUDOELASTICIDADE

As ligas de memória de forma são materiais únicos que têm a capacidade de obter grandes deformações e retornar a uma forma pré-definida após o descarregamento ou o aquecimento (CLADERA, 2014 *apud* Otsuka e Wayman, 1998), o que pode ser induzido pela criação de um circuito elétrico representando a lei de Joule. Por estas razões, as LMFs são usadas regularmente em diferentes campos e indústrias, como aviação, equipamentos médicos cirúrgicos e implantes (CLADERA, 2014 *apud* Otsuka e Wayman, 1998).

Este efeito, também conhecido como pseudo-elasticidade, descreve os materiais que recuperam suas formas isotermicamente a fim de produzir o efeito de memória de forma. Este fenômeno é essencialmente o mesmo que o de memória de forma, embora a transformação de fase para austenita ocorra abaixo da temperatura de funcionamento esperada (CALUÊTE, 2012).

O comportamento pseudo-elástico está associado a uma transformação de fase induzida por tensão, que gera deformação durante a carga e subsequente recuperação de forma pós-retirada da carga em temperaturas acima da fase austenítica. Este fenômeno se inicia em uma temperatura onde a fase austenítica

existe ($T > A_f$), onde, devido à aplicação de carga, ocorre o surgimento de martensita deformada na forma estável e finalmente retorna ao estado austenítico quando a tensão é retirada (LAGOUDAS, 2008).

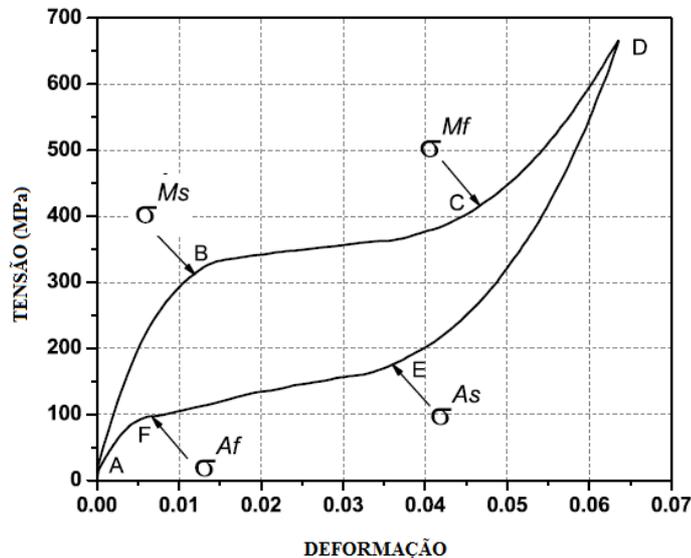


Figura 2.1 – Típico ciclo de carregamento pseudo-elástico em ligas de memória de forma (Modificado - LAGOUDAS, 2008)

A figura 2.1 mostra um típico ciclo de carregamento pseudo-elástico em ligas de memória de forma onde nos pontos B e C o material passa pela fase martensita após sofrer o carregamento e atingir o ponto máximo de deformação recuperável (D), o ciclo de histerese formado pelos pontos B-C-E-F onde o material é descarregado durante um ciclo de tensão e deformação (SILVA, 2015 *apud* CORRÊA FILHO, 2013).

2.1.2. APLICAÇÃO DA LIGA DE NiTi NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Uma das causas mais comuns para o colapso de pontes é a falta de capacidade dos apoios para acomodar os deslocamentos sofridos pelo tabuleiro, levando à queda deste elemento do topo dos pilares ou dos encontros. Normalmente isto está associado a uma deficiente absorção de energia dos deslocamentos possíveis de ocorrer durante um sismo, como mostra a Figura 2.2. Para prevenir este problema, a solução passa por reforçar a zona das juntas, instalando cabos que ligam ambos os elementos do tabuleiro, controlando deste modo os deslocamentos excessivos (PEREIRA, 2011).

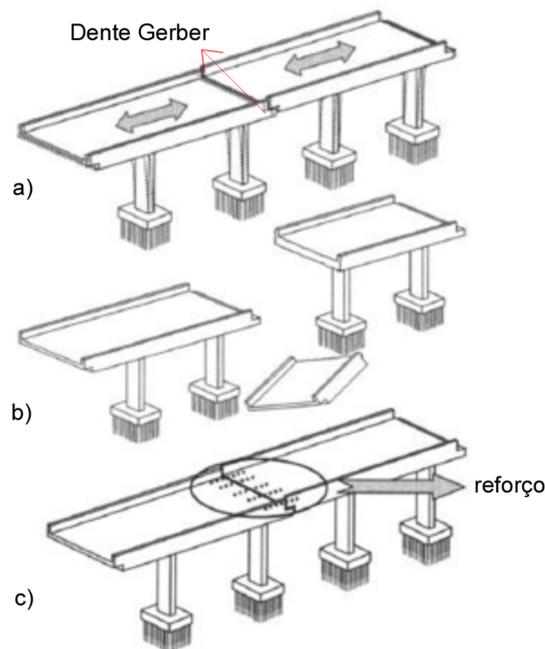


Figura 2.2 - Colapso do tabuleiro devido a deslocamentos excessivos nos apoios
(Modificado - PEREIRA, 2011).

A solução foi idealizada como sendo um conjunto de arames de LMF enrolados sobre si de maneira a formar um cabo e, como acontece na solução com cabos de aço, estes seriam ligados a cada elemento do tabuleiro (PEREIRA, 2011).

F.ASCE *et al* (2007) estudaram o comportamento do NiTi com elementos de concreto armado com total e meia reposição do aço na estrutura, a fim de estudar a capacidade da superelasticidade do NiTi para recuperar deformações e dissipar energia quando usado com concreto. Os experimentos foram realizados na mesma temperatura ambiente sob condições estáticas. As vigas foram carregadas até a metade do limite de escoamento (1725 kN de carga) e descarregaram a carga mínima de 1,33 kN. Novamente, as vigas foram carregadas lentamente até o limite de elasticidade, sendo monitoradas.

Os resultados mostraram que o uso de cabos de NiTi em concreto, a taxa de deslocamento foi reduzida em 90%. Sendo menos de um terço do que cabos de aço reforçado. A relação de deslocamento para as vigas reforçadas com NiTi foi de aproximadamente 20% da das vigas com reforço de aço, as vigas reforçadas com aço apresentaram uma tensão residual média 4,25 vezes maior do que as vigas reforçadas com NiTi. A liga de NiTi foi aproximadamente 60% mais rígida do que o aço, esta característica pode ser desejável para muitas aplicações. O estudo

argumentando que algumas aplicações, tal como uma estrutura feita de NiTi e aço de alta resistência, podem proporcionar capacidade para recuperar parcialmente as deformações (F.ASCE et al, 2007).

Recentemente, os atuadores feitos por liga de memória de forma aumentaram gradualmente devido à propriedade da LMF de regenerar tensões de recuperação quando aquecidas (LI, 2008). A liga de memória de forma baseada em NiTi tem muitas propriedades excelentes como atuador: cerca de 8% da tensão de recuperação (TSOI *et al.*, 2002) e grande esforço de recuperação, até 800 MPa (VOKOUN *et al.*, 2003).

LI *et al.* (2006) apresentou o comportamento de uma viga de concreto combinado com fios LMF aquecidos usando eletricidade. Além disso, os resultados indicaram que esses fios da LMF podem diminuir o valor absoluto das tensões de compressão, diminuir a compressão do concreto na zona de tração e reduzir a deflexão do raio médio da viga. Além disso, os fios de liga de memória de forma aquecidos apresentaram bons resultados para fechar rachaduras e executar a tarefa de reparação de danos de emergência em estruturas civis.

LI *et al.* (2008) propuseram um novo método para aumentar a resistência das estruturas de concreto armado através de placas de polímero reforçado com fibra de carbono em combinação com fios de NiTi. Como resultados, os testes indicaram que os fios NiTi podem reduzir as deformações residuais dos feixes efetivamente quando aquecidos, e quanto mais fios os espécimes possuíam, geravam uma maior redução na deformação residual. Além disso, a combinação de fios de materiais inteligentes e placas de polímero reforçado com fibra de carbono é um método efetivo para reforçar estruturas de concreto armado.

Em 2014, Cladera *et al.* discutiram alguns aspectos das experiências feitas em ligas de memória de forma em concreto estrutural. Seu trabalho apresentou alguns estudos e aplicações de materiais inteligentes, levando em consideração as diferentes propriedades de tais materiais, ou seja, superelasticidade, memória de forma e amortecimento, quando ligados ao concreto estrutural. As três propriedades-chave das LMFs podem ser representadas pela resposta mecânica do material quando submetido a uma tensão, conforme mostra a tensão-deformação abaixo da curva conforme figura 2.3 abaixo. Dependendo da propriedade desejada, o material da fibra LMF é escolhido.

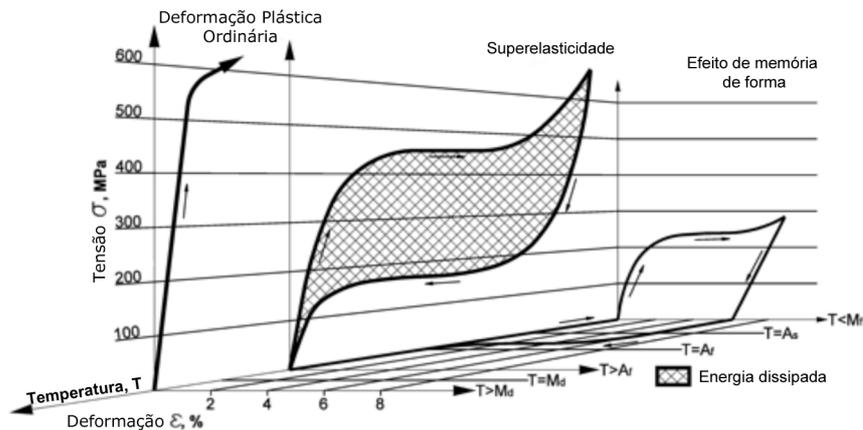


Figura 2.3 – Diagrama de tensão-deformação para NiTi (adaptado por Desroches *et al.* 2004).

A principal vantagem de usar materiais LMF como fibra longa do concreto é o fato de que ele pode recuperar deformações absorvendo energia de forma contínua, diferente do aço. Este fato foi evidenciado por Shajil *et al.* (2013), em um trabalho onde foram realizadas várias experiências com vigas reforçadas com fibra de NiTi. Concluíram que a fibra de aço reforçada apresentava um fator de auto-retração de 0,1 contra um fator de 0,7 para a fibra de NiTi reforçada. Surgiram vários problemas de ligação com o concreto que devem ser resolvidos. Como sugerido por Czaderski (2005), uma maneira de resolver esta questão é o uso de fios e cabos para melhorar a ligação entre LMFs e concreto.

2.2. CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR)

O concreto de alta resistência já é uma realidade no Brasil e o emprego de concretos com resistências maiores que as usuais - de 40 a 50 MPa - tem se difundido muito nos últimos anos. As empresas de concreto pré-misturado, bem como os centros de pesquisa, estão capacitados a obter esses concretos usados principalmente em estruturas de edifícios, pontes e pré-moldados, reduzindo a seção de pilares e cargas nas fundações e aumentando a durabilidade. No entanto, ultrapassar a barreira dos 100 MPa com um concreto dosado em central e aplicado em uma estrutura real, com vantagens econômicas e técnicas foi, por muito tempo, um sonho a ser realizado pela engenharia nacional. (HELENE; HARTMANN, 2013)

Embora uma das revisões feitas em 2014 na NBR 6118 traga uma abordagem sobre o uso de concreto de alta resistência, a definição que se tem através da norma é vaga, pois define como concreto de alta resistência aquele com propriedades entre 50 a 90 MPa (SILVA, 2015).

O conceito de Concreto de Alta Resistência - CAR - tem variado ao longo dos anos, o que pode ser confirmado no boletim 197 CEB-FIP(1990), no qual consta a evolução na máxima resistência de projeto, sendo recomendado como limite superior da resistência característica do concreto à compressão 80 MPa, no entanto, nas normas brasileiras, os modelos de verificação da segurança apresentados são válidos para resistência de até 50 MPa. Após o advento da sílica ativa, o cimento deixou de ser o fator limitante para a obtenção de maiores resistências, que passam a depender mais diretamente das propriedades dos agregados, que variam de região para região, em função da grande variabilidade das rochas existentes (VANDERLEI, 1999).

A história da engenharia brasileira apresenta obras pioneiras e grandes recordes em estruturas de concreto entre os quais podem ser citados o Edifício A Noite, no Rio de Janeiro (1928), com recorde mundial em altura de 103 m. Em São Paulo, podem ser citados o Edifício Martinelli com 106 m, de 1929, e o Edifício Itália, de 1959, com 168 m de altura. Outro recorde alcançado pelo Brasil foi o de maior vão livre em laje reta com o MASP (Museu de Arte de São Paulo), obra pioneira de concreto de alto desempenho (f_{ck} igual a 45 MPa) em 1968. No Edifício CENU (Centro Empresarial Nações Unidas) o recorde foi de bombeamento do concreto com uma só bomba a uma altura de aproximadamente 158 metros e o de maior volume de CAR já empregado em uma obra no Brasil - f_{ck} 50 MPa - considerado relativamente alto para os padrões até então empregados no País, com resistência média aos 28 dias de cura de 60 MPa. (HELENE; HARTMANN, 2013)

No Brasil um dos principais prédios construídos com o CAR é o E-Tower, com f_{ck} de projeto de 80 MPa, sendo que alguns pilares atingiu-se 125 MPa. Fica localizado na cidade de São Paulo, ver figura 2.4.



Figura 2.4 – E-Tower São Paulo. Fonte: <http://www.galoppido.com.br>. Acesso em 11/10/2017.

O CAR exige condições de produção e execução rigorosas, que deveriam ser padrão também para concretos convencionais. Conhecer as características de aditivos e adições ajuda a entender porque tanta preocupação. A sílica ativa propicia maior compacidade ao concreto, melhorando a aderência entre a pasta e os agregados graúdos devido à sua extrema finura, com diâmetro médio em torno de 19 mm. O excesso de impurezas na água pode provocar problemas na resistência, assim como o uso inadequado de aditivos (PRICE, 2003).

Dois pontos são importantes a serem levados em consideração. Em primeiro lugar, com concreto de alto desempenho a resistência muitas vezes é necessária após 28 dias de idade; isso deve ser levado em conta na consideração do critério de

resistência. Em segundo lugar, o que se necessita em um concreto de alto desempenho é um elevado módulo de deformação. Para esse fim, é essencial que se use um agregado com elevado módulo de deformação, mas também é importante que se escolha um material cimentício que resulte uma aderência particularmente boa entre as partículas de agregado graúdo e a matriz (SILVA, 2010 *apud* MENDES, 2002).

Os especialistas recomendam que o CAR seja produzido em centrais de concreto, pois exige controle rigoroso da massa dos materiais. Se a central estiver fora do canteiro, a mistura pode ser feita com todos os componentes exceto o superplastificante, que deve ser adicionado na última hora por ter efeito por tempo limitado. Por isso, deve-se dedicar especial atenção ao tempo de transporte desde a saída da usina até o local de aplicação (TÉCHNE, 2002).

2.3. ADERÊNCIA

A aderência é a propriedade responsável pelas restrições às deformações, sendo o mecanismo que permite a transferência de tensões na interface, fazendo com que, a estrutura apresente deformações homogêneas e compatíveis (MEDEIROS e SELMO, 2000).

A aderência assegura a igualdade de variação de deformações específicas da armadura e do concreto que as envolve, quando sob a ação de cargas. O seu comportamento tem importância decisiva com relação à capacidade de cargas das estruturas de concreto armado (FRANÇA, 2004).

Ancoragem é a medida de fixação da barra no concreto. Na ancoragem por aderência, deve ser previsto um comprimento suficiente para que o esforço da barra (de tração ou de compressão) seja transferido para o concreto. Denominando-se comprimento de ancoragem (PINHEIRO & MUZARDO, 2003).

França (2004) chama de aderência à ligação existente entre o aço e o concreto que impede ou reduz o deslizamento entre eles. O deslizamento, no início do carregamento, é causado em parte pela deformação elástica do concreto; entretanto, para cargas mais altas, ele é causado pelo fendilhamento do concreto em frente às nervuras (FRANÇA, 2004).

A aderência pode ser dividida em aderência por adesão, aderência por atrito e aderência mecânica.

2.3.1 Aderência por Adesão

A aderência por adesão caracteriza-se por uma resistência à separação dos dois materiais. Ocorre em função de ligações físico-químicas, na interface das barras com a pasta, geradas durante as reações de pega do cimento. Para pequenos deslocamentos relativos entre a barra e a massa de concreto que a envolve, essa ligação é destruída (PINHEIRO & MUZARDO, 2003).

A parcela de aderência por adesão, ilustrada na Figura 2.5, é estabelecida pela ligação físico-química que se estabelece na interface aço-concreto durante as reações de pega do cimento. A aderência depende da limpeza da superfície e da rugosidade das barras, o que não é suficiente para uma boa aderência. (FRANÇA, 2004).

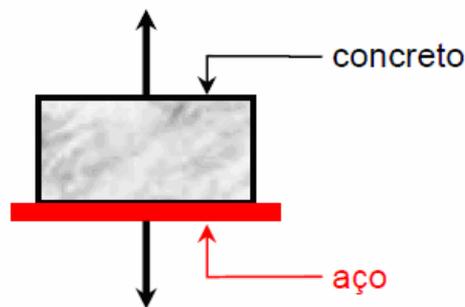


Figura 2.5 – Aderência por adesão, adap. FUSCO (1995)

2.3.2. Aderência Mecânica

A aderência mecânica está presente tanto nas barras nervuradas quanto nas barras lisas. As disposições de saliências ao longo das barras funcionam como peças de apoio, mobilizando tensões de compressão no concreto (FUSCO, 1995).

Essa aderência é a interação mecânica entre o aço e concreto, decorrente da presença de saliências na superfície da barra (nervuras laminadas, estrias), como ilustra a Figura 2.6. Este tipo de ligação depende da forma, altura, inclinação das nervuras e da distância entre elas. Por meio de intertravamento mecânico, do tipo de encaixe entre o concreto e as nervuras das barras de aço, formam-se consolos de concreto que são solicitados ao corte e à compressão antes que a barra possa deslizar no concreto (FRANÇA, 2004).

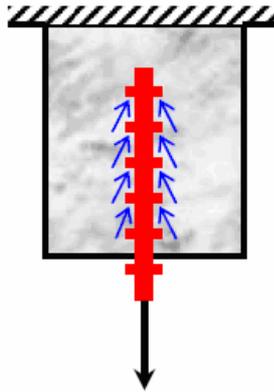


Figura 2.6 – Aderência mecânica, adap. FUSCO (1995)

2.3.3. Aderência por Atrito

A parcela relativa ao atrito, ilustrada na Figura 2.7, é decorrente da ação das forças de atrito existentes entre os dois materiais. Estas forças dependem do coeficiente de atrito entre o aço e o concreto, o qual é função da rugosidade superficial da barra. A aderência por atrito, a qual se manifesta devido à pressão transversal do concreto sobre a armadura como, por exemplo, a de retração ou de confinamento, pode ser determinada por meio de ensaios de arrancamento (OLIVEIRA, 2011).

Conforme DUCATTI (1993), mesmo quando o concreto apresentar fissuras de fendilhamento, o atrito pode substituir, embora parcialmente, a parcela perdida da transferência das tensões de aderência. Permanece a situação até certo nível de tensão para o qual ou a resistência de atrito seja esgotada ou se torne insuficiente. Nesse caso, a barra é arrancada deixando em seu lugar original, um orifício quase intacto dentro do concreto (quando do caso de barras lisas).

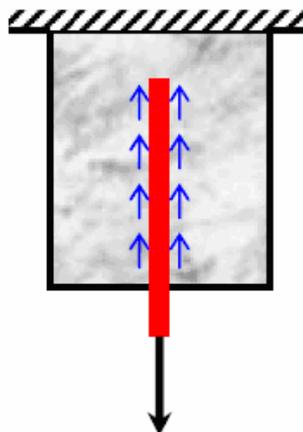


Figura 2.7 – Aderência por atrito (PINHEIRO E MUZARDO, 2003)

2.3.4. Tensões de Aderência

A aderência entre o concreto e o reforço é responsável por essa transferência, quando da fissuração do primeiro. Quando eficiente, a aderência garante que esses dois materiais trabalhem de forma unificada, garantindo também a capacidade do concreto de continuar a resistir aos esforços após a ocorrência da sua fissuração (MESQUITA *et. al*, 2005 *apud* Park & Paulay, 1975).

As tensões originárias das solicitações atuantes na superfície de contato aço-concreto são denominadas tensões de aderência, as quais podem ser estimadas a partir de expressões de cálculo propostas por Normas provenientes de ensaios executados ou de modelos matemáticos (FRANÇA, 2004).

Segundo LEONHARDT (1977), para uma barra de aço imersa em uma peça de concreto, como a indicada na figura 2.8, a tensão média de aderência é dada por:

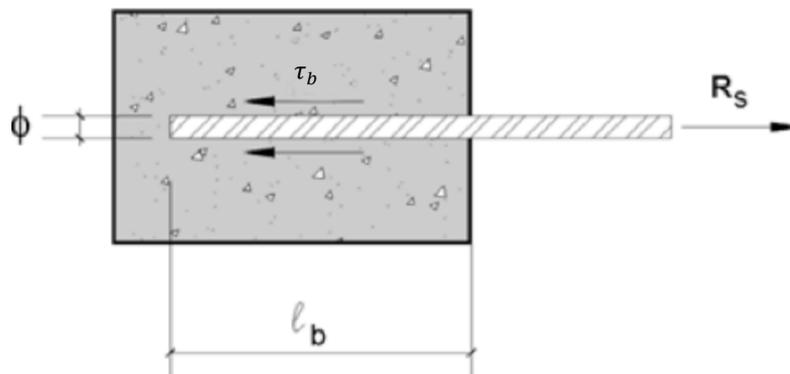


Figura 2.8 – Representação de Tensão de aderência (Modificado - PINHEIRO E MUZARDO, 2003).

$$\tau_b = \frac{R_s}{\pi \cdot \phi \cdot l_b} ; \quad (2.1)$$

Onde:

τ_b = Tensão de aderência;

R_s = Força atuante na barra;

ϕ = Diâmetro da barra;

l_b = Comprimento de ancoragem básico.

A tensão de aderência depende de diversos fatores, entre os quais:

- Rugosidade da barra;

- Posição da barra durante a concretagem;
- Diâmetro da barra;
- Resistência do concreto;
- Retração;
- Adensamento;
- Porosidade do concreto etc.

Na literatura há diversos estudos sobre o fenômeno da aderência em barras de aço e concreto, conforme resumo em tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Estudos sobre aderência entre aço e concreto

Ano	Autor	Elementos utilizados	Contribuição do estudo
1941	WATSTEIN	barras de aço	Alongamento e a tensão na barra da parte encravada no concreto
1948	MYLREA	barras ancoras em vigas de concreto	Distribuição e progressão da tensão de aderência
1948	McHENRY	barras de aço de diferentes superfícies em vigas de concreto	Distribuição da tensão na barra antes e depois da fissuração do concreto
1949	CLARK	vigas submetidas à flexão	Comparou a resistência ao deslizamento do aço em relação ao concreto
1951	MAINS	vigas bi-apoiadas submetidas a cargas concentradas	Mediu a distribuição da tensão de aderência ao longo da barra de aço
1954	FERGUSON	barras de aço	Investigou o espaçamento mínimo entre as barras de aço para transmissão das tensões de aderência
1966	PERRY	viga bi-apoiada com cargas concentradas	Verificou a influência do momento fletor com a relação entre tensão de aderência e deslizamento
1966	ABELES	vigas com diferentes características	Distribuição de tensão e da propagação das fissuras para diversos ciclos de carregamentos
1967	NGO	barras de aço e vigas de concreto armado	Utilizou o MEF na construção de um modelo numérico entre concreto e barras de aço
1967	LUTZ	barras nervuradas e concreto	Examinou a ação das forças de aderência, associadas ao deslizamento e à fissuração
1968	BRESLER	estruturas de concreto armado	Estudou o efeito acumulativo de diversos danos na transferência de tensão entre aço e o concreto
1968	NILSON	função polinomial de terceiro grau	Utilizando o MEF de NGO (1967) desenvolveu modelos numéricos de representação de

		representando concreto armado	amostras de concreto
1969	PERRY	barras de aço	Ensaio de arrancamento excêntrico submetidos a cargas repetidas estáticas e dinâmicas
1971	GOTO	barras de aço em concreto	Demonstrou o comportamento das fissuras de aderência no concreto ao redor da barra
1972	ISMAIL	armadura de aço e concreto	Analisa a deterioração da aderência em carregamento cíclico
1979	MIRZA	amostras prismáticas de concreto e aço	Estuda o comportamento da variação do diâmetro das barras, da resistência à compressão do concreto
1981	TASSIOS	modelo analítico através de leis não-lineares	Realiza estudos correlacionando a tensão de aderência local e o deslizamento local ao longo de uma barra
1981	SOMAYAJI	modelo analítico através de equações diferenciais de equilíbrio	Modelo analítico para investigar fissuras, e do efeito do enrijecimento à tração através do MEF
1984	JIANG	barras de aço em concreto	Observa fissuras secundárias e distribuição da tensão no concreto ao redor da barra de aço
1985	YANKELEVSKY	equações de equilíbrio de forças em um elemento infinitesimal em MEF	Observa os 4 estágios da aderência: contato inicial, quebra da aderência, redução da tensão e a última tensão
1986	KEMP	armadura de aço e concreto	Apresenta critérios para considerar a tensão de aderência sob condições de carregamento último e de serviço
1987	KEUSER	método dos elementos finitos	Analisa a influência na qualidade dos resultados obtidos na análise de tensão de aderência entre o aço e concreto
1989	ALLWOOD	modelo numérico baseado em MEF	Analisa separadamente as forças de interface do aço e do concreto
1990	RUSSO	modelo bilinear do aço expresso por função exponencial ou linear	Apresenta uma solução analítica de sistemas de equações diferenciais governadas pelo comportamento da ancoragem
1993	DUCATTI	barras de aço em concreto de alta resistência	Estuda a aderência entre concreto de alto desempenho e a barra de aço
1994	ROSA	método dos elementos finitos	Compara várias curvas de aderência x deslizamento entre aço e concreto
1995	KWAK	método dos elementos finitos	Apresenta uma formulação para implementação em programas computacionais de modelagem de concreto armado
1996	UIJL	barra de aço encravada num cilindro de concreto	Estuda o confinamento do concreto ao redor da barra
1996	EL-HAWARY	barra de aço	Efeitos do fogo e de altas temperaturas na

		encravada num cilindro de concreto	aderência de concreto e aço
1996	ALLWOOD	método dos elementos finitos	Expôs a abordagem de um modelo não-linear da aderência x deslizamento
1997	YANKELEV SKY	método dos elementos finitos	Apresentou o desenvolvimento de elementos finitos bidimensionais, que representam a interface entre aço e concreto
1998	DESIR	método dos elementos finitos	Utilizou leis constitutivas baseadas na termodinâmica clássica considerando a interface sendo uma superfície de descontinuidade
1998	MANFREDI	método dos elementos finitos	Apresentou a relação de tensão de aderência x deslizamento, introduzida na matriz rigidez
1998	BARBOSA	barras de aço de elevado limite elástico e concreto de alto desempenho	Analisa a posição das barras e o comportamento de vigas fletidas com o concreto armado de elevado desempenho
1999	AYOUB	barras de aço em concreto	Considerou os mecanismos de transferência de tensão entre o aço e o concreto, para carregamentos monotônico e cíclico
2000	MONTI	método dos elementos finitos	O modelo pressupõe a conservação plana da seção e as tensões no aço são computadas como sendo a soma de duas contribuições: a deformação e o deslizamento da ancoragem.
2000	ZUO	método dos elementos finitos	Expôs uma equação para o comprimento de ancoragem por transpasse de barras de aço em vigas, onde esse comprimento depende das características da interface.
2000	ELMORSI	método dos elementos finitos	Descreveu a formulação dos elementos da junção entre viga e pilar de concreto
2000	FERNANDES	barras de aço e concreto e método dos elementos finitos	Descreveu o comportamento da aderência entre o aço e o concreto sob ações monotônicas e repetidas através de investigação experimental.
2000	SPACONE	método dos elementos finitos	Discutiu a importância da modelagem do fenômeno da aderência e do deslizamento no comportamento de estruturas de concreto armado sob carregamento estático e dinâmico
2001	CAO	barra de aço encravada num cilindro de concreto	Observou a degradação da aderência
2001	KWAK	método dos elementos finitos	Desenvolveu um modelo analítico, para análise do comportamento não-linear de vigas submetidas a carregamento cíclico, baseado na relação momento-curvatura
2001	SALARI	equações de equilíbrio de deslocamento e no equilíbrio de forças	Apresentou formulações gerais para elementos unidimensionais considerando efeitos da aderência e do deslizamento na interface entre aço e o concreto armado
2002	MARINS	método dos	Desenvolveu modelagens numéricas

	NETO	elementos finitos	computacionais para análise de concreto armado submetidas ao ensaio de tração simétrica e de viga simétrica submetida à flexão
2002	LIMKATANYU	formulações derivadas de equilíbrio e compatibilidade de eq. diferenciais	Apresentou a teoria e a aplicação de três diferentes formulações utilizadas para modelagem numérica de concreto armado que consideram a aderência entre a barra de aço e o concreto
2002	KAMINSKA	estruturas de vigas, colunas e pórticos	Realizou ensaios para estudar o comportamento do concreto de alta resistência, o comportamento do aço e o comportamento da aderência entre eles.
2002	CHOI	método dos elementos finitos	Analisou a interação a fim de prever a perda da resistência de aderência entre os dois materiais
2002	GIRARD	método dos elementos finitos	Investigou o comportamento de coluna de concreto armado submetida a carregamento cíclico, considerando os efeitos do confinamento do concreto, a perda da rigidez do concreto
2003	JEPSSON	barras de aço em concreto com tubos plásticos ao redor da barra	Analisou através de ensaios a influência da perda de aderência total em regiões da armadura longitudinal de vigas de concreto armado
2003	CHEN	método dos elementos finitos	Investigou a influência da aderência-deslizamento, entre a barra de aço e o concreto, na distribuição das fissuras em elementos de concreto armado
2003	SIMÃO	método dos elementos finitos	Discutiu diversos modelos utilizados para simular o comportamento do aço, do concreto e da aderência
2004	FANG	amostras prismáticas de concreto e aço	Estudou a influência dos níveis de corrosão da armadura de aço sobre o comportamento aderência x deslizamento que ocorre entre a barra e o concreto
2004	JENDELE	método dos elementos finitos	Baseou nas características geométricas unidimensionais da barra de aço e nas propriedades da interface
2004	KWAK	barras de aço e concreto e método dos elementos finitos	Propôs um modelo analítico para simular o comportamento não-linear de estruturas de concreto armado submetidas ao cisalhamento e à tensão normal.
2004	LOWES	método dos elementos finitos	Desenvolveu um método dos elementos finitos, para estruturas submetidas a qualquer tipo de carregamento
2004	FRANÇA	barras de aço e concreto, concreto com resíduos de borracha	Apresentou resultados de ensaios de tração direta e ensaios de arrancamento
2005	LUCCIONI	modelo analítico	Desenvolveu um modelo analítico para o estudo do comportamento de estruturas de concreto armado, formulado a partir da teoria da plasticidade
2005	YANG	método dos	Apresentou um modelo computacional para

		elementos finitos	análise de vigas planas de concreto armado, onde as fissuras se propagam, a partir de um critério de energia, baseadas no conceito de fissuração fictícia
2005	BATIS	barra de aço encravada num cilindro de concreto	Examinou a performance de diferentes tipos de barras de aço, que foram submetidas a diversos estados de corrosão, devido à poluição atmosférica
2005	CAMPIONE	barras de aço em concreto, concreto com fibras e argila expandida	Estudou a aderência da armadura de aço embebida em elementos de concreto leve reforçado com fibras e feito com argila expandida
2005	OLIVEIRA FILHO	viga de concreto armado	Quantificou a perda de rigidez através do cálculo de flechas sucessivas ocorridas durante a aplicação de carregamento cíclico
2006	FANG	amostras prismáticas de concreto e aço e MEF	Estudou a influência da corrosão da armadura de aço sobre o comportamento aderência x deslizamento
2006	JENDELE	método dos elementos finitos	Baseou nas características geométricas unidimensionais da barra, nas propriedades da superfície e na relação tensão de aderência x deslizamento
2006	BROOKE	barras de aço em concreto	Analizou a performance da aderência, entre a armadura de aço e o concreto, no interior da junção viga-pilar, quando submetida a carregamento cíclico
2006	CORONELLI	método dos elementos finitos	Desenvolveu uma modelagem não linear, para análise do comportamento do cisalhamento em vigas de concreto armado.
2006	HIGGINS	viga de concreto armado	Analizou a influência dos estribos, quando submetidos à corrosão acelerada, na capacidade de resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado
2006	KWAK	método dos elementos finitos	Analizou vigas de concreto armado engastadas submetidas ao carregamento cíclico, sendo considerado comportamento da aderência x deslizamento
2006	ALMEIDA FILHO	concreto auto-adensável em barras de aço	O estudo considerou parâmetros como o tipo de concreto (convencional ou auto-adensável), a resistência à compressão do concreto e o diâmetro das barras.
2007	AZAD	viga de concreto armado	Estudou os efeitos da corrosão da armadura de aço sobre o comportamento de vigas fletidas
2007	HADDAD	barras de aço em concreto	Estudou experimentalmente, através de ensaios de arrancamento, os efeitos das reações agregado-cimento
2007	XIAO	barras de aço em concreto	Investigou, através de ensaios de arrancamento, o comportamento da aderência entre a armadura de aço e o concreto produzido com agregados reciclados.

Fonte: O próprio autor

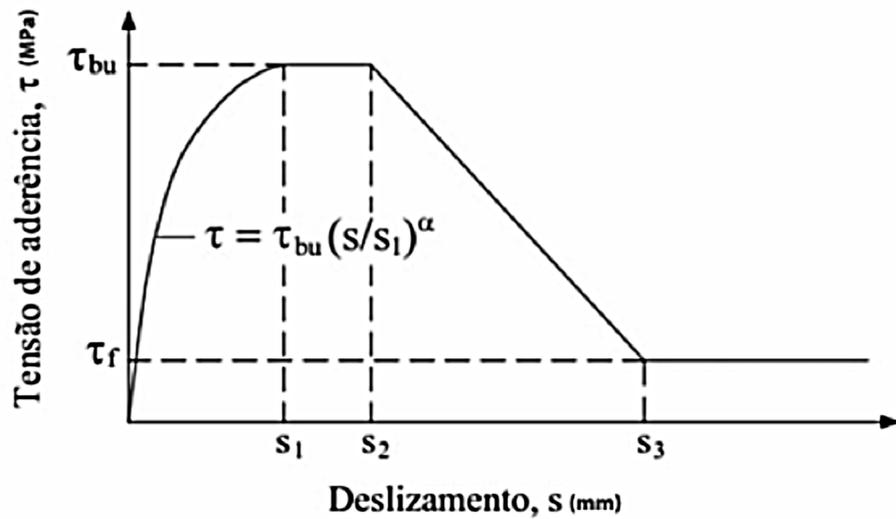


Figura 2.10 – Relação analítica tensão de aderência *versus* deslizamento carregamento monotônico (CEB-FIP MC 1990, 1991).

$$\tau = \tau_{bu} \left(\frac{S}{S_1} \right)^\alpha \quad (2.2)$$

$$\tau = \tau_f \quad (2.3)$$

Onde:

τ = Tensão de aderência;

τ_f = Adesão;

τ_{bu} = Tensão de aderência última;

S = Deslocamento

Tabela 2.2 – Valores proposto pela CEB-FIP MC 1990, 1991).

Valor	Laminado a frio		Laminado a quente	
	Condições de aderência		Condições de aderência	
	Boas	Todos os outros casos	Boas	Todos os outros casos
S1 = S2 = S3	0,01mm	0,01mm	0,01mm	0,01mm
A	0,5	0,5	0,5	0,5
$\tau_{bu} = \tau_f$	$0,1\sqrt{f_{ck}}$	$0,05\sqrt{f_{ck}}$	$0,3\sqrt{f_{ck}}$	$0,15\sqrt{f_{ck}}$

2.4. RESINAS EPOXI

Adesivos epóxi são utilizados em diversas aplicações em engenharia civil hoje em dia, uma aplicação comum é a reabilitação de estruturas de concreto armado, onde os adesivos epóxi proporcionam a transferência de tensão adequada entre os polímeros reforçados com fibras e o concreto circundante (Costa e Barros, 2015).

Segundo LUIZON (2011), as resinas epóxi são polímeros, que misturados com aditivos plastificantes formam poderosas ligas capazes de atingir grande resistência mecânica, física e química além de características como flexibilidade, aderência, impermeabilidade, durabilidade, a vários tipos de materiais.

Em seu estudo, Costa e Barros (2015), caracterizou o comportamento de resistência à tração de um adesivo à base de epóxi construindo um modelo do sistema estrutural vinculado ao carregando até a falha. Aplicando uma tensão constante, houve um aumento de deformação ao longo do tempo. Observou-se o fenômeno denominado de fluência.

Costa e Barros (2015) caracterizou alguns adesivos epóxi usados no fortalecimento de aplicações que utilizam resultados experimentais e um modelo de Hamburg modificado, obtendo as curvas de deformação de fluência ao longo do tempo. Concluíram que, para um nível de tensão até 60% da resistência à tração, o adesivo pode ser assumido como material viscoelástico. Durante o fenômeno de fluência, o material adesivo tem a capacidade de reorganizar sua estrutura interna de forma contínua, resistindo a uma deformação mais alta sem ruptura. Observou-se uma perda de rigidez com a idade do recipiente adesivo. O período de tempo entre a produção de adesivo e a aplicação deve ser cuidadosamente observado.

As principais vantagens da utilização de resinas epóxi são o aumento da resistência mecânica que podem variar quanto a tração de 30 a 95 MPa e à compressão de 120 a 210 MPa. A aderência objeto de estudo deste trabalho desde que respeitada o modo adequado de uso segundo o fabricante e a ausência de carregamento durante a colagem também há um ganho considerável. Entre outras vantagens também estão a retração não havendo necessidade de se deixar juntas; a resistência ao choque sendo muito utilizadas em ambientes de agressivos; a resistência à abrasão e ao desgaste possuindo uma durabilidade alta impedindo o excessivo desgaste; alta estabilidade térmica podendo suportar temperaturas em média de 120 °C sem perda de resistência (Cánovas, 1988).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1.1 Barra de NiTi

Foram utilizadas barras cilíndricas de liga de NiTi pseudoelástica lisas com diâmetro de 2,8 milímetros, fabricadas pela *NDC*, modelo SE508, suas propriedades mecânicas podem ser observadas na tabela 3.1 e composição química podem ser observadas na tabela 3.2 que seguem abaixo:

Tabela 3.1 – Propriedades físicas e mecânicas das barras de NiTi utilizadas (CORRÊA FILHO, 2013).

Propriedades físicas e mecânicas	
Ponto de Fusão (°C)	1310
Densidade (g/cm ³)	6,5
Resistividade Elétrica (μ ohm-cm)	82
Módulo de Elasticidade (GPa)	(Austenita) 70 a 90
Coefficiente de Expansão Térmica (°C) ⁻¹	11 x 10 ⁻⁶
Resistência a Tração (MPa)	≥ 1070
Resistência ao escoamento (MPa)	≥ 390
Alongamento Total (%)	≥ 10

Tabela 3.2 – Composição química das barras de NiTi utilizadas (CORRÊA FILHO, 2013).

Composição química	
Níquel	55,8 % (aprox)
Titânio	44 % (aprox)
Carbono	≤ 0,05 %
Oxigênio	≤ 0,02 %

3.1.2 Aço

Foram utilizadas barras de CA 60 com diâmetro de 5.0 mm nervuradas (tabela 3.3). Produzido de acordo com a norma NBR 7480, o CA-60 é conhecido pela alta resistência, proporcionando estruturas de concreto armado mais leves.

Além disso, o CA-60 Gerdau possui superfície nervurada e é soldável em todas as bitolas e apresentações.

Tabela 3.3 – Propriedades físicas e mecânicas das barras de aço utilizadas (GERDAU, 2017).

Propriedades físicas e mecânicas	
Diâmetro nominal DN (mm)	5,00
Massa nominal (kg/m)	0,154
Resistência característica de escoamento f_y (MPa)	600
Limite de Resistência (MPa)	660
Relação f_{st}/f_y	$\geq 1,05$

3.1.3 Cimento

Foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), comercialmente disponível, cujas características seguem a norma ABNT NBR 5733 (1991) conforme tabela 3.4 abaixo:

Tabela 3.4 – Resistência do cimento CP V-ARI (ABNT NBR 5733, 1991).

Resistência à compressão (MPa)	
1 dia	$\geq 14,0$
3 dias	$\geq 24,0$
7 dias	$\geq 34,0$
28 dias	-

3.1.4 Graute

Foi utilizado também para efeito comparativo o SikaGrout® 250 que é uma argamassa pré-dosada composta de cimento Portland, areia de quartzo e aditivos utilizada em reforços onde necessita-se de alta resistência. A resistência à compressão segue na tabela 3.5 abaixo:

Tabela 3.5 – Resistência do graute (ASTM C 349/02).

Resistência à compressão (MPa)	
1 dia	$\geq 26,0$
3 dias	$\geq 35,0$
7 dias	$\geq 42,0$
28 dias	$\geq 50,0$

3.1.5 Concreto

Como o foco da pesquisa não foi o desenvolvimento do concreto, não foram feitos ensaios de caracterização dos agregados, da água e do cimento. Foi adotado um traço de concreto proposto pelo comitê da Rede Internacional de Laboratórios de Ensaio de Materiais - RILEM TC 225-SAP. Foi adquirido um superplastificante largamente utilizado no mercado atualmente da Sika ViscoCrete® 6500. Com exceção desse aditivo o procedimento experimental foi o mesmo adotado por SILVA (2015) tabela 3.6 para efeito comparativo.

Tabela 3.6 – Composição do traço

Componentes	Massa (kg/m ³)	Volume (l/m ³)
Cimento CP V ARI	700	222,9
Sílica ativa (dosagem 10 % em relação a massa de cimento)	70	30
Areia lavada de rio	1218,0	459,6
Sika ViscoCrete® 6500	12,6	11,5
Água (água/cimento= 0,3)	210	210

O preparo foi realizado em betoneira de eixo inclinado (Figura 3.1), com capacidade para 320 litros e imprimada com argamassa de cimento, a fim de evitar que a água da mistura fosse absorvida pelas paredes internas, anteriormente secas.



Figura 3.1 – Betoneira utilizada para misturar a massa.

A composição do concreto e o procedimento de mistura foram estabelecidos para se obter espalhamento de 190 ± 10 mm, este valor é determinado no estado fresco do concreto, o índice de consistência através de abatimento de tronco de cone e sem os golpes para homogeneização da massa de acordo com a DIN 18555-2.

Foi adotada a ordem de colocação dos materiais na betoneira sugerida pela RILEM TC255-SAP segundo a ordem abaixo:

1. Adição dos componentes secos: areia, sílica ativa e cimento CP V-ARI misturados por 4 minutos;
2. Adição dos componentes líquidos: água e o superplastificante pré-dissolvido misturados por 1 minuto;
3. Mistura por mais 3 minutos todos os componentes;
4. Raspagem dos aglomerados presos as paredes da betoneira por mais 1 minuto;
5. Mistura por 3 minutos;

3.2. FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

Tanto os corpos de prova do concreto quanto o graute foram feitos da mesma forma. Os corpos de prova para teste de resistência foram moldados de acordo com a ABNT NBR 5738/2008, em formas cilíndricas de PVC de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura (Figura 3.2), adensados com haste metálica com 12 golpes de cada vez. Após a moldagem os CP's foram envelopados com plástico filme) para iniciar o processo de cura selada mantidos assim até os 28 dias onde foram rompidos para verificar a resistência à compressão.



Figura 3.2 – Molde para corpos de prova de 100mm x 200mm.

Foram moldados quatro corpos de prova para o concreto e mais quatro corpos de prova para o graute (Figura 3.3). Foi feito um nivelamento nas faces durante a moldagem para melhor distribuição de tensões ao longo da área.

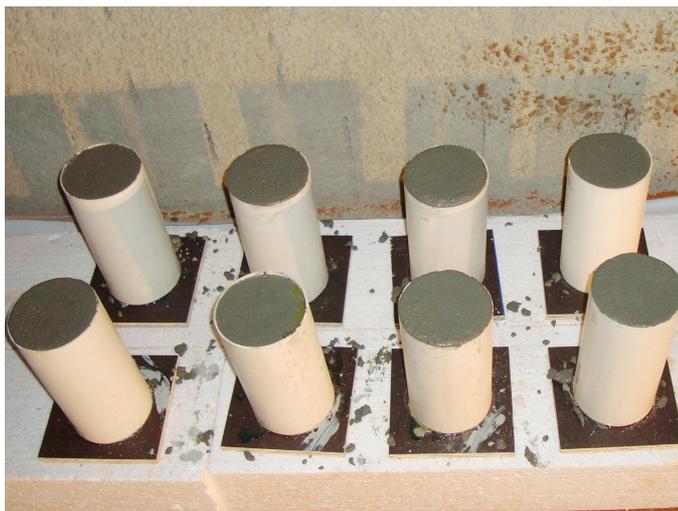


Figura 3.3 – Corpos de prova de concreto.

3.2.1. Resistência à Compressão Simples

Foram utilizadas as normas ABNT NBR 5738 e ABNT NBR 5739/2007 para execução deste ensaio.

Os corpos de prova foram colocados devidamente centralizados em uma prensa hidráulica. A carga de ensaio foi aplicada continuamente e sem choques. A resistência à compressão foi obtida dividindo-se a carga verificada no momento da ruptura pela área da seção transversal do corpo de provas, devendo esse resultado ser expresso com aproximação de 0,1 MPa (NBR 5739/2007). Os resultados do ensaio de compressão estão dispostos na tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Resultado do ensaio de resistência à compressão.

Resistência à compressão (MPa) – 28 dias						
Corpo de Prova	Material	Altura (mm)	Diam. (mm)	Resist. (MPa)	DESVIO	MÉDIA (MPa)
1	Graute	200	100	55,89	2,44	57,32
2	Graute	200	100	57,51		
3	Graute	200	100	56,09		
4	Graute	200	100	59,80		
5	Concreto	200	100	45,70	2,50	43,25
6	Concreto	200	100	42,17		
7	Concreto	200	100	43,53		
8	Concreto	200	100	41,59		

Os resultados obtidos são a média aos 28 dias da resistência à compressão, conforme a Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios.

Resistência à Compressão do Graute	57,32 ± 2,44 MPa
Resistência à Compressão do concreto	43,25 ± 2,50 MPa

3.3. METODOLOGIA PARA FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE ADERÊNCIA.

Os corpos de prova para ensaio de arrancamento foram fabricados conforme citados na norma RILEM TC 225-SAP sendo quadrados nas dimensões de 100 mm de altura x 200 mm de largura x 200 mm de comprimento. Algumas premissas básicas tiveram que ser adotadas para poder analisar e comparar os resultados com SILVA (2015) como: garantir o alinhamento de eixos entre o concreto e a barra de NiTi e organizar os corpos de prova para efetuar a concretagem durante um único dia para garantir a mesma resistência.

Foram feitos moldes de madeirite plastificado para melhor desfôrma, com cantoneiras de alumínio e barras rosqueáveis nas extremidades para facilitar a remoção do corpo de prova após concretado com um furo na parte inferior para ancorar as barras (Figura 3.4).

**Figura 3.4** – Fôrmas para moldagem dos Corpos de Prova.

Para evitar que a barra entrasse em contato direto com o concreto na sessão de 5 centímetros inferior dentro da forma foram colocadas ao redor da barra mangueiras de material polimérico (Figura 3.5) para que o comprimento de ancoragem necessário fosse atingido. Para facilitar a desmoldagem dos corpos de prova também foi aplicado óleo mineral para evitar o atrito entre as superfícies.



Figura 3.5 – Detalhe da mangueira na parte inferior da barra.

Posteriormente foram feitos os concretos para moldagem dos corpos de prova sendo enumerados de 1 a 12 com concreto conforme traço Tabela 3.6 e mais 12 corpos de prova enumerados de 1b a 12b concretados com graute.

Foram preparados 24 corpos de prova com comprimento de ancoragem de 50 mm variando o tipo de concreto, o material das barras e o tratamento das barras de NiTi (Tabela 3.9).

Tabela 3.9 – Resumo dos CP's utilizados.

Corpo de Prova	Material da Barra	Material do Corpo de Prova
01	Aço	Concreto
02	Aço	Concreto
03	Aço	Concreto
04	NiTi epóxi	Concreto
05	NiTi epóxi	Concreto
06	NiTi epóxi	Concreto
07	NiTi jateado	Concreto
08	NiTi jateado	Concreto
09	NiTi jateado	Concreto
10	NiTi barra lisa	Concreto
11	NiTi barra lisa	Concreto
12	NiTi barra lisa	Concreto
01b	Aço	Graute
02b	Aço	Graute
03b	Aço	Graute
04b	NiTi epóxi	Graute
05b	NiTi epóxi	Graute
06b	NiTi epóxi	Graute
07b	NiTi jateado	Graute
08b	NiTi jateado	Graute
09b	NiTi jateado	Graute
10b	NiTi barra lisa	Graute
11b	NiTi barra lisa	Graute
12b	NiTi barra lisa	Graute



Figura 3.8 – Detalhe do plástico filme para cura selada.

O concreto ficou em processo de cura selada por um período de 28 dias para ganho de resistência. Após isso foram desformados e levados para o laboratório da UNIEVANGELICA de Anápolis onde foram devidamente enumerados (Figura 3.9) e (Tabela 3.8) após isso iniciaram os ensaios de arrancamento.



Figura 3.9 – Detalhe dos corpos de prova enumerados antes do início dos ensaios.

Foi adotado comprimento de ancoragem de 50mm padronizado pelo corpo de prova RILEM TC 225-SAP. Foram realizados dois tratamentos superficiais nas barras para aumentar a rugosidade superficial do NiTi. Foi feito jateamento de areia através de um compressor de ar (Figura 3.10).

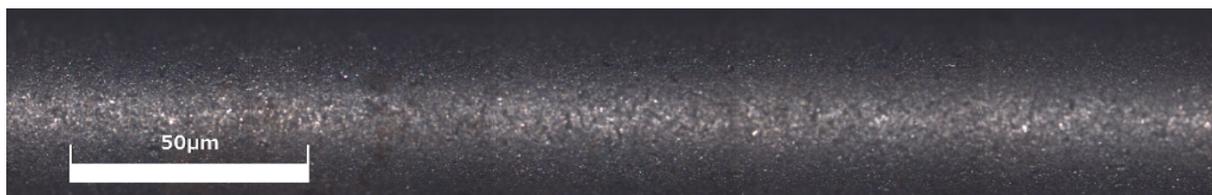


Figura 3.10 – Fotografia do CONFOCAL da barra de NiTi jateada.

Também foi feita aplicação de adesivo estrutural epóxi para simular nervuras nas barras de NiTi (Figura 3.11).



Figura 3.11 – Fotografia do CONFOCAL da barra de NiTi com adesivo estrutural epóxi.

3.4. METODOLOGIA PARA OS ENSAIOS

3.4.1. ENSAIO DE RUGOSIDADE

Foram feitos ensaios no microscópio Confocal no Laboratório da Universidade de Brasília com o intuito de construir imagens tridimensionais em alta resolução e medir a rugosidade superficial das barras. Em cada tipo de barra foram feitos 5 ensaios espaçados a cada 10 milímetros em determinada seção da barra marcada com caneta e repetidos três vezes cada para fazer uma média. Foram repetidos os ensaios na barra nervurada, na barra de NiTi lisa, na barra de NiTi jateada de areia e na barra de NiTi com adesivo estrutural epóxi.

3.4.2. ENSAIO DE ARRANCAMENTO

Os ensaios foram feitos numa máquina universal de ensaios com prensa mecânica digital 100t CONTENCO® (Figura 3.12) e utilizado o software Pavitest Concreto versão 2.0.00.05 para aquisição de dados e geração de gráficos.



Figura 3.12 – Máquina Universal de Ensaiois CONTENCO®.

Como as castanhas da máquina (Figura 3.13) são diferentes da prensa da UnB foi necessário fazer um novo suporte para apoio direto na máquina de ensaio de tração respeitando os espaçamentos para colocação do corpo de prova todo em aço 1020 com barras rosqueáveis, porca e contra-porca (Figura 3.14).



Figura 3.13 – Castanhas da Máquina Universal de Ensaiois aproximadamente 20 centímetros de altura.



Figura 3.14 – Garra adaptada para ensaio de tração.

O ensaio foi feito de maneira direta conforme os dados abaixo:

Deslizamento: 2mm por minuto;

Tipo de ensaio: Monotônico;

Distância das Garras: 420mm;

Força axial: Tração;

Para efeito de comparação foram adotados os mesmos parâmetros conforme os ensaios de SILVA(2015). O corpo de prova foi colocado na máquina e ajustado para início dos ensaios (Figura 3.15).



Figura 3.15 – Corpo de prova na garra para início dos ensaios de arrancamento.

Conforme constatou SILVA (2015) que houve deslizamento nas duas extremidades nos modelos para ensaios indiretos onde haviam dois corpos de prova de concreto nas extremidades e uma barra unindo ambos, foram feitos somente ensaios diretos onde a barra foi apoiada diretamente no mordente da garra (Figura 3.16).

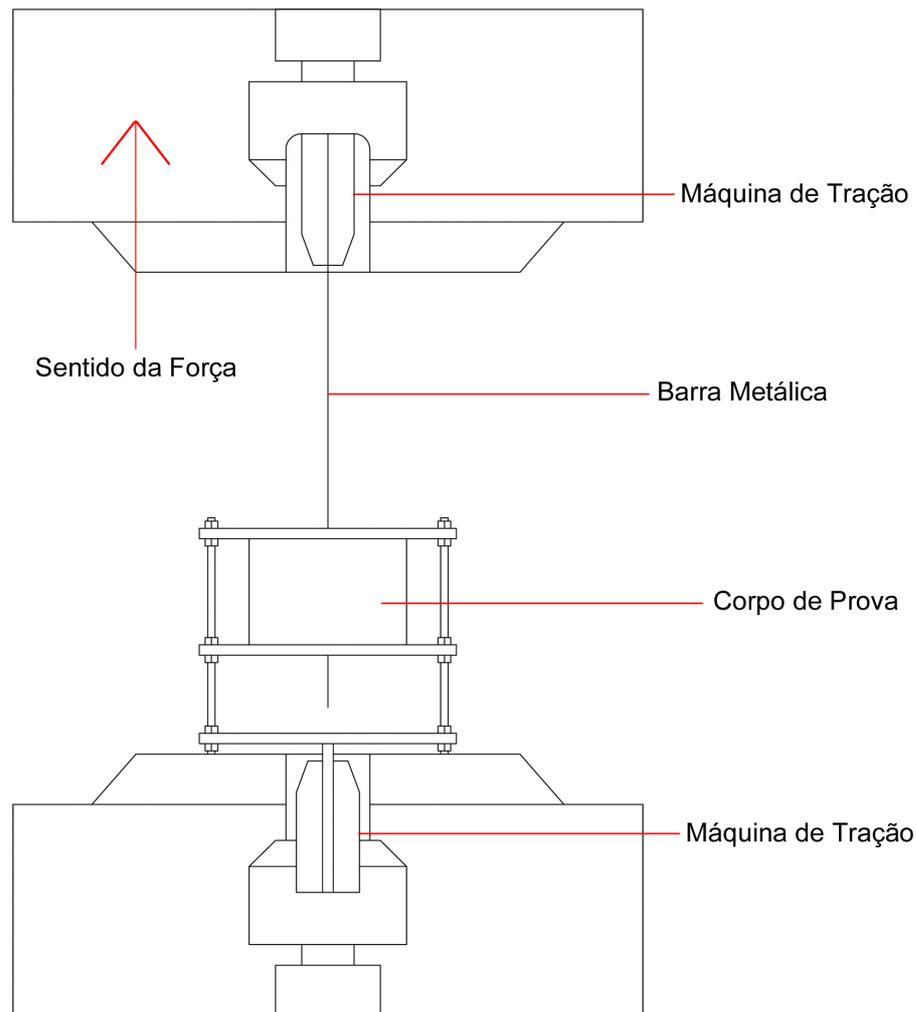


Figura 3.16 – Esquema de apoio para material dos ensaios diretos.

Para análise do gráfico de tensão x deslocamento a adesão pode estar presente representando o descolamento da barra do concreto. Os trechos S1, S2 e S3 representam as mudanças no comportamento dos deslizamentos baseados na força. O trecho S1 vai do início de aplicação da força até o pico de tensão gerado no ensaio. Quanto mais próximo de S3 maior será o deslizamento e menor a força necessária (SILVA, 2015).

3.4.3. VERIFICAÇÃO DO CÁLCULO DE TENSÃO DE ADERÊNCIA DE ACORDO COM A NBR 6118:2014

Segundo a NBR 6118: 2014, a aderência entre o concreto e a barra pode ser calculada através da equação:

$$f_{bd} = \left(\frac{0,21 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3}{\gamma_c} \right) \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (3.1)$$

onde:

f_{bd} = resistência de aderência de cálculo;

f_{ck} = resistência característica à compressão;

η_1 = coeficiente de conformação superficial 1,00 para barras lisas de aço, 1,40 para barras entalhadas e 2,25 para barras nervuradas;

η_2 = coeficiente de conformação superficial 1,00 situações de boa aderência e 0,70 situações de má aderência;

η_3 = coeficiente de conformação superficial 1,00 para $\varnothing \leq 32\text{mm}$ e 0,92 para $\varnothing = 40\text{mm}$;

γ_c = coeficiente de ponderação da resistência do concreto.

A tabela 3.10 apresenta os cálculos feitos para cada uma das situações através do Estado de limite último (ELU) e considerando boa aderência, devido à largura do corpo de prova de concreto em relação à barra. Neste caso, os valores para γ_c é: 1,20 combinações especiais ou de construção.

Tabela 3.10 – Cálculos adaptados da NBR 6118:2014.

f_{bd} (MPa) - $\varnothing \leq 32\text{mm}$ - $\gamma_c = 1,2$			
MATERIAL	BARRAS		
	Lisa	Entalhada	Nervurada
CONCRETO C40	2,15	3,02	4,85
GRAUTE C50	2,60	3,64	5,85

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise da rugosidade superficial

Como pode ser visto na Tabela 4.1 a barra de NiTi liso possui a menor rugosidade média pois sua superfície é polida e mais lisa que a do aço convencional que possui nervuras em sua geometria. Foi verificado a rugosidade da barra jateada que aumentou (cerca de duas vezes), comparada ao NiTi liso (Figura 4.1).

Tabela 4.1 – Rugosidade Média das barras.

Material	Cut Off (mm)	Rugosidade Média - Ra (μm)			Média (μm)
		1 ^a	2a	3a	
Aço Convencional	8	32,92	34,58	29,85	32,45 \pm 2,39
NiTi liso	0,8	0,47	0,71	0,79	0,65 \pm 0,16
NiTi Jateado	0,8	1,16	1,18	1,21	1,18 \pm 0,02
NiTi epóxi	8	14,48	16,98	22,69	18,04 \pm 4,20

Observa-se também que a rugosidade da barra de NiTi com resultados mais expressivos foram as barras com epóxi com cerca de 28 vezes mais rugosidade que as barras lisas.

As barras de aço nervuradas conseguiram os melhores resultados entre todas as barras conforme o esperado, porém vale ressaltar que as barras de epóxi em comparação ao aço conseguiram atingir 55% da rugosidade das barras nervuradas.

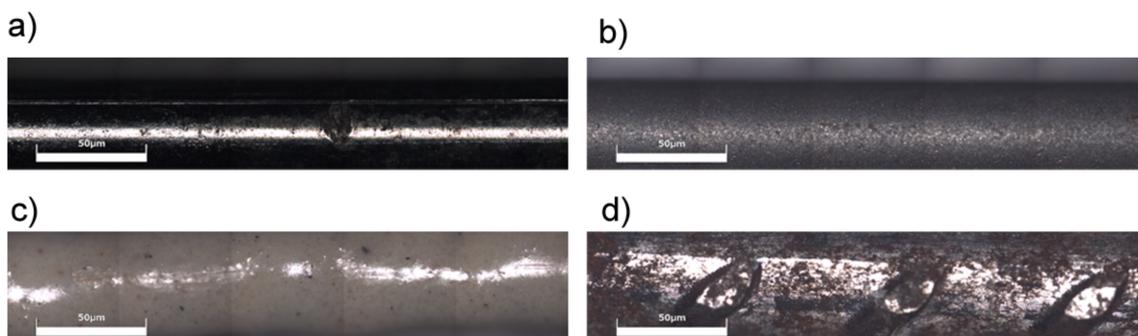


Figura 4.1 – Fotos do CONFOCAL: a) barra lisa, b) barra jateada, c) barra com epóxi e d) barra de aço convencional.

4.2. Ensaio de Arrancamento

4.2.1 Barras de aço convencional e Concreto x Barras de aço convencional e Graute.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração podem ser verificados nos Anexos I (barras de aço convencional e concreto) e II (barras de aço convencional e graute), e os resumos dos gráficos a seguir na Figura 4.2:

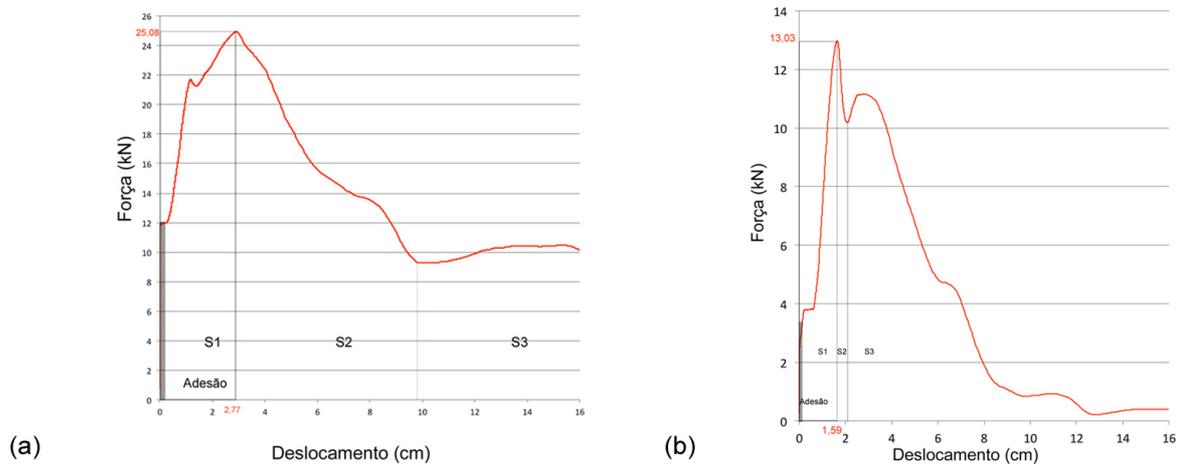


Figura 4.2 – Gráfico Força x Deslocamento aço e concreto (a) x aço graute (b).

No corpo de prova demonstrado na figura (a) foi possível identificar as três fases de aderência e a fase de adesão, na fase S1 resultou uma força de 25,08 kN e deslocamento de 2,77 cm foi executado com barras de aço e concreto convencional. Já no corpo de prova da figura (b) apresentou as três fases de aderência e a fase de adesão, tensão máxima com força de 13,03 kN e deslocamento de 1,59 cm. Nesses corpos de prova foram utilizados concreto figura (a) e graute figura (b). Abaixo segue as tabelas resumo 4.2 de todas as fases de aderência e fase de adesão e tabela 4.3.

Tabela 4.2 – Fases de aderência e adesão concreto x graute.

	Adesão (kN)	S1 (kN)	S2 (kN)	S3 (kN)
Aço x Concreto	6,47	14,45	5,21	10,19
Aço x Graute	2,43	12,15	4,86	0,39

Tabela 4.3 – Deslocamentos concreto x graute.

	Deslocamento Adesão (cm)	Deslocamento S1 (cm)	Deslocamento S2 (cm)	Deslocamento S3 (cm)
Aço x Concreto	0,45	2,46	6,86	15,54
Aço x Graute	0,25	3,22	7,06	15,81

Conforme pode ser visto abaixo, a figura 4.3 demonstra as fases de adesão e aderência onde pode ser visto que as barras de aço convencional e concreto obtiveram os melhores resultados provavelmente devido a presença de agregado miúdo em sua composição e possuir um menor abatimento o que pode explicar os resultados obtidos nos ensaios. E na figura 4.4 mostra os deslocamentos em função das fases de aderência demonstrando que as barras de aço convencional com graute houve maior deslocamentos devido ao maior abatimento do graute em relação ao concreto.

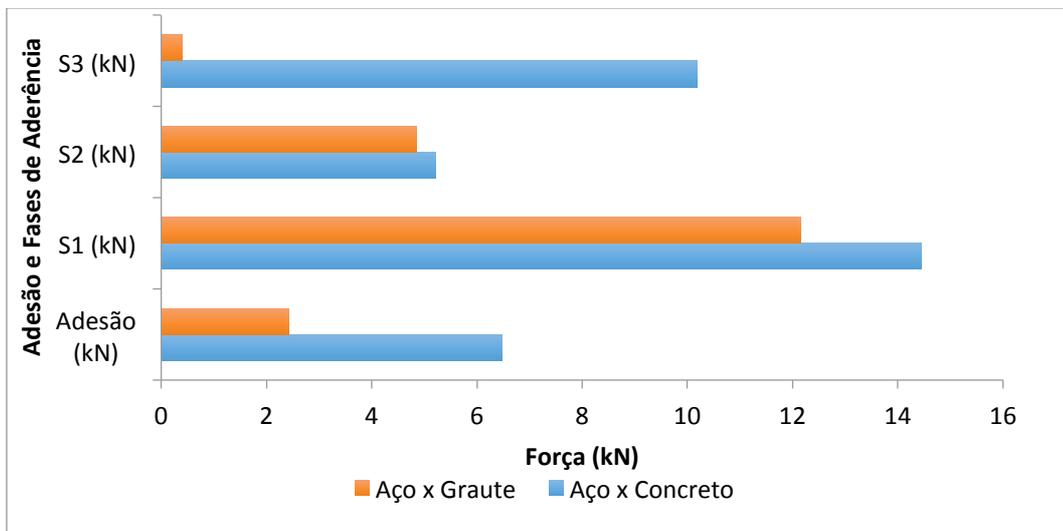


Figura 4.3 – Adesão e fases de Aderência em barras de aço do concreto x graute.

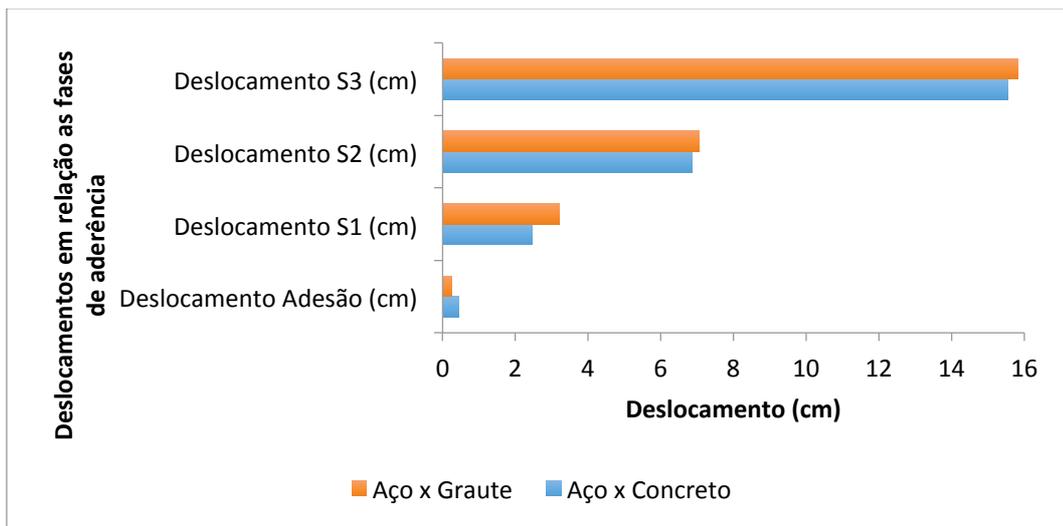


Figura 4.4 – Deslocamentos em relação as fases de aderência em barras de aço do concreto x graute.

4.2.2 Barras de NiTi epóxi e Concreto x Barras de NiTi epóxi e Graute.

Todos os resultados dos ensaios de arrancamento podem ser analisados em Anexos III (barras de NiTi epóxi e concreto) e IV (barras de NiTi epóxi e graute). Na figura 4.5 abaixo mostra dois gráficos das barras de NiTi epóxi e concreto (a) e a barra de NiTi epóxi e graute.

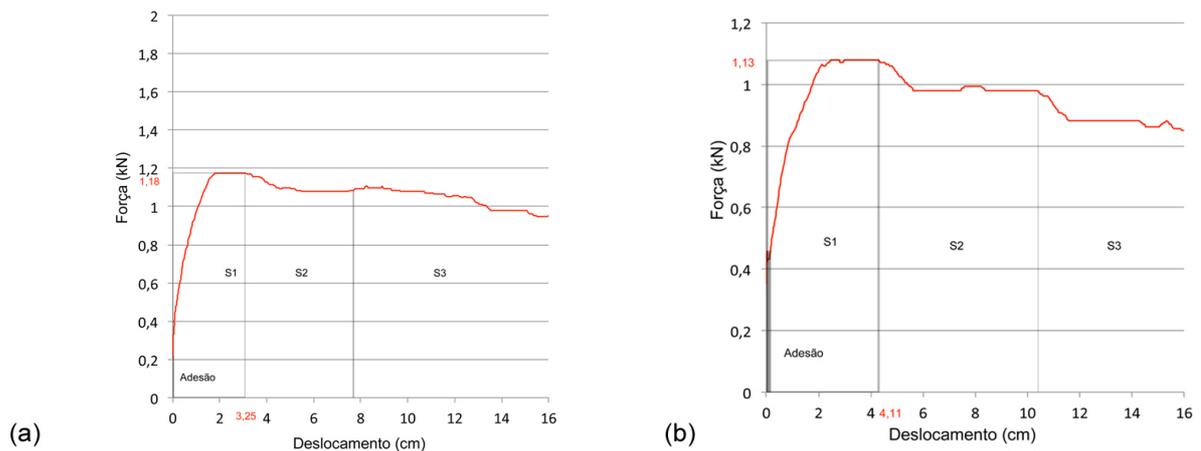


Figura 4.5 – Gráfico Força x Deslocamento NiTi epóxi e concreto (a) x NiTi epóxi e graute (b).

O arrancamento dos CPs 04,05 e 06 (Figura 4.4), foram semelhantes ambos apresentaram a fase de adesão e as três fases de aderência, ficaram com tensão entre 1 e 2 kN e o deslocamento próximo de 4 cm na fase S1. A força ficou oscilando porém não passa da tensão máxima em cada fase. Segue as tabelas resumo 4.4 de todas as fases de aderência e fase de adesão e tabela 4.5.

Tabela 4.4 – Fases de aderência e adesão NiTi epóxi e concreto x NiTi epóxi e graute.

	Adesão (kN)	S1 (kN)	S2 (kN)	S3 (kN)
NiTi epóxi x Concreto	0,52	1,34	1,2	0,94
NiTi epóxi x Graute	0,46	1,13	0,98	0,98

Tabela 4.5 – Deslocamentos NiTi epóxi e concreto x NiTi epóxi e graute.

	Deslocamento Adesão (cm)	Deslocamento S1 (cm)	Deslocamento S2 (cm)	Deslocamento S3 (cm)
NiTi epóxi x Concreto	0,02	3,59	8,1	15,91
NiTi epóxi x Graute	0,05	7,93	12,5	15,91

A figura 4.6 mostra os ensaios nas barras de NiTi com epóxi e concreto x as barras de NiTi com epóxi e graute onde pode notar que a fase de adesão ficou abaixo de 0,5 kN e a maior fase de aderência foi na fase S1, conforme o esperado. Porém continuou com forças similares a fase S1 nos trechos S2 e S3 para o concreto e para o graute o que demonstra que embora o epóxi não tenha conseguido aumentar a tensão de aderência significativamente, foi capaz de distribuir melhor as tensões de aderência nas fases de S2 e S3. A figura 4.7 demonstra os deslocamentos em função das fases de aderência e pode se notar que o deslocamento do NiTi epóxi no graute no trecho S1 foi quase igual ao deslocamento do NiTi epóxi no concreto no trecho S2 o que mostra que o concreto novamente foi superior pois quanto menor o deslocamento no trecho S1 maior a tensão de aderência.

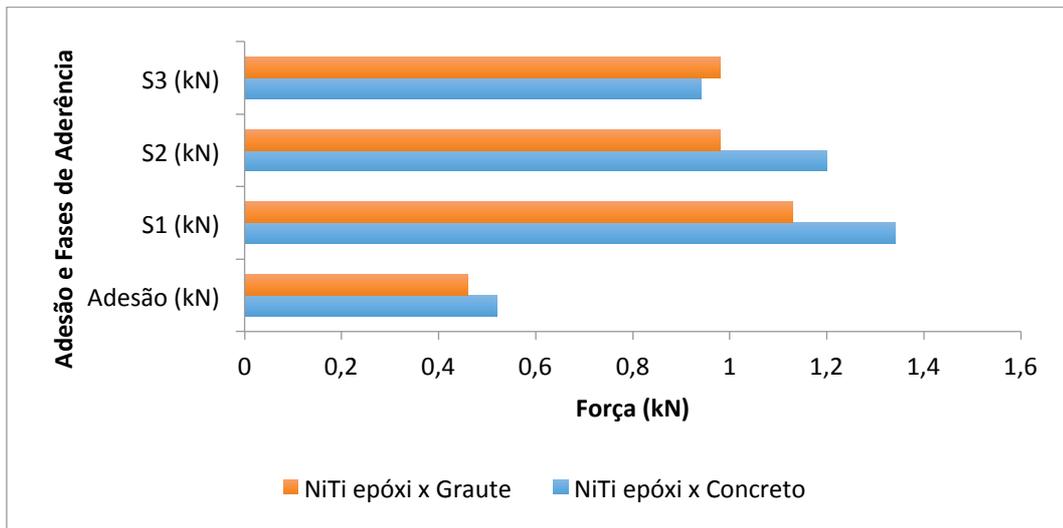


Figura 4.6 – Adesão e fases de Aderência em NiTi epóxi e concreto x NiTi epóxi e graute.

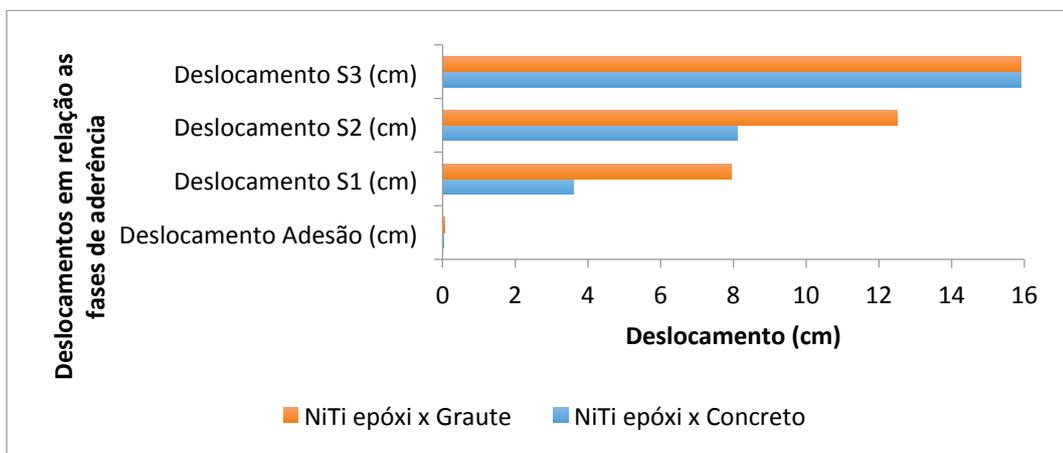


Figura 4.7 – Deslocamentos em NiTi epóxi e concreto x NiTi epóxi e graute.

4.2.3 Barras de NiTi jateado e Concreto x Barras de NiTi jateado e Graute.

Abaixo os ensaios dos corpos de prova de NiTi jateadas de areia e concreto e barras de NiTi jateadas de areia e graute (Figura 4.8).

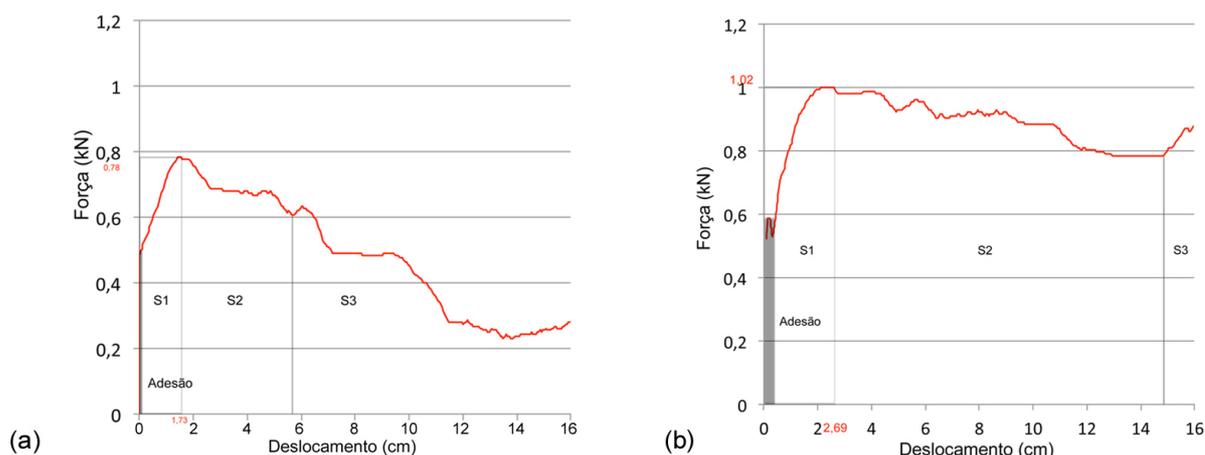


Figura 4.8 – Gráfico Força x Deslocamento NiTi jateado e concreto (a) x NiTi jateado e graute (b).

No corpo de prova acima de concreto com barras de NiTi jateada de areia a força máxima foi de 0,78 kN e um deslocamento de 1,73 cm na fase S1, declinando a força na fase S2 e um deslocamento próximo de 6 cm, e na fase S3 houve um declínio da força até o arrancamento total da barra.

No corpo de prova de graute no início houve fase de adesão até próximo de 0,6 kN, após isso a barra descolou e iniciou o deslocamento chegando a uma força máxima de 1,02 kN com deslocamento de 2,69 cm na fase S1. Na fase S2 houve oscilação de força mas não ultrapassou a tensão máxima presente na fase S1. Na fase S3 houve um pequeno acréscimo de força e ficou oscilando e no final houve um acréscimo, provavelmente por alguma rebarba deixada devido ao corte da barra ou efeito de jateamento. Conforme tabelas 4.6 e 4.7.

Tabela 4.6 – Fases de aderência e adesão NiTi jateado e concreto x NiTi jateado e graute.

	Adesão (kN)	S1 (kN)	S2 (kN)	S3 (kN)
NiTi Jateado x Concreto	0,33	2,98	0,75	0,75
NiTi Jateado x Graute	0,65	1,18	0,88	0,84

Tabela 4.7 – Deslocamentos NiTi jateado e concreto x NiTi jateado e graute.

	Deslocamento Adesão (cm)	Deslocamento S1 (cm)	Deslocamento S2 (cm)	Deslocamento S3 (cm)
NiTi Jateado x Concreto	0,01	1,10	9,05	15,89
NiTi Jateado x Graute	0,03	2,27	11,03	15,89

A figura 4.9 mostra os ensaios nas barras de NiTi com jateado de areia e concreto x as barras de NiTi com jateado de areia e graute onde pode notar que a fase de adesão ficou entre 0,3 e 0,7 kN e a maior fase de aderência foi na fase S1, conforme o esperado. A figura 4.10 mostra os deslocamentos em relação as fases.

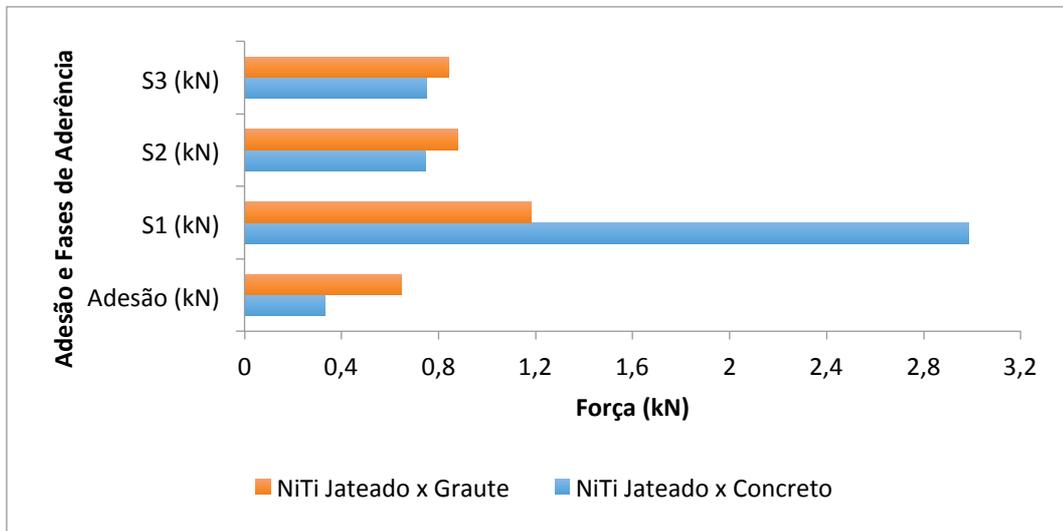


Figura 4.9 – Adesão e fases de Aderência em NiTi jateado e concreto x NiTi jateado e graute.

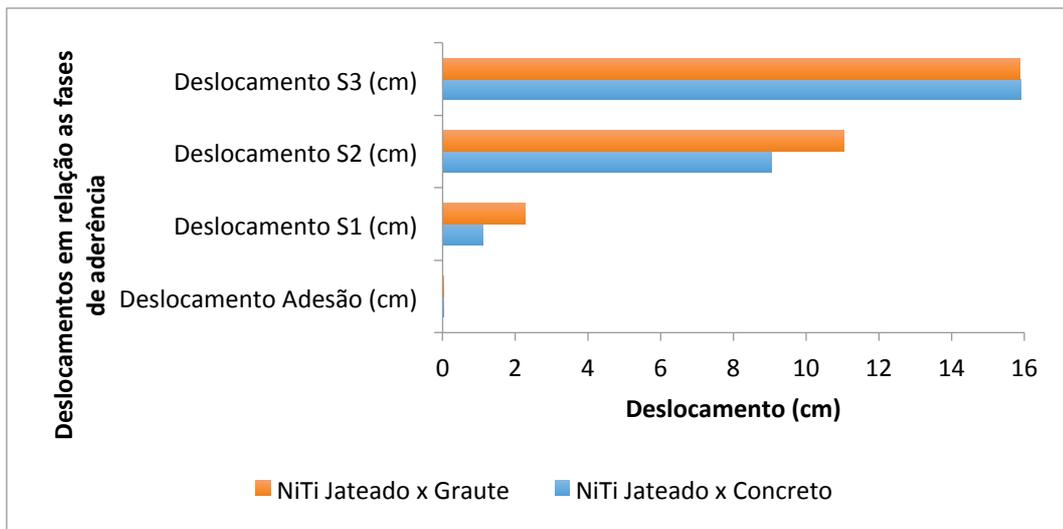


Figura 4.10 – Deslocamentos em NiTi jateado e concreto x NiTi jateado e graute.

4.2.4 Barras de NiTi lisas e Concreto x Barras de NiTi lisas e Graute.

Conforme pode ser visto na figura 4.11 os deslocamentos foram mais constantes com uma tensão após a fase de adesão quase estável oscilando pouco, pois a barra lisa apresentava baixa resistência ou rugosidade. Apresentou as três fases de aderência com uma tensão máxima de 1,18 kN e um deslocamento de 3,96 cm na fase S1 no concreto, já no graute os resultados foram bem mais baixos também apresentou as três fases de aderência com uma tensão máxima de 0,88 kN e um deslocamento de 3,71 cm na fase S1 no graute, o que novamente demonstra os melhores resultados em concreto embora a resistência à compressão dos corpos de prova de concreto foram inferiores ao graute.

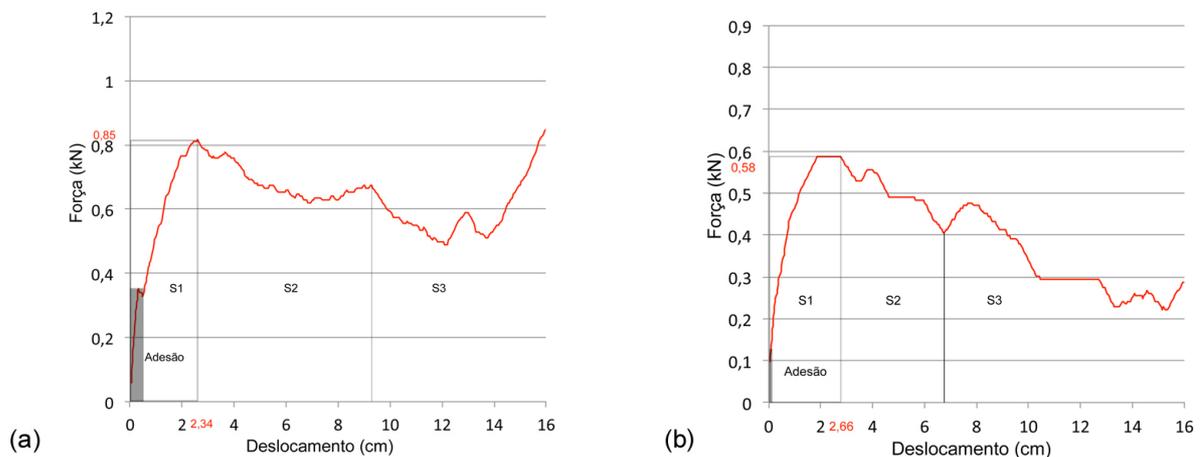


Figura 4.11 – Gráfico Força x Deslocamento NiTi liso e concreto (a) x NiTi liso e graute (b).

Os resultados dos corpos de prova em barras lisas de NiTi em concreto e graute podem ser vistos em Anexos VII e VIII, respectivamente.

Tabela 4.8 – Fases de aderência e adesão NiTi liso e concreto x NiTi liso e graute.

	Adesão (kN)	S1 (kN)	S2 (kN)	S3 (kN)
NiTi Liso x Concreto	0,37	0,94	0,72	1,01
NiTi Liso x Graute	0,13	0,68	0,35	0,32

Tabela 4.9 – Deslocamentos NiTi jateado e concreto x NiTi jateado e graute.

	Deslocamento Adesão (cm)	Deslocamento S1 (cm)	Deslocamento S2 (cm)	Deslocamento S3 (cm)
NiTi Liso x Concreto	0,15	2,83	11,30	15,88
NiTi Liso x Graute	0,01	3,06	9,21	15,83

Na tabela 4.8 acima nota-se que todas as fases de adesão e aderência em barras de NiTi lisas e concreto foi preciso uma intensidade de força bem maior do que as barras de NiTi lisas em graute para arrancar a barra do corpo de prova o que novamente demonstra a superioridade em termos de tensão de aderência do concreto em relação ao graute. Já na tabela 4.9 quase não houve deslocamento na fase de adesão da barra do NiTi liso no graute o que demonstra os resultados inferiores dos corpos de prova em graute, com deslocamento maior na fase S1, e menor deslocamento nas fases S2 e S3 o que demonstra que nos corpos de prova de graute há uma melhor distribuição das tensões de aderência porém não representa boas respostas quanto ao aumento de tensões. O que também é demonstrado nas figuras 4.12 e 4.13 abaixo.

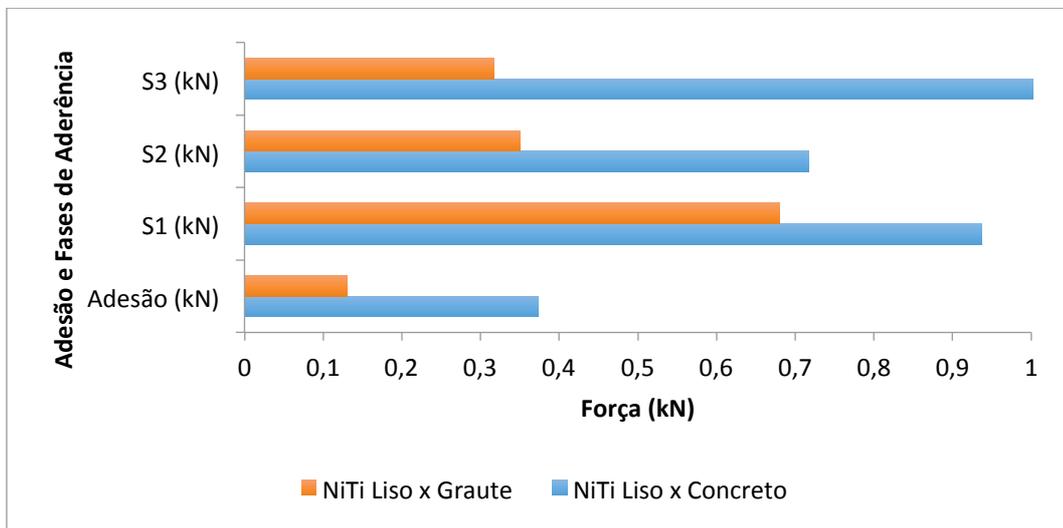


Figura 4.12 – Adesão e fases de Aderência em NiTi liso e concreto x NiTi liso e graute.

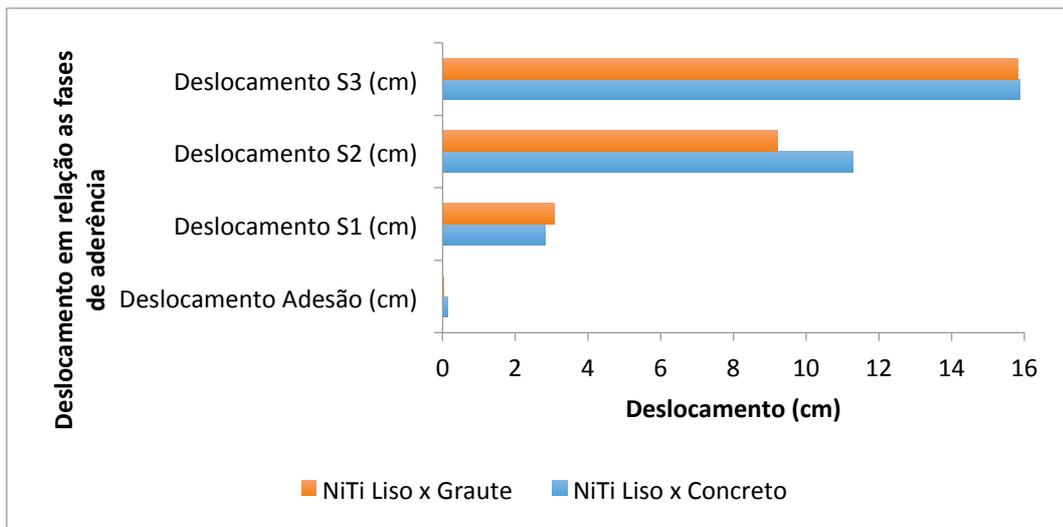


Figura 4.13 – Deslocamentos em NiTi liso e concreto x NiTi liso e graute.

A tabela 4.10 abaixo apresenta os resultados das tensões de aderência calculadas em função do diâmetro da barra e a força aplicada no ensaio de arrancamento. Estava disponível barras de NiTi de 2,8mm de diâmetro, não foi possível padronizar o diâmetro das barras para fazer o ensaio, porém quanto menor o diâmetro da barra maior a tensão de aderência.

Tabela 4.10 – Tensões de aderência.

CORPO DE PROVA	FORÇA MÁXIMA (kgf)	DIÂMETRO (mm)	TENSÃO DE ADERÊNCIA (MPa)	MATERIAIS
02	1370	5	17,095	Aço x Concreto
03	1290	5	16,096	Aço x Concreto
04	190	2,8	4,234	NiTi epóxi X Concreto
05	130	2,8	2,897	NiTi epóxi X Concreto
06	100	2,8	2,223	NiTi epóxi X Concreto
07	80	2,8	1,783	NiTi jateado x Concreto
08	120	2,8	2,674	NiTi jateado x Concreto
09	130	2,8	2,897	NiTi jateado x Concreto
10	130	2,8	2,897	NiTi liso x Concreto
11	150	2,8	3,342	NiTi liso x Concreto
12	130	2,8	2,897	NiTi liso x Concreto
01b	1330	5	16,595	Aço x Graute
02b	1150	5	14,349	Aço x Graute
03b	1250	5	15,597	Aço x Graute
04b	120	2,8	2,674	NiTi epóxi x Graute
05b	130	2,8	2,897	NiTi epóxi x Graute
06b	120	2,8	2,674	NiTi epóxi x Graute
07b	110	2,8	2,451	NiTi jateado x Graute
08b	130	2,8	2,897	NiTi jateado x Graute
09b	120	2,8	2,674	NiTi jateado x Graute
10b	90	2,8	2,005	NiTi liso x Graute
11b	100	2,8	2,228	NiTi liso x Graute
12b	60	2,8	1,337	NiTi liso x Graute

Os corpos de prova compostos por barras de aço convencional apresentaram resistência cerca de sete vezes maior que os outros de sua categoria, uma solução para apresentar resultados mais confiáveis seria fazer o procedimento de capeamento com enxofre dos corpos de prova conforme a ASTM C 39: 2003 que requer as extremidades dos corpos-de-prova sejam retificadas de modo que as superfícies do carregamento na hora do ensaio de compressão sejam planas e perpendiculares ao eixo longitudinal do corpo-de-prova com desvio máximo de 0,5°.

Já o corpo de prova 04 também devido à falta de capeamento gerou um resultado diferente do esperado pois o relevo do corpo de prova não ficou uniforme.

Tabela 4.11 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios.

CPs	MATERIAL	BARRA	TENSÃO DE ADERÊNCIA MÉDIA (MPa)	RUGOSIDADE MÉDIA - Ra (µm)
02 – 03	Concreto	Aço convencional	16,60 ± 0,71	32,451 ± 2,39
04 - 05 - 06	Concreto	NiTi epóxi	3,12 ± 1,02	18,049 ± 4,20
07 - 08 - 09	Concreto	NiTi jateado	2,45 ± 0,59	1,184 ± 0,02
10 - 11 - 12	Concreto	NiTi liso	3,05 ± 0,26	0,654 ± 0,16
01b - 02b - 03b	graute	Aço convencional	15,51 ± 1,13	32,451 ± 2,39
04b - 05b - 06b	graute	NiTi epóxi	2,75 ± 0,13	18,049 ± 4,20
07b - 08b - 09b	graute	NiTi jateado	2,67 ± 0,22	1,184 ± 0,02
10b - 11b - 12b	graute	NiTi liso	1,86 ± 0,46	0,654 ± 0,16

Com base nos resultados obtidos e ensaios, analisados estatisticamente na tabela 4.11, estão as médias de tensões de aderência em MPa podemos observar que as barras de aço convencional apresentaram resultados mais satisfatórios devido a nervura.

A melhor média de tensão de aderência entre as barras de NiTi foram as barras com epóxi de 3,12 ± 1,02 MPa no concreto e 2,75 ± 0,13 MPa no graute conforme pode ser visto nas tabelas 4.10 e 4.11, de 3,12 MPa ficando inferior somente às barras de aço. O que confirma os estudos de KEMP, BRESNY e UNTERSPAN, citados por FRANÇA (2004), onde os autores chegaram à conclusão de que a melhor aderência ocorreu em barras com rugosidade obtidas artificialmente.

Nos primeiros moldes da barra jateada foram comprovados os resultados de SILVA (2015) que a rugosidade média ficou cerca de 80% maior que a rugosidade na barra lisa. Porém a tensão de aderência no concreto foi maior em barras lisas que barras jateadas inversamente ao que aconteceu no graute, provando que o graute possui melhor resistência em comparação ao concreto convencional.

Conforme pode ser observado acima as barras lisas obtiveram as tensões de aderência quarenta e nove vezes inferior as barras de aço o que também foi observado por VIEIRA (1994) que justificou que o estado superficial das barras lisas,

onde a resistência de aderência está ligada à adesão, tem influência significativa sobre a aderência que elas possam desenvolver.

Tabela 4.12 – Comparação dos resultados com o valor esperado (%).

CPs	MATERIAL	BARRA	TENSÃO DE ADERÊNCIA MÉDIA (MPa)	% em relação ao esperado
02 – 03	Concreto	Aço convencional	16,60 ± 0,71	342,26
04 - 05 - 06	Concreto	NiTi epóxi	3,12 ± 1,02	64,33
07 - 08 - 09	Concreto	NiTi jateado	2,45 ± 0,59	113,95
10 - 11 - 12	Concreto	NiTi liso	3,05 ± 0,26	141,86
01b - 02b - 03b	graute	Aço convencional	15,51 ± 1,13	265,12
04b - 05b - 06b	graute	NiTi epóxi	2,75 ± 0,13	47,01
07b - 08b - 09b	graute	NiTi jateado	2,67 ± 0,22	102,69
10b - 11b - 12b	graute	NiTi liso	1,86 ± 0,46	71,53

A tabela 4.12 demonstra um comparativo de valores entre a tensão de aderência encontrada nos ensaios realizados com o valor esperado de tensão de aderência conforme o tipo de concreto e os diversos tipos de tratamento superficial das barras: lisa, entalhada e nervurada.

Tabela 4.13 – Resultados Tensão de Aderência e Rugosidade Média.

Material	Tensão de Aderência (Mpa)	Rugosidade Média (μm)
NiTi epóxi X Concreto	3,12	18,049
NiTi jateado x Concreto	2,45	1,184
NiTi liso x Concreto	3,05	0,654
NiTi epóxi x Graute	2,75	18,049
NiTi jateado x Graute	2,67	1,184
NiTi liso x Graute	1,86	0,654
Aço x Concreto	16,6	32,45
Aço x Graute	15,51	32,45

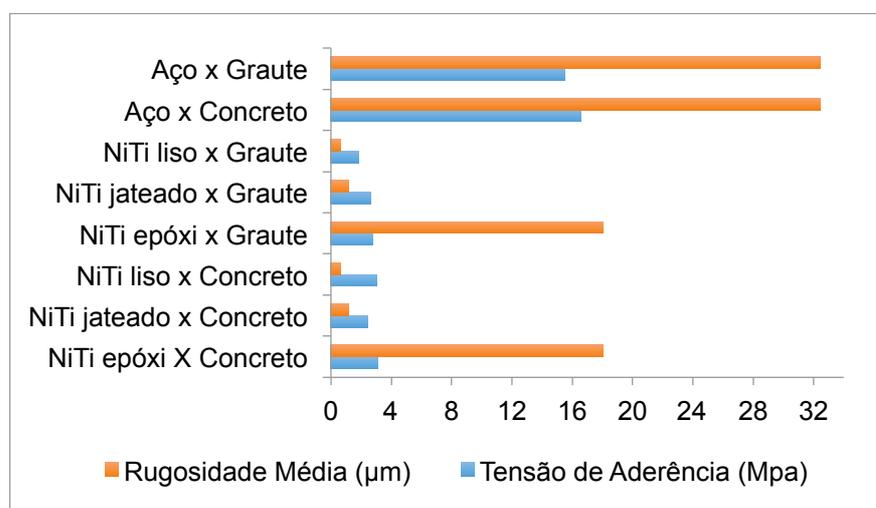


Figura 4.14 – Gráfico comparativo Rugosidade Média x Tensão de Aderência

Conforme pode ser observado na Tabela 4.13 e ilustrado na Figura 4.14 as barras de aço com graute quanto com concreto obtiveram resultados bastante expressivos com relação à tensão de aderência (15,51 MPa e 16,6 MPa respectivamente) e rugosidade média de 32,45 μm . As barras de NiTi com epóxi obtiveram resultados de tensão de aderência da ordem de 2,75 MPa no graute e 3,12 MPa no concreto e 18,049 μm de rugosidade média. Mesmo a rugosidade aumentando bastante não foi suficiente para gerar um aumento significativo na tensão de aderência, ficando longe da tensão do aço. Talvez para gerar uma maior tensão de aderência será necessário aumentar ainda mais a rugosidade média nas barras de NiTi.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Com os resultados obtidos nos ensaios, foi possível chegar a algumas considerações e sugestões para trabalhos futuros, as quais serão abordadas neste capítulo.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em suma, este tipo de ligas tem comportamentos e propriedades que lhes permitem poder ser utilizadas no dia-a-dia nos diferentes campos da ciência e merecendo ser estudado mais a fundo com o intuito de melhorar sua aderência ao concreto pelo modelo proposto, permitindo o seu melhoramento e desenvolvimento de novas técnicas para maior empregabilidade dessas ligas.

Embora foi comprovado nos testes e resultados que o graute possua maior resistência à compressão (Tabela 3.8) cerca de 32% superior ao concreto convencional, nos ensaios de arrancamento os corpos de prova com concreto mostraram resultados de cerca de 11% maior quanto a tensão de aderência do graute provavelmente devido ao fato do graute ser mais fluido do que o concreto.

Nos ensaios de arrancamento dentre as barras de aço convencional duas romperam e nenhuma de NiTi rompeu devido a tensão máxima ultrapassar 550 MPa, enquanto as barras de NiTi suportam 1070 MPa, segundo o fabricante.

As barras de NiTi lisas no graute possuem resistência a aderência mais baixa que todos os tratamentos feitos em todas as barras cerca de oito vezes inferior às barras de aço convencional certamente devido ao fato das barras não possuírem nervuras o que corrobora com um melhor desempenho em ensaios de arrancamento gerando assim uma maior tensão de aderência.

Comparando os resultados obtidos (Tabela 4.13) através dos ensaios de arrancamento das tensões de aderência presentes em cada combinação de barra e concreto com os valores esperados (Tabela 3.10) nota-se que as barras de aço convencional obtiveram os melhores resultados (cerca de 342% para o concreto e 265% para o graute). Nas barras de NiTi epóxi vale ressaltar que nos cálculos foram consideradas como barras nervuradas com resultados de 64% no concreto e 47% no graute, porém se consideradas barras lisas os resultados tornam-se satisfatórios tanto no concreto quanto no graute (cerca de 145% e 105% respectivamente) se tornando o melhor dos resultados dentre as barras de NiTi. As barras de NiTi jateado

obtiveram resultados expressivos (113,95% no concreto e 102,69% no graute) atendendo as solicitações de cálculos se mostrando uma alternativa viável devido ao baixo custo. As barras lisas de NiTi obtiveram resultados de 141,86% no concreto e um resultado abaixo do solicitado de 71,53% no graute.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Como possíveis trabalhos futuros, pode-se apontar:

- Estudar o tratamento mecânico das barras já no processo de fabricação fazendo nervuras nas mesmas, conforme barras encontradas comercialmente de aço;
- Adicionar fibras curtas de NiTi no concreto conforme afirmado por França (2004) melhora a aderência;
- Aprimorar o concreto com um abatimento menor, com a mesma resistência o que foi estudado por BRETTMANN, DARWIN e DONAHEY (1986);

REFERÊNCIAS

CALUÊTE, R. E., **Estudo das propriedades termomecânicas da liga Cu78,3%-Al19,8%-Mn11,9%**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica UFPB-CT, João Pessoa, 2012.

CÁNOVAS, M.F.; Patologia e Terapia do Concreto Armado. 1ª Ed. Pini, 1988.

CLADERA, A., Oller, E., & Ribas, C. (2013). **Pilot experiences in the application of shape memory alloys in structural concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, 26(11), 04014084.

COSTA, I., & BARROS, J. (2015). **Tensile creep of a structural epoxy adhesive: Experimental and analytical characterization**. International Journal of Adhesion and Adhesives, 59, 115-124.

CZADERSKI, C., Hahnebach, B., & Motavalli, M. (2006). **RC beam with variable stiffness and strength**. Construction and Building Materials, 20(9), 824-833.

DUCATTI, V.A. (1993). **Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura**. São Paulo. 273p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

F. ASCE, Saiidi, M. S., Sadrossadat-Zadeh, M., Ayoub, C., & Itani, A. (2007). Pilot study of behavior of concrete beams reinforced with shape memory alloys. Journal of materials in civil engineering, 19(6), 454-461.

FERNANDES, F. M. B. **Ligas com memória de forma**. Departamento de Ciência dos Materiais / CENIMAT, Universidade Nova de Lisboa, 2003.

FRANÇA, V. H. **Aderência aço-concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. Dissertação de mestrado. UNESP. Ilha Solteira, SP. (2004). 128p.

FUNAKUBO, H., 1987, **Shape Memory Alloys**, Ed. Hiroyasu Funakubo, University of Tokyo, Capítulo 1.

FUSCO, P.B. (1995). **Técnica de amar as estruturas de concreto**. São Paulo, Pini.
HELENE, Paulo; HARTMANN, Carine T.. Concreto de Alta Resistência CAD. **Téchne**, São Paulo, n. 81, dez. 2013. Mensal. Disponível em: <<http://piniweb.pini.com.br/construcao/noticias/concretos-de-alta-resistencia-79916-1.aspx>>. Acesso em: 07 nov. 2016.

LAGOUDAS, D. C., 2008, **Shape Memory Alloys – Modeling and Engineering Applications**. 1a ed. New York, Springer;

LI, H., Liu, Z. Q., & Ou, J. P. (2006). **Behavior of a simple concrete beam driven by shape memory alloy wires**. *Smart materials and structures*, 15(4), 1039.

LI, H., Liu, Z. Q., & Ou, J. P. (2008). **Experimental study of a simple reinforced concrete beam temporarily strengthened by SMA wires followed by permanent strengthening with CFRP plates**. *Engineering structures*, 30(3), 716-723.

LUIZON, J.V.N. **Estudo da eficiência de reforços estruturais em vigas de concreto armado com o uso de chapas de aço coladas com resina epoxy: uma análise qualitativa**. UNESP. Guaratinguetá, SP. (2011). 69p.

MARINS NETO, J. **Análise numérica não-linear de estruturas de concreto armado considerando o fenômeno da aderência entre o aço e o concreto**; Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas – SP, Brasil, 2007.

MEDEIROS, M. H. F.; SELMO, S. M. S. **Estruturas de concreto com corrosão de armaduras: estudo comparativo da eficiência de proteção de sistemas de reparo localizados**. São Paulo, PCC.USP. (Projeto de pesquisa FAPESP). 2000.

MESQUITA, Ligia P. et al. Determinação da tensão de aderência do bambu-concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - Pb, v. 10, n. 2, p.505-5016, 17 nov. 2005.

NASCIMENTO, F.C. **Ligas austeníticas com memória de forma**: influência da microestrutura nas propriedades mecânicas e na recuperação de forma. 1.ed. São Paulo, Edgar Blucher, 2008. 172p.

NOGUEIRA, C.M. **Estudo das Propriedades Mecânicas de Concretos Reforçados com Fibras Curtas com Efeito Memória de Forma**. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2011.

OLIVEIRA, Paulo Victor Silva de. **ESTUDO DA ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO: ENSAIO DE TIRANTES**. 2011. 67 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás – Ueg, Anápolis / Go, 2011.

PEREIRA, L.M.O. **Ligas Com Memória De Forma Características E Aplicações Em Engenharia Civil**. Dissertação de Mestrado da Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2011.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D. (2003). **Aderência e Ancoragem**. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos.

PRICE, B. **Advanced Concrete Technology**. Cap 3. Processes. Edited by NEWMAN, J and CHOO B. S. Amsterdam: Boston: Elsevier Butterworth Heinemann, 2003.

REBELLO, Yonopan Conrado Pereira, 1949 – **Bases para projeto estrutural na arquitetura** / Yonopan Conrado Pereira Rebello. – São Paulo: Ziguarte Editora, 2007.

RILEM-FIP-CEB (1973). **Bond test for reinforcing steel. 1. Beam test (7-II-28 D). 2. Pull-Out Test (7-II-128). Tentative Recommendations.** RILEM Journal Materials and Structures, v.6, n.32, p.96-105. Mar./Apr.

SAIIDI, M. Saiid et al. Pilot Study of Behavior of Concrete Beams Reinforced with Shape Memory Alloys. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 19, n. 6, p.454-461, jun. 2007. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2007\)19:6\(454\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:6(454)).

SCHWARTZ, M., 2009, **Smart Materials**. 1a ed. Boca Raton, CRC Press;

SHAJIL, N., Srinivasan, S. M., & Santhanam, M. (2013). **Self-centering of shape memory alloy fiber reinforced cement mortar members subjected to strong cyclic loading.** Materials and structures, 46(4), 651-661.

SILVA, Jeanisson César Mariano. **AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA NITI-CONCRETO PARA APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL.** 2015. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

SILVA, Renilton do Nascimento. **UM ESTUDO SOBRE O CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO.** 2010. 57 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana - BA, 2010.

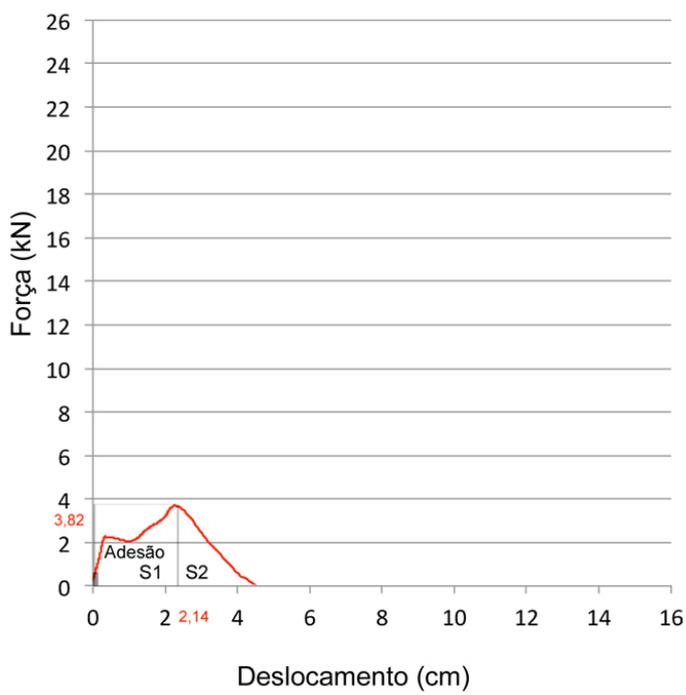
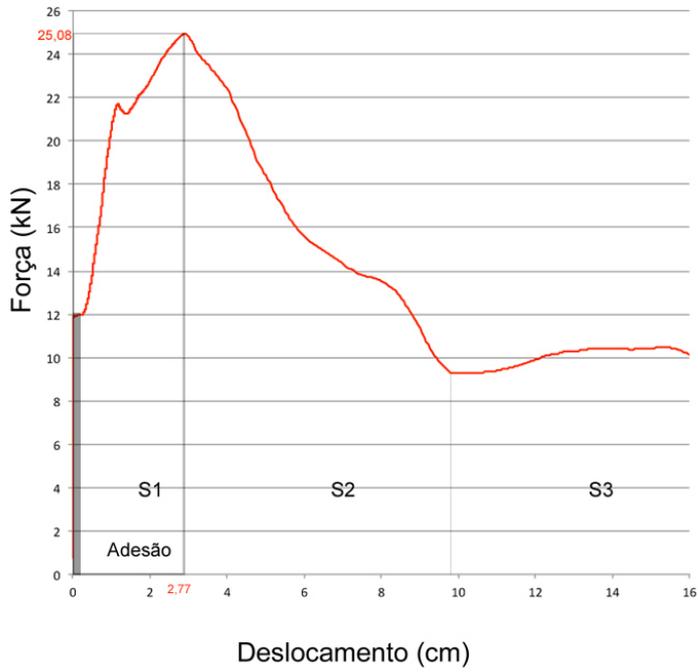
TSOI, K. A., Stalmans, R., & Schrooten, J. (2002). **Transformational behaviour of constrained shape memory alloys.** Acta Materialia, 50(14), 3535-3544.

VANDERLEI, R. D. (1999). **Análise experimental de pilares de concreto armado de alta resistência sob flexo compressão reta.** São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

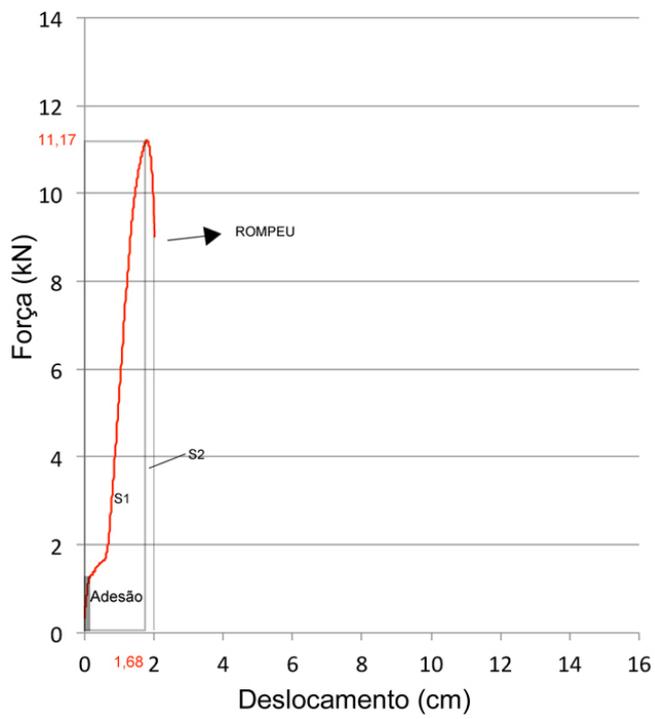
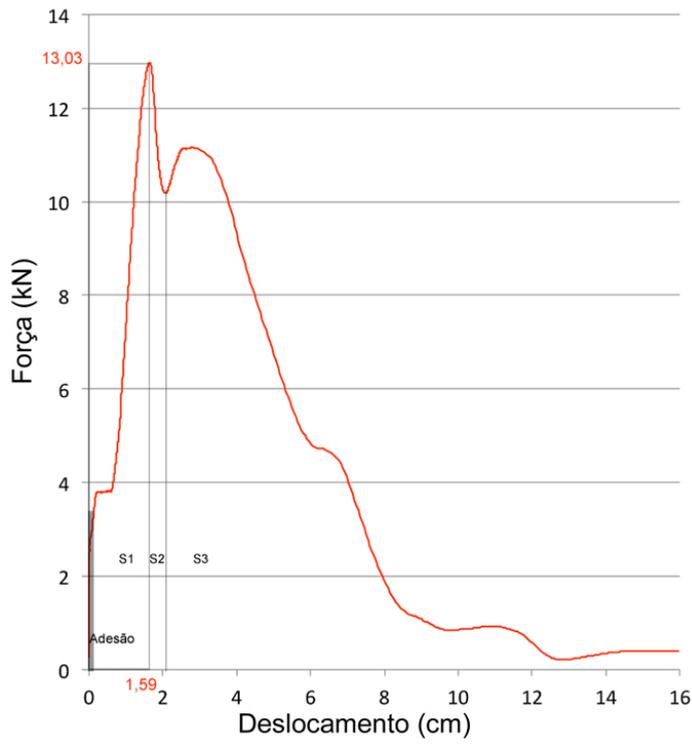
VIEIRA, F.M.P. **Estudo do Comportamento da Aderência das Barras de Aço no Concreto de Alta Resistência com Adição de Microssílica.** Porto Alegre 1994.

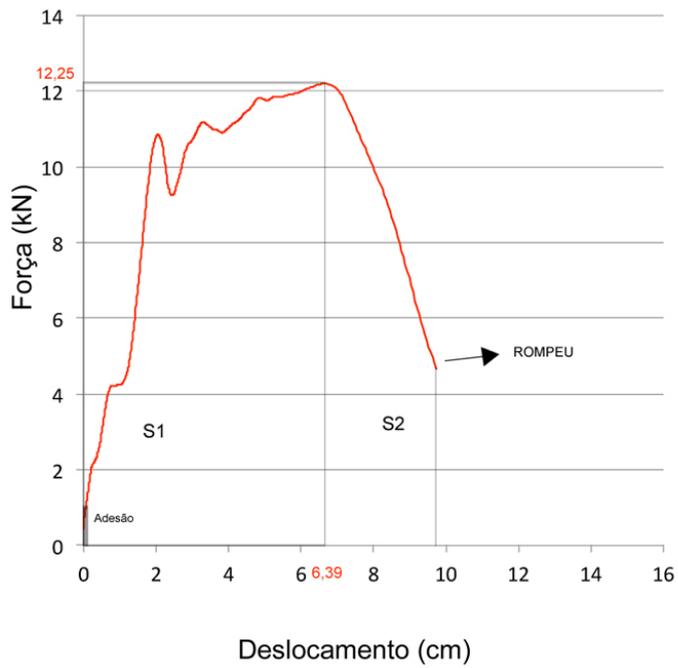
107p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VOKOUN, D., Kafka, V., & Hu, C. T. (2003). **Recovery stresses generated by NiTi shape memory wires under different constraint conditions.** Smart materials and structures, 12(5), 680.

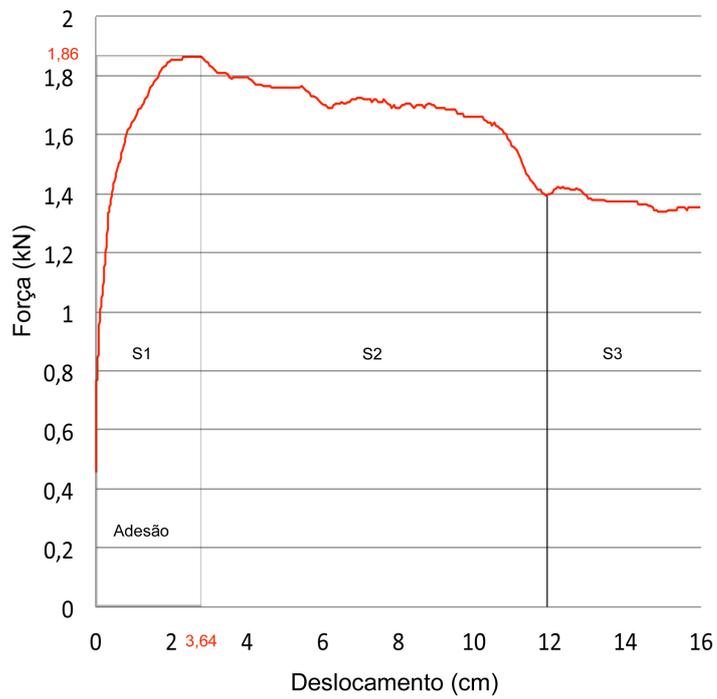
ANEXOS**Anexo I – Barras de Aço Convencional e Concreto**

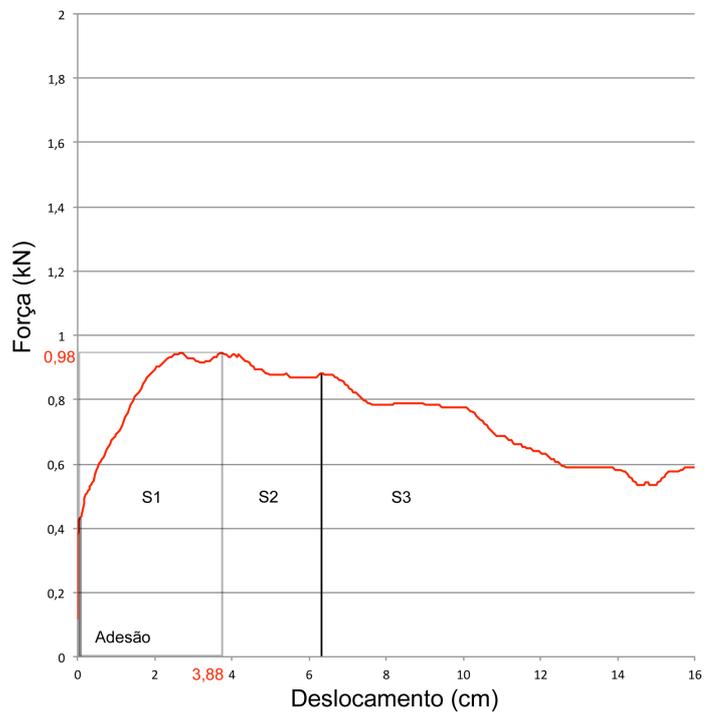
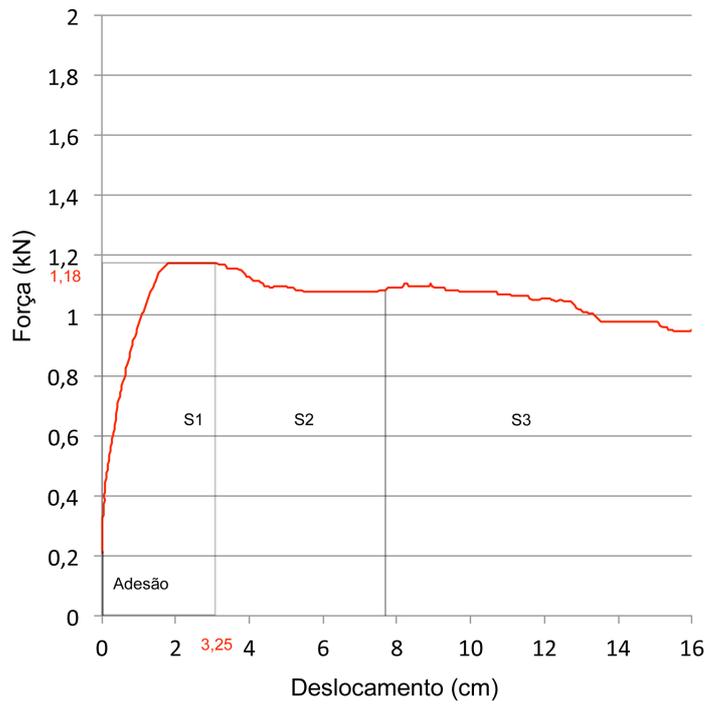
Anexo II – Barras de Aço Convencional e Graute



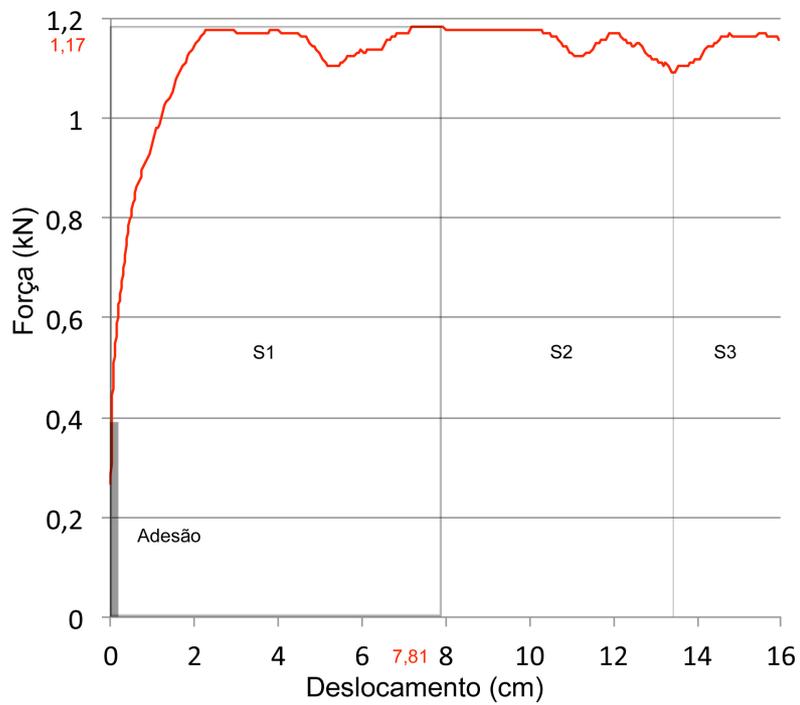
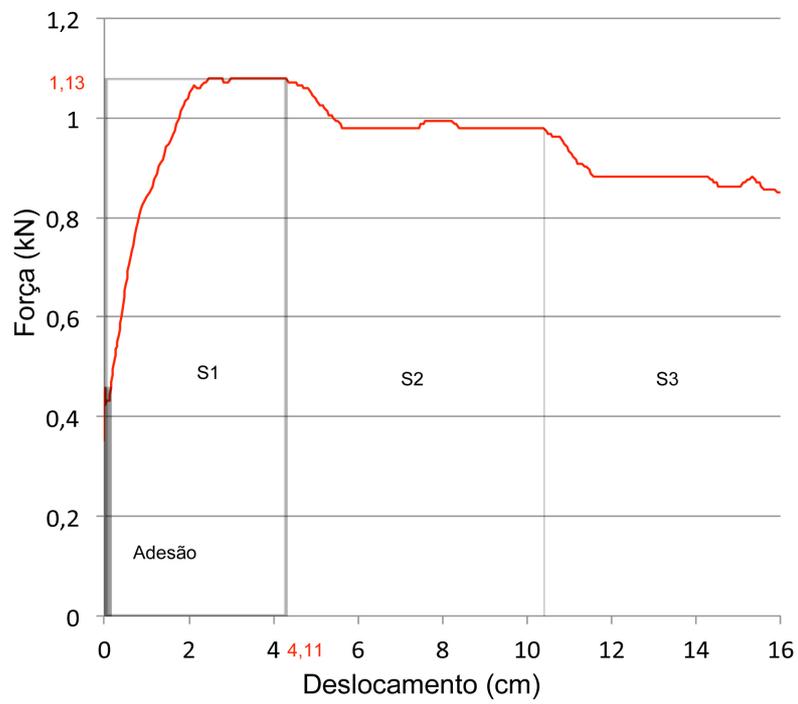


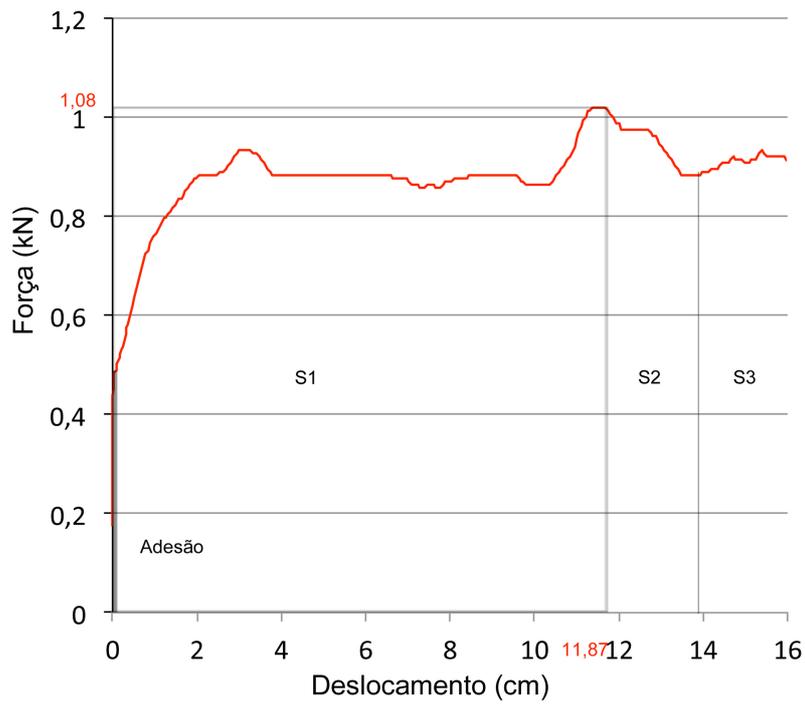
Anexo III – Barras de NiTi epóxi e Concreto



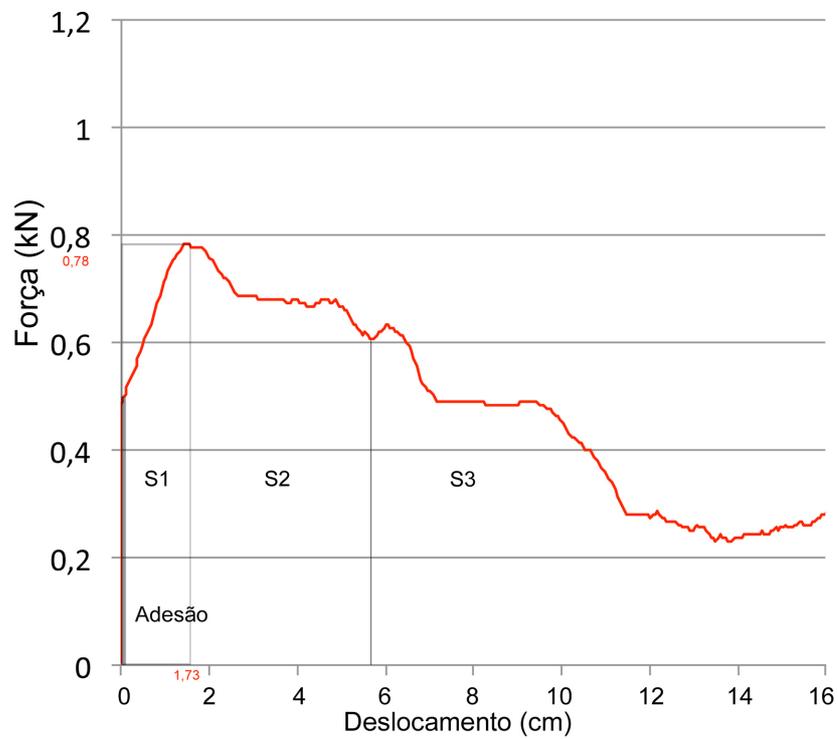


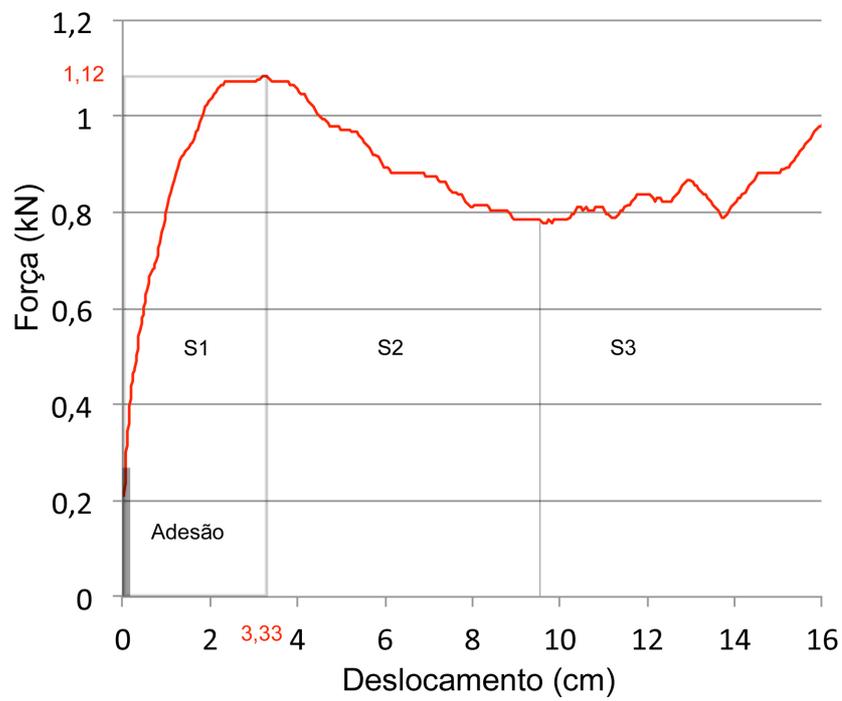
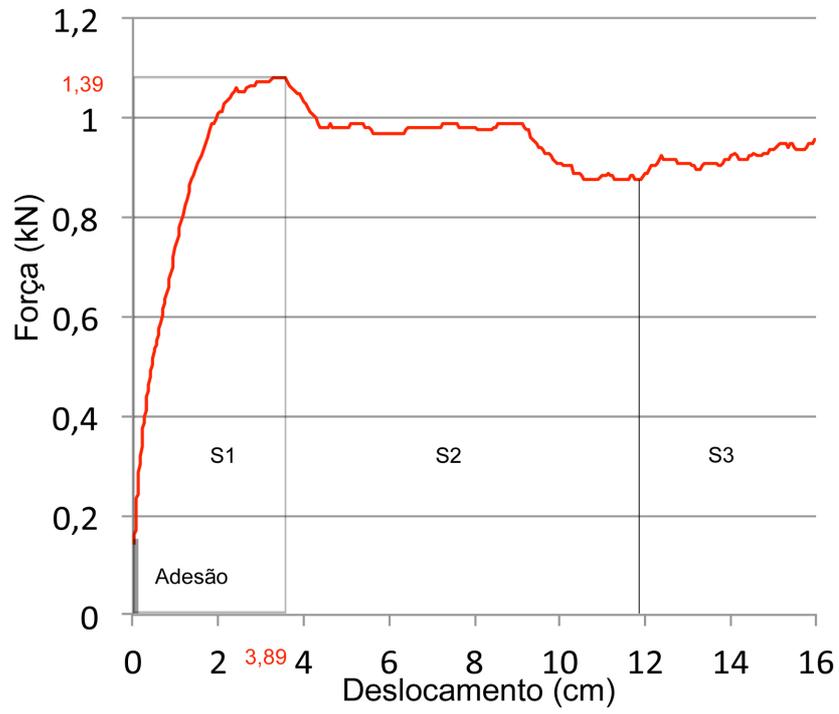
Anexo IV – Barras de NiTi epóxi e Graute

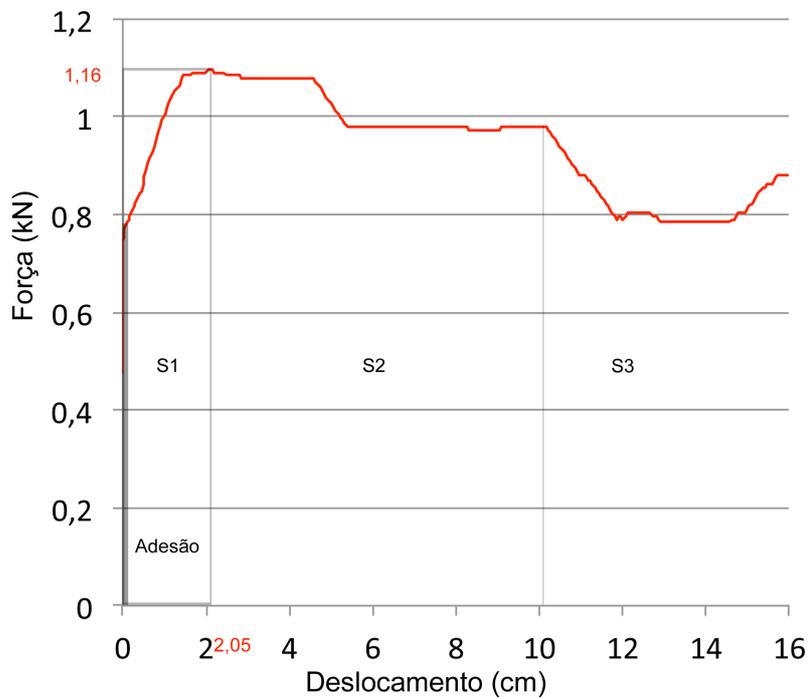
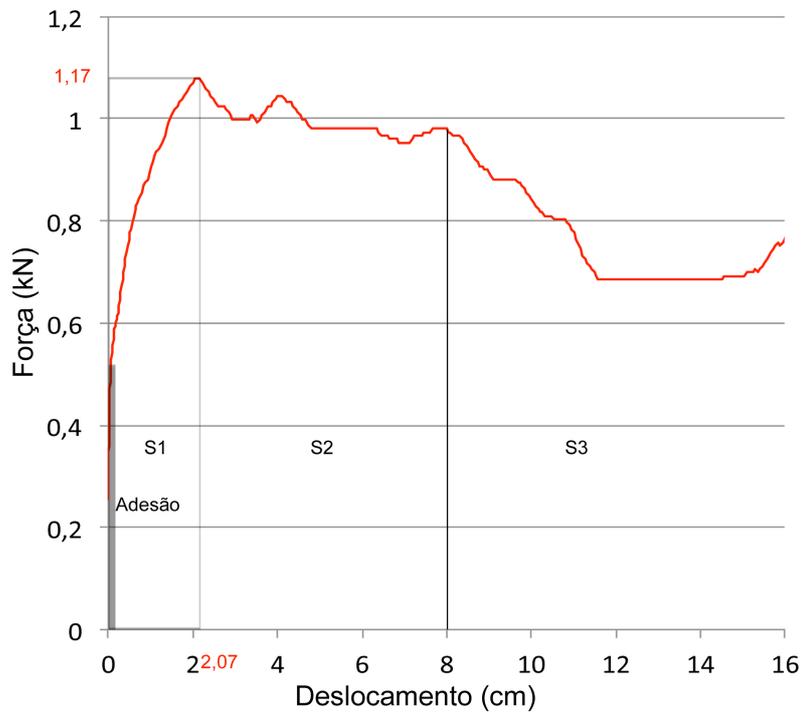


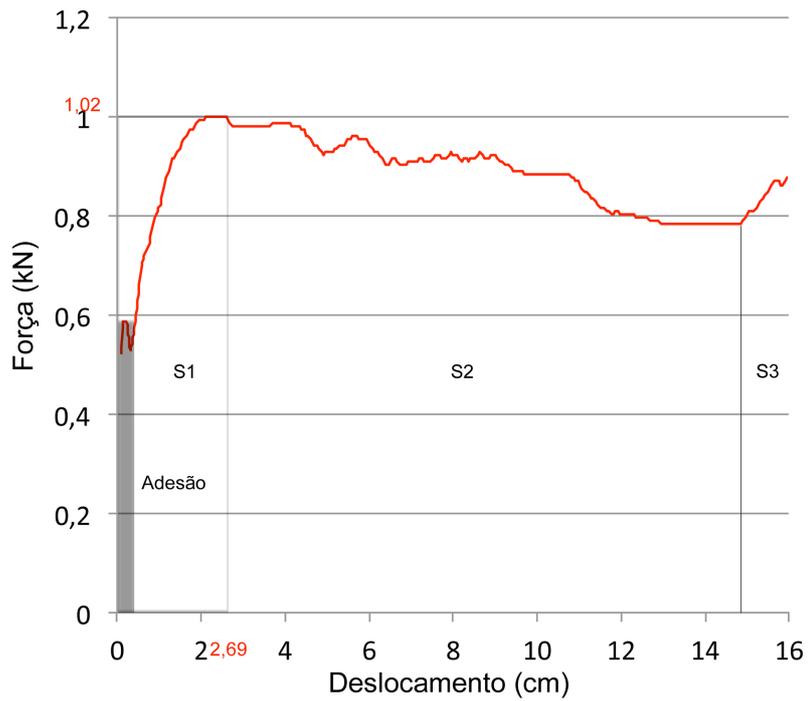


Anexo V – Barras de NiTi jateado e Concreto

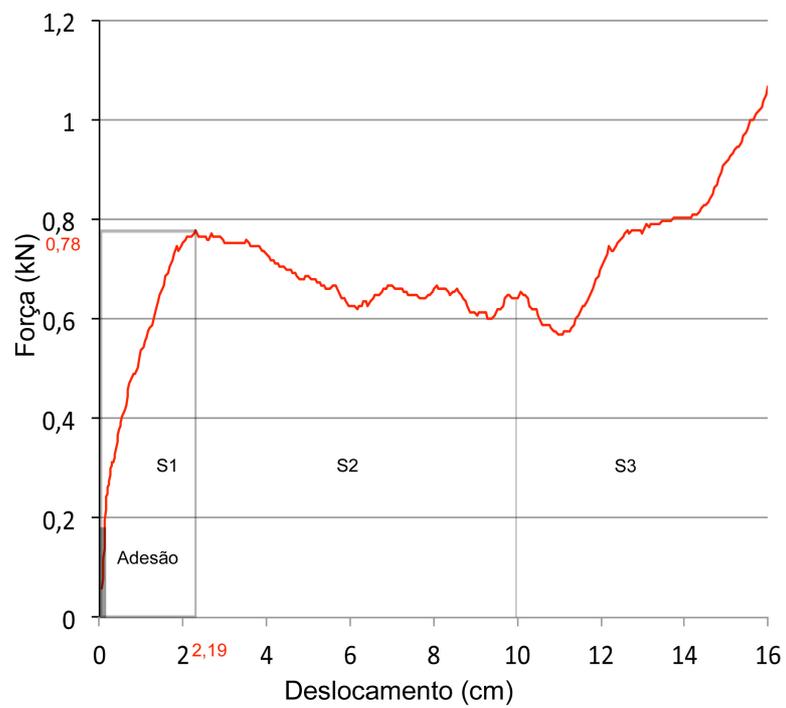


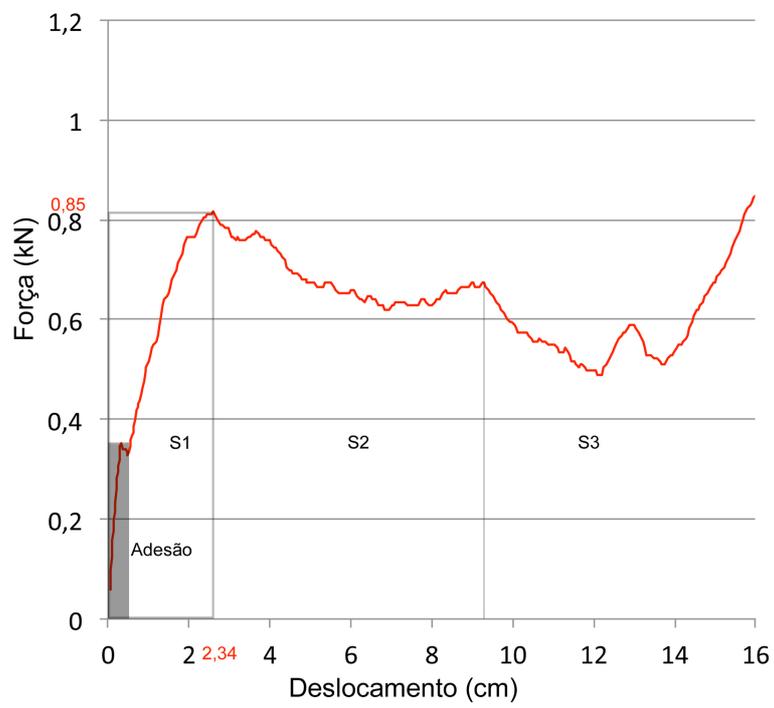
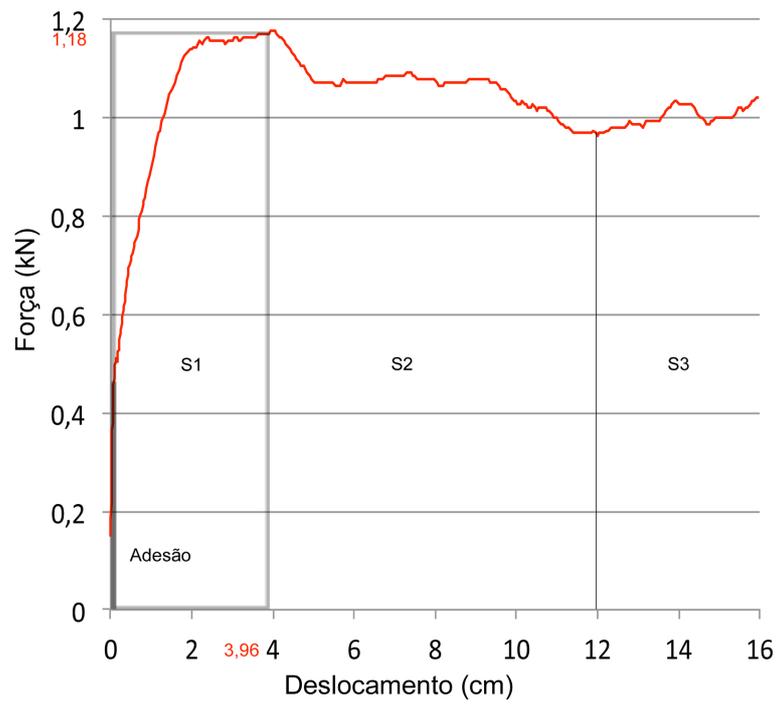


Anexo VI – Barras de NiTi jateado e Graute



Anexo VII – Barras de NiTi liso e Concreto





Anexo VIII – Barras de NiTi liso e Graute