

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

**AValiação DA ADERÊNCIA NITI-CONCRETO PARA APLICAÇÕES NA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

JEANISSON CESAR MARIANO SILVA

ORIENTADORA: Dr^a. Palloma Vieira Muterlle

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

**PUBLICAÇÃO: FGA.DM – 026A/2015
BRASÍLIA/DF: OUTUBRO/2015**

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

JEANISSON CESAR MARIANO SILVA

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

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: PALLOMA VIEIRA MUTERLLE

BRASÍLIA - DF

2015

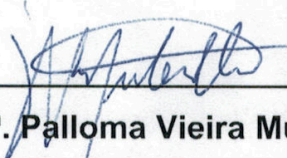
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA

AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA NITI-CONCRETO PARA APLICAÇÕES NA
CONSTRUÇÃO CIVIL

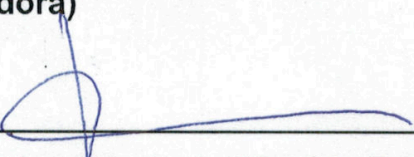
JEANISSON CESAR MARIANO SILVA

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


APROVADA POR:



Prof. Dr^a. Palloma Vieira Muterlle (UnB)
(Orientadora)



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



Prof. Dr. Edson Paulo da Silva (UnB)
(Examinador Externo)

Brasília, 20/10/2015

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, JEANISSON CESAR MARIANO

Avaliação da aderência NiTi-Concreto para aplicações na Construção Civil, [Distrito Federal] 2015.

Nº. 86.p. 210 x 297 mm (FGA/FT/UnB, Mestre, Integridade de Materiais da Engenharia, 2015).

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

1. Ensaio Arrancamento

2. Estruturas Especiais

3. Materiais Inteligentes

4. Pseudoelasticidade

I. FGA/FT/UnB

II. Mestre

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

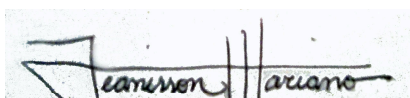
SILVA, J. C. M. (2015). Avaliação da aderência NiTi-Concreto para Aplicações na Construção Civil. Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Integridade da Engenharia, Publicação 026A/2015, Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF, nº.86p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Jeanisson Cesar Mariano Silva

TÍTULO: Avaliação da aderência NiTi-Concreto para aplicações na Construção Civil
GRAU: Mestre ANO: 2015

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.



JEANISSON CESAR MARIANO SILVA

EQN 410/411 BLOCO A.

70.865-400. Brasília, DF – Brasil.

jeanisson@gmail.com

*Ao meu amado pai Ducl Cesar Mariano da
Silva e minha amada e saudosa mãe Eva
Maria de Jesus Silva (in memoriam).*

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida.

À CAPES pelo suporte financeiro.

À minha orientadora, Professora Dra. Palloma Vieira Muterlle, pelo conhecimento que compartilhou, além da paciência e disposição.

Aos Professores do Programa de Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia, em especial a Professora Dra. Sandra Luz por toda atenção e suporte.

Aos colegas do SG-9, pelo suporte e amizade que motivaram, e muito, para o desenvolvimento deste trabalho (Artur, Edson Lucas, Xavier, Oliveira, Marcão, Wesley, Karen Fabara, Lara Grossi, Maurício, Junior).

Ao Professor Dr. Luciano Mendes Bezerra pelas orientações no desenvolvimento do trabalho, sempre com muita disposição e motivação. Aos colegas Alejandro e Pablo, também, do departamento de Engenharia Civil, por todo o suporte e ajuda, fundamentais para esta pesquisa.

Aos Professores Dr. José Alexander Araújo e Dr. Jorge Luiz de Almeida Ferreira pela ajuda na oportunidade de utilizar as máquinas e equipamentos para os ensaios de tração.

Aos amigos que sempre me ajudaram com apoio e companheirismo: Artur Ribeiro, Guilherme Victor, Luimar Filho e Paulo Herrera.

À minha namorada Suéllem Teixeira pela compreensão e apoio.

Às minhas amigas Dra. Roberta Passini e Dra. Maria Joselma Moraes pelo apoio e incentivo para que esta etapa se realizasse.

A todos meus familiares por cada sopro de tranquilidade e motivação que sempre me dispuseram, combustível da vida.

*“O começo de todas as ciências é o espanto
de as coisas serem o que são.”*

(Aristóteles)

RESUMO

Silva, Jeanisson Cesar Mariano, *Avaliação da aderência NiTi-Concreto para aplicações na Construção Civil*. Brasília: Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, Brasil, 2015. Dissertação de Mestrado.

Os sistemas construtivos e os métodos de se executar um sistema estrutural eficiente e prático fazem parte de uma área de intensa pesquisa, além da busca pela modernização que torne os métodos cada vez mais eficientes no que concerne às cargas e esforços, principalmente os que são provenientes de cargas acidentais. Em busca disto, a proposta deste trabalho foi verificar a aderência de uma barra metálica de NiTi pseudoelástica no Concreto de alta resistência, com finalidade de possíveis aplicações em diversas áreas da construção civil. A aderência NiTi-Concreto foi avaliada através de ensaios de arrancamentos, adaptados de acordo com as normas brasileiras relacionadas ao assunto (principalmente NBR 6118:2014 e NBR 7480:1996, bem como o apoio em normas internacionais (CEB-FIP MC 1990), para serem feitos em uma máquina de ensaio de tração modelo MTS 810, todos os testes foram efetuados na própria Universidade de Brasília, onde os resultados foram comparados com os modelos teóricos apresentados no decorrer da dissertação. Verificou-se que a aderência foi relativamente efetiva, ficando de 32 a 47% (variando de acordo com o comprimento de ancoragem) abaixo da expectativa ao comparar com a barra lisa de aço convencionalmente utilizada, também foi verificada a rugosidade através de um rugosímetro onde observou-se que mesmo a barra lisa do 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, pelo fato de ser formada uma camada de óxido na superfície do aço convencional.

Palavras-chave: Ensaio Arrancamento, Estruturas especiais, Materiais Inteligentes, Pseudoelasticidade.

ABSTRACT

Silva, Jeanisson Cesar Mariano, *Evaluation of the NiTi-concrete adhesion for construction industry application*. Brasília: Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, Brasil, 2015. Dissertação de Mestrado.

Constructive systems and methods to perform an efficient and practical structural system are part of an area of intensive research, in addition to the quest for modernization, focusing on increasing the efficiency in regard to the loads and mechanical stress, especially those which come from unwanted accidental loads. The present work aims verifying the adherence of pseudoelastic NiTi bar in high-strength concrete, once this kind of smart material has the possibility of applications in various fields of the construction industry. NiTi-concrete adhesion was evaluated through pullout tests, adapted in accordance with the Brazilian standards related to the subject (especially NBR 6118:2014 and NBR 7480:1996 as well as the international standards support CEB-FIP MC 1990), conducted in a tensile testing machine model MTS 810. All tests were carried out at the University of Brasilia and the results were compared with the theoretical models presented in this work. It was found that the adhesion was relatively effective, getting 32 to 47% (varying according to the anchor length) below the expectation when compared to the conventionally used smooth steel bar. The roughness was verified through a roughness tester and the results showed that the conventional smooth steel bar has a roughness about twenty-three times greater than the polished NiTi bar and four times greater than the sandblasted NiTi bar. This increased roughness in the conventional steel bar are due to the presence of an oxide layer on the surface.

Keywords: Pullout test, special structures, smart materials, pseudoelasticity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Gráfico Tensão <i>versus</i> Deformação da pseudoelasticidade (RUSTIGHI <i>et al</i> , 2003).....	4
Figura 2.2 – Ensaio realizado por OTERO (2004): (a) fenda devido ao carregamento; (b) recuperação da posição inicial proporcionada pelos cabos de LMF após descarregada.....	6
Figura 2.3 – Ruptura do concreto por tração face inferior (LEONHARDT E MÖNNIG, 1977).....	6
Figura 2.4 – Ruptura do concreto por compressão na face superior (LEONHARDT E MÖNNIG, 1977).....	6
Figura 2.5 – Ruptura do concreto por excesso de tensão no apoio (LEONHARDT E MÖNNIG, 1977).....	7
Figura 2.6 – Resultado da aplicação de SMAs e variação de temperatura em uma estrutura em cedência (BONCI ET AL., 2002).....	8
Figura 2.7 – (a) Estado geral da torre após sismo, (b) Intervenção realizada e (c) Dispositivo de LMF (BONCI et al, 2002).....	8
Figura 2.8 – Representação de aderência por adesão (PINHEIRO E MUZARDO, 2003).....	12
Figura 2.9 – Representação de aderência por atrito (PINHEIRO E MUZARDO, 2003).....	12
Figura 2.10 – Representação aderência mecânica em barras nervuradas (PINHEIRO E MUZARDO, 2003).....	13

Figura 2.11 - Rugosidade superficial de barras e fios lisos (LEONHARDT, 1977).....	13
Figura 2.12 – Representação de Tensão de aderência (PINHEIRO E MUZARDO, 2003).....	14
Figura 2.13 – Ruptura por aderência por: (a) fissuração por fendilhamento em concreto não-confinado; (b) arrancamento em concreto confinado (FERNANDES, 2000).....	15
Figura 2.14 – Fendilhamento longitudinal do concreto (FUSCO, 1995).....	16
Figura 2.15 – Transferência de esforços por aderência (FUSCO, 1995).....	16
Figura 2.16 - Curva de aderência versus deslizamento típica para carregamento monotônico, adaptada de ACI COMMITTEE 408, 1991 (FERNANDES, 2000).....	17
Figura 2.17 – Curvas de aderência para as misturas com consumo de cimento de 400 kg/m ³ (DUCATTI, 1993).....	18
Figura 2.18 – Influência da armadura de confinamento na relação local tensão de aderência versus deslizamento de barras nervuradas (SOROUSHIAN et al, 1991).....	19
Figura 2.19 – Influência da resistência de compressão na relação local tensão de aderência-deslizamento de barras nervuradas em concreto confinado (SOROUSHIAN et al, 1991).....	20
Figura 2.20 – Curva teórica tensão de aderência-deslizamento (TASSIOS, 1979).....	20
Figura 2.21 – Relação analítica tensão de aderência versus deslizamento-carregamento monotônico (CEB-FIP MC 1990, 1990).....	21

Figura 3.1 – Máquina utilizada para misturar a massa.....	27
Figura 3.2 – Agregado miúdo (areia) utilizada na mistura.....	28
Figura 3.3 – Aglomerante utilizado junto ao cimento.....	28
Figura 3.4 – Líquido Plastificante utilizado.....	28
Figura 3.5 – Cimento Portland CPV utilizado.....	29
Figura 3.6 – Abatimento de tronco de cone utilizado para medir a trabalhabilidade no microconcreto.....	30
Figura 3.7 – Corpos de prova após desmoldados, 48 horas.....	30
Figura 3.8 – Forma utilizada para fabricação dos Corpos de provas em forma de prismas para ensaio de tração na flexão.....	31
Figura 3.9 – Corpos de Prova Cilíndricos durante cura selada.....	32
Figura 3.10 – Corpos de Prova Cilíndricos desmoldados e numerados.....	33
Figura 3.11 – Corpos de provas em formato de prisma inteiros.....	34
Figura 3.12 – Esquema dos apoios para adaptação nos ensaios diretos e indiretos.....	36
Figura 3.13 – Fabricação da parte superior da estante.....	37
Figura 3.14 – Montagem da parte inferior da estante e marcação dos centros.....	37
Figura 3.15 – Montagem das gavetas móveis.....	38
Figura 3.16 – Imagem do perfil da madeira utilizada.....	38

Figura 3.17 – Estantes finalizadas.....	38
Figura 3.18 – Montagem dos moldes de PVC nas gavetas e apoios inferiores.....	39
Figura 3.19 – Imagens dos golpes utilizados para homogeneização e preenchimentos dos espaços.....	39
Figura 3.20 – Prateleiras com os Corpos de Prova recém concretados.....	40
Figura 3.21 – Detalhe do filme utilizado para garantir a cura selada.....	40
Figura 3.22 – Modelagem dos Corpos de Prova para ensaio direto. (a) Molde convencional, (b) Corpo de prova moldado com detalhe do gabarito para fixação do centro da peça e utilização do filme para cura selada.....	41
Figura 3.23 – Corpos de Prova para ensaio direto após desmoldados.....	41
Figura 3.24 – Detalhes das mangueiras utilizadas para neutralizar aderência na região necessária.....	42
Figura 3.25 – Óleo mineral sendo aplicado na mangueira para evitar aderência com o concreto.....	42
Figura 3.26 – Detalhes do projeto do suporte para apoio direto na máquina de ensaio de tração. (a) Vista Superior e (b) Vista Lateral.....	43
Figura 3.27 – Detalhes do projeto do suporte inferior para apoio do corpo de prova. (a) Vista Superior e (b) Vista Lateral.....	43
Figura 3.28 – Imagem do suporte do corpo de prova na máquina de ensaio de tração pronta.....	44
Figura 3.29 – Imagem dos suportes para o corpo de prova na máquina de ensaio de tração pronta.....	44

Figura 3.30 – Detalhe do furo no suporte inferior para passagem da barra de NiTi entre os corpos de prova de concreto.....	44
Figura 3.31 – Imagem do corpo de prova montado no suporte para ensaio.....	45
Figura 3.32 – Imagem do corpo de prova montado no suporte e fixado na máquina para ensaio indireto.....	45
Figura 3.33 – Imagem do corpo de prova montado no suporte e fixado na máquina para ensaio direto.....	46
Figura 3.34 – Marcação do deslizamento a cada 10 minutos. (a) durante o ensaio e (b) após o ensaio.....	47
Figura 4.1 – (a) Barras de NiTi e (b) Barra lisa do aço convencional.....	48
Figura 4.2 – Gráfico Força x Deslizamento CP 2A, com identificação de adesão e deslizamento.....	50
Figura 4.3 – Gráfico Força x Deslizamento CP 1A, com identificação de adesão e deslizamento.....	51
Figura 4.4 – Gráficos Força x Deslizamento CP 1B, com identificação de adesão e deslizamento.....	52
Figura 4.5 – Gráfico Força x Deslizamento CP 1B, com identificação de adesão e deslizamento	52
Figura 4.6 – Corpo de Prova com marcação do deslizamento dos dois lados.....	53
Figura 4.7 – Gráfico Força x Deslizamento, com identificação de adesão e deslizamento: : (a) CP 1D; (b) CP 1E e (c) CP 1F.....	54

Figura 4.8 – Gráfico Força x Deslizamento, com identificação de adesão e deslizamento: (a) CP 2B; (b) CP 2C e (c) CP 2D..... **56**

Figura 4.9 – Gráfico Força x Deslizamento, com identificação de adesão e deslizamento: (a) CP 10cm; (b) CP 15 cm e (c) CP 20 cm..... **59**

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores proposto pela CEB-FIP MC 1990 (1991).....	20
Tabela 3.1 – Cálculos adaptados da NBR 6118:2014.....	23
Tabela 3.2 – Propriedades físicas e mecânicas das barras de NiTi utilizadas.....	23
Tabela 3.3 – Composição química das barras de NiTi utilizadas.....	24
Tabela 3.4 – Composição do traço.....	24
Tabela 3.5 – Sequência para mistura dos constituintes dos microconcretos.....	26
Tabela 3.6 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão.....	29
Tabela 3.7 – Resultado do ensaio de resistência à compressão.....	30
Tabela 3.8 – Resultado do ensaio de resistência à compressão.....	31
Tabela 3.9 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios.....	32
Tabela 4.1 – Rugosidade Média das barras.....	47
Tabela 4.2 – Resumo dos CPs utilizados.....	48
Tabela 4.3 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de arrancamento indiretos.....	62
Tabela 4.4 – Resumo dos CPs utilizados.....	62
Tabela 4.5 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de arrancamento direto.....	66
Tabela 5.1 – Comparação dos resultados com o valor esperado (%).....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>CAR</i>	Concreto de Alta Resistência
<i>CAD</i>	Concreto de Alto Desempenho
<i>CEB</i>	<i>Comite Euro-International Du Béton</i>
<i>CP</i>	Corpo de Prova
<i>CuAlBe</i>	Cobre – Alumínio – Berílio
<i>CuAlNi</i>	Cobre – Alumínio – Níquel
<i>CuAlMn</i>	Cobre – Alumínio – Manganês
<i>FIP</i>	<i>Fédération Internationale Du Béton</i>
<i>LMF</i>	Liga com Memória de Forma
<i>NiTi</i>	Níquel – Titânio
<i>NBR</i>	Norma Técnica Brasileira
<i>POT</i>	<i>Pull Out Test</i>
<i>SMA</i>	<i>Shape Memory Alloy</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.....	XV
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XVI
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XVII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVO GERAL	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1. LIGA DE NITI.....	4
2.1.2. <i>Propriedades Pseudoelástica</i>	5
2.1.3. <i>Potencialidades da aplicação da liga de NiTi na construção civil</i>	6
2.2. CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA.....	9
2.2.1. <i>Vantagens e Aplicações</i>	10
2.3. ADERÊNCIA.....	12
2.3.1 <i>Aderência por adesão</i>	12
2.3.2. <i>Aderência por atrito</i>	13
2.3.3. <i>Aderência mecânica</i>	14
2.3.4. <i>Tensão de aderência</i>	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1. VERIFICAÇÃO DO CALCULO DE TENSÃO DE ADERÊNCIA DE ACORDO COM A NBR 6118:2014.....	23
3.2. MATERIAIS	26
3.2.1. <i>NiTi Pseudoelástico</i>	26
3.2.2. <i>Concreto</i>	26
3.3. CARACTERIZAÇÃO DO MICROCONCRETO	30
3.3.1. <i>Resistência à tração na flexão</i>	30
3.3.2. <i>Resistência à compressão dos cilindros</i>	31
3.3.3. <i>Resistência à compressão dos prismas</i>	33
3.4. ENSAIO DE RUGOSIDADE	34

3.5. A METODOLOGIA PARA FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA ...	35
3.5.1. <i>Ensaio indireto</i>	35
3.5.2. <i>Ensaio direto</i>	40
3.5.3. <i>A metodologia para o ensaio</i>	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1. MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DA BARRA.....	47
4.2. ENSAIO INDIRETO	48
4.3. ENSAIO DIRETO.....	57
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	61
5.1. CONCLUSÕES.....	61
5.2. TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

De acordo com NOGUEIRA (2006) as estruturas de concreto armado representam a grande maioria das obras na construção civil, isto porque apresentam grande robustez e estabilidade para cargas estáticas, no entanto, para solicitações dinâmicas os mecanismos de dissipação de energia são dependentes da plastificação dos elementos de aço, podendo colocar em risco a estabilidade estrutural da construção.

OTSUKA (1998) diz que a liga NiTi apresenta propriedades muito particulares: podem recuperar grandes deformações por variação de temperatura (efeito de memória) ou por descarga (efeito pseudoelástico). CALUÊTE (2012) comenta que a liga possui, também, grande capacidade de dissipação de energia, permitindo a imposição de grandes deformações e excelente capacidade para suportar elevado número de ciclos de carga/descarga (resistência à fadiga).

Existe uma grande fragilidade no sistema estrutural de concreto armado de uma edificação no que diz respeito à cargas dinâmicas (principalmente geradas por sismos) que ocorre na ligação entre viga e pilar, o sistema pode perder o equilíbrio por não suportar as deformações (MEHTA E MONTEIRO, 1994). Devido às propriedades da liga NiTi pseudoelástica de suportar grandes deformações retornando a seu estado natural, sem nenhum esforço extra necessário, houve a motivação do uso deste material para se prevenir de colapsos em casos de um evento da magnitude de um sismo.

Esta pesquisa apresenta alguns casos de aplicações do NiTi em propostas experimentais onde verifica-se que uma viga de concreto armado com elementos desta liga consegue recuperar um décimo mais que a deformação obtida para uma viga de concreto armado convencional, chegando a ter uma gama de deformações sete vezes superior a um elemento estrutural de concreto armado convencional. Comenta também o caso da Basílica de São Francisco de Assis na Itália, onde após uma catástrofe ocorrida em 1997 toda a estrutura da edificação foi comprometida, elaborando um reforço através de ligas de memória de forma a estrutura foi completamente recuperada, esta justificativa foi expressa através de outro evento ocorrido com mesma magnitude e não foi imposto prejuízo imposto a nova estrutura.

Para verificar a possibilidade do uso entre os materiais Concreto x NiTi pseudoelástico e para que esta aplicação seja viável uma das principais causas a ser

verificada é a aderência, com intuito de perceber como ela se apresenta e atua entre estes materiais. Os resultados desta verificação podem ser encontrados nesta pesquisa através de gráficos força *versus* deslizamento obtidos através de estudos experimentais.

1.1. OBJETIVO GERAL

Verificar a aderência NiTi-Concreto para aplicação no sistema estrutural de Concreto Armado.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir da motivação deste trabalho e com intuito de alcançar o objetivo principal, o presente estudo visa:

- Identificar as principais características dos materiais escolhidos;
- Analisar os eventos que ocorrem em um sistema estrutural de Concreto Armado;
- Testar a aderência da liga de NiTi no concreto.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

A pesquisa é dividida em cinco capítulos, onde no primeiro capítulo contém a introdução sobre o assunto abordado apresentando a problematização, motivação e os objetivos da pesquisa. O capítulo dois é destinado a abordagem da revisão da literatura sobre os materiais e estudos aplicados na área de abrangência desta pesquisa, apresentando as propriedades dos materiais e como está sendo aplicado nos trabalhos atuais. Os materiais e métodos utilizados para consolidar a proposta experimental são especificados no capítulo três, trazendo o detalhamento das adaptações e projetos para fabricação dos corpos de prova e adaptação dos mecanismos utilizados para ensaio na máquina de tração. A partir de toda revisão e preparação dos corpos de prova, no capítulo quatro pode-se verificar os resultados e as discussões que foram obtidos a partir de ensaio de arrancamento na máquina de tração, expressando a aderência da barra no concreto através de gráficos de força *versus* deslizamento. As conclusões estão contidas no início do capítulo cinco, onde foram feitas todas considerações pertinentes a pesquisa e resultados. Ao final deste

mesmo capítulo são sugeridas algumas propostas para as adaptações numéricas e experimentais, a partir dos resultados obtidos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo levantar, conforme a abrangência da pesquisa, os trabalhos citados na literatura atual, quais abrangem os principais materiais e objetos de análises a serem utilizados na adaptação do processo de verificação da aderência que ocorre entre os componentes que irão atuar no sistema proposto.

2.1. LIGA DE NITI

As ligas com memória de forma, também conhecidas como SMA's do inglês Shape Memory Alloys, estão entre as ligas metálicas cada vez mais pesquisadas nas últimas décadas, devido suas propriedades especiais com grande potencialidade de aplicação em vários campos, entre eles o controle de vibrações (CALAUTÊ, 2012). As ligas com memória de forma possuem duas características principais: uma de memória de forma (martensita na temperatura ambiente) e outra de pseudoelasticidade (austenita na temperatura ambiente), são determinadas por sua temperatura de transformação de fase. A memória de forma ocorre quando a liga é deformada e após ser aquecida a uma determinada temperatura retoma a sua geometria inicial, já a característica de pseudoelasticidade se dá quando a liga retorna a sua geometria inicial logo após o carregamento ter sido removido, sem a necessidade de se aquecer a liga (OTSUKA, 1998).

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 (ciclo de histerese, que é de grande importância para equilíbrio dos esforços que ocorrem na ligação viga-pilar, região que apresenta bastante sensibilidade na ocorrência de sismos), excelente capacidade para suportar elevado número de ciclos de carga/descarga (resistência à fadiga) e boa resistência à corrosão (CALUÊTE, 2012).

Os materiais com memória de forma/superelasticidade têm sido aplicados em vários campos: na Indústria Espacial/Aeronáutica, antenas de satélite flexíveis; atuadores e conexões mecânicas, no setor automobilístico; atuadores/conectores elétricos e elementos de união de tubos também são utilizados. Na área biomédica, o

campo de aplicação desses materiais também é vasto: ferramentas cirúrgicas, implantes, suporte para sutura de ossos e arames ortodônticos (AIZAWA et al, 1998). Na área de Construção Civil, que é o tema de interesse desta proposta, já é possível encontrar o desenvolvimento de algumas pesquisas, geralmente associadas à área de análise de tensões.

2.1.1. PROPRIEDADES PSEUDOELÁSTICA

Segundo Ryhänen (1999) a pseudoelasticidade é um comportamento das liga de memória de forma que é apresentado durante a fase austenita, fase em que a liga recupera a sua forma inicial quando uma carga previamente colocada é removida. Neste caso, o processo de transformação para a recuperação da forma do material é induzido pela tensão, diferentemente do efeito memória de forma que necessita de temperatura para que ocorra esta recuperação da geometria inicial. No caso da liga pseudoelástica a fase em que o material se encontra vai depender da amplitude da carga aplicada.

A figura 2.1 apresenta a pseudoelasticidade, onde o material que está em temperatura ambiente (T) após sofrer carregamento passa pela reorientação da martensita (B-C) até atingir o máximo de deformação recuperável (D) com o descarregamento. O ciclo de histerese corresponde a capacidade de energia que pode ser dissipada durante um ciclo de tensão e deformação direta e reversa, representado através da área formada por B-C-E-F (RUSTIGHI *et al*, 2003 *apud* CORRÊA FILHO, 2013).

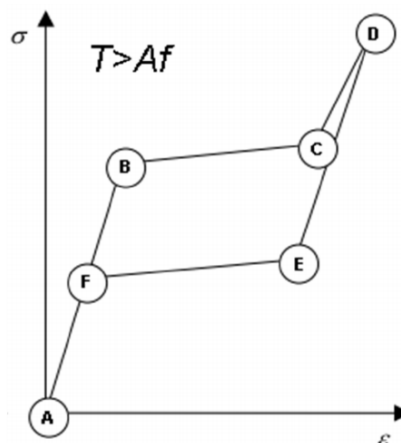


Figura 2.1 – Gráfico Tensão *versus* Deformação da pseudoelasticidade (RUSTIGHI *et al*, 2003).

As ligas com efeito de pseudoelasticidade, à temperatura ambiente, são constantemente utilizadas na aplicação ortodôntica com intuito de movimentar a arcada dentária para um posicionamento fisiológico requerido, qual o NiTi é o material mais utilizado (WANG ET AL, 2004).

2.1.2. POTENCIALIDADES DA APLICAÇÃO DA LIGA DE NITI NA CONSTRUÇÃO CIVIL

As estruturas de concreto armado representam a grande maioria das obras na construção civil, principalmente no Brasil, e estas estruturas se comportam muito bem para cargas estáticas. No entanto, para cargas dinâmicas, o sistema dependerá da plasticidade dos elementos da armadura (aço), que muitas vezes é motivo de preocupação pois o aço convencionalmente usado pode não suportar estas ações e colocar em risco a estabilidade do sistema (NOGUEIRA, 2006).

O uso de ligas com memória de forma como reforço no conjunto estrutural de concreto armado ainda é um tema pouco explorado. Porém, demonstra ser substancialmente uma boa proposta para prevenir o sistema estrutural da instabilidade devido às cargas dinâmicas que, eventualmente, possam estar expostos (SEMIÃO, 2010). A capacidade de recuperação na fase pseudoelástica é a característica com maior potencial para aplicações em controle de vibrações (DUERIG, 1990).

Conforme estudos elaborados na Universidade Federal de Minas Gerais por NOGUEIRA (2006) e na Universidade Nova de Lisboa por PEREIRA (2011), a viga de concreto armado com elementos de ligas com memória de forma, principalmente o NiTi, consegue recuperar um décimo mais do que a deformação obtida para uma viga de concreto armado convencional, e chega a ter deformações nos elementos estruturais sete vezes superior a um elemento convencional.

OTERO (2004) fez ensaios em uma viga de concreto reforçado com cabos de LMF pseudoelástica submetendo-a à um carregamento que resultou em uma fenda onde logo após descarga a viga volta praticamente a sua posição original (Figura 2.2), comentando sobre a validade da aplicação deste tipo de material como reforço no concreto.

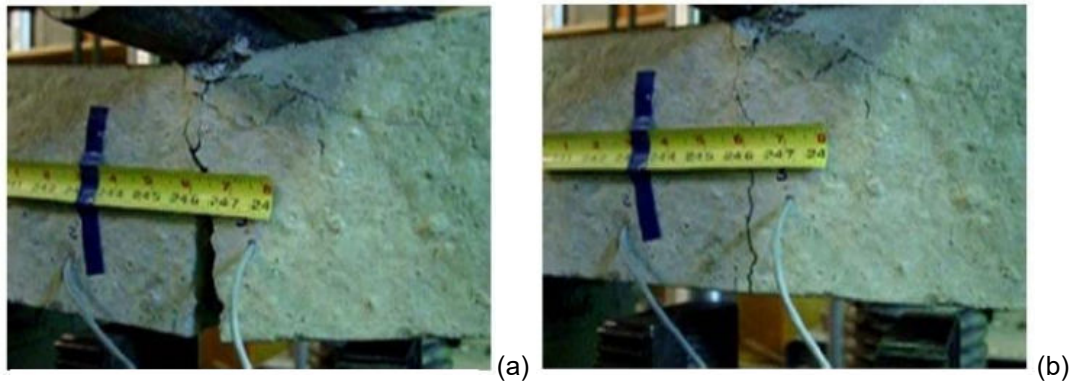


Figura 2.2 – Ensaio realizado por OTERO (2004): (a) fenda devido ao carregamento; (b) recuperação da posição inicial proporcionada pelos cabos de LMF após descarregada.

O concreto é um material que resiste bem à compressão, mas resiste menos à tração, como resultado disso, existe o crescimento de fissuras quando as cargas são aplicadas, ou via retrações do próprio material ou variação de temperatura. Por isso, o concreto deve ser reforçado com fibras longas (Concreto Armado), fibras curtas ou protendido, para obter um melhor aproveitamento estrutural dos materiais (MEHTA E MONTEIRO, 1994)

Segundo LEONHARDT E MÖNNIG (1977), o concreto armado é um material de construção composto, onde a ligação entre o concreto e a armadura de aço é devida à aderência do cimento e a efeitos de natureza mecânica. As barras devem absorver os esforços de tração que surgem nas peças submetidas à flexão ou à tração. Conforme Figura 2.3, Figura 2.4 e Figura 2.5.



Figura 2.3 – Ruptura do concreto por tração face inferior (LEONHARDT E MÖNNIG, 1977).

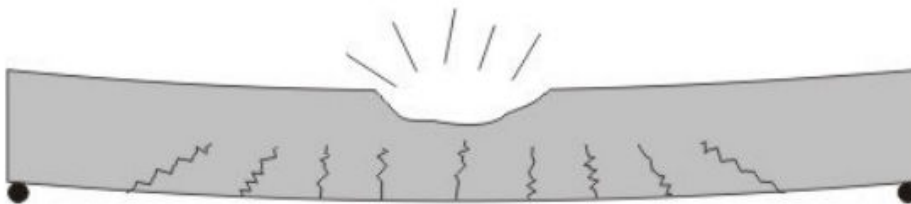


Figura 2.4 – Ruptura do concreto por compressão na face superior (LEONHARDT E MÖNNIG, 1977).



Figura 2.5 – Ruptura do concreto por excesso de tensão no apoio (LEONHARDT E MÖNNIG, 1977).

A fissura ocorre porque o elemento de concreto exposto a uma solicitação ocasionada por tração pode não acompanhar as deformações, devido a sua menor propriedade em relação a solicitações deste tipo. A presença do aço em forma de armadura é um reforço que pode ser utilizado em estruturas de concreto e fica disposta na zona de tração das peças estruturais. Em peças submetidas apenas à compressão as armaduras, também, podem aumentar a capacidade de carga à compressão (SEMIÃO, 2010).

De acordo com o exposto por MO *et al.* (2004), existem concretos estruturais que conseguem suportar explosões de ataques terroristas ou desastres naturais e já podem ser encontrados em pesquisas mais recentes, a liga em estudo compreende este tipo de proposta e está relacionada ao campo materiais inteligentes. A utilização de NiTi pseudoelástico aumenta substancialmente as propriedades relacionadas à cargas dinâmicas, inclusive sismos induzidos (via com fluxo pesado e intenso, edificação que abriga máquinas de uso pesado, estruturas próximas a linhas férreas, etc.).

SEMIÃO (2010) apresenta o caso da técnica de elementos enrijecidos para recuperação de estruturas, qual é uma solução para evitar que a transmissão de energia dissipada possa comprometer a estrutura, principalmente após um terremoto. O autor mostra como o uso de materiais com memória de forma pode ser capaz de controlar os deslocamentos, limitar as forças e a aceleração transmitida à estrutura, como exemplo apresenta o estudo de DESROCHES *et al.* (2002) sobre a Igreja de S. Giorgio, Itália, a qual foi restaurada após uma forte catástrofe ocasionada por um terremoto em 1996 qual danificou a torre da igreja comprometendo todo o sistema estrutural (Figura 2.6), a efetividade do reforço se comprova pois, segundo SEMIÃO (2010), seis anos após a restauração a região passou por novo abalo sísmico com magnitude próxima do ocorrido e nenhuma deformação permanente ou falha ocorreu no sistema reforçado (Figura 2.7).

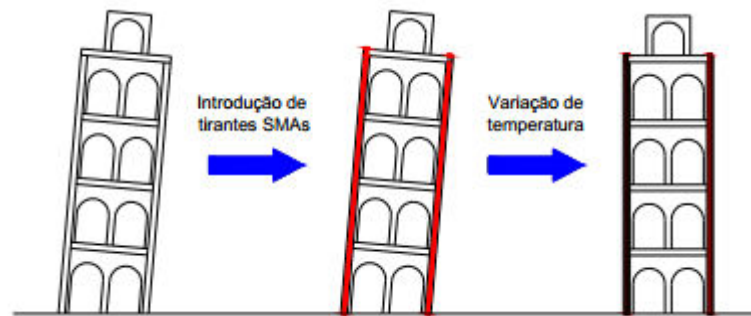


Figura 2.6 – Resultado da aplicação de SMAs e variação de temperatura em uma estrutura em cedência (DESROCHES *et al.*, 2002).

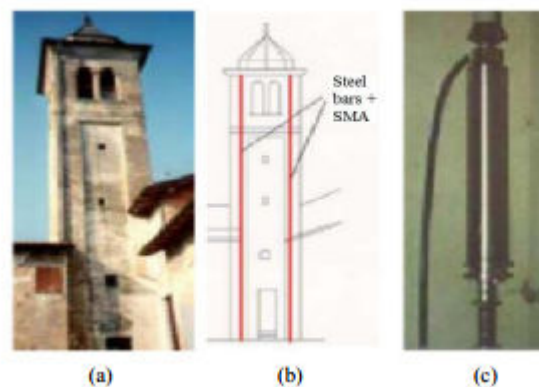


Figura 2.7 – (a) Estado geral da torre após sismo, (b) Intervenção realizada e (c) Dispositivo de LMF (DESROCHES *et al.*, 2002).

2.2. CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA

NAWY (1996) diz que o conceito de concreto de alta resistência é um assunto que não se pode dar uma definição definitiva, pois o autor comenta o fato de que a relatividade na definição é inevitável, visto que o concreto comercializado tem propriedades específicas diferentes de acordo com a região. Em outras palavras um mesmo concreto pode ser considerado de alta resistência em uma região e em outra apenas comum ou convencional.

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.

Para AÏTCIN (2000) o concreto de alta resistência é essencialmente o concreto com relação água/aglomerante abaixo de uma proporção 0,4, este valor é sugerido como o limite entre concretos convencionais e concretos de alta resistência pois,

conforme o autor, é muito difícil produzir concreto com boa trabalhabilidade utilizando esta relação em materiais convencionais sem a utilização de aditivos superfluidificantes. No preparo convencional o aglomerante utilizado é apenas cimento, já no concreto de alta resistência utiliza-se uma mistura de cimento + aditivo e por isto a relação passa a ser denominada “água/aglomerante” e não “água/cimento”.

Dentro da categoria de CARs pode-se encontrar microconcretos, que segundo FUSARI (2008) são compósitos que possuem em sua composição: graute, argamassa, agregados de pequena dimensão (pedriscos de tamanho máximo 9,5mm), etc. O processo de dosagem e aplicações são os mesmo do CAR com agregados graúdos e ainda possuem a vantagem de melhor trabalhabilidade e precisão ao se preencher homoganeamente os espaços.

2.2.1. VANTAGENS E APLICAÇÕES

AMARAL (1993), cita algumas das principais aplicações para as quais as características especiais deste tipo de concreto são particularmente importantes, como: pilares de edifícios, grandes estruturas, obras marítimas, pré-moldados, obras hidráulicas, reparos em obras de concreto, pisos de alta resistência e peças mecânicas. Também salienta as propriedades especiais dos concretos de alta resistência (CAR) com sílica ativa: baixa permeabilidade, alta resistência aos ataques de cloretos e sulfatos, alta resistência à abrasão, ótima aderência sobre concretos velhos, quase o dobro da aderência concreto-aço em relação aos concretos convencionais, altas resistências mecânicas à baixa idade, baixa segregação e ausência de exsudação.

DAL MOLIN (1995) descreve as principais vantagens do CAR em relação ao concreto convencional e outros materiais de construção, ressaltando as seguintes características:

- Diminuição das dimensões das peças estruturais, principalmente pilares de edifícios altos, fato que aumenta e melhora os espaços livres, principalmente nos andares mais baixos e mais sobrecarregados;
- Vigas mais esbeltas e de maior comprimento, reduzindo a quantidade total de vigas necessárias em cada pavimento;

- Redução do peso total das estruturas, com a conseqüente redução das cargas nas fundações;
- Redução das deformações imediatas como conseqüência de um maior módulo de deformação (capacidade de deformação sem que haja fissuras em argamassas e concretos);
- Minimização das deformações lentas, com a redução da fluência devido à menor quantidade de vazios na pasta de cimento;
- Aumento da durabilidade das estruturas, pelo fato dos CAR serem menos porosos e permeáveis, estando assim menos expostos aos ataques dos agentes agressivos presentes no meio ambiente;
- Redução nos custos devido à redução do volume de concreto necessário;
- Maior rapidez de execução.

Outro campo de aplicação para os CAR é em pontes, CARRASQUILLO & CARRASQUILLO (1988) apresentam as vantagens em relação ao emprego do CAR para estas finalidades, que resumidamente são:

- Maior resistência à compressão por unidade de custo, peso e volume;
- Maior módulo de deformação, que é vantajoso quando deflexões controlam o projeto;
- Viabilização da execução de maiores vãos;

O emprego do CAR pode ser significativo para solução de alguns problemas existentes, que são:

- Retorno do investimento financeiro mais rápido, pois devido a sua alta resistência nas primeiras idades, permite um encurtamento do cronograma das obras;
- Menores custos, por possibilitar mais e melhores opções de relações entre o custo e a resistência à compressão dos diversos concretos;
- Melhor aproveitamento dos recursos ambientais, devido a maior durabilidade das estruturas e sua maior resistência mecânica, minimizando o consumo de matérias primas nobres, e permitindo igualmente, projetos arquitetônicos que melhoram o aproveitamento dos espaços nas edificações;

LIBÓRIO (2004) e AÍTCIN (2000) comentam sobre algumas desvantagens do CAR que são:

- Maior dificuldade de aplicação devido à maior coesão decorrente do uso da sílica ativa, e da perda de abatimento;
- Exigência de um controle de qualidade mais apurado;
- Necessidade de procedimentos de cura, devido ao uso da sílica ativa e do baixo consumo de água.

2.3. ADERÊNCIA

De acordo com PINHEIRO E MUZARDO (2003), aderência é a propriedade que impede que haja escorregamento de uma barra em relação ao concreto que a envolve. É, portanto, responsável pela solidariedade entre o aço e o concreto, fazendo com que esses dois materiais trabalhem em conjunto. A transferência de esforços entre aço e concreto e a compatibilidade de deformações entre eles são fundamentais para a existência do concreto armado. Isto só é possível por causa da aderência. Ancoragem é a fixação da barra no concreto, para que ela possa ser interrompida.

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. Ele é denominado comprimento de ancoragem. Além disso, em peças nas quais, por disposições construtivas ou pelo seu comprimento, necessita-se fazer emendas nas barras, também se deve garantir um comprimento suficiente para que os esforços sejam transferidos de uma barra para outra, na região da emenda. Isto também é possível graças à aderência entre o aço e o concreto (PINHEIRO & MUZARDO, 2003).

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. A Figura 2.8 mostra um cubo de concreto moldado sobre uma placa de aço. A ligação entre os dois materiais se dá por adesão, para separá-los, há necessidade de se aplicar uma ação representada pela força F_{b1} . Se a força fosse aplicada na horizontal, não se conseguiria dissociar a adesão do comportamento relativo ao atrito. No entanto, a adesão existe independente da direção da força aplicada (PINHEIRO E MUZARDO, 2003).

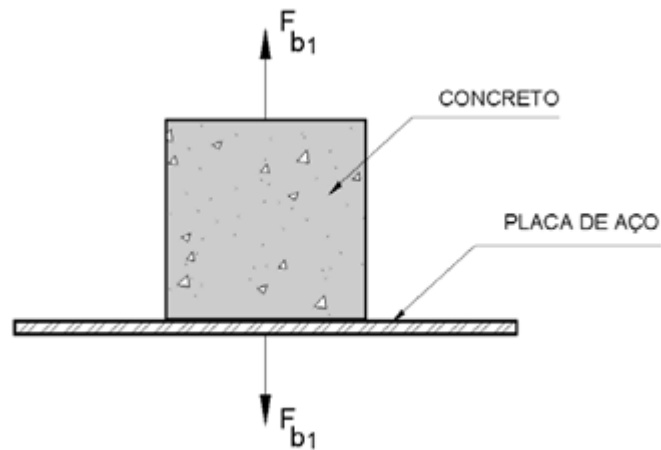


Figura 2.8 – Representação de aderência por adesão (PINHEIRO E MUZARDO, 2003).

2.3.2. Aderência por Atrito

Por meio do arrancamento de uma barra de um bloco concreto (Figura 2.9), verifica-se que a força de arrancamento F_{b2} é maior do que a força F_{b1} mobilizada pela adesão. Esse acréscimo é devido ao atrito entre a barra e o concreto (PINHEIRO E MUZARDO, 2003).

O atrito manifesta-se quando há tendência ao deslocamento relativo entre os materiais. Depende da rugosidade superficial da barra e da pressão transversal σ , exercida pelo concreto sobre a barra, em virtude da retração. Em barras curvas ou em regiões de apoio de vigas em pilares, aparecem acréscimos dessas pressões de contato, que favorecem a aderência por atrito. O coeficiente de atrito entre aço e concreto é alto, em função da rugosidade da superfície das barras, resultando valores entre 0,3 e 0,6 (LEONHARDT, 1977).

Na Figura 2.9, a oposição à ação F_{b2} é constituída pela resultante das tensões de aderência (τ_b) distribuídas ao longo da barra.

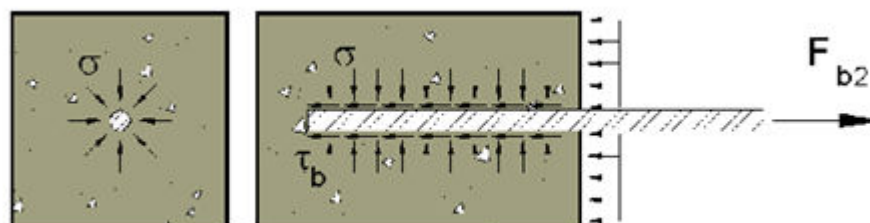


Figura 2.9 – Representação de aderência por atrito (PINHEIRO E MUZARDO, 2003).

2.3.3. Aderência Mecânica

A aderência mecânica é devida à conformação superficial das barras. Nas barras de alta aderência (Figura 2.10), as saliências mobilizam forças localizadas, aumentando significativamente a aderência (PINHEIRO E MUZARDO, 2003).

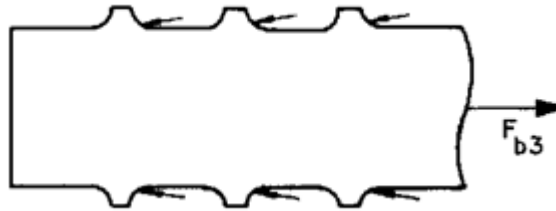


Figura 2.10 – Representação aderência mecânica em barras nervuradas (PINHEIRO E MUZARDO, 2003).

A Figura 2.11 (LEONHARDT, 1977) mostra que mesmo uma barra lisa pode apresentar aderência mecânica, em função da rugosidade superficial devida à corrosão e ao processo de fabricação, gerando um denteamento da superfície. Para efeito de comparação, são apresentadas superfícies microscópicas de: barra de aço enferrujada, barra recém laminada e fio de aço obtido por laminação a quente e posterior encruamento a frio por estiramento. Nota-se que essas superfícies estão muito longe de serem efetivamente lisas. Portanto, a separação da aderência nas três parcelas - adesão, atrito e aderência mecânica - é apenas esquemática, pois não é possível quantificar isoladamente cada uma delas.

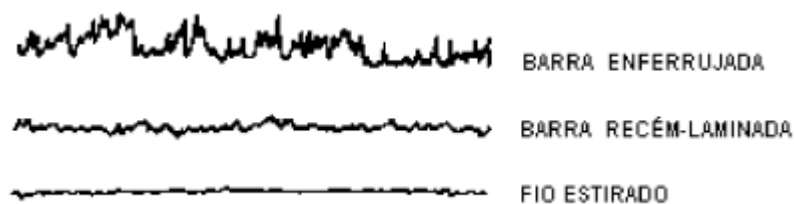


Figura 2.11 - Rugosidade superficial de barras e fios lisos (LEONHARDT, 1977).

2.3.4. Tensão de Aderência

Segundo LEONHARDT (1977), para uma barra de aço imersa em uma peça de concreto, como a indicada na figura 2.12, a tensão média de aderência é dada por:

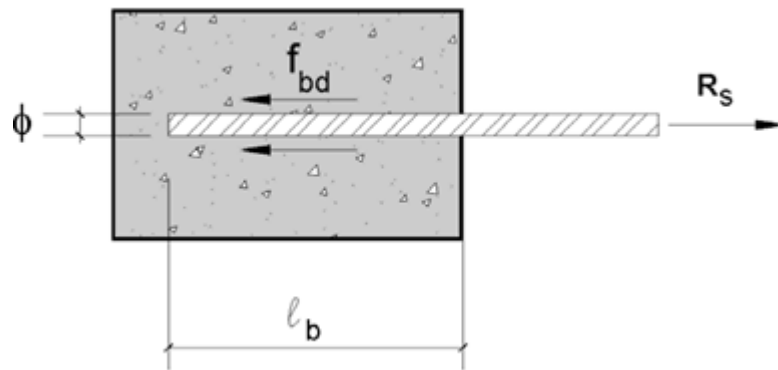


Figura 2.12 – Representação de Tensão de aderência (PINHEIRO E MUZARDO, 2003).

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

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.

FERNANDES (2000) mostra que existem dois tipos de rupturas da aderência para corpos-de-prova sob ação monotônica: ruptura por arrancamento direto da barra e fendilhamento do cobrimento do concreto. A primeira acontece através de um confinamento que favorece uma tendência de corte do concreto entre as nervuras do aço. Este fato se relaciona à resistência do concreto e à geometria das nervuras. Na figura 2.13 é possível verificar o que ocorre em cada um dos casos.

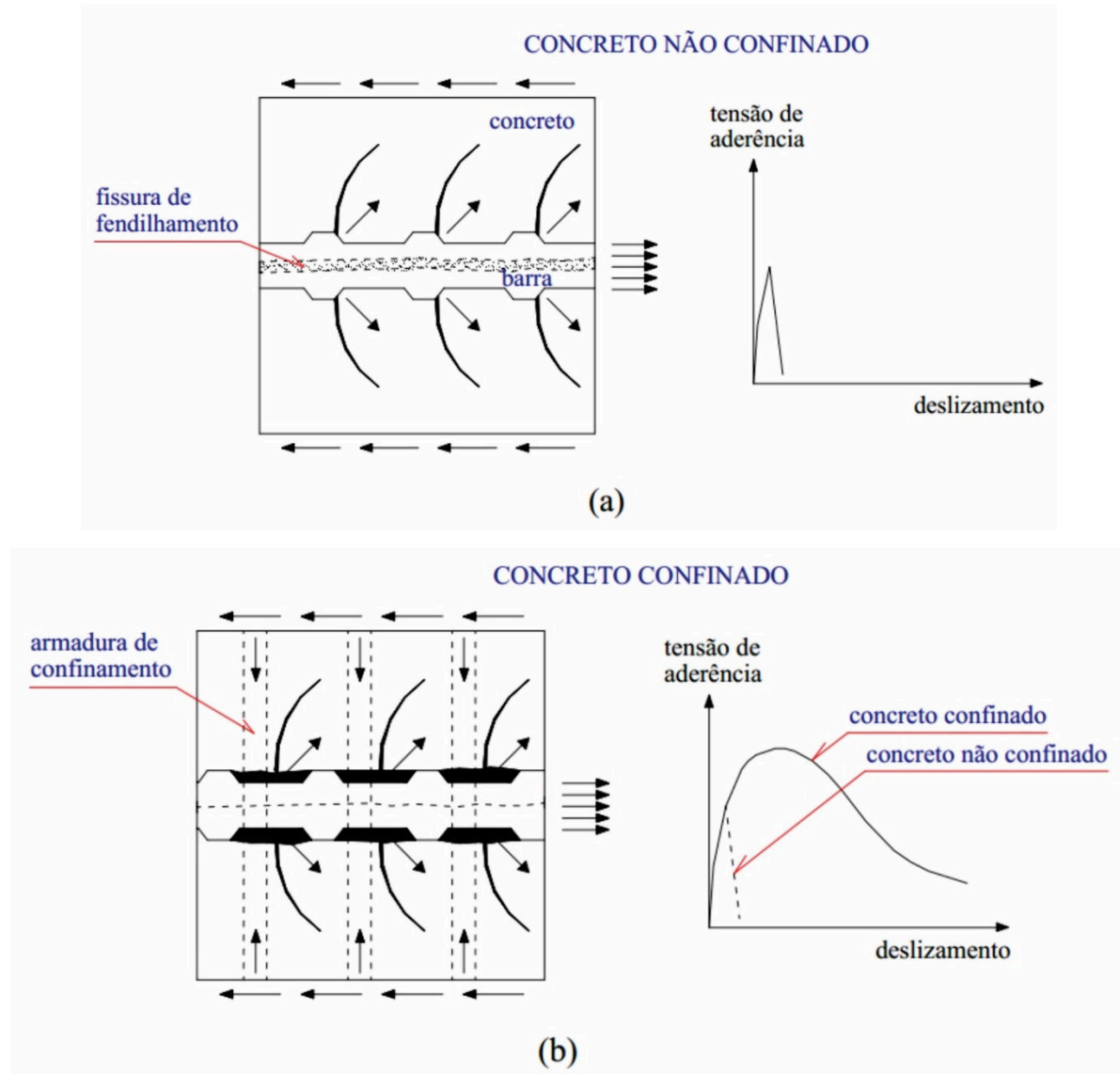


Figura 2.13 – Ruptura por aderência por: (a) fissuração por fendilhamento em concreto não-confinado; (b) arrancamento em concreto confinado (FERNANDES, 2000).

FUSCO (1995) diz que o fendilhamento do cobrimento é um evento que ocorre nas componentes radiais das tensões compressivas onde é iniciado um caminho de esforços e cargas do aço para o concreto. Isto ocorre por que o confinamento não é suficiente para garantir que haja o arrancamento da barra, criando resistência de aderência. Estas tensões vão gerar componentes diagonais que remeterão à uma tensão de tração, provocando uma pressão no concreto ao redor da barra, como representado nas figuras 2.14 e 2.15.

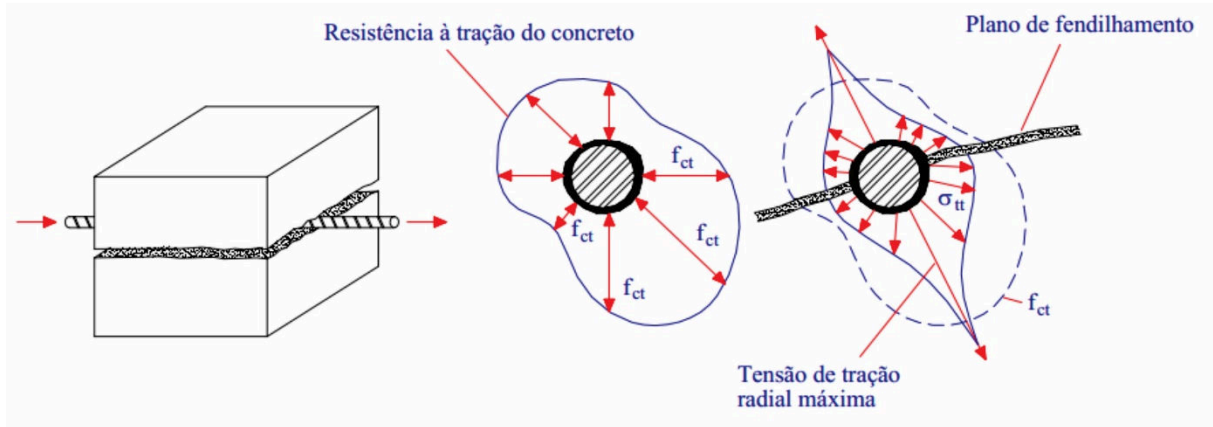


Figura 2.14 – Fendilhamento longitudinal do concreto (FUSCO, 1995).

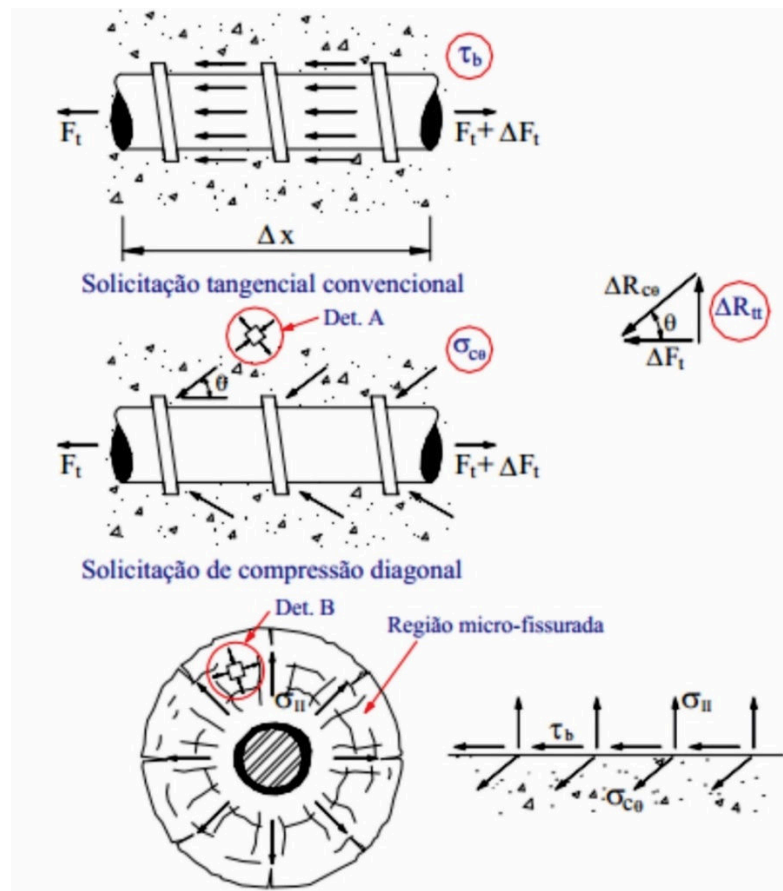
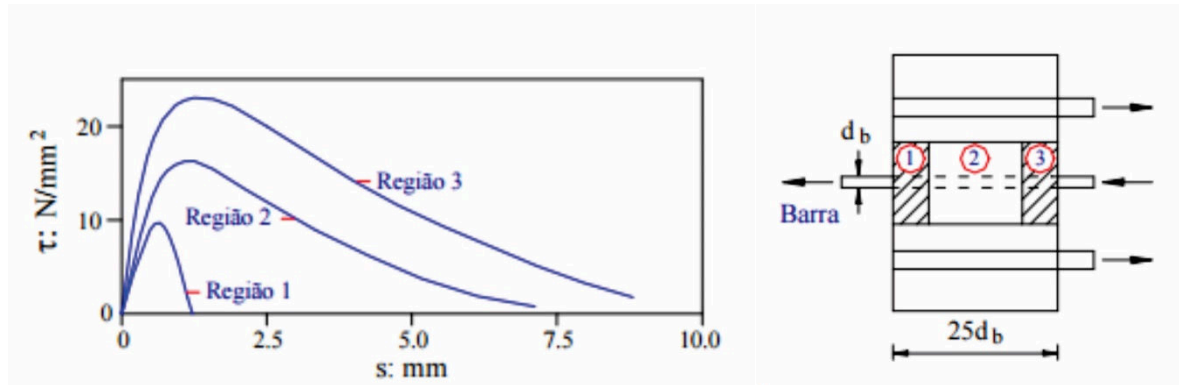


Figura 2.15 – Transferência de esforços por aderência (FUSCO, 1995).

O artigo sobre aderência publicado pelo ACI COMMITTEE 408 (1991) explora através de uma abordagem generalista os principais parâmetros e definições sobre a problematização da aderência em barras de aço atuando juntamente com o concreto, dentre este estão: modos de rupturas, principais faturas que influências a aderência e fornece diretrizes para critérios de projetos.

Uma barra de material metálico sob carregamento monotônico e uma tensão que tende a provocar o arrancamento gera um comportamento típico que está

representado na figura 2.16. É possível observar que a proporcionalidade de confinamento e o estado de tensão da cobertura de concreto presente na barra influenciam a curva adquirida de tensão de aderência *versus* deslizamento, e para isto se observa um constante grau de influência tanto para tração quanto para esforços de compressão.



Região 1: Concreto não-confinado* sob tração

Região 2: Concreto confinado*

Região 3: Concreto não-confinado* sob compressão

*na direção da força

Figura 2.16 - Curva de aderência *versus* deslizamento típica para carregamento monotônico, adaptada de ACI COMMITTEE 408, 1991 (FERNANDES, 2000).

Um outro estudo de arrancamento realizado por DUCATTI (1993), baseado na ASTM C-234, mostra o comportamento de corpos de provas de Concreto de Alto Desempenho (CAD) sob carregamento monotônico e de curta duração, que pode ser observado na figura 2.17, onde indica um mesmo comportamento qualitativo comparado aos concretos convencionais, porém com ganhos em relação aos parâmetros quantitativos. Os principais parâmetros observados neste conteúdo experimental foi: resistência à compressão do concreto, posição das barras em relação à concretagem e teor de microssílica.

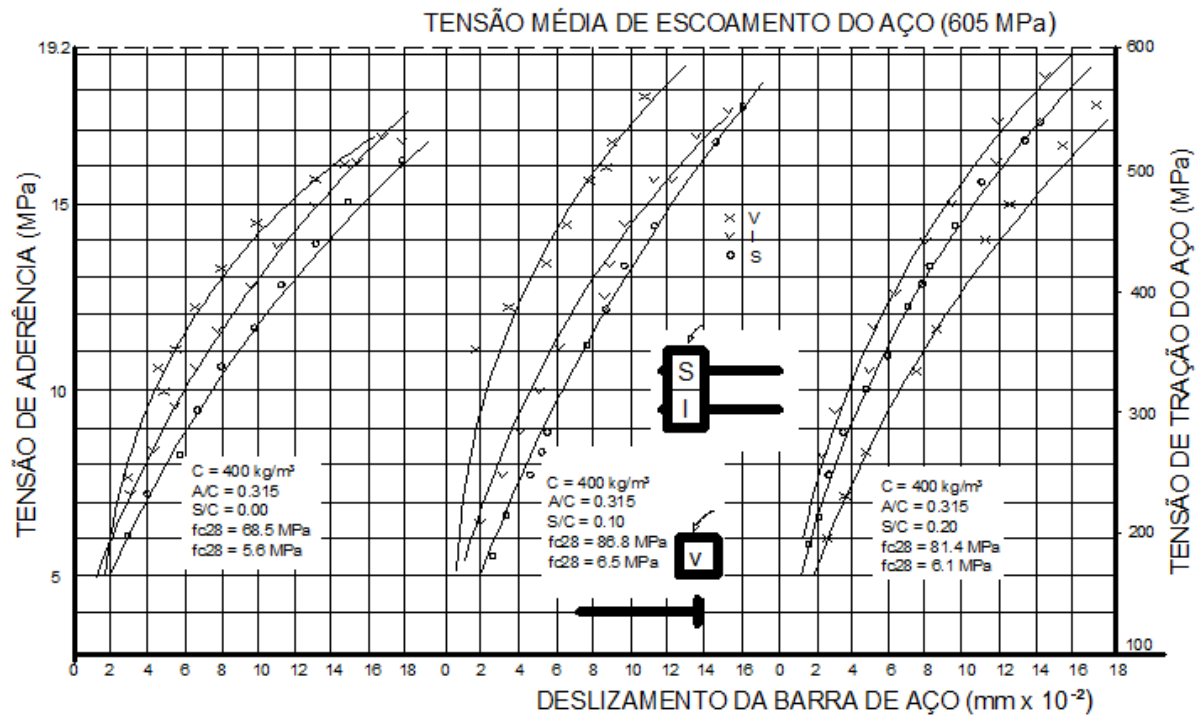


Figura 2.17 – Curvas de aderência para as misturas com consumo de cimento de 400 kg/m³ (DUCATTI, 1993).

SOROUSHIAN (1991) realizou estudos de aderência onde apresentou os resultados da influência dos espaçamentos entre armaduras transversais, mesmo o intuito do presente estudo não ser o estudo através do confinamento ou adição de armaduras verticais este experimento, é um trabalho muito interessante por apresentar resultados do comportamento da aderência não variáveis, onde a diferença nos resultados obtidos em cada uma das armaduras utilizada, no geral, torna insignificante. Os ganhos obtidos se mostram um pouco melhores quando se tem uma redução da fissuração cisalhante próxima a interface aço-concreto. Isto pode ser visto na figura 2.18.

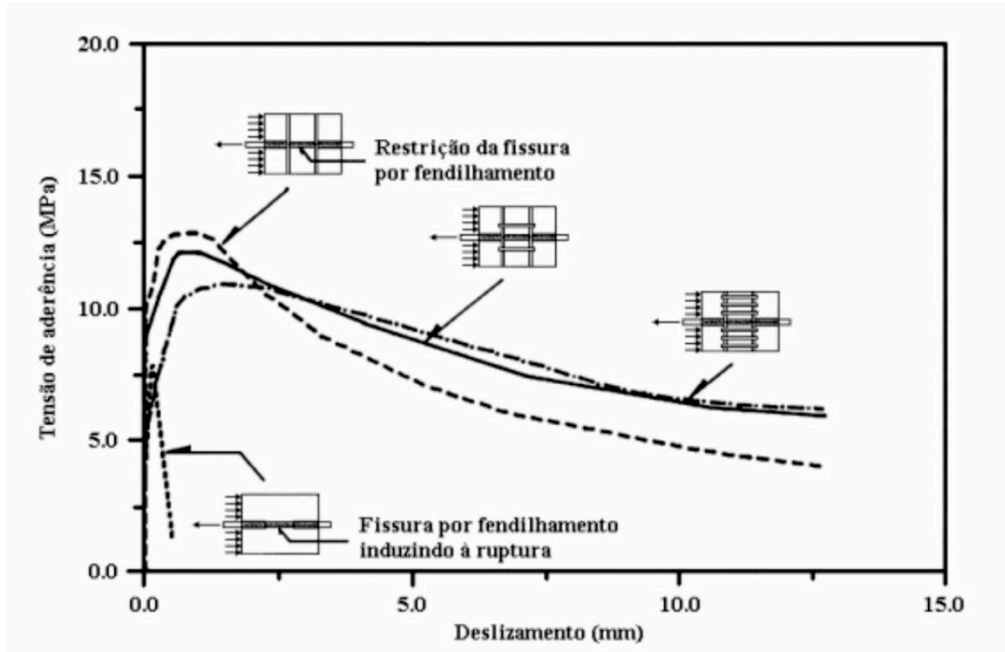


Figura 2.18 – Influência da armadura de confinamento na relação local tensão de aderência *versus* deslizamento de barras nervuradas (SOROUSHIAN et al, 1991).

Ainda como método de se entender o efeito da aderência, a figura 2.19 apresenta os efeitos da resistência à compressão do concreto nas regiões de aderência. Embora os valores característicos de tensão e deslizamento se mostraram pouco influenciáveis, o valor máximo da tensão de aderência *versus* deslizamento é a própria resistência de aderência significando um ganho substancial com o aumento da resistência a compressão do concreto (SOROUSHIAN, 1991).

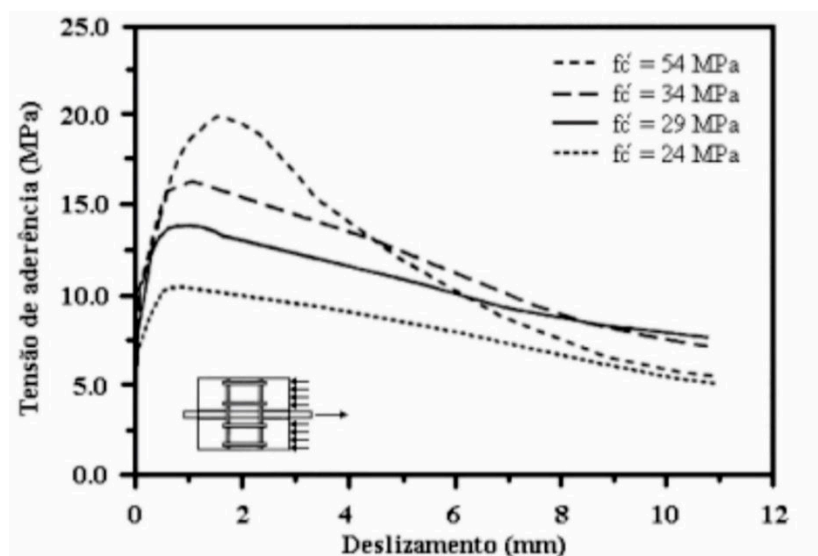


Figura 2.19 – Influência da resistência de compressão na relação local tensão de aderência-deslizamento de barras nervuradas em concreto confinado (SOROUSHIAN et al, 1991).

Há vários modelos de estudos sobre o comportamento da aderência, quais são elaborados por diversos autores disponíveis na literatura, dentre estes está o modelo proposto por Tassios (1979), qual apresenta o desenvolvimento das tensões existentes através de alguns estágios característicos que são comparados através de um deslocamento da barra em relação ao concreto, exemplificado na figura 2.20 através de uma curva teórica.

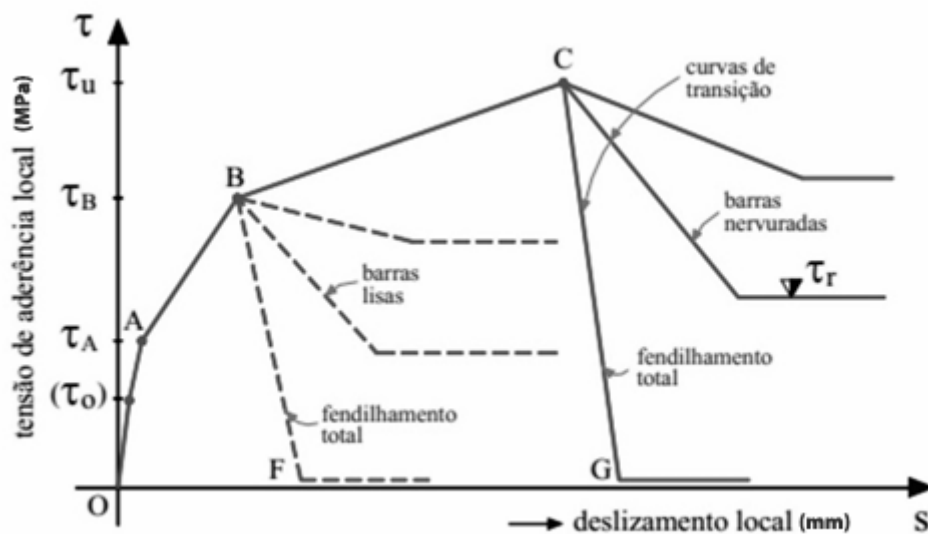


Figura 2.20 – Curva teórica tensão de aderência-deslizamento (TASSIOS, 1979).

O presente estudo tem como intuito basear-se nestes estágios determinados por Tassios (1979) para melhor comparação aos resultados existentes, isto por se tratar do uso de um material metálico ainda pouco explorado. De acordo com o modelo MC 1990, qual é um estudo aproximado do estudado por Tassios e elaborado pelo Comité Euro-International Du Beton e Fédération Internationale De La Précontrainte (1990), os resultados à respeito das tensões de aderência entre o metal e o concreto, através de um carregamento monotônico, pode ser obtido como uma função do deslocamento relativo s , Figura 2.21 e Equações 2.2 e 2.3.

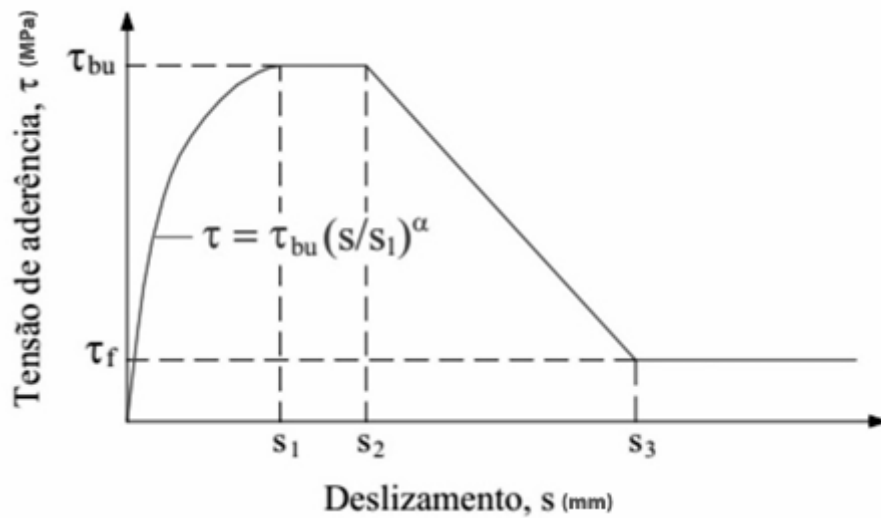


Figura 2.21 – Relação analítica tensão de aderência *versus* deslizamento carregamento monotônico (CEB-FIP MC 1990, 1991).

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

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

Onde:

τ = Tensão de aderência;

τ_{bu} = Tensão de aderência última;

S = Deslocamento

Tabela 2.1 – 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
α	0,5	0,5	0,5	0,5
τ_{bu} = τ_f	$0,1\sqrt{fck}$	$0,05\sqrt{fck}$	$0,3\sqrt{fck}$	$0,15\sqrt{fck}$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para desenvolver este estudo, primeiramente, foi utilizado alguns parâmetros de adaptação dos cálculos das normas utilizadas convencionalmente, com a intenção de comparar os resultados com os valores obtidos pelo do aço sugeridos nestas normas citadas. Onde, a partir disto foi elaborado todos os dispositivos necessários para alcançar uma modelagem, dos corpos de provas, próxima as existentes.

Esta pesquisa experimental segue, então, as seguintes metodologias, quais serão detalhadas no decorrer deste estudo:

- Verificação dos cálculos de tensão de aderência baseados na NBR 6118:2014, a respeito das características da liga proposta como substituição do aço convencional;
- Caracterização dos materiais de estudo. O concreto de alta resistência e a liga de NiTi pseudoelástica;
- Confecção dos gabaritos e moldes para os corpos de provas, com duas propostas de metodologia, uma indireta e outra direta;
- Criação e fabricação do dispositivo para fixação do corpo de prova à máquina de ensaio de tração durante os testes.
- Utilização da máquina de ensaio de tração para os ensaios de arrancamento.

3.1. VERIFICAÇÃO DO CALCULO DE TENSÃO DE ADERÊNCIA DE ACORDO COM A NBR 6118:2014

De acordo com a presente norma brasileira, a aderência entre o concreto e a barra pode ser calculada através da equação 3.1:

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \quad (3.1)$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (3.2)$$

onde:

f_{bd} = resistência de aderência de cálculo;

$f_{ctk,inf}$ = resistência característica à tração inferior;

f_{ck} = resistência característica à compressão;

η = coeficiente de conformação superficial;

η_1 = 1,00 para barras lisas, 1,40 para barras entalhadas e 2,25 para barras nervuradas;

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

η_3 = 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.

Na ausência de parâmetros mais precisos para cálculo da resistência a tração característica a norma permite utilizar as equações 3.3 e 3.4:

$$f_{ct,m} = 0,3 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (3.3)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m} \quad (3.4)$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ct,m} \quad (3.5)$$

Onde:

$f_{ct,m}$ = resistência média à tração do concreto;

$f_{ctk,inf}$ = resistência característica à tração inferior

$f_{ctk,sup}$ = resistência característica à tração superior

f_{ck} = resistência característica à compressão;

f_{ctk} = resistência característica à tração;

f_{ctd} = resistência à tração de cálculo;

Combinando as equações 3.1 e 3.3, é possível obter:

$$f_{bd} = \left(\frac{0,21 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3}{\gamma_c} \right) \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (3.6)$$

A tabela 3.1 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 Y_c são: 1,40 para combinações normais; 1,20 combinações especiais ou de construção e 1,20 para combinações excepcionais.

Tabela 3.1 – Cálculos adaptados da NBR 6118:2014.

f_{bd} (MPa) - $\phi \leq 32\text{mm}$ - $Y_c = 1,2$			
Concreto	Barras		
	Lisa	Entalhada	Nervurada
C25	1,50	2,09	3,36
C50	2,37	3,32	5,29
C100	3,76	5,27	8,40
f_{bd} (MPa) - $\phi \leq 32\text{mm}$ - $Y_c = 1,4$			
C25	1,28	1,79	2,90
C50	2,03	2,84	4,61
C100	3,23	4,52	7,32

Para o comprimento de ancoragem foi utilizado a equação:

$$l_b = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \quad (3.7)$$

Onde:

l_b = comprimento de ancoragem;

ϕ = diâmetro da barra;

f_{yd} = resistência ao escoamento do aço de cálculo;

f_{bd} = resistência de aderência de cálculo.

Através da equação 3.7 obtém-se:

- Para os ensaios indireto com barra lisa de NiTi de $\phi 2.80$ mm, condição de boa aderência:

$$l_b = 170,99 \text{ mm}$$

- Para os ensaios direto com barra lisa de NiTi de $\phi 6.00$ mm, condição de boa aderência:

$$l_b = 159,57 \text{ mm}$$

3.2. MATERIAIS

3.2.1. NiTi Pseudoelástico

Foi utilizada a liga NiTi pseudoelástica na forma de barras cilíndricas polidas com 2,8 e 6 milímetros de diâmetro, fabricadas pela NDC, modelo SE508. As propriedades mecânicas, físicas e composição química fornecidas pelo fabricante podem ser observadas na Tabela 3.2 e Tabela 3.3 respectivamente.

Tabela 3.2 – 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
Coeficiente de Expansão Térmica (°C)	11 x 10 ⁻⁶
Resistência a Tração (MPa)	≥ 1070
Resistência ao escoamento (MPa)	≥ 390
Alongamento Total (%)	≥ 10

Tabela 3.3 – Composição química das barras de NiTi utilizadas (CORRÊA FILHO, 2013).

Composição química	
Níquel	55.8 pp% (aprox)
Titânio	44 pp% (aprox)
Carbono	≤ 0.05 pp. %
Oxigênio	≤ 0.02 pp. %

3.2.2. Concreto

O cimento utilizado no preparo da mistura é do tipo Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) conforme norma ABNT NBR 5733/19. No procedimento deste estudo foi utilizado o microconcreto que é proposto pelo comitê da RILEM TC 225-SAP, a Tabela 3.4 mostra a composição do traço. A relação água/aglomerante estabelecida de 0,3 é usual para concretos de alta resistência.

A caracterização do concreto foi feita a partir do mesmo traço utilizado nos corpos de prova, o que assegura o uso direto da resistência esperada. Esta

caracterização foi toda feita no Laboratório de materiais do departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília.

Tabela 3.4 – Composição do traço.

Componentes	Massa (kg/m ³)	Volume (l/m ³)
Cimento CPV ARI	700	222,9
Sílica ativa (dosagem 10 % em relação a massa de cimento)	70	30
Areia lavada de rio	1218,0	459,6
Aditivo superplastificante (dosagem 1,8% em massa em relação à massa de cimento)	12,6	11,5
Água (água/cimento= 0,3)	210	210
Ar	-	20

Durante o preparo do traço foi utilizado um misturador específico com pás alternadas (Figura 3.1), o qual tem a função de homogeneizar da melhor maneira os componentes (Figuras de 3.2 a 3.5) que constam na Tabela 3.4.

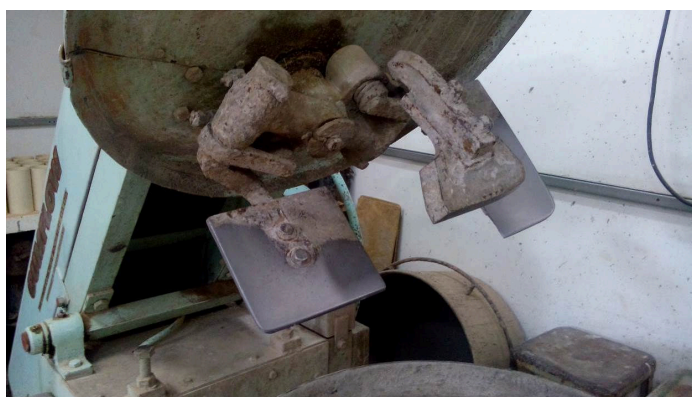


Figura 3.1 – Máquina utilizada para misturar a massa.



Figura 3.2 – Agregado miúdo (areia) utilizada na mistura.



Figura 3.3 – Aglomerante utilizado junto ao cimento.



Figura 3.4 – Líquido Plastificante utilizado.



Figura 3.5 – Cimento Portland CPV utilizado.

A composição dos microconcretos 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 (Figura 3.6) e sem os golpes para homogeneização da massa de acordo com a DIN 18555-2.

Na Tabela 3.5 é apresentada a sequência para mistura dos materiais constituintes dos microconcretos sugerida pela RILEM TC255-SAP que foi utilizada no microconcreto de referência.

Tabela 3.5 – Sequência para mistura dos constituintes dos microconcretos.

Tempo (min)	Ação	Duração de cada etapa (min)
04:00 - 00:00	Homogeneização dos componentes secos	4
00:00 - 01:00	Adição de água, incluindo o superplastificante pré-dissolvido	1
01:00 - 04:00	Mistura	3
04:00 - 05:00	Raspagem dos aglomerados presos as paredes do misturador	1
05:00 - 08:00	Mistura	3

No estado endurecido foi realizada a caracterização do microconcreto através de ensaios específicos para cada propriedade mecânica a ser verificada: resistência à tração na flexão, resistência à compressão dos cubos e resistência à compressão para cilindros. Os corpos de prova utilizados nos ensaios, após moldados, foram embalados em filme plástico e mantidos em condições padronizadas de umidade e temperatura por 48 horas. Após o desmolde, eles foram novamente envoltos em filme plástico até a data do rompimento, como mostrado na Figura 3.7. Os cilindros e os prismas utilizados nos ensaios foram mantidos em sala climatizada – utilizando o processo de cura selada. Os corpos de prova foram rompidos aos 28 dias da moldagem.



Figura 3.6 – Abatimento de tronco de cone utilizado para medir a trabalhabilidade no microconcreto.



Figura 3.7 – Corpos de prova após desmoldados, 48 horas.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DO MICROCONCRETO

3.3.1. Resistência à Tração na Flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão não possui uma normalização para os microconcretos em estudo neste trabalho. Por isso, adota-se como referencial a norma ABNT NBR 13279:2005, usada para argamassas. A Figura 3.8 mostra o molde utilizado na moldagem dos corpos de prova, juntamente com os corpos de provas desmoldados e numerados.



Figura 3.8 – Forma utilizada para fabricação dos Corpos de provas em forma de prismas para ensaio de tração na flexão.

Para cada mistura foram moldados doze prismas com dimensões 4x4x16 cm. Os corpos de prova foram colocados num equipamento com dois apoios espaçados

de uma distância 'l' e uma carga é aplicada no centro do vão até a ruptura. A resistência é determinada pela Equação 3.7:

$$R_f = \frac{3.P.l}{2.b.h^2}; \quad (3.8)$$

Onde:

R_f = resistência à tração na flexão (MPa);

P = carga aplicada verticalmente no centro do prisma;

L = distância entre os suportes (mm)

b = base do corpo de prova;

h = altura do corpo de prova;

Os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão são apresentados na Tabela 3.6, com os respectivos coeficientes de variação. Os valores foram obtidos pela média dos seis corpos de prova rompidos.

Tabela 3.6 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão.

Resistência à tração na flexão (MPa) – 28 dias				
Corpo de Prova	CARGA (kgf)	RESIST. (MPa)	DESVIO	MÉDIA (MPa)
1	507	11.50	-5.08%	10.94
2	464	10.52	3.83%	
3	490	11.11	-1.55%	
4	491	11.13	-1.76%	
5	483	10.95	-0.10%	
6	460	10.43	4.66%	

3.3.2. Resistência à Compressão dos Cilindros

O ensaio de resistência à compressão em corpos cilíndricos foi realizado seguindo as prescrições das normas ABNT NBR 5738 e ABNT NBR 5739. Para cada mistura, foram moldados dez cilindros com cinco centímetros de diâmetro e dez centímetros de altura (Figura 3.9 e 3.10). As faces rasadas durante a moldagem foram retificadas antes do rompimento para garantir a eliminação de imperfeições e uma

melhor distribuição das tensões ao longo da área da superfície. Antes do ensaio, registram-se as dimensões reais dos corpos de prova com uso de paquímetro e peso utilizando balança digital. Para a medição da resistência, os cilindros são colocados em uma prensa com medidor digital de força, sendo nele aplicada uma carga axial até o rompimento. A resistência é obtida dividindo-se a carga de ruptura registrada pela área da superfície de aplicação.



Figura 3.9 – Corpos de Prova Cilíndricos durante cura selada.



Figura 3.10 – Corpos de Prova Cilíndricos desmoldados e numerados.

Os resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão dos cilindros podem ser visualizados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Resultado do ensaio de resistência à compressão.

Resistência à compressão (MPa) – 28 dias								
Corpo de Prova	Diam. (mm)	Altura (mm)	Massa (g)	Densid. (g/cm ³)	Carga (kgf)	Resist. (MPa)	DESVIO	MÉDIA (MPa)
1	49.96	97.83	438.39	2.2859	18,300	93.35	-1.00%	92.42
2	49.42	96.40	429.51	2.3227	18,380	95.82	-3.67%	
3	49.61	97.29	433.74	2.3064	17,600	91.05	1.49%	
4	49.65	96.74	430.61	2.2991	17,510	90.44	2.15%	
5	49.61	95.69	425.50	2.3004	11,340	-	-	
6	49.64	95.80	428.50	2.3112	17,700	91.46	1.04%	

3.3.3. Resistência à Compressão dos Prismas

Assim como no ensaio de resistência à tração na flexão, o ensaio para determinação da resistência à compressão dos cubos não possui normalização, e, portanto, será utilizada como referência a ABNT NBR 13279:2005. Os prismas utilizados são as metades dos prismas rompidos no ensaio de resistência à tração na flexão. Os corpos de prova são apoiados em placas metálicas e submetidos a uma carga axial até o rompimento. As placas objetivam a uniformização e distribuição das tensões. A figura 3.11 mostra os corpos de prova.

**Figura 3.11** – Corpos de provas em formato de prisma inteiros.

Os resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão dos cubos estão presentes na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Resultado do ensaio de resistência à compressão.

Resistência à compressão (MPa) – 28 dias				
Corpo de Prova	CARGA (kgf)	RESIST (MPa)	DESVIO	MÉDIA (MPa)
1A	16,550	103.44	-3.26%	100.17
1B	16,290	101.81	-1.63%	
2A	17,080	106.75	-6.56%	
2B	15,040	94.00	6.16%	
3A	16,340	102.13	-1.95%	
3B	15,790	98.69	1.48%	
4A	12,380	-	-	
4B	14,300	-	-	
5A	15,050	94.06	6.10%	
5B	15,910	99.44	0.74%	
6A	15,920	99.50	0.67%	
6B	16,310	101.94	-1.76%	

A partir de todos resultados e suas médias aos 28 dias, têm-se em resumo a Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios.

Resistência à tração na flexão	10.94 MPa
Resistência à Compressão Cilindros	92.42 MPa
Resistência à Compressão Prismas	100.17 MPa

3.4. ENSAIO DE RUGOSIDADE

A rugosidade foi verificada através de um rugosímetro, medindo a Rugosidade Média (Ra) no sentido longitudinal das amostras com cut-off de 0,8 mm para a barra de NiTi e 2,5 mm para a barra do aço convencional. Este ensaio foi feito no laboratório de metrologia da Engenharia Mecânica, da Universidade de Brasília.

As amostras foram retiradas de uma barra de mesmo lote das que foram utilizadas na caracterização do NiTi, sendo verificada “como recebida” e após tratamento com jateamento de areia. A amostra do aço convencional foi retirada de uma barra lisa com 5 mm de diâmetro.

3.5. A METODOLOGIA PARA FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Por se tratar de um ensaio adaptado, os corpos de provas foram fabricados de maneira especial, onde deveriam garantir:

- Seguir as dimensões sugeridas pelas normas utilizadas na pesquisa;
- Garantir alinhamento de eixos entre o concreto e a barra de NiTi;
- Fácil manuseio e armazenamento até estarem prontos para os testes (processo de cura do concreto);
- Organizar de maneira que se pudesse executar a concretagem de todos no mesmo dia, aproveitando o mesmo traço, com intuito de garantir a mesma resistência em todos eles;
- Suportes móveis para garantir o desmoldes dos corpos de prova sem danificar o dispositivo projetado, reaproveitamento do molde.

E foi a partir destes princípios que se executou as propostas, que serão especificadas e ilustradas a seguir:

3.5.1. Ensaio Indireto

Materiais utilizados:

- a. Fios de NiTi diâmetro 2,8 mm;
- b. Compensado impermeabilizado;
- c. Parafusos;
- d. Cola silicone;
- e. Canos PVC diâmetro 100mm e altura 200mm;
- f. Concreto alta resistência;
- g. Papel filme.

Inicialmente a proposta era fazer ensaios indiretos, colocar dispositivos de apoio na máquina de ensaio de tração nas duas extremidades de modo que a barra não sofresse nenhum tipo de esforço (Figura 3.12).

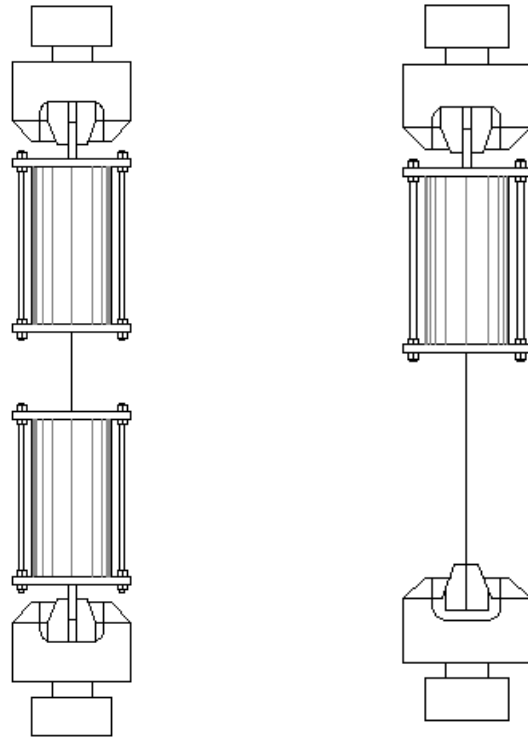


Figura 3.12 – Esquema dos apoios para adaptação nos ensaios indiretos e diretos.

Para tal, foi fabricado uma espécie de “estante” (Figura 3.13) para que todos os corpos de prova fossem confeccionados de uma única vez, garantindo a utilização de um mesmo traço do concreto.

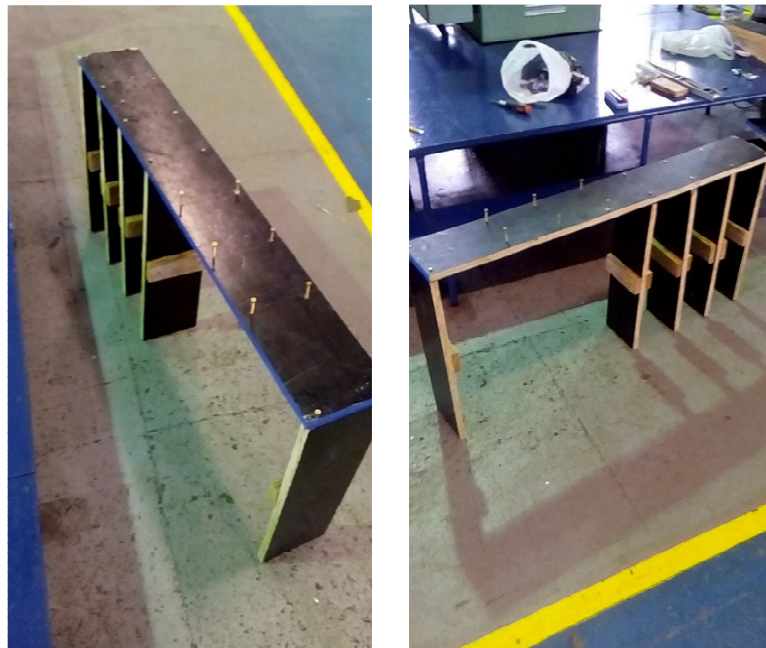


Figura 3.13 – Fabricação da parte superior da estante.

Esta estante foi projetada para garantir o alinhamento da barra de NiTi (Figura 3.14 e 3.15), que une os corpos de prova de concreto para facilitar o manuseio dos mesmos durante o processo de cura, será utilizado o processo de cura selada (conforme caracterização do concreto).



Figura 3.14 – Montagem da parte inferior da estante e marcação dos centros.



Figura 3.15 – Montagem das gavetas móveis.

Neste processo foi utilizado um compensado resistente à umidade (Figura 3.16), pois o contato com a água poderia danificar o molde. Foi toda nivelada e fixada com parafusos, a Figura 3.17 apresenta o resultado final.



Figura 3.16 – Imagem do perfil da madeira utilizada.



Figura 3.17 – Estantes finalizadas.

As gavetas distribuídas axialmente são móveis para facilitar o desmolde após o tempo de cura necessário para o teste, que foi de 28 dias e para preencher os corpos de provas da parte inferior. Os corpos de provas cilíndricos foram moldados em canos PVC (Figura 3.18) com diâmetro de 100mm e altura de 200mm fixados nos apoios de cada uma das colunas da estante através de parafusos e vedados com cola de silicone.



Figura 3.18 – Montagem dos moldes de PVC nas gavetas e apoios inferiores.

No topo da estante foram feitos furos para que, através de funis, pudesse ser adicionado o concreto e possibilitar os golpes (Figura 3.19) de homogeneização da pasta dentro do molde superior (conforme caracterização do concreto).



Figura 3.19 – Imagens dos golpes utilizados para homogeneização e preenchimentos dos espaços.

Como resultado final (Figura 3.20) obteve-se os corpos de provas e, para garantir a cura selada, se utilizou “papel filme” vedando a parte exposta ao meio, como pode ser visto nas Figura 3.21.



Figura 3.20 – Prateleiras com os Corpos de Prova recém concretados.



Figura 3.21 – Detalhe do filme utilizado para garantir a cura selada.

3.5.2. Ensaio Direto

Materiais utilizados:

- a. Barra NiTi diâmetro 6mm;
- b. Moldes cilíndricos metálicos de diâmetro 100mm e altura 200mm;
- c. Concreto de alta resistência;
- d. Papel filme.

Para o ensaio direto adaptou-se o próprio molde metálico cilíndrico de diâmetro 100mm e altura de 200mm qual é comumente utilizado, foi feito uma marcação do centro utilizando o mesmo gabarito da fabricação da estante para o ensaio indireto, com finalidade de garantir que a barra de NiTi ficasse exatamente ao centro. As Figuras 3.22 e 3.23 mostram estes detalhes.

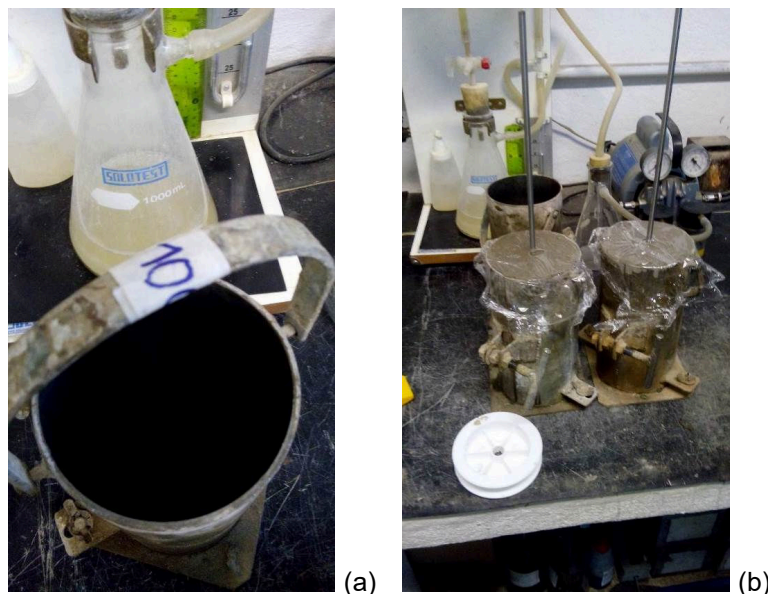


Figura 3.22 – Modelagem dos Corpos de Prova para ensaio direto. (a) Molde convencional, (b) Corpo de prova moldado com detalhe do gabarito para fixação do centro da peça e utilização do filme para cura selada.



Figura 3.23 – Corpos de Prova para ensaio direto após desmoldados.

Em ambos tipos de corpos de prova foram adicionadas mangueiras de material poliméricos (Figura 3.24) de modo a evitar o contato de parte da barra com o concreto, pois a profundidade planejada, através dos cálculos, deve ser mantida.



Figura 3.24 – Detalhes das mangueiras utilizadas para limitar aderência na região necessária.

Também, foi utilizado óleo mineral para que não houvesse atrito entre as superfícies dos materiais, a Figura 3.25 mostra a aplicação do óleo na região da mangueira.



Figura 3.25 – Óleo mineral sendo aplicado na mangueira para evitar aderência com o concreto.

3.5.3. A metodologia para o Ensaio

Devido à ausência do equipamento específico para o ensaio de arrancamento (POT) que mede o deslizamento da barra pelo lado oposto à força aplicada em relação ao corpo de prova, o propósito desta adaptação foi utilizar uma máquina de ensaio de tração (modelo MTS 810) para o teste de deslizamento, onde foi utilizado o procedimento, que será apresentado mais adiante, para cada um dos ensaios propostos, direto e indireto.

A MTS 810 apresenta o suporte para fixação dos corpos de prova através de garras, onde a pressão é feita por mordentes que são específicos de acordo com as dimensões das peças, limitando-se a uma dimensão máxima de 16mm, tanto para peças cilíndricas quanto para peças planas. Como o corpo de prova de concreto possui diâmetro de 100mm foi necessário a fabricação de um mecanismo que fizesse essa fixação, conforme apresentado nas Figuras 3.26 a 3.31:

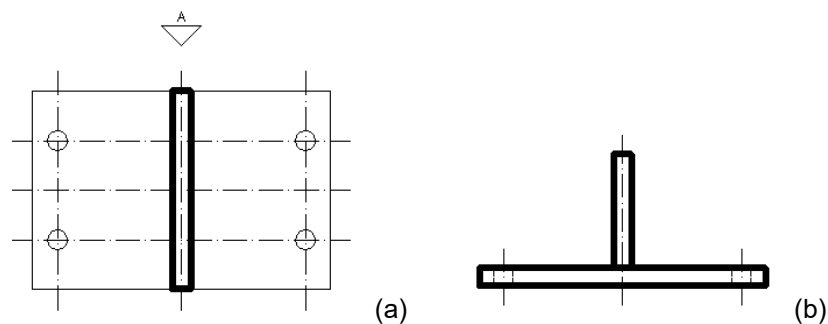


Figura 3.26 – Detalhes do suporte para apoio direto na máquina de ensaio de tração. (a) Vista Superior e (b) Vista Lateral.

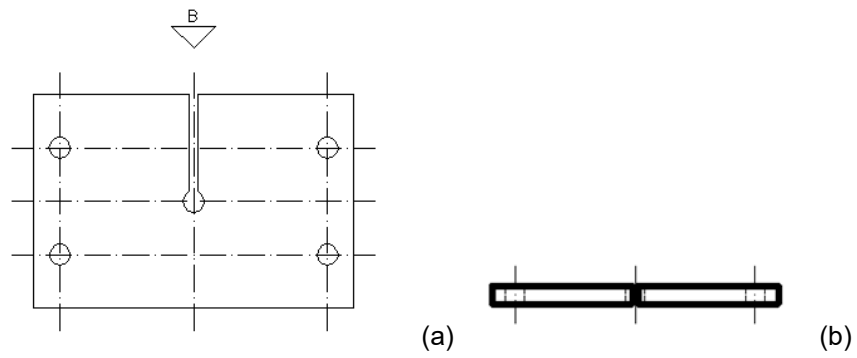


Figura 3.27 – Detalhes do suporte inferior para apoio do corpo de prova. (a) Vista Superior e (b) Vista Lateral.



Figura 3.28 – Imagem do suporte do corpo de prova na máquina de ensaio de tração pronta.



Figura 3.29 – Imagem dos suportes dos corpos de prova na máquina de ensaio de tração pronta.



Figura 3.30 – Detalhe do furo no suporte inferior para passagem da barra de NiTi entre os corpos de prova de concreto.



Figura 3.31 – Imagem do corpo de prova montado no suporte para ensaio.

Este mecanismo foi utilizado tanto no ensaio indireto quanto no ensaio direto, alterando apenas o estado de apoio no segundo caso, como mostra as Figuras 3.32 e 3.33.



Figura 3.32 – Imagem do corpo de prova montado no suporte e fixado na máquina para ensaio indireto.

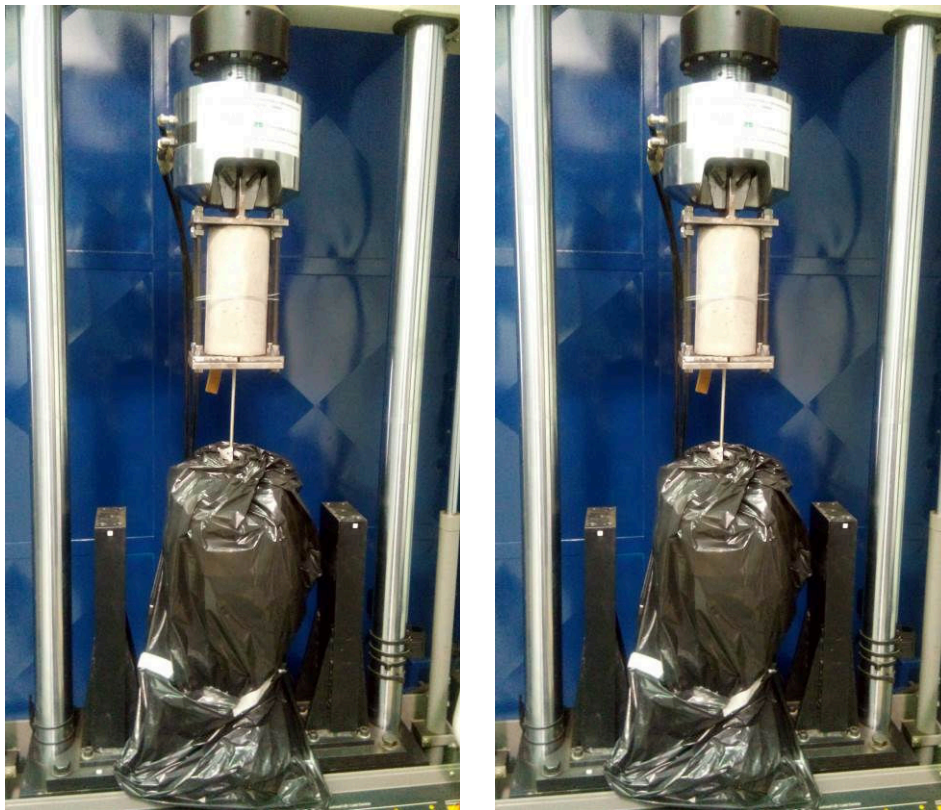


Figura 3.33 – Imagem do corpo de prova montado no suporte e fixado na máquina para ensaio direto.

Prevendo a deformação da barra de NiTi, e indisponibilidade de instrumentação para tal finalidade (extensômetro), foi programado um deslizamento de 2mm por minuto para que o ensaio fosse o mais estático possível e, também, para melhor acompanhamento da deformação da barra, embora de acordo com as propriedades e cálculos prévios isto não deveria ser uma limitante do ensaio. A cada 10 minutos (20mm de deslizamento) foi mensurado e marcado o curso que a barra percorreu, como mostrado na Figura 3.34.

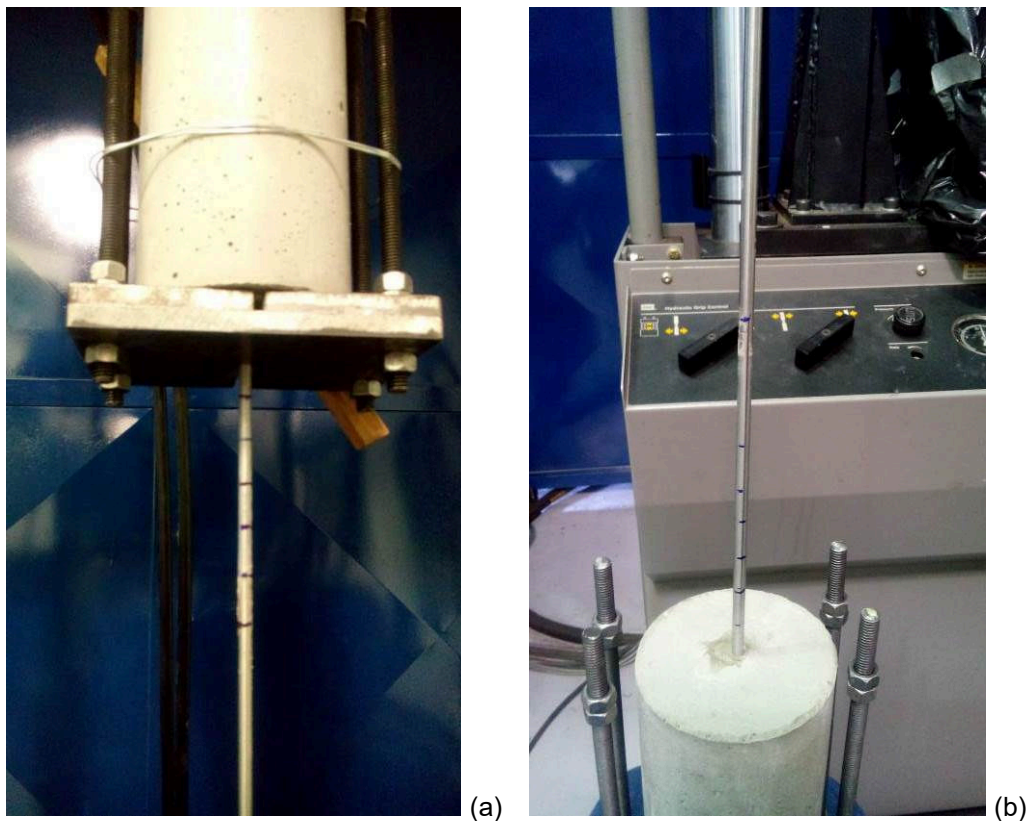


Figura 3.34 – Marcação do deslizamento a cada 10 minutos. (a) durante o ensaio e (b) após o ensaio.

Os dados programados para ambos ensaios foram:

Deslizamento: 2mm por minuto;

Tipo de ensaio: Monotônico;

Curso axial máximo: 160mm (-80 a 80);

Força axial: Tração;

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos estudos anteriores apresentados neste estudo foram feitos testes nos corpos de provas verificando a aderência da barra no concreto.

4.1. MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DA BARRA

Como pode ser visto na Figura 4.1 e na Tabela 4.1, a barra de NiTi possui superfície polida e, portanto, é mais lisa que a superfície do aço convencional. Após os ensaios verificou-se uma necessidade de se testar outros tipos de superfícies para melhor aderência. Foi verificado a rugosidade não somente da barra lisa de NiTi mas, também, ela jateada com jato de areia.

Tabela 4.1 – Rugosidade Média das barras.

Material	Cut off (mm)	Rugosidade Média – Ra (μm)			Média (μm)
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	
Aço Convencional	2.5	4.33	6.20	3.82	4.78 \pm 0,97
NiTi Polido (Como Recebido)	0.8	0.36	0.15	0.12	0.21 \pm 0,32
NiTi Jateado	0.8	1.16	1.28	1.05	1.16 \pm 0,28



(a)



(b)

Figura 4.1 – (a) Barras de NiTi e (b) Barra lisa do aço convencional.

Observa-se que a rugosidade da barra de NiTi jateada aumentou substancialmente (cerca de seis vezes), porém ainda é quatro vezes menor que a barra lisa do aço convencional.

4.2. ENSAIO INDIRETO

O comprimento de ancoragem foi calculado a partir da equação de comprimento de ancoragem básico (equação 3.6), dado pela NBR 6118:2014, onde foi obtido o valor de 170,99 mm (ver capítulo 3).

A proposta foi padronizar o comprimento básico variando de 100-200 mm (Tabela 4.2), verificando assim a melhor aderência abrangendo o comprimento de ancoragem de cálculo e evitando possível desvio próximo. Por questão de padronizar os teste foi definindo os comprimentos básicos de 100mm, 150mm e 200mm. Moldando três corpos de prova para cada uma das profundidades e um corpo de prova piloto de 150mm (pois foi o mais próximo do comprimento de ancoragem de cálculo).

Para todos os corpos de prova a tensão máxima de aderência foi calculada através da equação 2.1.

Tabela 4.2 – Resumo dos CPs utilizados.

Corpo de Prova	Comprimento l_b (mm)
CP 1A	100
CP 1B	100
CP 1C	100
CP 1D	150
CP 1E	150
CP 1F	150
CP 2A TESTE PILOTO	150
CP 2B	200
CP 2C	200
CP 2D	200

Como cada estante possui seis gavetas para apoio dos Corpos de Prova, eles foram nomeados de acordo com a posição em relação a estante e a gaveta. Por exemplo, o CP 1A representa que o Corpo de prova foi fabricado na “Estante 1” e na “Gaveta A”.

Teste piloto – CP 2A:

Após ensaio de arrancamento obteve-se a Figura 4.2:

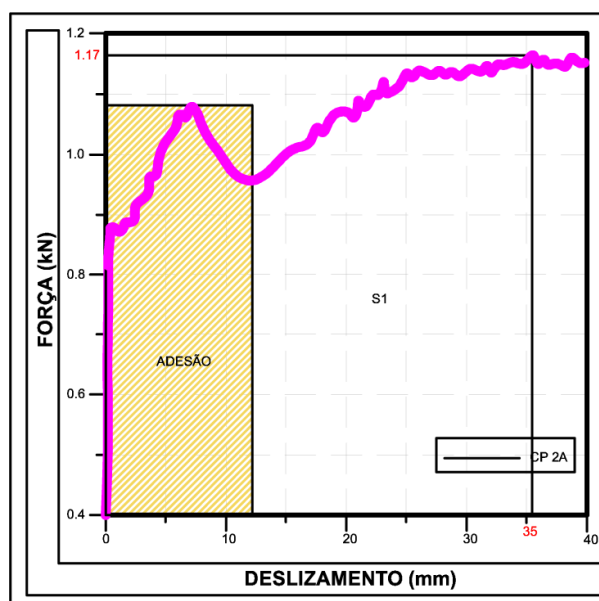


Figura 4.2 – Gráfico Força x Deslizamento CP 2A, com identificação de adesão e deslizamento.

Nota-se um primeiro momento onde ocorre um aumento da força inicial até aproximadamente 1,08 kN com deslizamento aproximado de 8 mm, provavelmente ocasionada pela adesão do concreto com a barra, após isso ocorre um deslizamento da barra e um posterior aumento da força devido atuação da tensão de aderência, a tensão de aderência é de 0,89 MPa.

Ainda observando o gráfico foi possível verificar uma força máxima de resistência a aderência de 1,17 kN em um deslizamento de aproximadamente 35 mm ocasionando uma tensão de aderência máxima de 0,89 MPa, ao comparar este resultado com os cálculos e valores expressos na Tabela 3.1 a tensão apresentada se mostra inferior ao esperado, provavelmente devido ao corpo de prova ser sem confinamento e com barra lisa. Como visto na Tabela 4.1 e na Figura 4.1 a barra de NiTi tem rugosidade superficial muito menor que o aço convencional.

Um problema identificado foi que, por ter corpo de prova de concreto dos dois lados, em certo momento o teste deslizava do lado que era para se manter fixo, e como não havia instrumentos disponível para este tipo de verificação não foi possível identificar através dos resultados do gráfico, onde exatamente está ocorrendo esta variação. E foi por este motivo que foi proposto fazer o ensaio direto, porém como os

corpos de prova foram fabricados em um mesmo traço, foi mantido a verificação dos outros ensaios para verificar a repetitividade.

Testes com comprimento de ancoragem 100 mm:

Nestes testes foram verificados os corpos de prova: CP 1A, CP1B e CP1C. Os resultados estão apresentados nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, respectivamente.

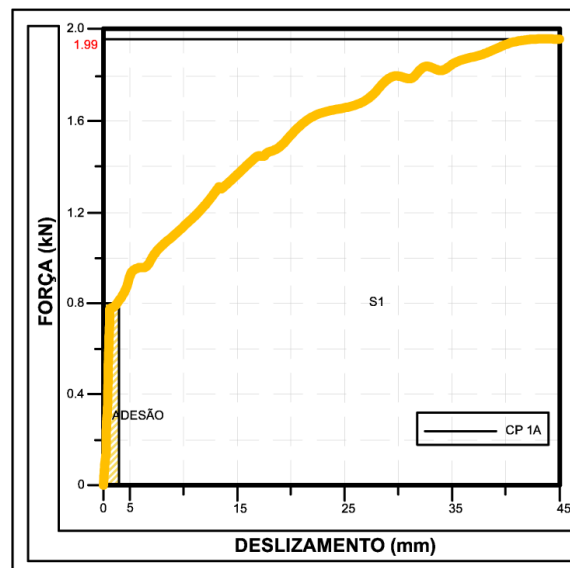


Figura 4.3 – Gráfico Força x Deslizamento CP 1A, com identificação de adesão e deslizamento.

Verifica-se que no CP 1A houve inicialmente a necessidade de uma força de aproximadamente 0,8 kN para um deslizamento de aproximadamente 4 mm para romper a resistência pela adesão dos materiais, acontecendo uma rápida perda de força, voltando a aumentar a resistência de aderência até a força atingir um nível de 1,99 kN com deslocamento de 45 mm, gerando uma tensão de 2,26 MPa (equação 2.1). Só é possível identificar uma única fase de deslizamento (S1).

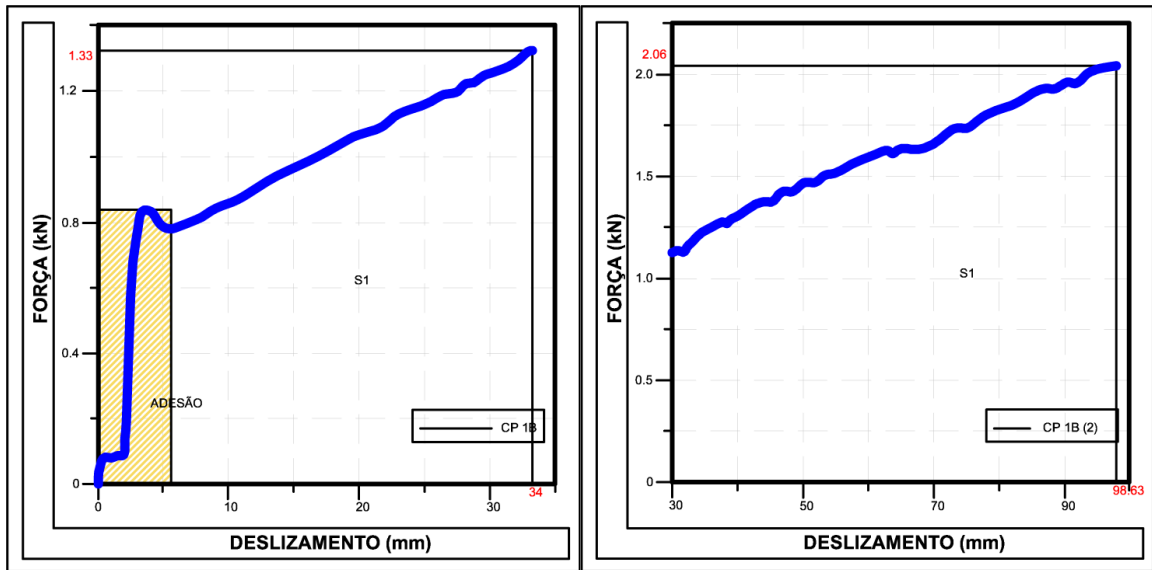


Figura 4.4 – Gráficos Força x Deslizamento CP 1B, com identificação de adesão e deslizamento.

O arrancamento do CP 1B (Figura 4.4) foi semelhante ao anterior e também com a identificação de apenas uma fase de aderência (S1). Com o limite de resistência a adesão em uma força de aproximadamente 0,9 kN e deslizamento de 6 mm, logo em seguida com a força aumentando até 2.06 kN com deslocamento de 96.63 mm, onde atinge o limite da resistência a aderência, gerando uma tensão máxima de aderência de 2.34 MPa. Como a força não mostrou tendência a diminuir este ensaio não comprova o término do deslizamento em região S1.

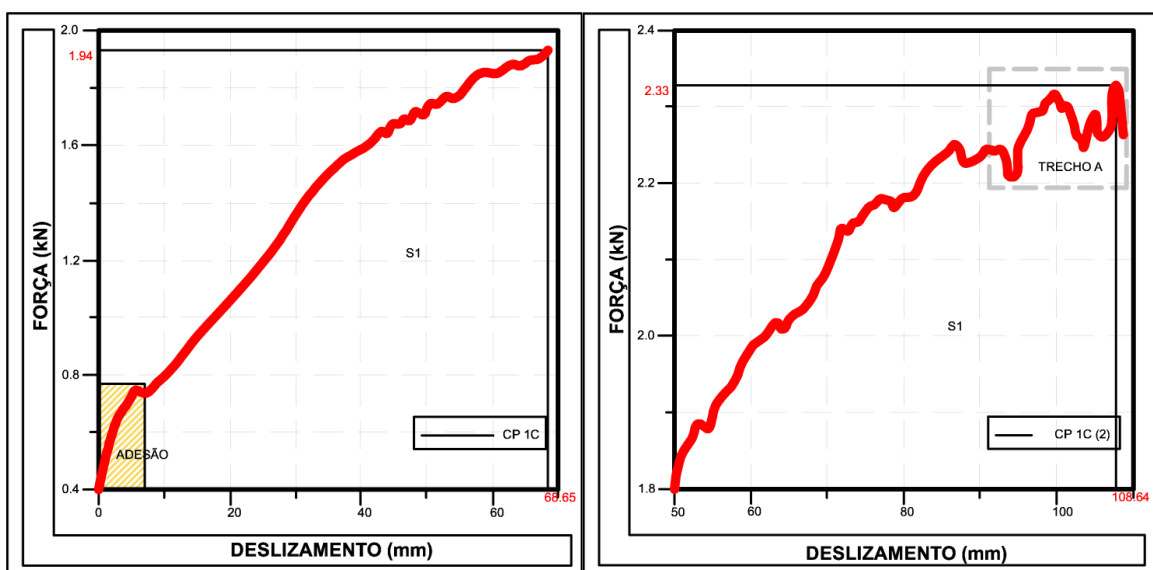


Figura 4.5 – Gráfico Força x Deslizamento CP 1C, com identificação de adesão e deslizamento.

No CP 1C (Figura 4.5) a adesão é vencida em uma força de 0,8 kN e deslizamento de aproximadamente 8 mm, iniciando um aumento gradativo da força até atingir uma amplitude de 2.33 kN em 108.64 mm de deslizamento, gerando uma tensão máxima de aderência de 2,65 MPa. Neste caso aparece uma variável no gráfico (Trecho A), sendo possível definir uma região como fase S1, porém torna difícil a identificação da seguinte fase de aderência, pois o corpo de prova iniciou um deslizamento referente ao lado qual deveria ser fixo (Figura 4.6).

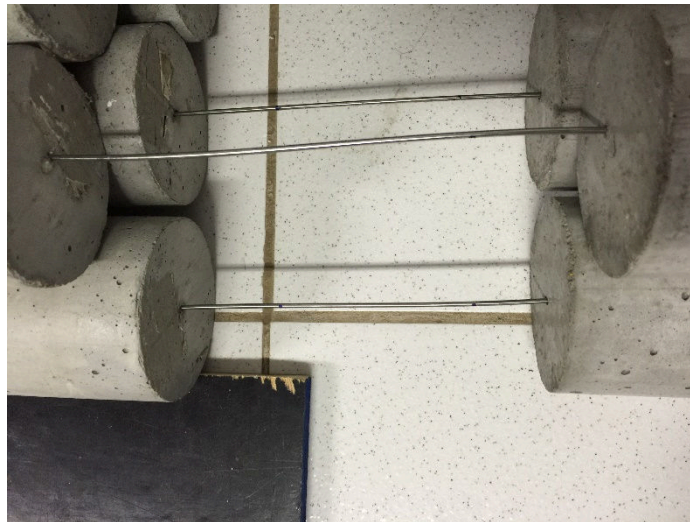


Figura 4.6 – Corpo de Prova com marcação do deslizamento dos dois lados.

Percebe-se uma repetitividade nos resultados referentes a tensão de aderência e, também, que a tensão inicial proporcionada pela adesão do concreto na barra de NiTi para comprimento de ancoragem de 100mm, se manteve constante em todos os testes e com valores próximos.

Teste com comprimento de ancoragem 150 mm:

Nestes testes foram verificados os corpos de prova: CP 1D, CP 1E e CP 1F. Os resultados estão apresentados na Figura 4.7.

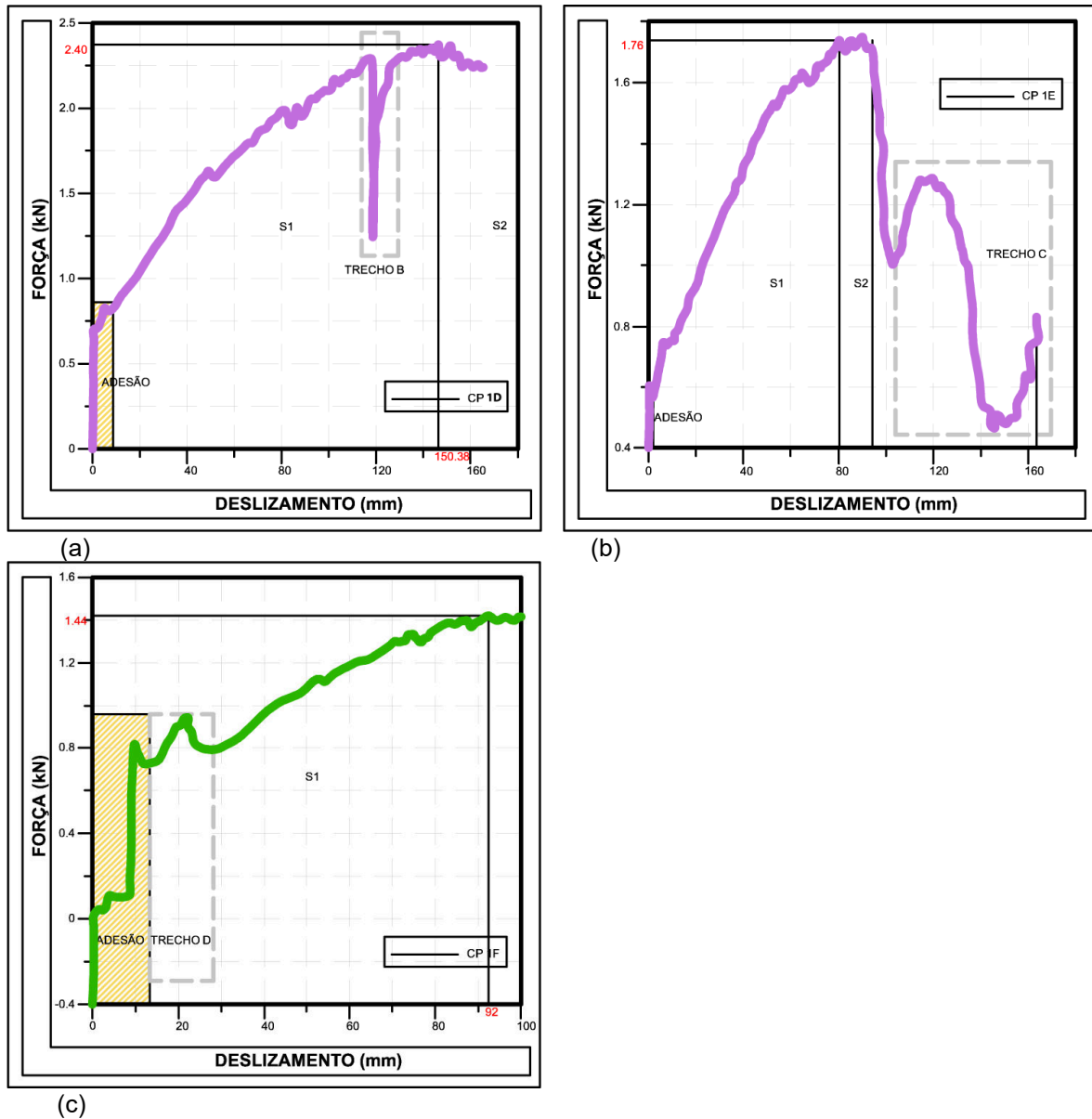


Figura 4.7 – Gráfico Força x Deslizamento, com identificação de adesão e deslizamento: : (a) CP 1D; (b) CP 1E e (c) CP 1F.

A adesão no CP 1D resiste até uma carga de aproximadamente 0,8 kN e um deslizamento de 8 mm, atingindo uma força máxima de 2,40 kN em 150,38 mm de deslizamento, com tensão máxima de aderência de 1,82 MPa. Neste primeiro teste com a profundidade de 150mm, se percebeu o deslizamento do lado qual deveria estar fixo, gerando uma modificação no comportamento da tensão de aderência representado no gráfico através do Trecho B. Possivelmente seria o início da fase S2, comparando com os outros ensaios de mesma profundidade.

O teste do CP 1E mostrou um comportamento mais contínuo, sendo possível identificar as fases S1, S2 e início de uma fase S3, porém ao iniciar esta terceira fase (Trecho C) o corpo de prova começou o deslizamento no lado oposto a força de arrancamento aplicada.

Após iniciar este deslizamento irregular o ensaio continuou com uma alternância do deslizamento entre as extremidades prevista e pré-definida como fixa, porém manteve a similaridade da tensão máxima de aderência do resultado anterior.

A adesão foi rompida a uma força de aproximadamente 0,8 kN e deslizamento de 5mm, a força máxima alcançada foi de 1,76 kN em aproximadamente 80 mm de deslizamento, resultando em uma tensão máxima de aderência de 1,33MPa.

O CP 1F durante o teste comportou bem diferente dos demais, após a tensão necessária para vencer a adesão dos materiais, houve o aparecimento de uma fase (Trecho D) que apresenta o início de S1, mas o deslizamento começou a acontecer, novamente, do lado oposto ao previsto. Em seguida o ensaio continuou na fase S1 normalmente, até a força alcançar um nível de 1,44 kN aos 92 mm de deslocamento, nota-se uma fase de adesão sendo vencida próximo a uma força de 0,8 kN, porém o resultado ficou confuso, dificultando a exatidão na identificação do início da tensão de aderência, a tensão máxima de aderência foi de 1.09 MPa.

Com a profundidade de 150mm é possível perceber uma similaridade no resultado referente a adesão e tensão de aderência, porém mostra inferior a profundidade de 100mm.

Teste com comprimento de ancoragem 200 mm:

Nestes testes foram verificados os corpos de prova: CP 2B, CP 2C e CP 2D. Os resultados estão apresentados na Figura 4.8.

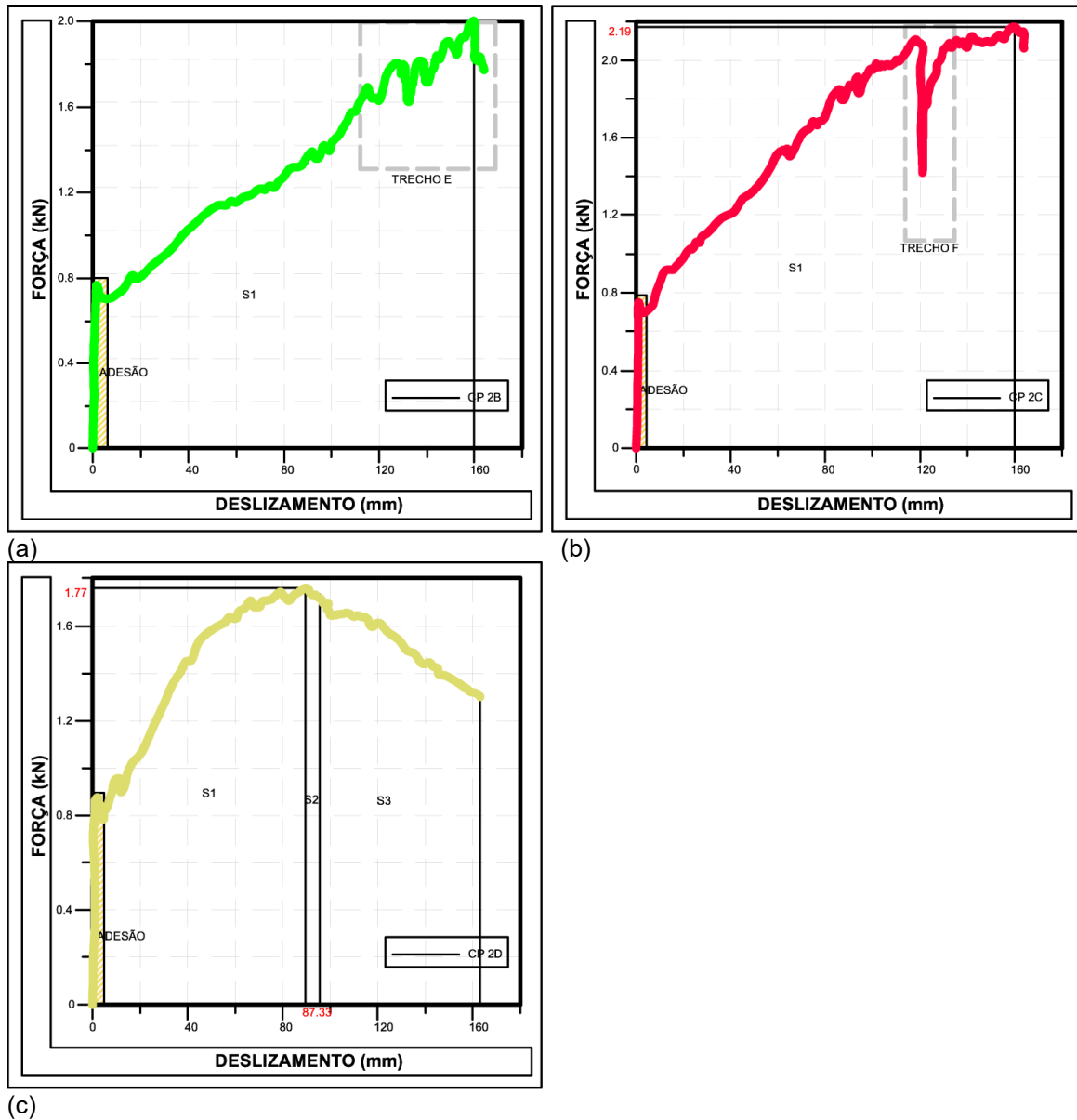


Figura 4.8 – Gráfico Força x Deslizamento, com identificação de adesão e deslizamento: (a) CP 2B; (b) CP 2C e (c) CP 2D.

O CP 2B apresentou similaridade com o ocorrido no CP 1C (Figura 4.6) e com o CP 1E (Figura 4.8), onde apresenta uma instabilidade no deslizamento, denominada como “Trecho E” onde aparece uma modificação na continuidade da fase S1. Isto porque inicia o deslizamento no lado oposto ao previsto, surgindo o revezamento dos lados que se deslizavam continuamente até o final do teste, impossibilitando a definição do final da fase S1.

A força máxima na adesão foi de 0,8 com deslizamento de 8 mm e força máxima de resistência a aderência de 2.00 kN com deslizamento de aproximadamente 160mm, a tensão máxima neste caso foi de 1.14 MPa.

O teste com o CP 2C se manteve normal até aparecer o comportamento ocorrido no “Trecho F”, é típico do deslizamento do lado oposto ao previsto, que cessou e continuou a normalidade no teste até o curso máximo definido para o corpo de prova. Este deslizamento é bem semelhante ao ocorrido no CP 1D (Figura 4.8) onde a suspeita é de que o deslizamento até certo ponto tenha ocorrido na extremidade errada do corpo de prova.

Sendo a força máxima de resistência na adesão de aproximadamente 0,8 kN com deslizamento aproximado de 6 mm, força máxima de resistência na aderência de 2,19 kN com deslizamento de 160 mm, e tensão máxima de aderência de 1,24 MPa.

O teste do CP 2D manteve normalidade no deslizamento, onde é possível perceber as três fases de aderência (S1, S2 e S3). A resistência máxima na adesão ocorrendo até aproximadamente 0,9 kN com deslizamento de aproximadamente 6 mm, resistência máxima na aderência de 1,77 kN em 87,33 mm de deslizamento e tensão máxima de aderência de 1.00 MPa.

Na Tabela 4.3 é possível verificar os resultados de todos os Corpos de Prova para melhor comparação dos resultados.

Tabela 4.3 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de arrancamento indiretos.

Corpo de Prova	Adesão (kN)	Tensão de aderência τ_b (MPa)	Média da Tensão de Aderência (MPa)	Comprimento l_b (mm)
CP 1A	0.75	2.26	2.41±0,16	100
CP 1B	0.83	2.34		100
CP 1C	0.75	2.65		100
CP 1D	0.80	1.82	1.28±0,40	150
CP 1E	0.75	1.33		150
CP 1F	0.80	1.09		150
CP 2A	0.87	0.89		150
CP 2B	0.75	1.14	1.12±0,10	200
CP 2C	0.73	1.24		200
CP 2D	0.85	1.00		200

O melhor desempenho foi obtido com o comprimento de ancoragem de 100mm, porém, como dito anteriormente, o fato de não controlar o deslizamento no apoio correto fez com que os resultados ficassem confusos em alguns casos, deixando a dúvida do que realmente acontece na relação de aderência NiTi-Concreto.

4.2. ENSAIO DIRETO

O comprimento de ancoragem foi calculado a partir da equação de comprimento de ancoragem básico (equação 3.6), dado pela NBR 6118:2014, onde foi obtido o valor de 159,57 mm (ver capítulo 3).

Como visto nos resultados anteriores, alguns ensaios foram contaminados por haver deslizamento nas duas extremidades do modelo utilizado como corpo de prova, e com intuito de verificar esta possibilidade, foi feito o ensaio direto, onde a barra foi apoiada diretamente no mordente da garra. Foram preparados três corpos de provas, mantendo o mesmo comprimento de ancoragem básico utilizado nos ensaios anteriores (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Resumo dos CPs utilizados.

Corpo de Prova	Comprimento l_b (mm)
CP 10cm	100
CP 15cm	150
CP 20cm	200

Os resultados obtidos nos testes do ensaio direto podem ser verificados no gráfico expressado na Figura 4.9:

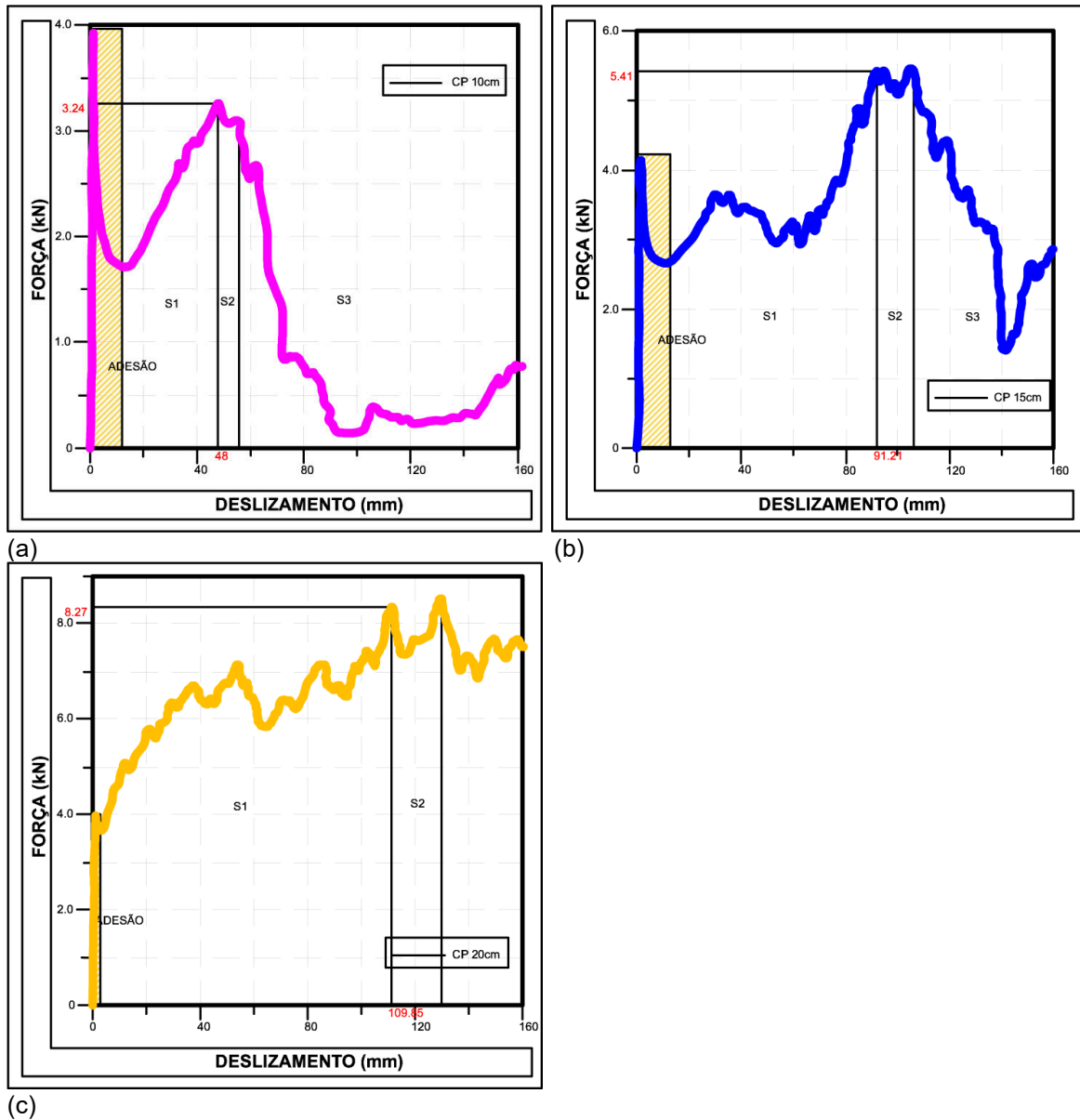


Figura 4.9 – Gráfico Força x Deslizamento, com identificação de adesão e deslizamento: (a) CP 10cm; (b) CP 15 cm e (c) CP 20 cm.

Neste teste foi possível verificar as três fases de aderência e a fase de adesão, ocorrendo diferente do teste anterior, pois no ensaio indireto o comprimento de 100mm se mostrou mais eficiente que os demais, já neste direto é possível observar um comportamento mais sutil, com as principais fases (S1 e S2) as quais apresentam a efetividade da aderência (força igual a 3,24 kN e deslocamento de 48 mm), impedindo que o deslizamento ocorra até os 60mm e com tensão máxima de aderência de 1.72 MPa. A resistência a adesão é ultrapassada com aproximadamente 4.00 kN e 3 mm de deslizamento, onde há uma queda da força necessária retomando o seu aumento até aproximadamente 48 mm de deslocamento.

O CP 15cm apresentou as três fases de aderência, mantendo o mesmo padrão de deslizamento do teste anterior, suportando uma distância de deslizamento maior com um comprimento de ancoragem também maior, ocorre com uma carga máxima de 5,41 kN próximo aos 91,21 mm de deslizamento e com tensão máxima de aderência de 1.91 MPa. A resistência máxima na adesão é de 4.10 kN com deslizamento de 3 mm.

Com comprimento de 200mm (CP 20cm) não foi possível definir com precisão a terceira fase de aderência, por volta dos 130mm o teste começa a diminuir a força necessária para vencer a tensão de aderência, porém não foi possível notar a perda da tensão de aderência. Contudo, é possível observar a continuidade no padrão de deslizamento dos outros ensaios diretos, apresentando melhor desempenho com maiores comprimentos de ancoragem. A adesão ocorre com resistência máxima de aproximadamente 4.00 kN e 3 mm de deslizamento.

A Tabela 4.4 apresenta o resumo dos resultados, onde observa-se que no ensaio direto a tensão proporcionada pela adesão se mantém constante independente do comprimento, pois está relacionada diretamente com a união dos materiais e não das tensões internas.

Tabela 4.5 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de arrancamento direto.

Corpo de Prova	Adesão (kN)	Tensão de aderência τ_b (MPa)	Comprimento l_b (mm)
CP 10cm	3.87	1.72	100
CP 15cm	4.10	1.91	150
CP 20cm	4.00	2.19	200

Com base nos resultados dos ensaios diretos (Tabela 4.5) em comparação com os resultados obtidos nos ensaios indiretos (Tabela 4.3), percebe-se que o ensaio direto apresentou resultados mais coerentes, pois aumentando o comprimento de ancoragem a resistência à aderência também aumenta. Já no ensaio indireto o comprimento de ancoragem de 100 mm foi mais efetivo que o de 200mm, com uma tensão de aderência média de $2.41 \pm 0,16$ MPa contra uma de $1.12 \pm 0,10$ MPa, respectivamente. No ensaio direto a tensão de aderência média foi de 2.19 para

comprimento de ancoragem de 200 mm e de 1.72 para comprimento de ancoragem de 100 mm.

A tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios em confronto com o valor de cálculo (em porcentagem).

Tabela 4.6 – Comparação dos resultados com o valor esperado (%).

Comprimento de ancoragem l_b (mm)	Ensaio Indireto τ_b Média (MPa)	% em relação ao esperado	Ensaio Direto τ_b Média (MPa)	% em relação ao esperado
100	2.41±0,16	75	1.72	53
150	1.28±0,40	40	1.91	59
200	1.12±0,10	35	2.19	68

Os resultados do ensaio indireto apresentaram uma resposta quantitativa melhor com tensão máxima cerca de 7% mais eficiente que o ensaio direto, porém no desenvolver do teste os CPs do ensaio direto tiveram um comportamento mais estável, é possível ver claramente esta diferença nos gráficos.

Através das propriedades de resistência ao escoamento da barra verifica-se que não houve a ativação da propriedade pseudoelástica do NiTi que ocorre apenas com cargas a partir de 390 MPa.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos nos ensaios é possível chegar a algumas conclusões e sugestões para futuras pesquisas, as quais serão abordadas neste capítulo.

5.1. CONCLUSÕES

Os resultados dos experimentos mostraram que há uma aderência razoável ao se comparar com os cálculos iniciais. Nenhum dos ensaios houve o arrancamento total (limitação do equipamento utilizado para fazer os testes) e, mesmo assim, a barra se manteve fixa nos corpos de concreto ainda que estivesse próximo a este arrancamento. Talvez alguns dos valores empíricos adaptados das normas utilizadas possam ser redimensionados conforme ensaios específicos para o material da liga metálica, afim de confirmar a relação da tensão de aderência entre os materiais, obtendo um valor numérico mais eficiente quanto ao seu real estado de resistência ao arrancamento.

Comparando os cálculos iniciais contidos na Tabela 3.1, verifica-se que a tensão de aderência, quantitativamente, obteve dados abaixo do esperado e isto ocorreu provavelmente devido ao fato da barra utilizada ter uma superfície mais lisa do que a utilizada convencionalmente. Um tratamento de jateamento de areia foi feito em uma amostra do NiTi pseudoelástico e verificou-se que a rugosidade (ver Tabela 3.4) aumentou aproximadamente seis vezes em relação a superfície do NiTi como recebido, os valores de Ra foram $1.16 \pm 0,28 \mu\text{m}$ e $0.21 \pm 0,32 \mu\text{m}$ respectivamente. A relação entre a rugosidade do NiTi e o Aço convencional é de vinte e três vezes menor no polido e quatro vezes com jateamento de areia, indicando que o jateamento de areia pode proporcionar um ganho na aderência sem a necessidade de um tratamento mais complexo, pois segundo LEONARDT (1997) a rugosidade favorece diretamente a aderência (ver Figura 2.9).

Esperando uma resistência a aderência de 3,76 MPa para combinações especiais (Tabela 3.1) os resultados obtidos nos ensaios experimentais (Tabela 4.6) revelam que os testes do ensaio indireto possuem uma grande variação nas informações. Os resultados dos ensaios diretos se mostraram muito mais coerentes por seguirem um aumento contínuo da força de aderência conforme se aumenta o comprimento de ancoragem. Entretanto, a necessidade do tratamento superficial se

torna inevitável pois mesmo com comprimento de ancoragem de 200 mm o resultado foi 32% menor que o esperado, no caso do ensaio direto.

Como a proposta desta pesquisa é verificar uma possível trabalhabilidade entre os materiais e que torne viável o uso da liga NiTi pseudoelástica, pode-se concluir que os testes representaram uma resposta positiva. Ainda é necessário rever alguns dos mecanismos utilizados, mas por ser um assunto ainda pouco explorado este trabalho tende a auxiliar na motivação para futuras pesquisas, principalmente na verificação da integridade em uma estrutura de concreto.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Há algumas sugestões para futuras pesquisas:

- Estudar o tratamento da superfície para uma melhor aderência: foi feito teste de rugosidade com a superfície tratada através de jato de areia, com ganhos significativos; Tratamento mecânico; Cola epóxi;
- Aprimorar o sistema adaptado (ensaio direto), pois algumas propriedades relacionadas a deformação da barra pode influenciar nos resultados, a instrumentalização do corpo de prova se mostra extremamente necessário.
- Fazer o arrancamento total da barra de NiTi do concreto para comparar com o ensaio teórico proposto, pois verifica-se que em alguns dos corpos de provas apareceram uma nova resistência ao deslizamento após a identificação da queda da resistência após a fase S2, isso tornou impossível a identificação da fase S3 ou um possível surgimento de uma nova fase.

REFERÊNCIAS

AIZAWA, S., KAKIZAWA, T., HIGASINO, M. **Case Studies of Smart Materials for Civil Structures. Smart Materials and Structures.** v. 7, n. 5, October 1998.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho, tradução de Geraldo G. Serra.** São Paulo, Editora Pini, 2000

AMARAL FILHO, E. M. (1993). **Concreto de alta resistência.** São Paulo. Associação Brasileira de Cimento Portland. 75p.

BONCI, A. [et al.] – **Use of shock transmission units and shape memory alloy devices for the seismic protection of monuments: the case of the Upper Basilica of San Francesco at Assisi.** Em Proceedings of International ICOMOS Congress More than Two Thousand Years of Architecture, Paris, 2001.

CALUÊTE, R. E., **Estudo das propriedades termomecânicas da liga Cu78,3%-Al9,8%-Mn11,9%.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica UFPB-CT, João Pessoa, 2012.

CARRASQUILLO P. M.; CARRASQUILLO R. L., **Evaluation of the use of current concrete practice in the production of high-strength concrete.** ACI Materials Journal, January/February, 1988. 5p

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON (1991). **CEB-FIP Model Code 1990.** Bulletin d'Information, n.203-205

CORRÊA FILHO, L. N. (2013). **Efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas e térmicas de uma liga NiTi pseudoelástica.** Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.DM - 200A/2013, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 63p

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de sílica ativa.** São Paulo, 1995. Tese (Doutorado em engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

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.

DUERIG, T. (1990). **Engineering aspects of shape memory alloys.** London: Butterworth-Heinemann.

FERNANDES, R. M. **A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto.** 2000. 155 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2000.

FUSCO, P.B. (1995). **Técnica de armar as estruturas de concreto.** São Paulo, Pini.

FUSARI, D. G. **Efeito do uso de resíduos do caulim e granito na regressão de resistência em microconcreto.** Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2008.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. (1977). **Construções de concreto: Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado.** 1.ed. Rio de Janeiro, Interciência. v.1.

LIBÓRIO, J. **Concreto de Alto Desempenho – Uma Tecnologia Simples para Produção de Estruturas Duráveis,** in: II Simpósio Internacional sobre Concretos Especiais, Sobral-CE, setembro de 2004. 42p.

MEHTA, P. K. **Concrete Structure Properties and Materials.** Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1986.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MO, Y. L., KAIRY, OTERO, K., Song, G. **Desenvolvimento and Testing of a Proof-of-Concept Smart Concrete Structure**. Department of Civil Engineering and Department of Mechanical Engineering. University of Houston, Texas, 2004.

NAWY, E.G., **Fundamentals of High Strength High Performance Concrete**. London: Longman Group Limited, 1996. 340p.

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.

OTERO, K. **Intelligent reinforced concrete structures using shape memory alloys**. Dissertação de Mestrado da Universidade de Houston, Texas, USA, 2004.

OTSUKA K., WAYMAN C. M., **Introduction & Mechanism of shape memory effect and superelasticity**, New York: Cambridge, 1998.

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.

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.

RYHÄNEN J. **Biocompatibility evaluation of nickel-titanium shape memory metal alloy**. Oulun : University of Oulu, 1999.

SEMIÃO, L.A.P. **Utilização de Ligas com Memória de Forma no controlo de vibrações em Estruturas Inteligentes de Engenharia Civil.** Dissertação de Mestrado da Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2010.

SOROUSHIAN, P.; CHOI, K. (1989). **Local bond of deformed bars with different diameters in confined concrete.** ACI Structural Journal, v.86, n.2, p.217-22, Mar./Apr

TASSIOS, T.P. (1979). **Properties of bond between concrete and steel under load cycles idealizing seismic actions. AICAP-CEB Symposium, Structural Concrete Under Seismic Actions.** CEB, Bulletin d'Information, n.131, p.67-122

WANG, Z.G.; ZU; FENG, X.D.; ZHU, S.; ZHOU, J.M.; WANG, L.M., **Annealing-induced evolution of transformation characteristics in TiNi shape memory alloys.** Physical B 353, 2004.