

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFMG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

**Estudo das Propriedades Mecânicas de Concretos Reforçados com Fibras Curtas
com Efeito Memória de Forma.**

Cláudio Menezes Nogueira.

Aos meus pais,
Luciano Alves Nogueira e Claudioslander Menezes Nogueira;
meus irmãos Luciana, Lucas e Cássio.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela força e garra para seguir em frente;

Aos meus pais e familiares pela ajuda, fé e gratidão proporcionada ao longo dessa fase da vida;

À Prof.^a Maria Teresa, pela dedicação e acompanhamento em todas as fases do mestrado;

À todos os professores do Departamento de Engenharia de Estruturas, em especial ao Prof. Ricardo Hallal Fackury, Prof. Ney Amorim e Prof. Edgar Carrasco;

Ao Paulo Guetti, Igor Portella e Leonardo Braga pelo apoio constante;

Ao Prof. Rodney Saldanha pela viabilidade dos ensaios;

À Inês, Lucíola, Patrícia e Renata do Departamento de Engenharia de Estruturas,

À Isa e todos funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Civil pela compreensão e incentivo, além dos pesquisadores Vinícius Xavier e Felipe;

Ao Prof. Vander Vasconcellos, Weber e pesquisadores do laboratório de ensaios cerâmicos;

Ao Idelbrando e demais funcionários do LAEES;

Ao estatístico Marcelo Lemos de Medeiros;

Ao colega e amigo Fabiano Esperidião;

Ao Eng. Antônio Victor de Moraes, pela vivência e credibilidade;

Ao Eng. Júlio César Valério pela colaboração.

SUMÁRIO

1-Introdução.....	1
2-Objetivo.....	4
3-RevisãoBibliográfica.....	5
3.1– Propriedades Mecânicas do Concreto.....	5
3.1.1– Resistência Mecânica do Concreto.....	8
3.1.2– Tenacidade (Tração).....	10
3.1.3– Fadiga.....	12
3.2– Reforço do Concreto.....	14
3.2.1– Fibras Longas.....	14
3.2.2– Fibras Curtas.....	16
3.2.3– Concreto Protendido.....	20

3.3– Efeito Memória de Forma.....	23
3.3.1–Aplicações de ligas de Nitinol com EMF	35
3.3.2–Aplicação de ligas de Nitinol com EMF na Construção Civil.....	43
4-Materiais e Procedimento Experimental	58
4.1– Materiais	58
4.2– Procedimento Experimental.....	61
5-Resultados.....	77
6-Conclusões.....	96
7-Bibliografia.....	98
8-Anexo	104

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – CURVAS DE CARGA VERSUS DESLOCAMENTO TÍPICAS. (MEHTA E MONTEIRO, 1994).	11
FIGURA 3.2 – RUPTURA DO CONCRETO POR TRAÇÃO NA FACE INFERIOR.....	14
FIGURA 3.3 – RUPTURA DO CONCRETO POR COMPRESSÃO NA FACE SUPERIOR.	15
FIGURA 3.4 – RUPTURA DO CONCRETO POR EXCESSO DE TENSÃO NO APOIO.	15
FIGURA 3.5 – TIPOS DE FIBRAS DE AÇO. (CUNHA ET AL).	16
FIGURA 3.6 – TENACIDADE DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS CURTAS. (CUNHA ET AL).	18
FIGURA 3.7 – TRANSFORMAÇÃO DA MARTENSITA E AUSTENITA COM CARGA X TEMPERATURA.	25
FIGURA 3.8 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO EFEITO MEMÓRIA DE FORMA.	26
FIGURA 3.9 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO EFEITO MEMÓRIA DE FORMA.	27
FIGURA 3.10 – VISTA EM TRÊS DIMENSÕES DA MARTENSITA E AUSTENITA. ..	27
FIGURA 3.11 – COMPARAÇÃO ENTRE A VISTA MACROSCÓPICA E MICROSCÓPICA DA AUSTENITA E DA MARTENSITA.	28

FIGURA 3.12 – DUAS DIFERENTES PERSPECTIVAS DAS ESTRUTURAS DE CSCL ADOTADAS PELO NITI NA FASE AUSTENITA.	29
FIGURA 3.13 – FORÇAS PARALELAS E OPOSTAS, ONDE O DESLOCAMENTO DE UM OBJETO SOFRE CISALHAMENTO.	30
FIGURA 3.14 – UM TOTAL DE QUATRO VARIANTES MARTENSÍTICAS PODEM CRESCER A PARTIR DE CADA PLANO PASSANDO ATRAVÉS DE UMA FACE DIAGONAL NA ESTRUTURA DO CSCL.	31
FIGURA 3.15 – CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DO NITI RESPONSÁVEIS PELO EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA.	32
FIGURA 3.16 – COMPARAÇÃO ENTRE OS DIVERSOS MATERIAIS.	34
FIGURA 3.17 – SATÉLITE COM LIGA EMF.	35
FIGURA 3.18 – MECANISMO DE ABERTURA DO SATÉLITE COM LIGA EMF.	36
FIGURA 3.19 – AERONAVE COM LIGA EMF NAS ASAS.	37
FIGURA 3.20 – DETALHE DA ASA DA AERONAVE.	37
FIGURA 3.21 – MOVIMENTAÇÃO DA ASA DA AERONAVE.	38
FIGURA 3.22 – UTILIZAÇÃO DA LIGA COM EMF NA ROBÓTICA.	38
FIGURA 3.23 – CONEXÕES DE ALTA PRECISÃO.	39
FIGURA 3.24 – IMPLANTE DENTÁRIO.	40
FIGURA 3.25 – APLICAÇÃO DE NITINOL NA DESOBSTRUÇÃO DE COÁGULOS SANGUÍNEOS.	40
FIGURA 3.26 – STENTS: USADOS PARA DESOBSTRUÇÃO DE ARTÉRIAS.	41

FIGURA 3.27 – EQUIPAMENTO CIRÚRGICO DE ALTA PRECISÃO (PINÇA).	41
FIGURA 3.28 – INSTRUMENTAÇÃO MÉDICA.	42
FIGURA 3.29 – VÁLVULA DO CORAÇÃO.....	43
FIGURA 3.30 – VIGA COM APLICAÇÃO DE CARGA EM TRÊS PONTOS.....	44
FIGURA 3.31 – DURANTE A APLICAÇÃO DA CARGA, A TRINCA PODE SER VISTA.....	45
FIGURA 3.32 – DEPOIS DE REMOÇÃO DA CARGA, A TRINCA PRATICAMENTE DESAPARECE.....	46
FIGURA 3.33 – VIGA DE AÇO COLOCADA AO LONGO DO TOPO DA BASÍLICA DE SÃO FRANCISCO DE ASSIS, PARA GARANTIR A CONEXÃO GLOBAL HORIZONTAL. (BONCI ET AL, 2002).	47
FIGURA 3.34 – VIGA DE AÇO EM FORMA DE TRELIÇA COLOCADA AO LONGO DA BASE DA BASÍLICA DE SÃO FRANCISCO DE ASSIS. (BONCI ET AL, 2002).	48
FIGURA 3.35 – ATUADORES DAS VIGAS DA BASÍLICA DE SÃO FRANCISCO DE ASSIS. (BONCI ET AL, 2002).	48
FIGURA 3.36 – ATUADORES NO TOPO DO TELHADO DA BASÍLICA DE SÃO FRANCISCO DE ASSIS. (BONCI ET AL, 2002).	49
FIGURA 3.37 – DETALHES DOS ATUADORES (COM TAMPA DE PROTEÇÃO, À ESQUERDA, E SEM TAMPA DE PROTEÇÃO, À DIREITA) NO TOPO DO TELHADO DA BASÍLICA DE SÃO FRANCISCO DE ASSIS. (BONCI ET AL, 2002).	49
FIGURA 3.38 – ANÁLISE DAS TENSÕES NA FACHADA DA BASÍLICA DE SÃO FRANCISCO DE ASSIS. (BONCI ET AL, 2002).	50
FIGURA 3.39 –TORRE DA IGREJA DE SÃO GIORGIO PROTEGIDA COM SMA. (DESROCHES ET AL, 2002).	51

FIGURA 3.40 – MODELO TEÓRICO DA VIGA. (LAU ET AL, 2002).....	52
FIGURA 3.41 – TENSÕES INDUZIDAS NO COMPÓSITO. (LAU ET AL, 2002).....	53
FIGURA 3.42 – MODELO EXPERIMENTAL PARA ANÁLISE DINÂMICA. (LAU ET AL).....	53
FIGURA 3.43 – ESTRUTURA APORTICADA COM CABOS DE SMA. (BARATA E CORBI, 2002).....	54
FIGURA 3.44 – CABOS NAS BASES DE TABULEIROS DE PONTES. (DESROCHES ET AL, 2003).....	55
FIGURA 3.45 – DETALHES DOS CABOS DAS PONTES. (DESROCHES ET AL, 2003).....	55
FIGURA 3.46 – SUPORTES ESPECIAIS PARA PÓRTICOS. (DOLCE ET AL, 2002). ...	56
FIGURA 3.47 – CONECTORES DE PILARES E VIGAS. (DESROCHES ET AL).....	57
FIGURA 4.1– PREPARAÇÃO DOS FIOS DE NITINOL.....	59
FIGURA 4.2– FIO COMPLETAMENTE RETILÍNEO.....	59
FIGURA 4.3– ALICATE PARA CORTE DAS FIBRAS.	60
FIGURA 4.4– FIBRAS JÁ CORTADAS.	60
FIGURA 4.5– ESQUEMA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.	61
FIGURA 4.6 – CORTE DAS FÔRMAS.....	63
FIGURA 4.7 –MESA COM SERRA CIRCULAR PRONTA PARA REALIZAR O ENTALHE.....	64
FIGURA 4.8 – CORTE DO ENTALHE DA FORMA.....	64

FIGURA 4.9– FÔRMA COM AS LATERAIS ENCAIXADAS E O FUNDO FIXADO COM ELÁSTICO.....	65
FIGURA 4.10 – BETONEIRA PARA MISTURA DOS COMPONENTES DO CONCRETO.....	66
FIGURA 4.11 – VERIFICAÇÃO PRELIMINAR DA TEMPERATURA DE CURA DO CONCRETO.....	67
FIGURA 4.12– CONCRETO PRONTO PARA SER MOLDADO.	68
FIGURA 4.13 – MESA VIBRATÓRIA.....	69
FIGURA 4.14 – PAQUÍMETRO PARA AQUISIÇÃO DAS DIMENSÕES DOS CPS.	69
FIGURA 4.15 – ESTUFA USADA PARA AQUECER OS CORPOS DE PROVA.....	70
FIGURA 4.16 – LEITOR LASER DE TEMPERATURA. (MARCA POLIMED LTDA)...	71
FIGURA 4.17 – LEITOR DE UMIDADE (MARCA POLIMED LTDA).	71
FIGURA 4.18 – INSTRON 5582.	72
FIGURA 4.19– LIGA NITINOL SENDO DEFORMADA POR TRAÇÃO DE 8%.	73
FIGURA 4.20 – CLIP-GAGE.	74
FIGURA 4.21– SISTEMA MONTADO PARA CAPTAR DESLOCAMENTOS DO CONCRETO.....	75
FIGURA 4.22– CORPO DE PROVA APOIADO EM TRÊS PONTOS.....	76
FIGURA 5.1 – GRÁFICO COMPARATIVO-FLEXO TRAÇÃO, NÃO FORNO E FIBRA X NÃO FORNO E FIO.	78

FIGURA 5.2 – GRÁFICO COMPARATIVO- FADIGA, NÃO FORNO E FIBRA X NÃO FORNO E FIO.....	79
FIGURA 5.3 – GRÁFICO COMPARATIVO-FLEXO-TRAÇÃO, NÃO FORNO FIBRA X FORNO E FIBRA.....	80
FIGURA 5.4 – GRÁFICO COMPARATIVO,FLEXO-TRAÇÃO, NÃO FORNO E FIO X FORNO E FIO.....	81
FIGURA 5.5 – GRÁFICO COMPARATIVO,FLEXO-TRAÇÃO, FORNO E FIBRA X FORNO E FIO.....	82
FIGURA 5.6 – GRÁFICO COMPARATIVO.-FADIGA NÃO FORNO, FIBRA X FORNO E FIBRA	83
FIGURA 5.7 – GRÁFICO COMPARATIVO- FADIGA, NÃO FORNO E FIO X FORNO E FIO.....	84
FIGURA 5.8 – ORGANOGRAMA DOS ENSAIOS.....	90

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – DIMENSÕES DAS FÔRMAS.....	62
TABELA 4.2 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA.....	66
TABELA 5.1 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS.....	85
TABELA 5.2– ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS- SIGNIFICÂNCIA- CURA	86
TABELA 5.3 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS - FORÇA.....	86
TABELA 5.4 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS - FLEXO-TRAÇÃO E FADIGA COM FLEXO-TRAÇÃO.....	87
TABELA 5.5 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS- SIGNIFICÂNCIA- FLEXO-TRAÇÃO E FADIGA COM FLEXO-TRAÇÃO	87
TABELA 5.6 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS - FIO E FIBRA.....	88
TABELA 5.7 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS- SIGNIFICÂNCIA- FIO E FIBRA	88
TABELA 5.8 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS - NÃO FORNO E FORNO	89
TABELA 5.9 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS- SIGNIFICÂNCIA- NÃO FORNO E FORNO	89
TABELA 5.10 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS – FATOR EM ESTUDO	91

TABELA 5.11 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS - SIGNIFICÂNCIA - COMBINAÇÕES.....	91
TABELA 5.12 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS – CP’S NÃO FORNO	92
TABELA 5.13 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS – SIGNIFICÂNCIA - CP’S NÃO FORNO.....	92
TABELA 5.14 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS - CP’S FORNO	93
TABELA 5.15 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS – SIGNIFICÂNCIA – CP’S FORNO.....	93
TABELA 5.16 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS - TIPO DE MISTURA - FIO.....	94
TABELA 5.17 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS – SIGNIFICÂNCIA - TIPO DE MISTURA - FIO.....	94
TABELA 5.18 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS - TIPO DE MISTURA - FIBRA.....	95
TABELA 5.19 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL DOS ENSAIOS – SIGNIFICÂNCIA - TIPO DE MISTURA - FIBRA	95

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Af = Temperatura de fim da transformação martensítica;

Au-Cd = Ouro e Cádmio;

cp = Cimento Portland;

CPs = Corpos de prova;

CRF = Concreto Reforçado com fibras;

Cu = Cobre;

EMF = Efeito memória de forma;

Fe = Ferro;

FIG = Figura;

Fo = Concreto foi ao forno;

In-Tl = Índio e Tálho;

LVDT = Transdutor de deslocamento;

Mi = Temperatura de início da transformação martensítica;

Mf = Temperatura de fim da transformação martensítica;

N = Número de corpos de prova;

Ni = Níquel;

Ni-Ti = Níquel e Titânio;

SMA = Shape Memory alloy = liga com efeito memória de forma;

SPSS = Software para análise estatística;

ϵ (hc) = Hexagonal compacta;

γ (cfc) = Cubo de face centrada.

RESUMO

As fibras curtas de aço têm sido utilizadas para melhorar a tenacidade do concreto e torná-lo pseudodúctil. Neste trabalho é avaliada a influência da adição de fibras curtas de níquel e titânio com efeito memória de forma na tenacidade do concreto. Esse estudo se deu pela análise comparativa dos resultados de ensaios de flexo-tração de concretos reforçados com fibras curtas e longas antes e após a aplicação de esforços cíclicos. Foram utilizadas fios de Nitinol deformados de 8% e programados para retomarem a forma inicial em temperaturas em torno de 60°C. Os resultados indicaram que o efeito memória de forma das fibras curtas aumenta a tenacidade do concreto e o mesmo efeito pode ser utilizado como protensão se os concretos forem reforçados com fios.

ABSTRACT

The short alloys have been used to improve the tenacity of the concrete and to become it pseudo-elasticity. In this work the influence of the short shape memory nickel-titanium alloys addition is evaluated of in the concrete tenacity. This study gave for the comparative analysis of the resulted of assays of flex-traction of concrete strengthened with short alloys and long alloys before and after the application of cycle's efforts. Wires of Nitinol deformed of 8% and programmed had been used to regains its original geometry in temperatures around 60°C. The results had indicated that the shape memory alloy increases the concrete tenacity and the same effect can be used as protension if the concrete ones will be strengthened with short alloys .

1

INTRODUÇÃO

Durante milhões de anos os materiais naturais (madeira, pedras, ossos e peles de animais etc.) foram os únicos conhecidos e disponíveis atendendo de forma rudimentar as necessidades do ser humano.

Cerca de cinco mil anos antes de Cristo, o homem passou a fazer os primeiros utensílios domésticos com argilas (materiais cerâmicos primitivos) e passou a produzir os primeiros utensílios a partir de metais e ligas. No início da era cristã o homem conhecia sete metais: cobre, prata, chumbo, estanho, ferro, mercúrio e ouro.

Até meados do século XIX, o conhecimento existente acerca dos materiais era essencialmente empírico. Desde então, maiores desenvolvimentos começaram a ser conseguidos, devido à possibilidade da observação com o microscópio, o que permitiu estudos mais avançados dos materiais e de seus processos de fabricação e transformação, dando origem à Ciência dos Materiais e, posteriormente, à Engenharia de Materiais.

Hoje, são dispostos aproximadamente 50.000 materiais, classificados em cinco grandes grupos: metais, cerâmicas, polímeros, semicondutores e compósitos, MONTEIRO et al, (2003).

Com essa diversidade de materiais, a utilização de fibras para reforçar os materiais é uma solução para diversos problemas na construção civil atualmente. Esses compósitos possuem maior ductilidade e tenacidade que os materiais tradicionais e com eles é possível produzir componentes mais leves do que os convencionais, mas com elevado desempenho mecânico.

A adição de fibras metálicas ao concreto promove o aumento da capacidade de absorção de energia do composto, ou seja, a tenacidade é notadamente aumentada. Além disso, podem ser observadas melhorias na qualidade do concreto, no que diz respeito à ductilidade pela redução da abertura de fissuras ao longo das peças estruturais. Esse fenômeno restringe parcialmente a penetração de substâncias agressivas no material aumentando sua vida útil.

Observa-se também um aumento da capacidade da resistência ao impacto, da resistência à tração e da resistência à fadiga do material. Esses resultados indicam que o composto com fibras apresenta melhor desempenho do que o concreto convencional.

Estudos ainda não conclusivos apontam para uma redução das armaduras principais das peças estruturais em concreto armado onde as fibras de aço participariam, efetivamente, na contribuição à resistência às tensões de tração.

Por outro lado, as ligas com efeito memória de forma têm sido muito pesquisadas. Em um futuro próximo é provável que se fabriquem essas ligas a preço que as tornem passíveis de utilização em componentes presentes no dia a dia, sendo então, muito eficaz adicionar ao concreto, fibras com efeito memória de forma.

Tem-se desenvolvido trabalhos nessa área com ligas de níquel e titânio, cobre e ferro, além de alguns polímeros e cerâmicas. As ligas mais utilizadas são: a Ni-Ti ou Nitinol, e aquelas onde a base é o cobre, ligas ferrosas, cerâmicas e polímeros, SAADAT (2002).

O Nitinol além de ser pioneiro nas pesquisas, apresenta propriedades elétricas e mecânicas adequadas, além de longa vida sob fadiga e boa resistência à corrosão. Já as ligas de cobre apresentam como vantagens altas condutividades elétrica e térmica, e capacidade de deformação.

Os materiais com memória de forma/superelasticidade tem sido aplicado 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 atuação desses materiais também é vasto: ferramentas cirúrgicas, implantes, suporte para sutura de ossos e arames ortodônticos. Na área de Construção Civil, que é o tema de interesse desta dissertação, poucos trabalhos vêm sendo desenvolvidos, e geralmente estão associados à área de análise de tensões, AIZAWA et al. (1998).

Dentro deste contexto, este trabalho visa avaliar a possibilidade de utilização de fibras com efeito memória de forma no concreto através da avaliação das tenacidade do compósito antes e após a aplicação de esforços cíclicos.

2

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras curtas ou fios de Níquel e Titânio com efeito memória de forma, no tocante a tenacidade e a esforços cíclicos.

3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1– Propriedades Mecânicas do Concreto

O concreto é um material resultante da mistura direta e proporcionada de um aglomerante (cimento), agregados e água. É considerado o material mais importante na construção civil e possui várias aplicações além da estrutural, tais como: revestimento, pavimentos, paredes, canalizações, fundações, etc.

É necessário o conhecimento dos materiais que compõem o concreto, além do aperfeiçoamento dos métodos de cálculo, para que se possa aproveitar melhor as características do produto. O concreto é um material composto que consiste de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual são mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados. A dosagem dos componentes do concreto e da argamassa é conhecida também por “traço”.

O agregado é o material granular, que pode ser a areia, pedregulho, pedra britada ou escória de alto forno, com a adição de um meio cimentante para formar um concreto ou uma massa de cimento hidráulico e água.

A argamassa é a mistura de areia, cimento e água. Graute é uma mistura de material aglomerante com agregado, à qual se adicionou água suficiente para produzir uma consistência fluida.

Cimento é um material finamente pulverizado, que sozinho não é aglomerante, mas desenvolve propriedades ligantes, como resultado da hidratação. O cimento mais utilizado para fazer concreto é o cimento Portland, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, MEHTA E MONTEIRO (1994).

A palavra cimento é originada do latim CAEMENTU, que designava na velha Roma, uma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos. Os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água.

O grande passo no desenvolvimento do cimento foi dado em 1756, pelo inglês John Smeaton, que conseguiu obter um produto com grande resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos.

Em 1818, o francês Vicat obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, pela mistura de componentes argilosos e calcários.

Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino, percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto às pedras empregadas nas construções.

A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland. Com o decorrer dos tempos os estudos relacionados com o cimento foram aprimorados, o que nos possibilitou conhecer diversas propriedades do concreto que utilizamos.

O concreto possui uma massa específica de 24000 N/m^3 , já no concreto leve sua massa específica é de 19000 N/m^3 e no concreto pesado é de 35000 a 55000 N/m^3 . A massa específica é uma propriedade importante nos cálculos do peso próprio da estrutura, varia de acordo com o processo de execução (adensamento, tipo de agregados e quantidade de vazios).

A permeabilidade e absorção do concreto são afetadas por diversos fatores como materiais constituintes: água (quantidade e pureza), cimento (quantidade, finura e composição), agregados (quantidade, tipos, graduação, impurezas e umidade) e aditivos (quimicamente ativos ou inertes); métodos de preparação: mistura, lançamento, adensamento e acabamento; tratamento: idade, cura e condições de ensaio.

O concreto se deforma sob ação de vários fatores, tais como: hidratação do cimento, solicitação mecânica, variações da quantidade de água no concreto e térmicas. As solicitações mecânicas são responsáveis por dois tipos de deformação: imediata (aparece logo após a aplicação do carregamento) e lenta (aparece ao longo do tempo com a manutenção do carregamento).

A variação de volumes devido à retração é função da quantidade de cimento e da relação água/cimento, aparecendo fissuras. Vários fatores podem contribuir para o fissuramento da estrutura: resistência do concreto, relação entre as resistências do concreto e do aço, variações dimensionais devidas à retração e espessura da armadura.

As fissuras geralmente aparecem nas zonas de tração onde são diferentes as deformações do aço e do concreto, o que pode ser minimizado ou evitado com a utilização de concretos especiais, como o concreto com adição de fibras.

Em estruturas expostas a intempéries, como no caso de pontes, primeiramente se dá uma retração e depois, expansões e retrações, que dependem das condições de exposição da estrutura e do grau de umidade da atmosfera. Em estruturas protegidas das intempéries existe retração inicial, mas pequena, no caso de estruturas convencionais.

3.1.1– Resistência Mecânica do Concreto.

A resistência é considerada a propriedade fundamental do concreto, embora em alguns casos a durabilidade e a impermeabilidade possam ser mais importantes, como no caso de barragens e estruturas de contenção. Normalmente, a resistência indica a qualidade do concreto por estar relacionada com a estrutura da pasta de cimento endurecida.

Resistência é a medida da tensão para romper um material. A resistência do concreto é função do processo de hidratação do cimento, que é relativamente lento.

Os ensaios de resistência do concreto são normalmente baseados em corpos de prova curados em condições específicas de temperatura e umidade por um período de vinte e oito dias. Em estruturas usuais são utilizadas resistências à compressão da ordem de 20 a 40 MPa (Mega Pascal), apesar de que concretos de alta resistência de até 130 MPa são produzidos atualmente, MEHTA E MONTEIRO (1994).

A maioria dos defeitos na resistência mecânica do concreto é causada pelo excesso de água colocado a fim de facilitar o amassamento e a trabalhabilidade do mesmo. A influência desta relação é representada pela quantidade de água não necessária à hidratação do cimento e que irá evaporar, deixando vazios no interior, os quais serão diretamente responsáveis pela queda da resistência.

Os vários tipos de cimento são indicados para compor argamassas e concretos de acordo com as necessidades de cada caso. Além disso, pode-se modificar suas características aumentando ou diminuindo a quantidade de água e cimento, e dos demais componentes: agregados (areia, pedra britada, cascalho etc.). É possível usar ainda aditivos químicos, a fim de reduzir certas influências ou aumentar o efeito de outras, quando desejado ou necessário.

Os diferentes tipos de cimentos normalizados são designados pela sigla e pela classe de resistência. A sigla corresponde ao prefixo cp acrescido de algarismos romanos I a V, sendo as classes de resistências indicadas pelos números 25, 32 e 40. Estas apontam os valores mínimos de resistência à compressão, expressos em MPa, garantidos pelos fabricantes, após 28 dias de cura.

As propriedades físicas e químicas dos agregados e das misturas ligantes são essenciais para a vida das estruturas em que são usados.

A água utilizada para o amassamento dos aglomerantes deve corresponder a certas qualidades químicas, não pode conter impurezas e ainda estar dentro dos parâmetros recomendados pelas normas técnicas a fim de que garantam a homogeneidade da mistura.

As impurezas e os sais dissolvidos na água, quando em excesso, podem ser nocivos para os aglomerantes utilizados na preparação de concretos e argamassas. As águas sulfatadas, as águas ácidas dos terrenos de turfas, e as águas correntes que contêm ácidos carbônicos, são águas que não devem ser utilizadas nos concretos.

A água do mar, as águas pluviais procedentes de terrenos não calcários, as águas que contêm matérias químicas ou orgânicas atacam, desagregam ou decompõem os aglomerantes, por isto devem ser evitadas na preparação dos concretos e argamassas.

A cura é um dos principais procedimentos de execução de estruturas que influencia nas propriedades finais do concreto. Para se obter um bom concreto, o lançamento de uma mistura adequada deve ser seguido pela cura em ambiente apropriado durante as primeiras fases do endurecimento.

NEVILLE (1997) classifica os procedimentos de cura em duas grandes categorias, a cura por molhagem e a cura por membrana. Este último tem como uma de suas técnicas a utilização de compostos químicos de cura que são aplicados por pulverização, formando uma fina membrana sobre o concreto que evita a evaporação da água por secagem.

3.1.2– Tenacidade (Tração).

É a medida da energia requerida para provocar a completa ruptura de um material, MOGUEL (1999). A energia necessária para romper o material, produto da força vezes a distância, é representada pela área sob a curva carga-deslocamento.

A diferença entre tenacidade e resistência é de grande importância, pois dois materiais podem ter resistências idênticas, porém diferentes valores de tenacidade. Entretanto, normalmente, quando a resistência de um material cresce, a ductilidade (quantidade de deformação permanente que pode ocorrer antes do rompimento) e a tenacidade diminuem. Normalmente, materiais com alta resistência rompem de forma brusca, na maioria das vezes, sem que ocorra uma deformação não elástica ou permanente significativa, MEHTA E MONTEIRO (1994).

Diferentemente do concreto convencional, o concreto reforçado com fibras (CRF), apresenta um regime de ruptura do material com uma resposta mais dúctil, no regime pós-pico do carregamento, onde, podem assim ser aplicados em obras hidráulicas, pavimentos viários, túneis ferroviários, rodoviários e pisos industriais, uma vez que o material vai conduzir a estruturas mais duráveis, esbeltas e econômicas.

Os ensaios de flexão, por serem de execução mais fácil do que os ensaios de tração direta, tanto para concretos simples como para concretos reforçados, e talvez por simularem de forma mais realística as condições de solicitação de muitas situações práticas, ganharam maior popularidade.

A capacidade de absorção de energia, entendida como a área sob a curva $P-\delta$, talvez seja o parâmetro mais difundido e adotado por diversos países como Japão, Holanda, Bélgica e Alemanha.

As curvas de carga-deformação típicas para o concreto convencional e para o CRF são mostradas na FIG. 3.1 abaixo.

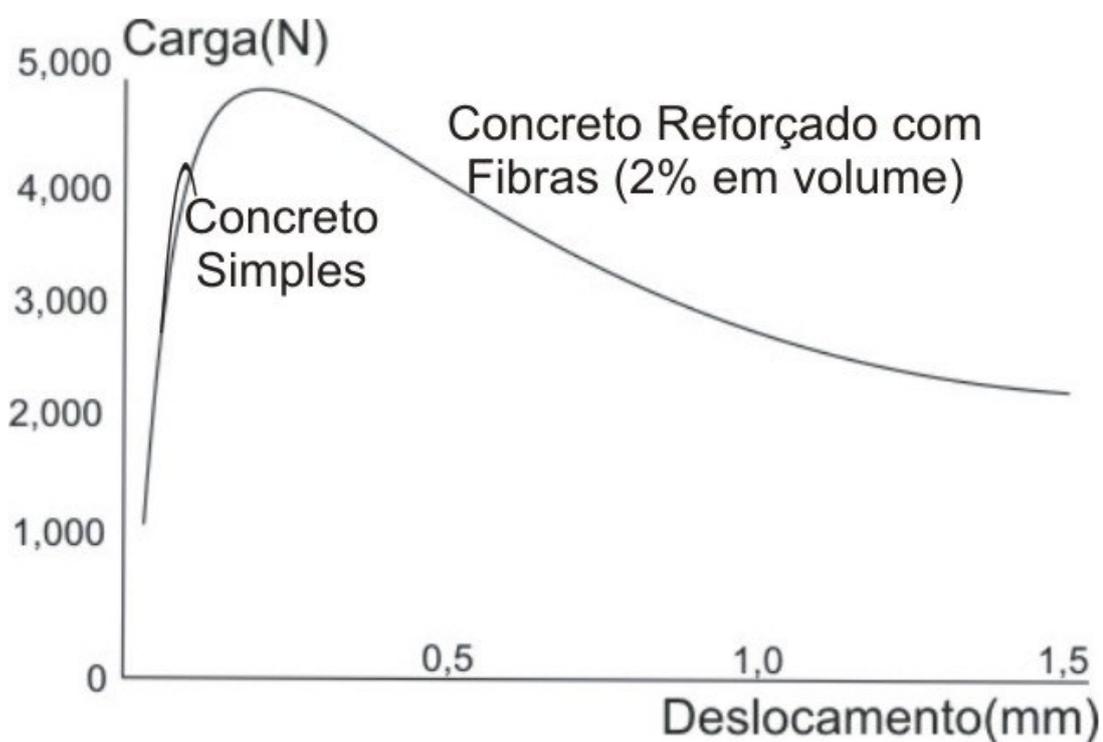


FIGURA 3.1 – Curvas de carga versus deslocamento típicas.
(MEHTA E MONTEIRO, 1994).

O concreto convencional rompe de forma repentina, quando a deformação relativa à resistência à flexão última for superada, ao passo que o concreto reforçado com fibras continua a resistir a cargas consideráveis, mesmo com deformações muito superiores à deformação de fratura do concreto convencional. Isso tem o efeito de aumentar o trabalho da fratura, que é definido como tenacidade, MEHTA E MONTEIRO (1994).

Segundo o American Concrete Institute-ACI, que se refere às considerações de projeto para CRFA, a energia total absorvida no arrancamento da fibra é de dez a quarenta vezes maior, para concreto reforçado com fibra do que para o concreto convencional.

3.1.3– Fadiga

A fadiga produz uma alteração nas propriedades mecânicas do material devido a ciclos repetidos de cargas variáveis. Essas cargas não são suficientemente grandes para provocar a ruptura em uma simples aplicação, mas podem provocá-la, em pelo menos 100 ciclos, segundo a definição do American Concrete Institute ACI-215, apud A. de Souza Coutinho e Gonçalves Arlindo.

A ação de carregamentos repetidos, de intensidade muito elevada, devido a sismos ou outros acontecimentos catastróficos, pode provocar ruptura estrutural em menos de 100 ciclos, A. de Souza Coutinho e Gonçalves Arlindo. Há três tipos fundamentais de ciclos de fadiga: carregamento repetido, carregamento alternado e carregamento ondulado, onde os outros tipos de fadiga são quaisquer combinação destes.

O interesse pelo estudo da fadiga do betão começou quando se iniciou a construção das primeiras pontes de betão armado; onde posteriormente pavimentos de estradas de concreto simples ou armado, estruturas na plataforma marítima para a exploração do petróleo aumentaram ainda mais o interesse pelo estudo desse fenômeno, que também é importante na resistência das estruturas aos sismos.

Segundo A. de Souza Coutinho e Gonçalves Arlindo, durante a vida útil de uma estrutura, onde após algumas dezenas de anos, a passagem de cargas rolantes por um ponto de um pavimento ou laje, ou a ação das ondas numa estrutura marítima provoca um momento fletor nesse local, que pode ser repetido dezenas de milhões de vezes. Uma onda marítima atuando em uma estrutura durante dez anos, a um ritmo de uma por cada dez segundos, provoca uma fadiga de trinta milhões de ciclos. Pontes ou pavimentos de estradas com intensa circulação rodoviária podem sofrer a ação das cargas rolantes mais de cinquenta milhões de vezes durante um provável tempo de sua utilização.

Os primeiros estudos realizados sobre a resistência à fadiga foram devido a Van Ornum em 1903 e 1907, que estabeleceu a base da resistência do concreto a esse tipo de solicitação.

A incorporação de fibras de aço ou outros tipos de ligas têm uma aplicação considerável na melhoria das propriedades do concreto, como a resistência inicial de ruptura, impacto, fadiga e ductilidade. Por essa razão, concretos reforçados com fibras são usados em pavimentos de aeroportos, rodovias, piso de pontes e fundações de máquinas com carregamentos dinâmicos, que estão sujeitos a carregamentos cíclicos.

O desempenho dessas estruturas deve ser considerada pelos projetistas que se baseiam em dados desenvolvidos por pesquisadores e por experiência própria. Carregamentos sucessivos podem influenciar na rigidez do material e na sua durabilidade, o que geralmente acarreta em uma falha estrutural precoce.

Uma avaliação experimental das condições de uma estrutura, sujeita a carregamentos cíclicos, foi analisada apenas há poucos anos, onde elas eram avaliadas apenas através de resultados empíricos. Esses resultados requerem tempo para coletar e processar os dados de um determinado projeto, o que, não é aplicável a outros casos.

Normalmente, a fadiga é um processo progressivo, com mudanças estruturais internas que ocorrem em um material sujeito a esforços repetidos. Para concretos reforçados com fibras, temos as fases pasta de cimento com agregados e fibras, assim como as interfaces das fibras e agregados com pasta de cimento hidratado.

A carga cíclica provoca uma mudança microscópica na estrutura do cimento hidratado, como uma diminuição do tamanho das fissuras que existem na interface entre o agregado e a pasta de cimento.

3.2– Reforço do Concreto

O concreto é um material que resiste bastante 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 obtermos um melhor aproveitamento estrutural dos materiais que utilizamos.

3.2.1– Fibras Longas

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, F.LEONHARDT E E.MÖNNIG (1982).

As barras devem absorver os esforços de tração que surgem nas peças submetidas à flexão ou à tração. Conforme FIG. 3.2, FIG. 3.3 e FIG. 3.4 abaixo.



FIGURA 3.2 – Ruptura do concreto por tração na face inferior.

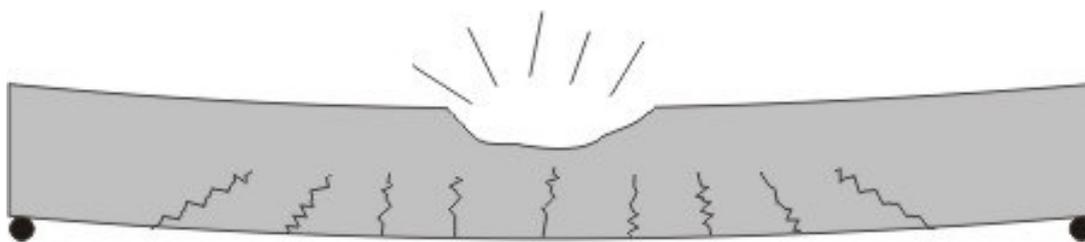


FIGURA 3.3 – Ruptura do concreto por compressão na face superior.



FIGURA 3.4 – Ruptura do concreto por excesso de tensão no apoio.

Tendo em vista que o concreto tracionado não pode acompanhar as deformações do aço, o concreto é fissurado, sem que seja aproveitada a sua resistência à compressão. A armadura deve ser disposta na zona de tração das peças estruturais, mas em peças submetidas apenas à compressão, as armaduras podem aumentar a capacidade de carga à compressão.

O concreto com cal hidráulica e o cimento pozolânico já era conhecido pelos romanos como um aglomerante. A invenção do cimento romano, em 1796, pelo inglês J.Parker, e a do cimento Portland por J.Aspdin, em 1824 deram origem aos mais recentes estudos e obras em concreto.

Em meados do século XIX, as armaduras de aço em peças de concreto foram adotadas pela primeira vez, na França, onde, em 1855, J.L. Lambot construiu um barco com argamassa de cimento reforçada com ferro e em 1861, F.Coignet publicou os princípios básicos para construções em concreto armado.

Em 1873, o americano W.E. Ward construiu em Nova York, uma casa de concreto armado. Emil Mörsch publicou em 1902 uma descrição, com bases científicas e fundamentadas, do comportamento do “concreto de ferro” e através de ensaios, desenvolveu a primeira teoria realista sobre o dimensionamento de peças de concreto armado. A expressão concreto armado foi mencionada apenas em 1920 porque o material utilizado é aço e não ferro.

3.2.2– Fibras Curtas

Um concreto que contém cimento hidráulico, água, agregados miúdos ou grãos e miúdos e fibras discretas descontínuas é chamado de concreto reforçado com fibras.

Fibras de várias formas e tamanhos são utilizadas atualmente em todo o mundo, produzidas em aço, plástico, vidros e materiais naturais. Contudo, para a maioria das peças estruturais e não estruturais, as fibras de aço são as mais utilizadas, MEHTA E MONTEIRO (1994).

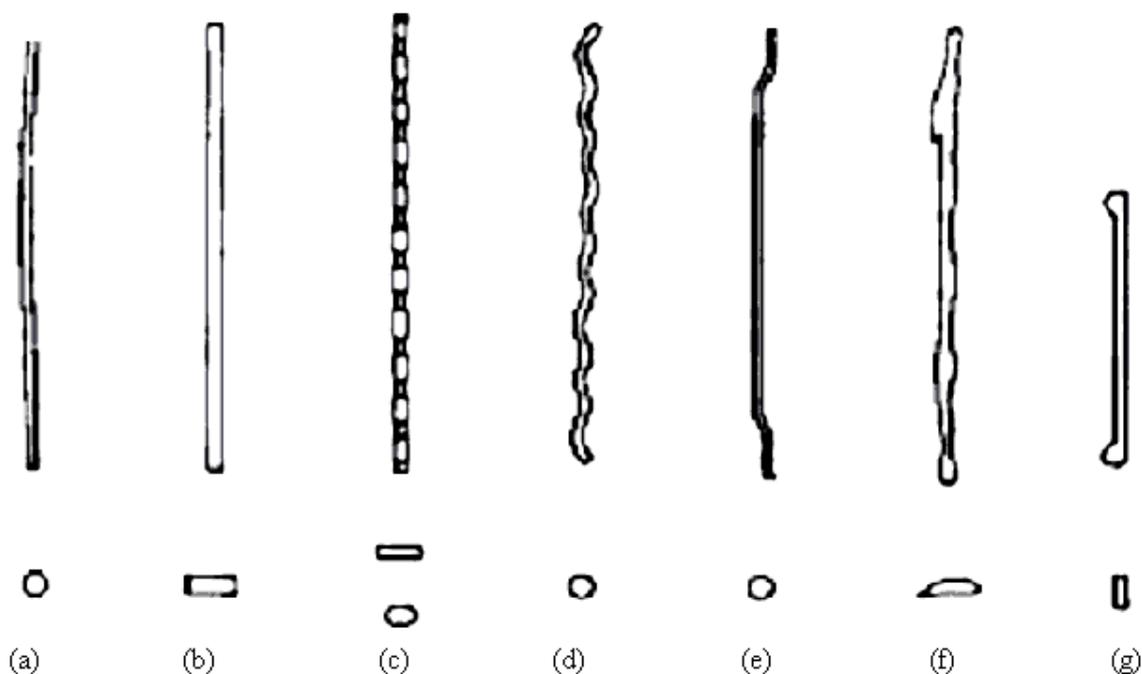


FIGURA 3.5 – Tipos de fibras de aço. (Cunha et al).

Existem diferentes tipos de fibras, conforme FIG. 3.5, com formas e geometria variadas. Alguns estudos mostraram que a configuração apresentada na FIG. 3.5 (e) tem-se mostrado mais eficiente.

Uma das principais características das fibras curtas é de possuir um alto módulo de elasticidade e absorver um grande nível de tensão, o que faz com que as fissuras não se propaguem na estrutura.

O concreto reforçado com fibras curtas possui uma grande capacidade portante, mesmo quando fissurado, e ainda permite a redistribuição de esforços. A vantagem disso é a resistência à fadiga e uma maior durabilidade estrutural, devido à diminuição da entrada de agentes agressivos.

É necessária uma energia suficiente para que a fibra se rompa, se as fissuras forem continuar a propagar, o que proporciona ao material um aumento de tenacidade, BASTOS E PINHEIRO (2000). Pode-se verificar esse fato na FIG. 3.6.

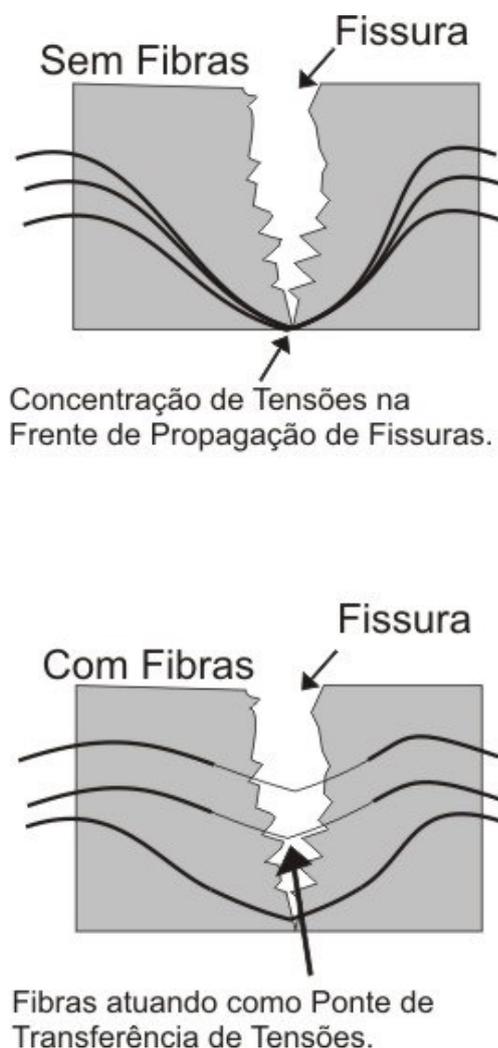


FIGURA 3.6 – Tenacidade do concreto reforçado com fibras curtas. (Cunha et al).

A resistência à primeira fissura é diretamente ligada ao volume de fibras incorporado, pelo fator de forma das fibras (relação entre espessura e comprimento) e pela orientação das fibras, PINTO JÚNIOR E MORAES (1996). Podemos verificar um aumento da ductilidade de concretos reforçados com fibras, quando após aplicarmos uma carga máxima, a redução da carga com o aumento dos deslocamentos é muito menor nos concretos reforçados do que nos concretos convencionais.

FIGUEIREDO et al (2000), recomendam que o comprimento da fibra deva ser superior a duas vezes a dimensão máxima do agregado graúdo. Essas fibras curtas devem agir como uma malha de ligação, o que vai ajudar na transferência das tensões nas fissuras,

assim, o comprimento mínimo da fibra deve transpor o diâmetro máximo do agregado, a fim de fazer uma correta junção da matriz da pasta.

O concreto convencional rompe de forma repentina, quando a deformação relativa à resistência à flexão última for superada, ao passo que o concreto reforçado com fibras continua a resistir a cargas consideráveis, mesmo com deformações muito superiores à deformação de fratura do concreto convencional, MEHTA E MONTEIRO (1994).

O compósito suportará cargas cada vez maiores, após a primeira fissura da matriz, se a resistência das fibras ao arrancamento na primeira fissura for maior do que a carga na primeira fissuração. Em uma seção fissurada, a matriz não resiste a nenhuma tração e as fibras suportam todo o carregamento do compósito.

Com o aumento de carga no compósito, as fibras tendem a transferir a tensão adicional para a matriz, através tensões de aderência. Se essas tensões de aderência não excedem a resistência de aderência, pode haver uma fissuração adicional na matriz. Este processo de fissuração múltipla continuará até que haja ou o rompimento da fibra ou o seu arrancamento, devido à perda de aderência local acumulada, SHAH (1984).

O aumento da tenacidade à fratura é notado pela ação de ponte (deslocamento, deslizamento, arrancamento ou escoamento das fibras) nas micros e macro fissuras da matriz. Esse mecanismo retarda e controla a macro fissuração, além de aumentar a demanda de energia para o avanço da fissura. Ao combinar fibras com a armadura contínua, pelo efeito sinérgico, ambas se tornam mais eficientes. As fibras melhoram a aderência do concreto com a armadura, inibindo a fissuração na região de transferência de forças, FURLAND-JR (1995).

3.2.3– Concreto Protendido

A protensão pode ser definida como o artifício de introduzir, numa estrutura, um estado prévio de tensões, de modo a melhorar sua resistência ou seu comportamento, sob ação de diversas solicitações.

O concreto armado com armaduras previamente tensionadas é denominado como concreto protendido. Algumas tentativas primitivas falharam porque não se sabia ainda que o concreto encurta-se com o passar do tempo pela retração e pela deformação lenta, o que ocasionava em uma perda de protensão expressiva. Apenas em 1928, E. Freyssinet desenvolveu um processo com o emprego de aços de alta resistência, onde tensões de compressão suficientemente elevadas e permanentes foram aplicadas.

O artifício de protensão tem uma importância particular no caso do concreto, pelas seguintes razões:

O concreto é um dos materiais de construção mais importantes. Os componentes necessários à confecção do concreto (cimento, areia, pedra e água) são disponíveis a baixo custo, relativamente. O concreto possui boa resistência à compressão. Resistências da ordem de 200 kgf/cm² (20MPa) a 500 kgf/cm² (50MPa) são utilizadas nas obras atualmente.

O concreto tem pequena resistência à tração, da ordem de 10% de resistência à compressão. Além de pequena, relativamente, a resistência à tração do concreto é pouco confiável. De fato, quando o concreto não é bem executado, a retração do mesmo pode provocar fissuras, que diminuem a resistência à tração do concreto, antes mesmo de atuar qualquer solicitação. Devido a essa natureza aleatória da resistência à tração do concreto, ela é geralmente desprezada nos cálculos estruturais.

Sendo o concreto um material de propriedades tão diferentes a compressão e a tração, o seu comportamento pode ser melhorado aplicando-se compressão prévia, isto é, protensão, nas regiões onde as solicitações produzem tensões de tração.

A utilização de aços de elevada resistência, como armaduras de concreto armado, fica limitada pela fissuração do concreto. De fato, como os diferentes tipos de aço têm aproximadamente o mesmo módulo de elasticidade, o emprego de aços com tensões de tração elevadas implica grande alongamento dos mesmos, o que, por sua vez, ocasiona fissuras muito abertas. A abertura exagerada das fissuras reduz a proteção das armaduras contra corrosão e é indesejável esteticamente.

O artifício da protensão, aplicado ao concreto, consiste em introduzir na viga esforços prévios que reduzam ou anulem as tensões de tração no concreto sob ação das solicitações em serviço. Nessas condições minimiza-se a importância da fissuração como condição determinante de dimensionamento da viga.

A protensão do concreto é realizada, na prática, por meio de cabos de aço de alta resistência, tracionados e ancorados no próprio concreto. O artifício da protensão desloca a faixa de trabalho do concreto para o âmbito das compressões, onde o material é mais eficiente. Com a protensão, aplicam-se tensões de compressão nas partes da seção tracionadas pelas solicitações dos carregamentos. Desse modo, pela manipulação das tensões internas, pode-se obter a contribuição da área total da seção da viga para a inércia da mesma.

Sob ação de cargas, uma viga protendida pode sofrer flexão, alterando-se as tensões de compressão aplicadas previamente. Quando a carga é retirada, a viga volta à sua posição original e as tensões prévias são restabelecidas.

Se as tensões de tração provocadas pelas cargas forem inferiores às tensões prévias de compressão, a seção continuará comprimida, não sofrendo fissuração.

Sob ação de cargas mais elevadas, as tensões de tração ultrapassam as tensões prévias, de modo que o concreto fica tracionado e fissura. Retirando-se a carga, a protensão provoca o fechamento das fissuras.

As resistências de concreto, utilizadas em concreto protendido, são duas a três vezes maiores que as utilizadas em concreto armado. Os aços utilizados nos cabos de protensão têm resistência três a cinco vezes superiores às dos aços usuais do concreto armado.

O sentido econômico do concreto protendido consiste no fato de que os aumentos percentuais de preço são muito inferiores aos acréscimos de resistência utilizáveis, tanto para o concreto como para o aço de protensão.

Em relação ao concreto armado, o concreto protendido apresenta vantagens como redução das tensões de tração provocadas pela flexão e pelos esforços cortantes; redução da incidência de fissuras; diminuição das quantidades necessárias de concreto e de aço, devido ao emprego eficiente de materiais de maior resistência; permite vencer vãos maiores que o concreto armado convencional; para o mesmo vão, permite reduzir a altura necessária da viga; facilita o emprego generalizado de pré-moldagem, uma vez que a protensão elimina a fissuração durante o transporte das peças;

Durante a operação de protensão, o concreto e o aço são submetidos a tensões, em geral, superiores às que poderão ocorrer na viga sujeita às cargas de serviço. A operação de protensão constituído, neste caso, uma espécie de prova de carga da viga.

Uma das vantagens mais importantes do concreto protendido é a de vencer maiores vãos. Para ilustrá-la pode-se criar o fato de que as pontes com vigas retas de concreto armado têm seu vão livre limitado a 30m ou 40m, enquanto as pontes com vigas protendidas já atingiram vãos de 250m.

3.3– Efeito Memória de Forma

O efeito memória de forma é a propriedade que certos materiais adquirem, após tratamento termomecânico, de oscilar entre formas previamente definidas ou mesmo a capacidade de recuperar uma deformação residual, aparentemente acima de seu limite elástico, através de um simples aquecimento, (MOTA, 2002).

Os primeiros estudos sobre o fenômeno do Efeito Memória de Forma surgiram na década de 50 com ligas Au-Cd e In-Tl. Na década de 60 aconteceu um grande avanço com o surgimento da liga Ni-Ti e ligas a base de Cu. As ligas a base de Fe foram descobertas apenas na década de 70. No Brasil os primeiros trabalhos surgiram apenas no começo da década de 80. Também vêm sendo desenvolvidos trabalhos nessa área com polímeros e cerâmicas (SAADAT, 2002).

Essa liga só atraiu a atenção de pesquisadores e engenheiros em 1962, quando cientistas da Naval Ordnance Laboratory, que é o centro de pesquisas da marinha dos Estados Unidos, descobriram uma porcentagem de níquel e titânio que possuía EMF (Efeito Memória de Forma).

Em 1962 Buehler e Wiley desenvolveram uma série de ligas de Níquel e Titânio, com uma composição de 53 até 57 % de Níquel, e foi percebido uma série de efeitos: alguns corpos de prova dessas ligas, após uma deformação residual de 8 a 15%, voltaram a sua forma original após ciclos térmicos. Esse efeito tornou-se conhecido como efeito memória de forma e a liga foi chamada de liga com efeito memória de forma. Anos mais tarde, foi descoberto que essas ligas também possuíam a propriedade de superelasticidade, também chamada de pseudoelasticidade, que é a capacidade de recuperar grandes deformações durante ciclos de carregamentos e descarregamentos sucessivos com uma temperatura constante (FUGAZZA, 2003).

Estas ligas, para uso comercial são geralmente ligas de Níquel-Titânio. Cabos muito finos de Ni-Ti podem ser torcidos numa grande variedade de formas sendo totalmente

flexíveis, enquanto se encontram em sua fase de mais baixa temperatura, próximos a da temperatura ambiente.

Certas ligas, com efeito memória de forma, possuem uma propriedade associada à capacidade de recuperação da forma original após a deformação, através de transformações martensíticas reversíveis/alterações na estrutura cristalina do material, com o aquecimento acima da temperatura de fim da transformação da martensita em austenita - AF (Funakubo, 1987, Otsuka & Wayman, 1998).

Os principais fatores que influenciam na recuperação de forma são: composição química, estrutura inicial, treinamento, tamanho de grão e energia de defeito de falha de empilhamento (NASCIMENTO, 2002).

A recuperação de forma se deve à reversão da martensita induzida termicamente ou mecanicamente: a reversão, martensita ϵ (hc) em austenita γ (cfc), que ocorre com o aquecimento (NASCIMENTO, 2002).

Segundo Bernadini et al, as ligas com efeito memória de forma são usadas em diferentes campos com diferentes propósitos, dependendo da sua aplicação, uma ou outra fase, martensítica ou austenítica podem ser escolhidas de acordo com as características desejadas. Em relação ao ponto de vista de proteção contra sismos têm-se diferentes características. Para ambas as fases o comportamento é de quase ausência de efeitos de fadiga e corrosão, além de amortecer tensões. Na fase de Austenita, o efeito de deformação residual praticamente zero é percebido, para carregamentos abaixo de 10% do carregamento que causa o escoamento do material, pseudoelasticidade. Na fase de Martensita, existe a possibilidade de recuperar completamente a tensão residual com aquecimento do material, efeito memória de forma, conforme mostrado na FIG. 3.7 abaixo.

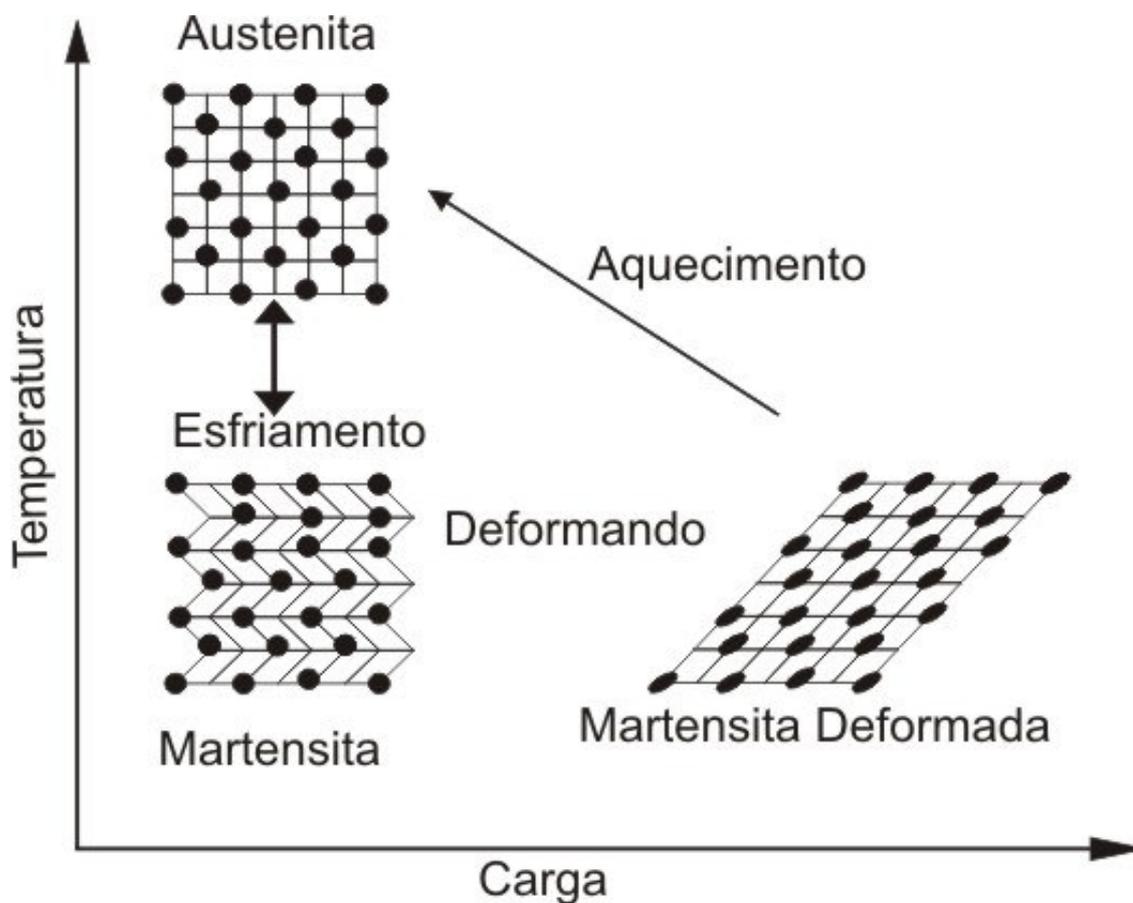


FIGURA 3.7 – Transformação da martensita e austenita com carga x temperatura.

A liga é deformada a uma temperatura abaixo de M_s (temperatura de início da transformação martensítica) e recupera a sua forma inicial através do aquecimento acima da temperatura crítica M_f (temperatura de fim da transformação martensítica), conforme pode ser observado esquematicamente na FIG.3.8 e FIG. 3.9.

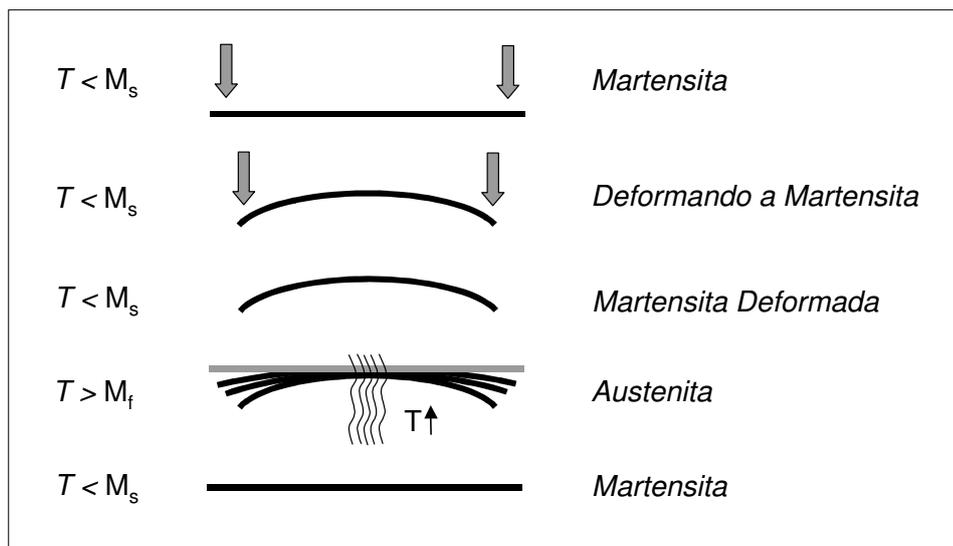


FIGURA 3.8 – Representação esquemática do efeito memória de forma.

Outra propriedade relacionada a esses materiais é a superelasticidade/pseudoelasticidade, fenômeno também associado a transformações martensíticas e carregamento cíclico.

Alguns pesquisadores têm estudado a adição dessas fibras ao concreto e outros compósitos. Esse material quando adicionado é capaz de mudar a forma pela qual o material rompe após um aquecimento, além de dotá-lo de uma pseudo-superelasticidade, onde, o material é capaz de deformar oito por cento a mais do que um compósito que não possua a fibra (MO, 2004).

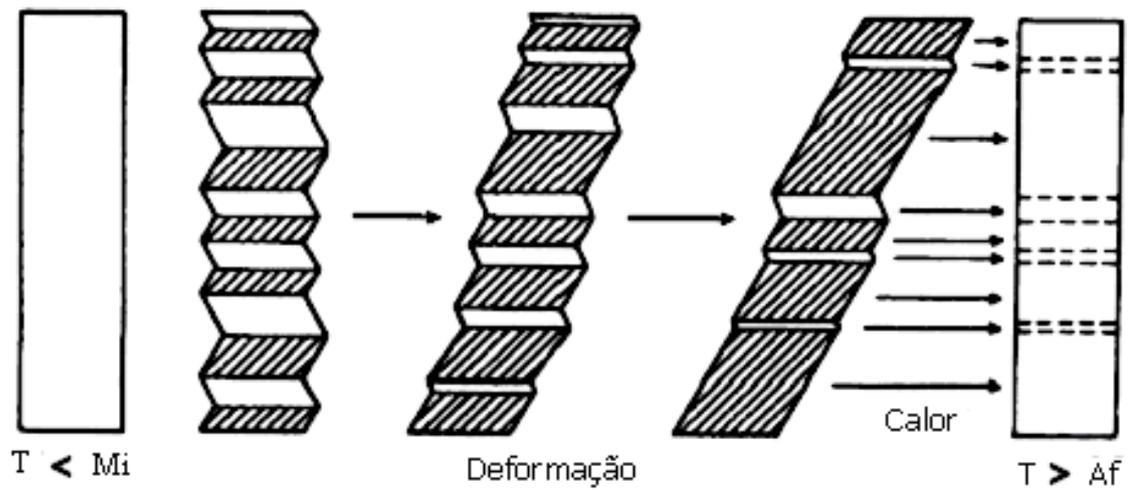


FIGURA 3.9 – Ilustração esquemática do efeito memória de forma.

Na figura acima, o material está na condição martensítica, com a aplicação de um esforço de cisalhamento sobre a amostra, ocorre uma movimentação das variantes de martensita no sentido do carregamento, assim, um grande cristal cisalhado é formado (MOTA, 2002).

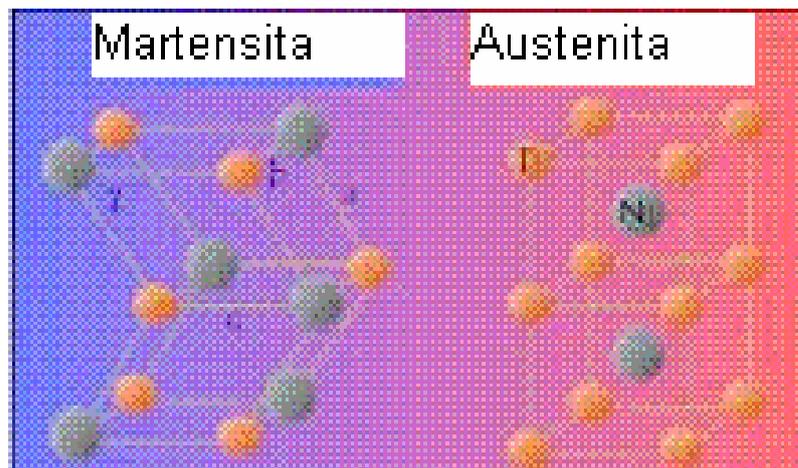


FIGURA 3.10 – Vista em três dimensões da Martensita e Austenita.

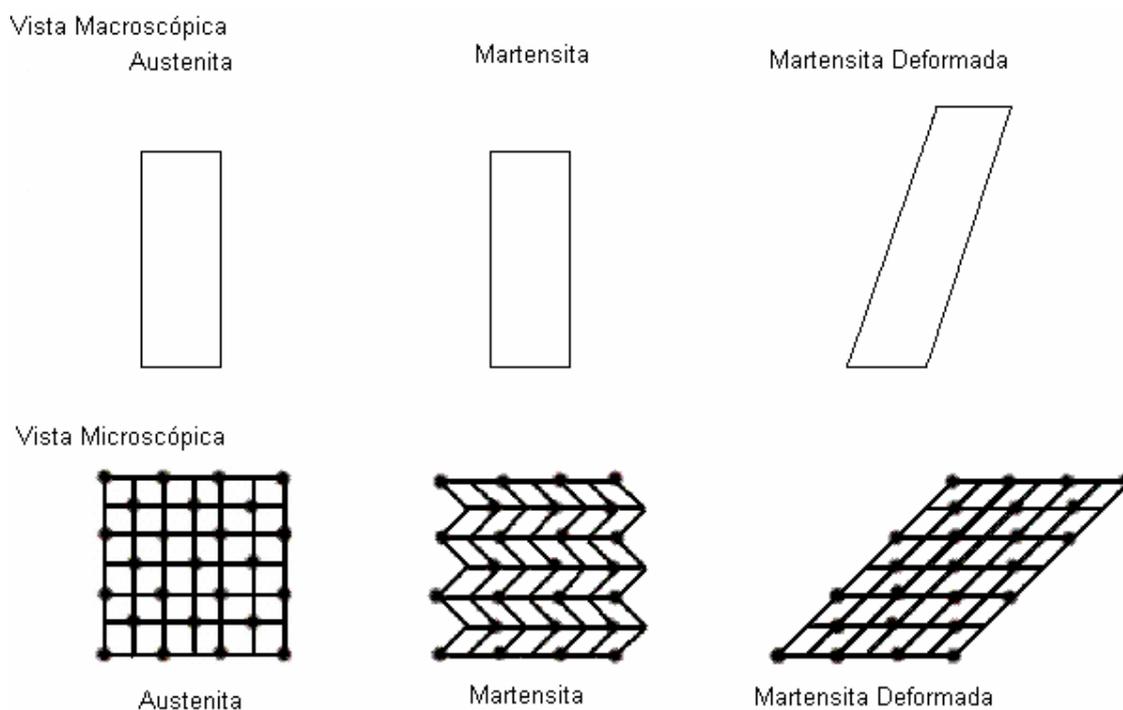


FIGURA 3.11 – Comparação entre a vista macroscópica e microscópica da Austenita e da Martensita.

Após o aquecimento acima de A_f , esta variante retorna à estrutura da fase matriz, por um caminho previamente definido e com força motriz provida pela transformação de fase.

No caso do NITINOL, ao se submeter a uma mudança de temperatura, existe uma mudança de fase, a fase quando a temperatura é alta é denominada austenita e a fase quando temperatura é baixa é denominada martensita, independentemente da estrutura cristalina das fases.

A compreensão das características do ciclo da memória de forma depende da relação entre as fases de mais baixa e mais alta temperatura. Na FIG. 3.12, a estrutura da austenita (fase de mais alta temperatura) é mostrada em duas perspectivas diferentes. A fase austenita adota a estrutura de CsCl, a qual tem átomos de Ni em cada vértice da célula unitária cúbica e átomos de Ti no centro do cubo, ou vice-versa.

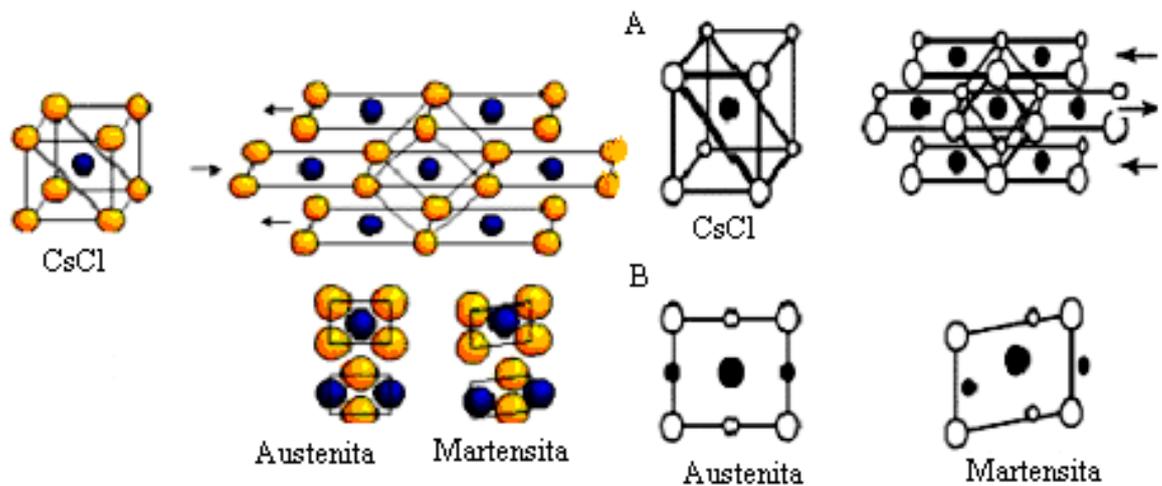


FIGURA 3.12 – Duas diferentes perspectivas das estruturas de CsCl adotadas pelo NiTi na fase austenita.

A representação comum está à esquerda, mostrando um cubo de um tipo de átomo com o outro átomo ao centro. As esferas brancas e pretas representam os dois tipos de átomos.

A profundidade das esferas indica o seu tamanho; esferas maiores estão mais próximas, e as esferas menores estão mais distantes. Na FIG 3.12 à direita em A, a estrutura é representada como séries de planos empilhados, com o cubo também mostrado para comparação.

A componente do deslizamento dos planos é indicada pelas setas, o que permite a variações nas posições atômicas durante a transição da fase austenita para martensita. Na FIG. 3.12 à direita em B, as estruturas da austenita e da martensita estão representadas por uma projeção bidimensional de um dos retângulos mostrados na parte A. Temos também que o tamanho das esferas representa a profundidade; as esferas menores pertencem à camada abaixo do plano das esferas maiores.

Caso a célula unitária cúbica de Ni-Ti seja balanceada sobre um vértice do cubo, a estrutura da austenita pode ser também representada como uma pilha de planos, como mostrado à direita, na FIG. 3.12 em B. Esta perspectiva é interessante para descrever a relação entre as estruturas da austenita e da martensita. Numa representação mais

compacta, o empilhamento de planos pode ser reduzido a uma projeção retangular bidimensional visto de cima, com o retângulo derivado a partir dos dois vértices e duas faces diagonais da célula unitária cúbica. Duas das camadas no empilhamento são mostradas na FIG. 3.12 à direita em B, e as pequenas esferas representam os átomos da próxima camada, acima ou abaixo.

Durante a transformação estrutural sob resfriamento, de austenita para a martensita, estes planos particulares na estrutura austenítica deslizam uns em relação aos outros, indicado pelas setas à direita da FIG. 3.12 à direita em A. Vemos o caso que não modifica os ângulos de 90° , e deforma por cisalhamento e o caso que modifica os ângulos de 90° para cerca de 96° . (Um movimento de cisalhamento ilustrado na FIG. 3.13 pode ocorrer quando duas forças opostas são deslocadas uma em relação à outra).



FIGURA 3.13 – Forças paralelas e opostas, onde o deslocamento de um objeto sofre cisalhamento.

Comparando-se a projeção bidimensional da martensita com a da austenita, FIG. 3.12 à direita em B, fica clara a perda dos ângulos de 90° e a compensação de camadas alternadas umas em relação às outras quando a fase austenita transforma-se na fase martensita de baixa temperatura. Embora os movimentos envolvidos na transformação de austenita em martensita sejam relativamente simples, existem 24 diferentes modos de conduzir a transformação. Para entender a origem dessas 24 diferentes variantes, são mostradas na FIG. 3.14, as direções de dois tipos de cisalhamento durante a transformação.

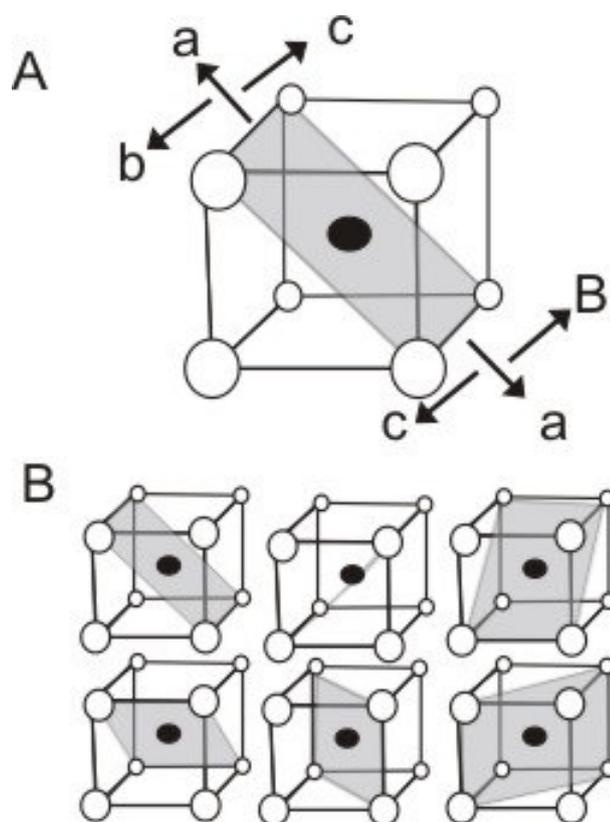


FIGURA 3.14 – Um total de quatro variantes martensíticas podem crescer a partir de cada plano passando através de uma face diagonal na estrutura do CsCl.

Os planos podem mudar a partir de um eixo no plano diagonal da face. Esta variação não mudará os ângulos de 90° do plano.

Um deslize adicional pode ocorrer pelo movimento simultâneo nas direções indicadas por cada par de setas denominadas b ou c. Estes movimentos destruirão os ângulos de 90° do plano B.

Seis planos equivalentes passam através das faces diagonais na estrutura de CsCl. Assim, um total de $6 \times 2 \times 2 = 24$ diferentes variantes pode crescer a partir dos planos.

Os planos podem deslocar-se uns em relação aos outros em cada uma das 2 direções paralelas à face diagonal (indicado pelas setas a), e deslizar em cada uma das 2 direções

paralelas aos vértices da célula (indicado por pares de setas b e c). Adicionalmente existem seis planos diagonais na estrutura CsCl, mostrados na FIG. 3.14 B.

Cada um destes seis conjuntos de planos podem então se deslocar em uma das 2 direções e distorcer em uma das duas direções. O resultado é $6 \times 2 \times 2 = 24$ diferentes modos de transformar a estrutura em martensita.

As etapas do ciclo de memória de forma do NiTi, e as transformações de fase são apresentadas na FIG. 3.15.

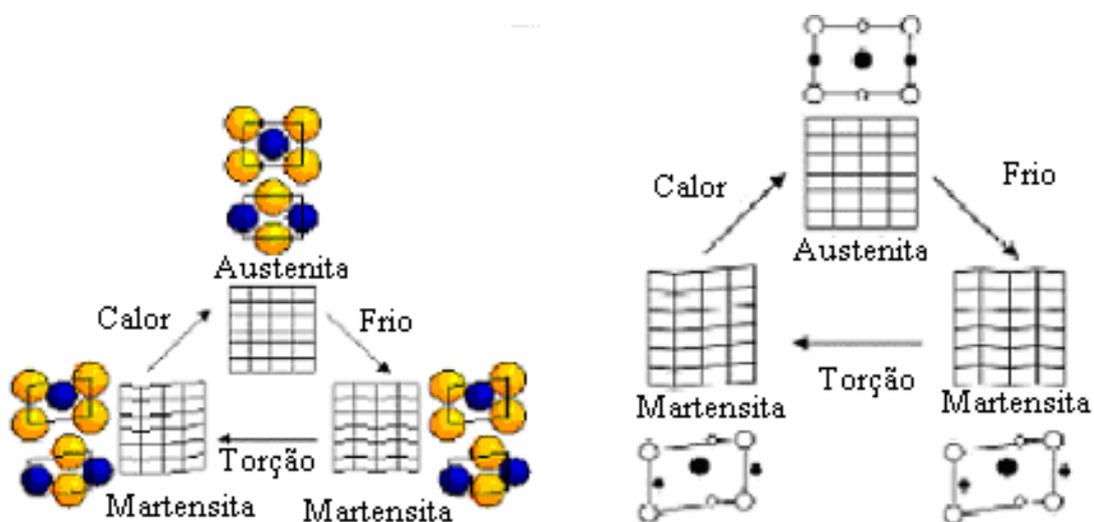


FIGURA 3.15 – Características estruturais do NiTi responsáveis pelo efeito de memória de forma.

O ciclo se inicia com o NiTi na fase austenita mostrada ao topo da figura. Como o NiTi é resfriado, seguindo o ciclo no sentido horário, ocorre a transformação em martensita. Os planos diagonais escorregam uns em relação aos outros, como mostrado na direita superior da FIG. 3.15, e se deformam até a forma de um paralelogramo em uma projeção bidimensional.

Com essa projeção, duas variantes martensíticas orientadas diferentemente, uma inclinada para a esquerda e outra para a direita, podem ser observadas. Quando a

martensita é dobrada, as variantes podem se reorientar da esquerda para a direita e vice-versa para aliviar as tensões.

Quando o NiTi aquecido, o caminho de mais baixa energia devolve os átomos às suas posições originais e mantém a ordem dos átomos, com átomos de Níquel circundados exclusivamente por átomos de Titânio e vice-versa.

Na parte superior da FIG. 3.15 encontra-se a projeção bidimensional da representação da estrutura da austenita em forma de um retângulo. A matriz de retângulos mostrada na parte inferior desta representação mostra como as unidades estruturais se arranjam para preencher o espaço em grande escala. Ao uma amostra de austenita é resfriada através da temperatura de transição de fase, a estrutura transforma-se em martensita.

A visualização das 24 diferentes orientações da martensita, ou seja, as variantes das estruturas em larga escala da martensita são representadas em duas dimensões na FIG. 3.15 como um conjunto de paralelogramos inclinados. Estes paralelogramos podem ser empacotados juntos aos pontos em que a forma total não varia significativamente durante a mudança de fase.

A amostra de Ni-Ti encontra-se na fase martensítica de baixa temperatura, à temperatura ambiente. Ela foi previamente treinada para lembrar uma forma linear na fase austenita. Quando a liga Ni-Ti é dobrada ou torcida na fase martensita de baixa temperatura, o efeito sobre a microestrutura é uma reorientação das variantes correspondendo a uma mudança macroscópica na forma.

Esta reorientação é mostrada abaixo e à esquerda na FIG. 3.15, como a inclinação da maior parte dos paralelogramos numa direção comum. Este mecanismo reversível para a acomodação de tensão distingue o Ni-Ti da maioria dos metais, para os quais uma tensão semelhante iria introduzir defeitos na estrutura cristalina ou causar deslizamento de planos uns sobre os outros, deformando de forma permanente.

Na última etapa do ciclo da memória da forma, o calor é usado para transformar a martensita novamente na fase austenita. Os átomos recuperam suas posições iniciais e a forma macroscópica inicial da amostra é restabelecida.

Embora existam vários caminhos para retornar à estrutura da austenita, somente o caminho de menor energia restabelece a estrutura ordenada CsCl na qual os átomos de Ni e Ti possuem uma mistura de átomos de Ni e Ti como vizinhos mais próximos no cristal.

Pode-se comparar diversos materiais com a Liga de Nitinol que é mais elástica do que o aço, por exemplo, conforme a FIG. 3.16.

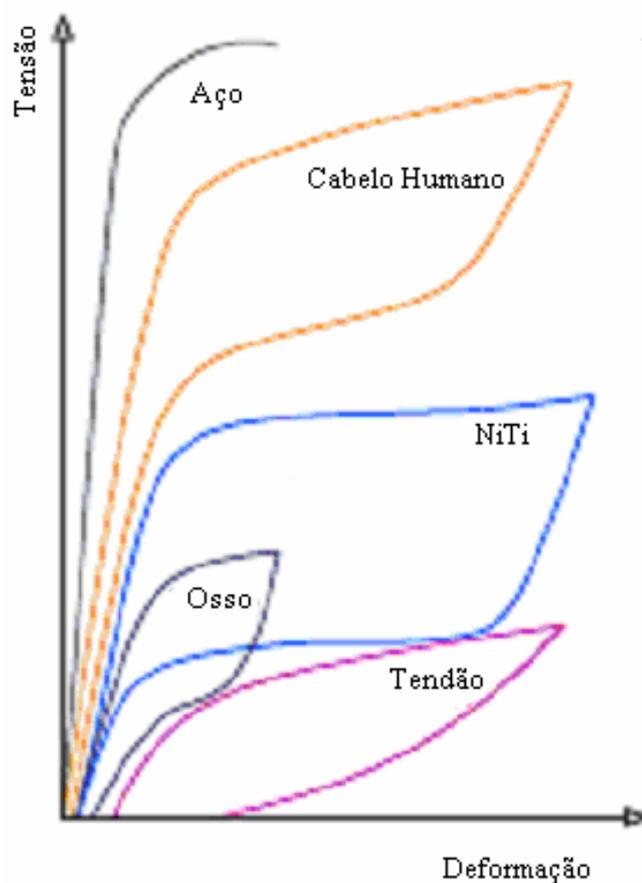


FIGURA 3.16 – Comparação entre os diversos materiais.

Com a análise da figura acima se conclui que a liga de NiTi pode deformar mais para uma mesma tensão, via análise qualitativa.

3.3.1–Aplicações de ligas de Nitinol com EMF

As aplicações das ligas com memória são numerosas e aparentemente limitadas por nossa imaginação. Essas ligas eram voltadas para a confecção de conexões de tubo sem solda e de antenas infláveis para satélites, como mostrado na FIG. 3.17.



FIGURA 3.17 – Satélite com liga EMF.

O uso da liga com efeito memória de forma evoluiu enormemente em termos de aplicações espaciais. Essa liga pode ter formas e procedimentos de ativação muito simples (via calor), o que torna viável a sua utilização em antenas de satélites, conforme FIG. 3.18.

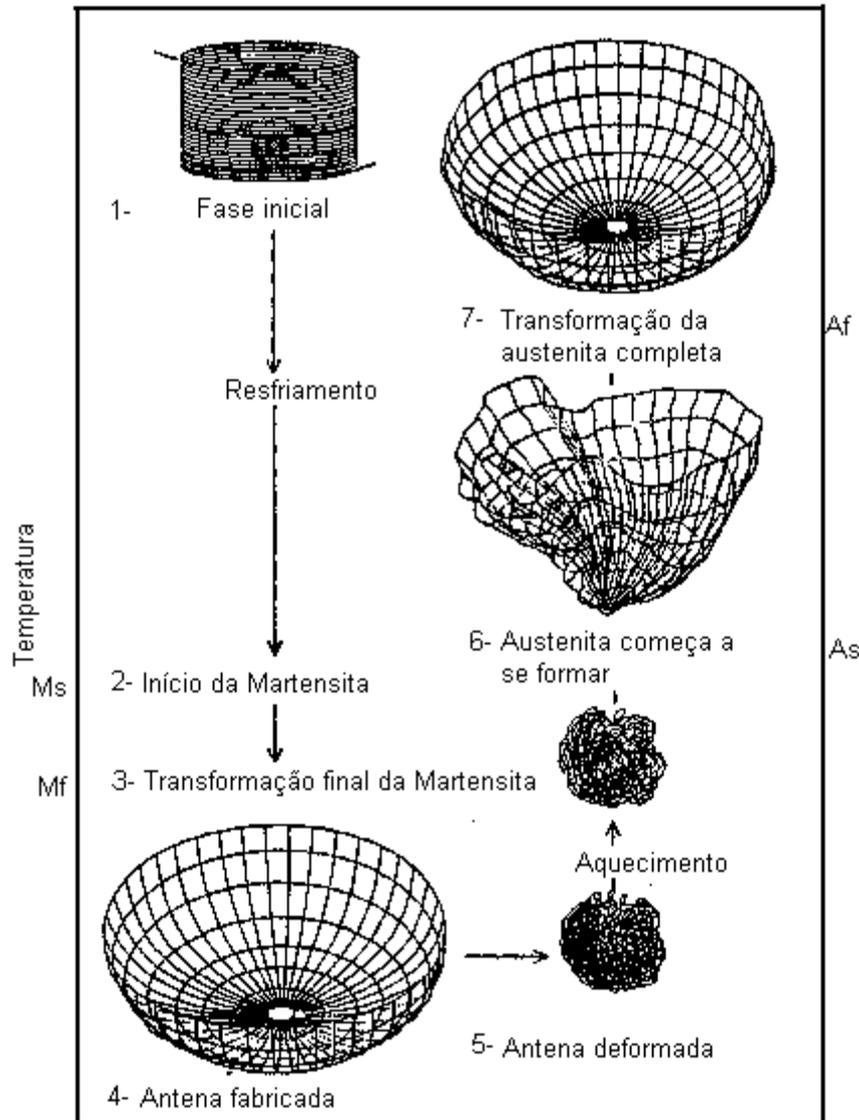


FIGURA 3.18 – Mecanismo de abertura do satélite com liga EMF.

A asa da aeronave da FIG. 3.19 movimenta-se, com o auxílio da liga com EMF ao aquecer por atrito do ar, e assim, aumenta o desempenho da mesma, conforme se pode ver no detalhe e movimentação da FIG. 3.20 e FIG. 3.21, respectivamente.



FIGURA 3.19 – Aeronave com liga EMF nas asas.



FIGURA 3.20 – Detalhe da asa da aeronave.

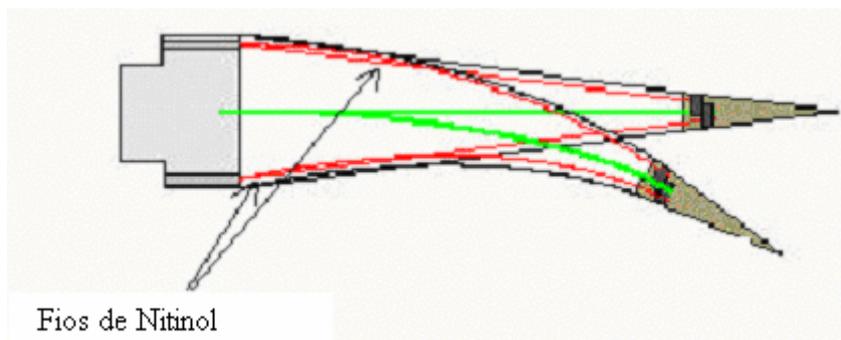


FIGURA 3.21 – Movimentação da asa da aeronave.



FIGURA 3.22 – Utilização da liga com EMF na robótica.

Conectores com efeito memória de forma foram desenvolvidos pela NASA para facilitar a junção de tubos compósitos em peças estruturais no espaço. Esse tubo possui a capacidade de engatar ou liberar um sistema estrutural, como se pode ver na FIG. 3.23.

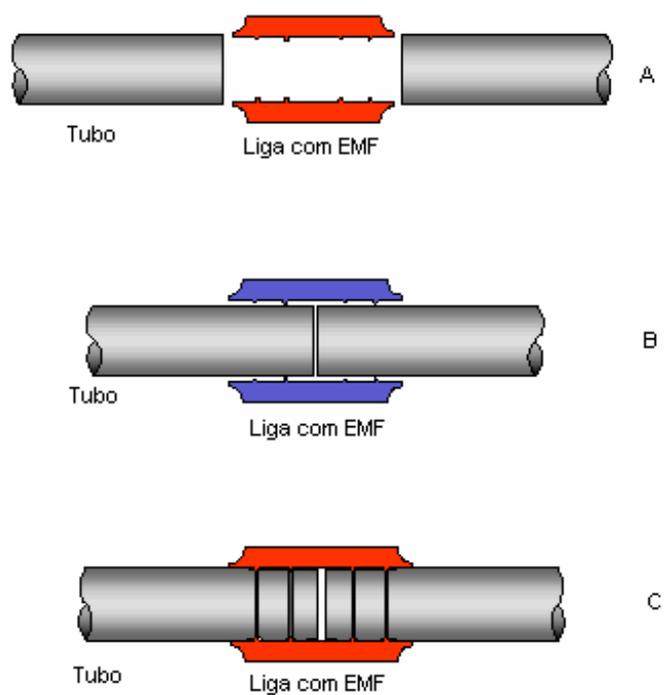


FIGURA 3.23 – Conexões de alta precisão.

Uma outra área interessante e comercialmente viável é a ortopédica. A junção de fraturas no osso procede mais rapidamente se a fratura for unida sob uma tensão de compressão. Durante cirurgias para corrigir fraturas, placas de liga com efeito memória de forma podem ser usadas em ambos os lados da fratura, produzindo a compressão necessária no local, com a utilização do EMF, após aquecimento, como pode ser visto na FIG. 3.24.

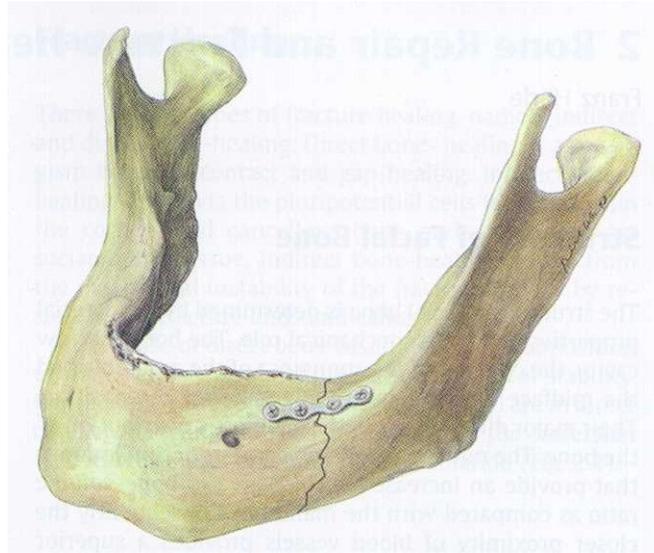


FIGURA 3.24 – Implante dentário.

O stent é uma técnica mundial indicada para expansão de micro estruturas. Um exemplo de stent é o mostrado na FIG. 3.25 e FIG. 3.26. O stent é inicialmente alongado em forma de um pequeno mecanismo, para facilitar a sua inserção, onde posteriormente ele adquire a forma original, de acordo com a temperatura do corpo humano

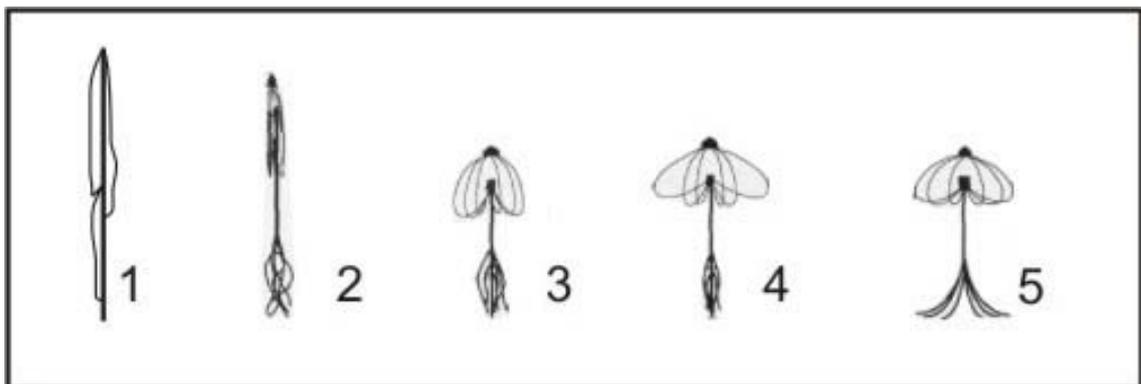


FIGURA 3.25 – Aplicação de NITINOL na desobstrução de coágulos sanguíneos.

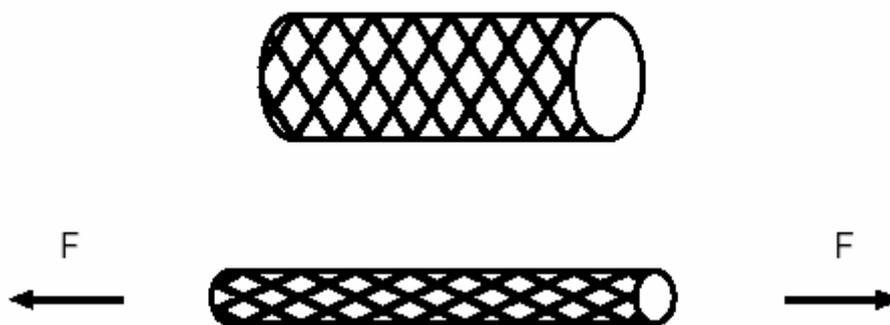


FIGURA 3.26 – Stents: usados para desobstrução de artérias.



FIGURA 3.27 – Equipamento cirúrgico de alta precisão (Pinça).

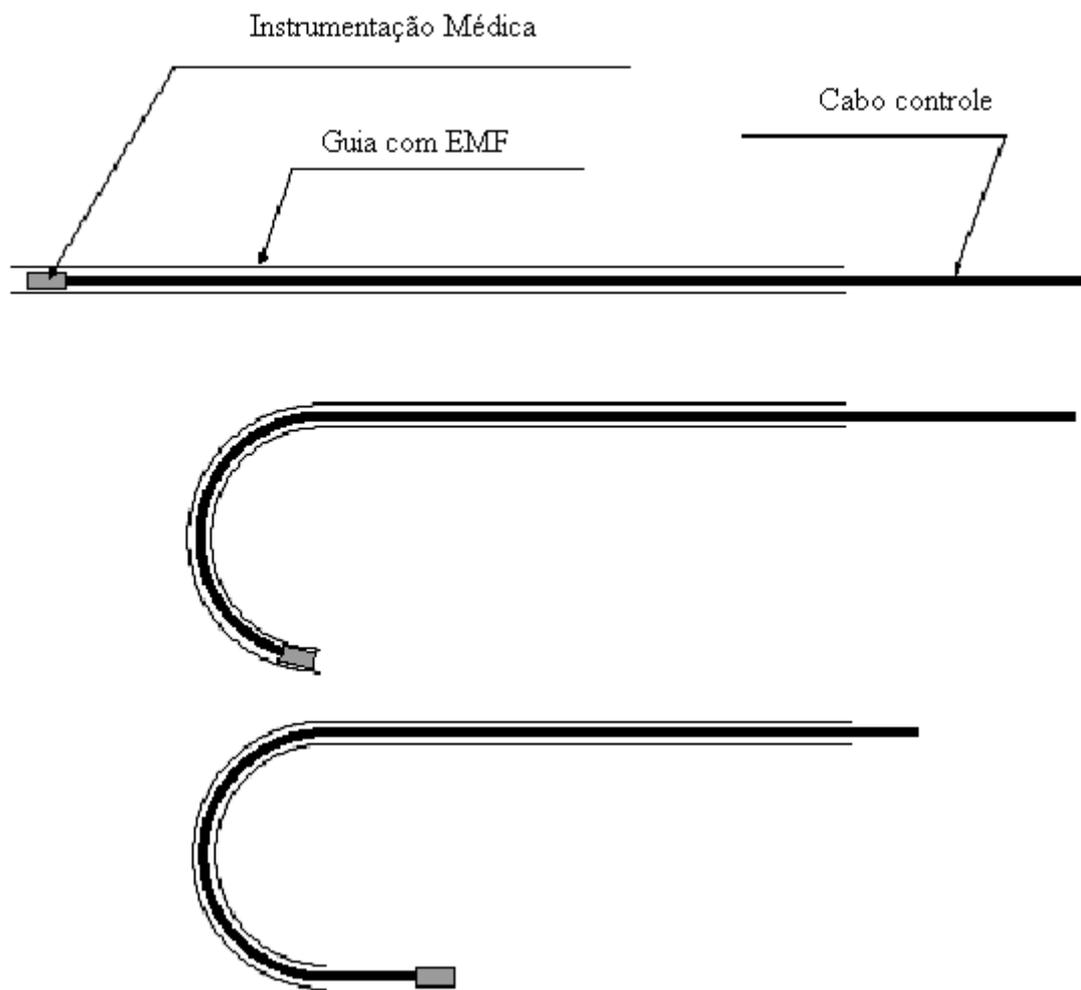


FIGURA 3.28 – Instrumentação Médica.

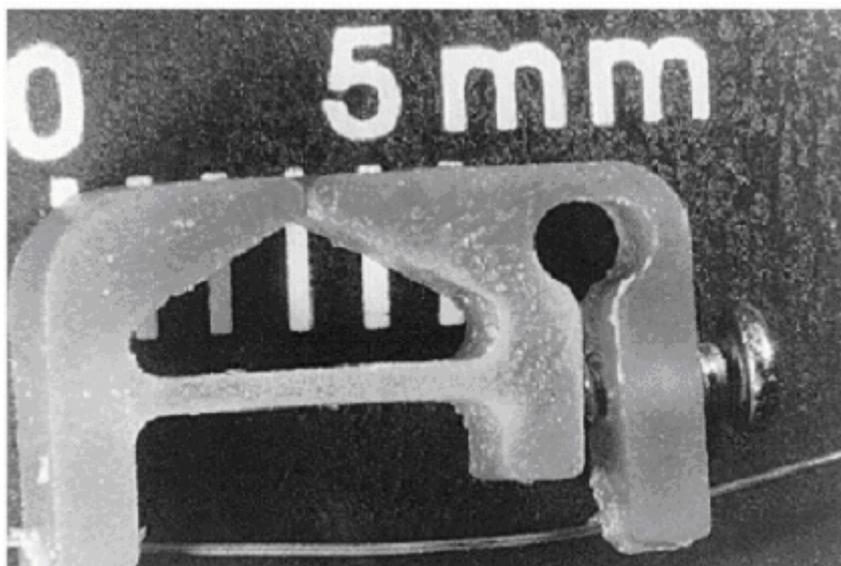


FIGURA 3.29 – Válvula do coração.

Atualmente, as ligas com EMF são largamente utilizadas na área Espacial, sensores-atuadores de temperatura em dispositivos de segurança contra incêndio, em armação de óculos, jóias e até em roupas que mudam de aspecto com a temperatura do corpo ou do ambiente. Talvez o maior sucesso, no momento, esteja nas aplicações médicas, em próteses que se ajustam perfeitamente aos ossos, filtros para coágulos sanguíneos, dispositivos para cirurgias não invasivas, fios para correção de arcada dentária, como visto anteriormente.

3.3.2–Aplicação de ligas de Nitinol com EMF na Construção Civil

Segundo MO (2004), existem concretos estruturais que conseguem suportar explosões de ataques terroristas ou desastres naturais e já podem ser encontrados em pesquisas mais recentes, como é o caso de “materiais inteligentes”, onde ligas de Nitinol interagem com o concreto.

Esse material resiste a duas formas usuais: a memória de forma que é capaz de mudar a forma de uma amostra rompida após um aquecimento e uma superelasticidade, onde, o material é capaz de deformar oito por cento a mais do que um concreto que não possua a fibra.

Os fios pré tracionados de Nitinol são colocados na massa de concreto. Esse concreto reforçado é aquecido após a sua cura. Após esse procedimento, o concreto adquire um acréscimo de amortecimento e uma melhor capacidade de absorver impacto.

Na presença de trincas devido a explosões ou terremotos, o uso de aquecimento devido a uma aplicação de uma corrente elétrica vai diminuir a presença de trincas nas estruturas afetadas.

Para demonstrar esse efeito, MO (2004) estudou alguns corpos de prova de dimensões 13.5"x 6"x 2" que foram testados como nas figuras seguintes:



FIGURA 3.30 – Viga com aplicação de carga em três pontos.

O corpo de prova foi totalmente instrumentado para que fossem analisadas as tensões e as deformações.



FIGURA 3.31 – Durante a aplicação da carga, a trinca pode ser vista.

Durante a aplicação da carga, a trinca se abre em torno de 8 mm como mostrado na FIG. 3.31.



FIGURA 3.32 – Depois de remoção da carga, a trinca praticamente desaparece.

Descarregando a estrutura, e aquecendo os fios de Nitinol, a trinca reduz significativamente, o que pode ser observado na FIG. 3.32.

Segundo BONCI et al (2002), a técnica de se usar elementos enrijecidos em uma estrutura é uma solução para evitar a transmissão de energia dissipada, o que pode danificar a mesma, após um terremoto. O uso de materiais com efeito memória de forma é capaz de controlar os deslocamentos e limitar as forças e a aceleração transmitida à estrutura, como exemplo, temos a Basílica de São Francisco de Assis, a qual foi restaurada após uma forte catástrofe feita pelo terremoto de 1997.

As unidades de transmissão de energia são usadas para conectar elementos estruturais, como vigas, pilares, lajes e telhados. É fato que essas unidades diminuem a velocidade com que os elementos iriam se movimentar devido à atuação de um vento forte ou terremotos.

As ligas com efeito memória de forma são calculadas para ter diferentes intensidades de respostas para diferentes ações externas como:

- a) Para uma baixa ação horizontal, (vento, terremotos de pequena intensidade) a liga se torna mais rígida, como uma conexão de uma peça de aço convencional, e assim, ocorrem deslocamentos não significantes.

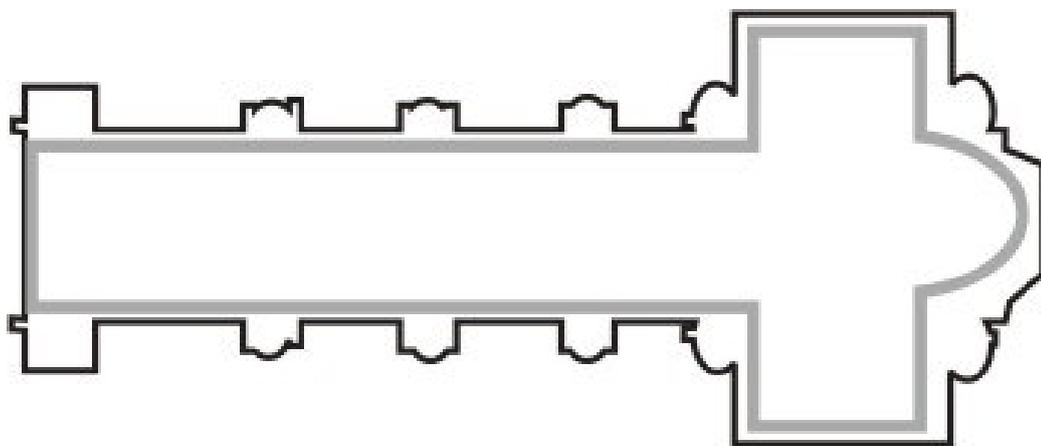


FIGURA 3.33 – Viga de aço colocada ao longo do topo da Basílica de São Francisco de Assis, para garantir a conexão global horizontal. (BONCI et al, 2002).

- b) Para ações horizontais mais altas a rigidez da liga se torna super elástica e controla os deslocamentos da estrutura, através da transmissão de pequenas forças à mesma como se fosse barras de aço, o que causa micro fissuras no concreto;
- c) Para ações horizontais extraordinárias como um terremoto de alta intensidade, a rigidez da liga cresce de forma a evitar deslocamentos excessivos e instabilidade.

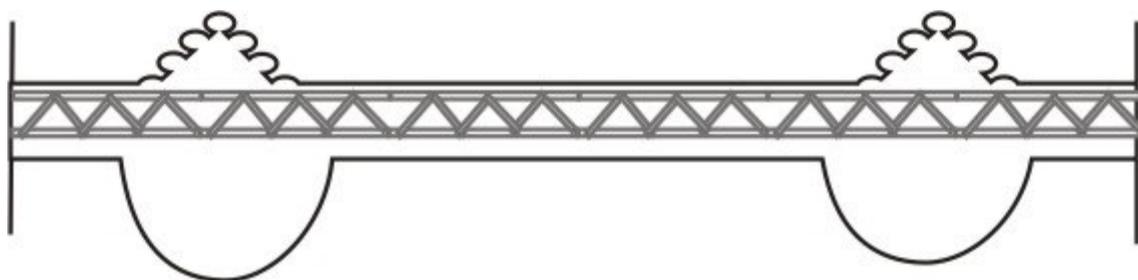


FIGURA 3.34 – Viga de aço em forma de treliça colocada ao longo da base da Basílica de São Francisco de Assis. (BONCI et al, 2002).

A viga é fixada em diversos pontos ao longo da parede, e conectada com os pilares e a interseção dos cantos.



FIGURA 3.35 – Atuadores das vigas da Basílica de São Francisco de Assis. (BONCI et al, 2002).



FIGURA 3.36 – Atuadores no topo do telhado da Basílica de São Francisco de Assis.
(BONCI et al, 2002).

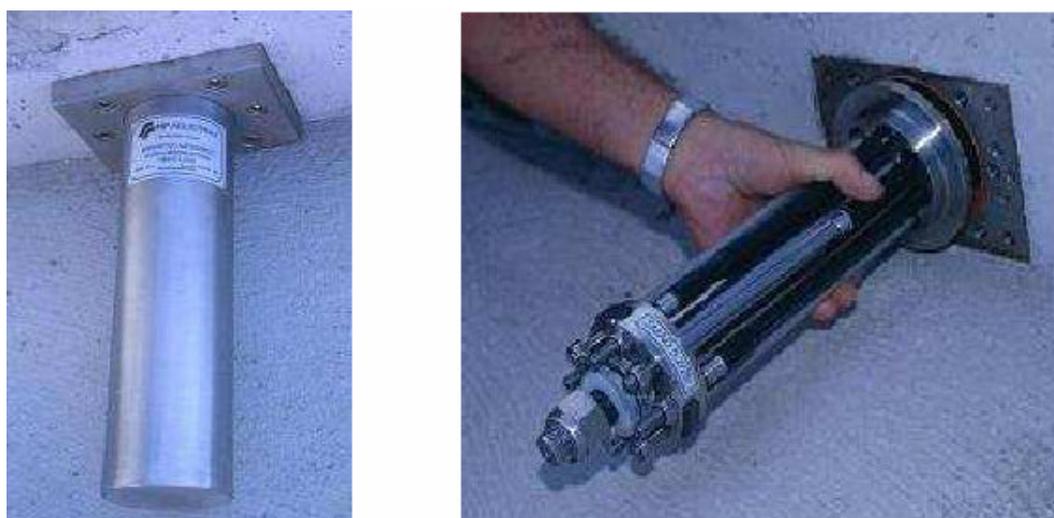


FIGURA 3.37 – Detalhes dos atuadores (com tampa de proteção, à esquerda, e sem tampa de proteção, à direita) no topo do telhado da Basílica de São Francisco de Assis.
(BONCI et al, 2002).

Os Atuadores foram instalados no topo do telhado para estabilizar a estrutura sujeita a forças laterais. Essas ligas de SMA têm demonstrado propriedades estruturais diferentes, para diferentes forças horizontais. Sob pequenas forças horizontais, essas ligas ficam rígidas e suportam deslocamentos insignificantes, ao passo que sob fortes ações horizontais, como um terremoto, sua rigidez é capaz de controlar os deslocamentos de paredes sob extremo carregamento horizontal, evitando assim o colapso.

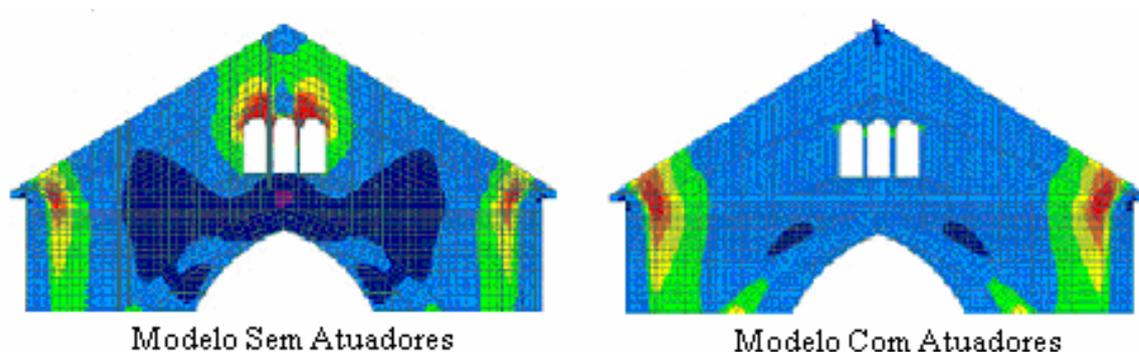


FIGURA 3.38 – Análise das tensões na fachada da Basílica de São Francisco de Assis.
(BONCI et al, 2002).

Existe uma concentração de tensões no topo da edificação, próximo às janelas. Essas tensões foram diminuídas com a colocação dos atuadores, conforme podemos observar na FIG. 3.38 à direita.

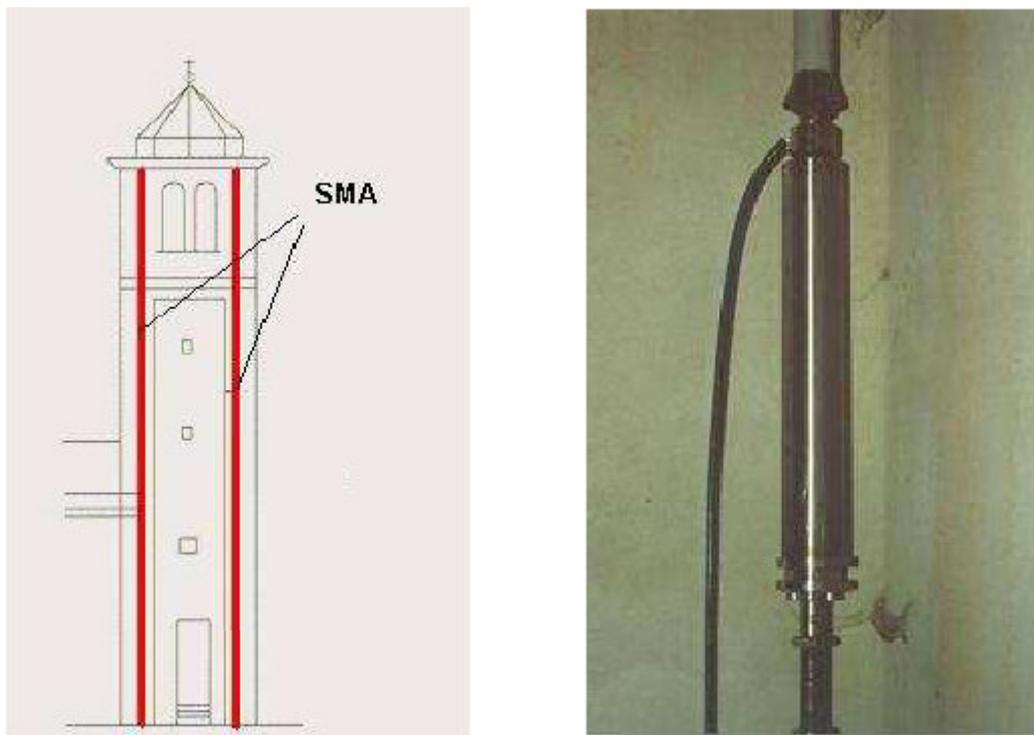


FIGURA 3.39 –Torre da Igreja de São Giorgio protegida com SMA. (DESROCHES et al, 2002).

Uma outra intervenção pode ser vista na FIG. 3.39, onde a Torre da Igreja de São Giorgio. A estrutura é muito velha (século XIV) e foi seriamente danificada durante um terremoto em 1996. Sua torre tem 18,5 metros de altura e possui uma base de 3 metros, suas paredes têm 0,42 metros de espessura cujas dimensões correspondem a uma estrutura fraca e passível de ser rompida durante um abalo sísmico. Quatro cabos de SMA foram colocados nas faces internas dos cantos da torre para aumentar a sua rigidez a flexão. Foram gastos 60 cabos de 1 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento, que foram ancorados desde o topo até a base da torre, com o intuito de limitar as forças aplicadas na estrutura.

LAU (2002), pesquisou vigas com ligas com efeito memória de forma, com diferentes condições de contorno.

Foram realizadas várias análises experimentais com esses compósitos (fios de Nitinol colocados em uma matriz de resina epóxi) e a partir desse momento, as respostas dinâmicas puderam ser encontradas em termos de frequência natural e amortecimento do material, usando sua memória de forma e propriedades pseudo-elásticas.

A atuação das fibras pode ser usada para protender ou não uma estrutura, de acordo com a temperatura aplicada à fibra, o que pode promover uma adição da capacidade de uma viga de resistir a um acréscimo de carga e obviamente de momento fletor.

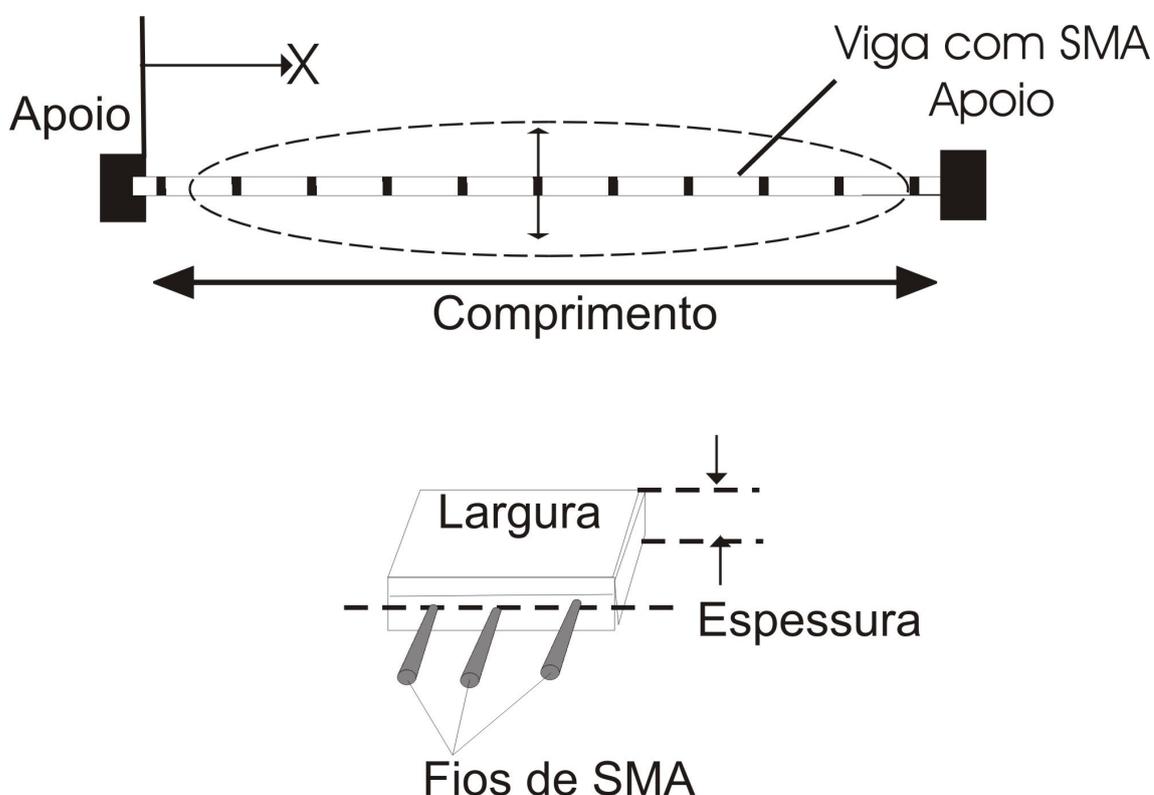


FIGURA 3.40 – Modelo teórico da viga. (LAU et al, 2002).

Modelo teórico para estudo das respostas dinâmicas do compósito. Os fios de Nitinol foram colocados no meio da viga como mostrado na FIG. 3.40, ao longo do seu eixo horizontal.

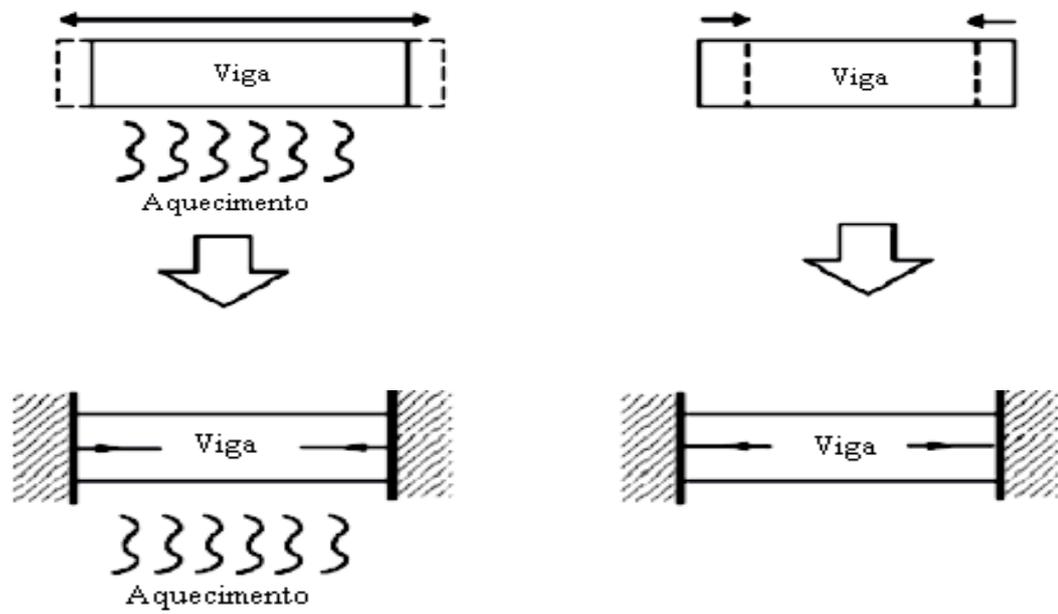


FIGURA 3.41 – Tensões induzidas no compósito. (LAU et al, 2002).

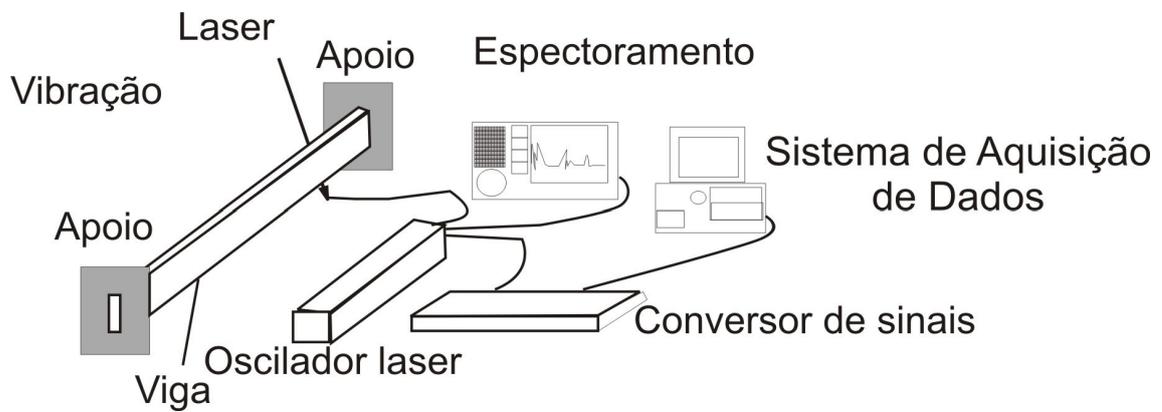


FIGURA 3.42 – Modelo experimental para análise dinâmica. (LAU et al).

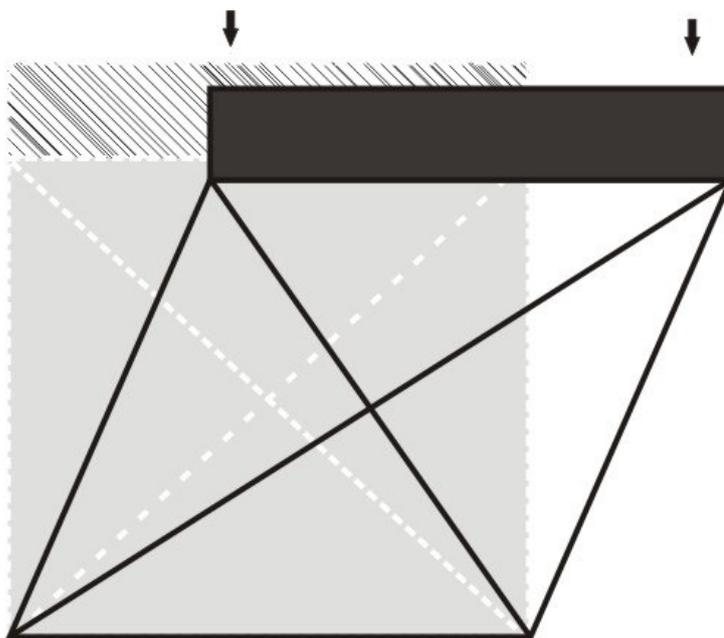


FIGURA 3.43 – Estrutura apórticada com cabos de SMA. (BARATA E CORBI, 2002).

BARATTA E CORBI (2002) investigaram a influência de cabos de SMA com a colaboração de rigidez em um pórtico sob carga, como se pode ver na FIG. 3.43. A estrutura em estudo consistiu basicamente em materiais elasto-plásticos e cabos pseudoelásticos suportando apenas esforços de tração e incapazes de suportar compressão. Resultados numéricos mostraram que os cabos aumentaram a estabilidade estrutural, devido a uma melhor resposta dinâmica.

Os cabos produziram uma diminuição na máxima amplitude e na tensão residual, assim como um excelente desempenho na atenuação do efeito P-delta.

Comparando-se um modelo convencional com um modelo inovador, os pesquisadores concluíram que bases de SMA são mais eficientes do que isoladores de borracha, para vibrações sísmicas. Por outro lado, as mesmas conclusões não podem ser feitas para cabos de SMA em comparação com cabos de aço.

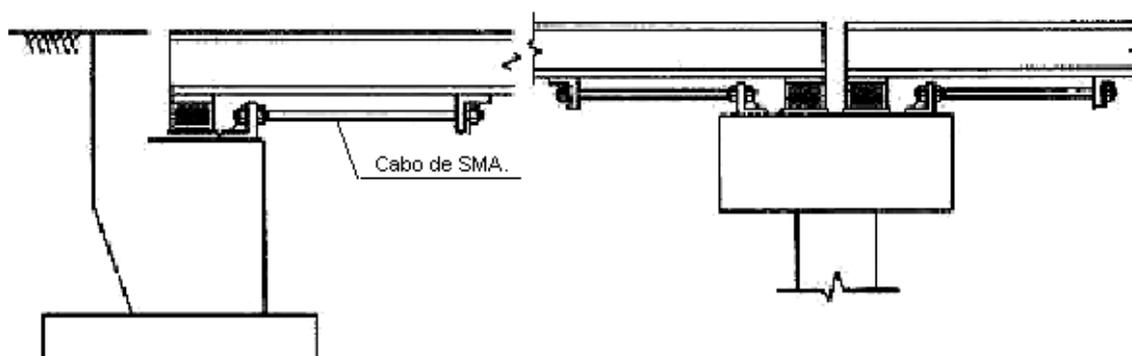


FIGURA 3.44 – Cabos nas bases de tabuleiros de pontes. (DESROCHES et al, 2003).

DESROCHES et al (2003) estudaram a estrutura da FIG. 3.44, que é formada por cabos de SMA que atuam diretamente no tabuleiro da ponte e na sua base de sustentação, melhorando a sua estabilidade. Esse artifício consegue reduzir consideravelmente o deslocamento nodal do centro do vão da ponte, se for comparado com um sistema de cabos de aço convencional, sem SMA. Também, caso ocorra fortes terremotos, o acréscimo de rigidez pode evitar grandes deslocamentos, garantindo um travamento adicional da estrutura de uma forma global.

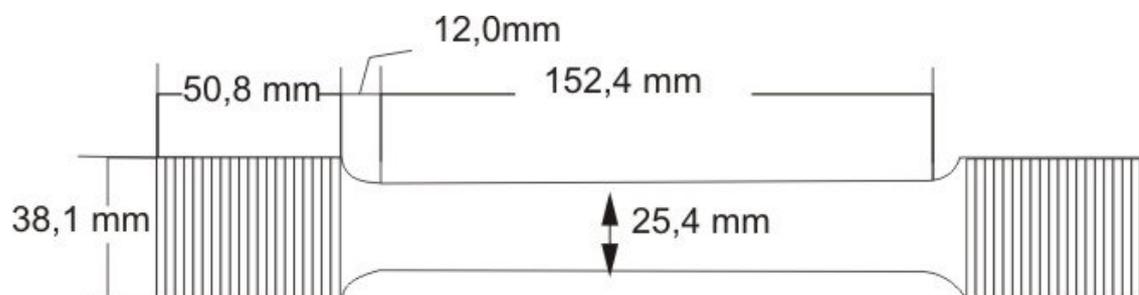


FIGURA 3.45 – Detalhes dos Cabos das pontes. (DESROCHES et al, 2003).

Na figura acima se pode ver como foram modelados os cabos para auxiliar na segurança à estabilidade da ponte estudada por DESROCHES et al, 2003. Os cabos possuem comprimentos relativamente pequenos, mas o seu efeito tem a garantia de uma melhor estabilidade das pontes no caso de abalos sísmicos.

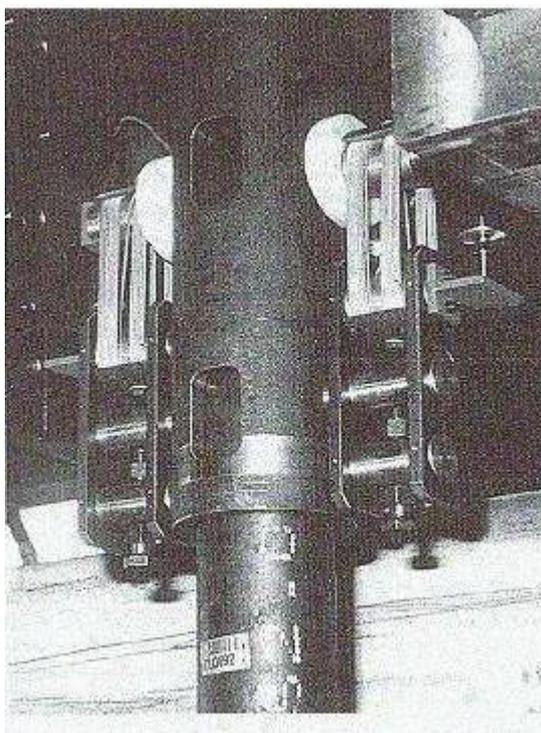


FIGURA 3.46 – Suportes especiais para pórticos. (DOLCE et al, 2002).

BRUNO e VALENTE, DOLCE et al (2002), pesquisaram a possibilidade de utilizar suportes especiais para pórticos utilizando ligas de SMA, conforme visto na FIG. 3.46. De fato, devido a sua extrema versatilidade, pode-se obter um bom comportamento estrutural simplesmente variando o número ou as características das ligas do apoio.

A idéia principal de se usar este tipo de sistema é de criar um sistema de amortecimento que controla a vibração do pórtico, fato esse também estudado por Han et al (2003).

Eles fizeram uma análise experimental em dois pórticos de aço com oito amortecedores de SMA. A dimensão da estrutura foi de 2 m de altura e 1 m de comprimento por 0.25 m de largura, carregada verticalmente com 4 blocos de 20 kg, sendo dois para cada pórtico. O resultado do ensaio foi de 45 segundos para o pórtico reduzir o seu deslocamento inicial em 50% sem amortecimento e de apenas 1 segundo, quando equipado com o sistema de amortecimento. A análise também foi testada com o uso de elementos finitos e os resultados foram similares.



FIGURA 3.47 – Conectores de pilares e vigas. (DESROCHES et al).

DESROCHES et al (2002), investigaram a eficácia de vários tipos de conectores soldados em peças metálicas como mostra a FIG. 3.47. A ligação consiste basicamente em uma viga W 24X94 e uma coluna W 14X159 com peças de 34.9 mm de diâmetro feitas de SMA, soldadas a consolos curtos na base e no topo, suportando tanto tração como compressão. A resposta final desse mecanismo foi uma capacidade de recuperar 80% da sua forma original e a conexão apresentou comportamento idêntico à primeira série de testes.

4

MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1– Materiais

Foram estudados corpos de prova prismáticos de concreto com reforço, utilizando liga metálica com efeito memória de forma.

A fibra e o fio utilizados foram de Nitinol de alta resistência, adquirida na forma de arames de 0,001 m de diâmetro que foram tracionados de modo a adquirir a deformação de 8%. As fibras foram cortadas em pedaços de 0,01 m de comprimento e os fios em pedaços com 0,18 m de comprimento (FIG. 4.1 e FIG. 4.2)..

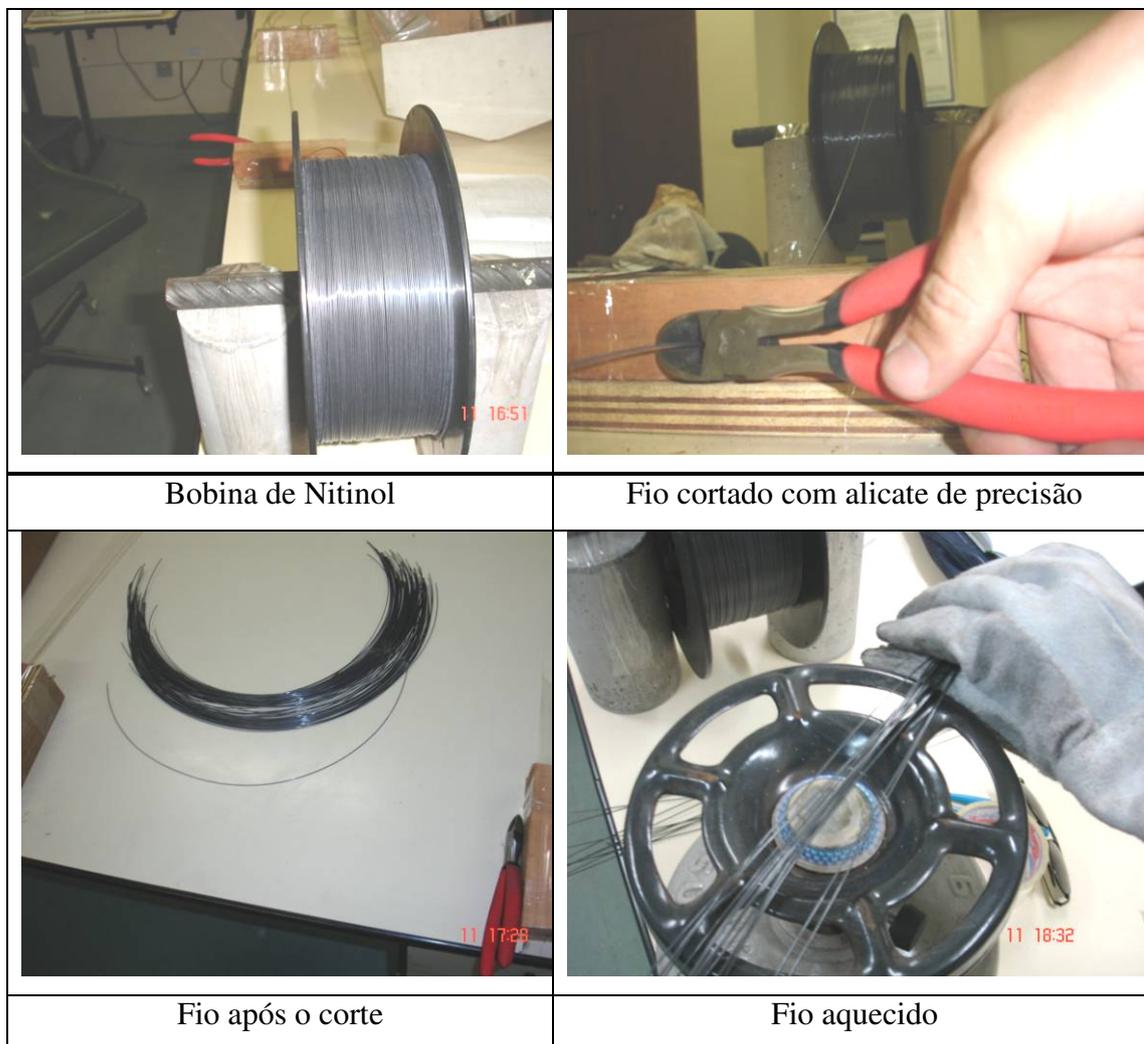


FIGURA 4.1– Preparação dos fios de Nitinol.

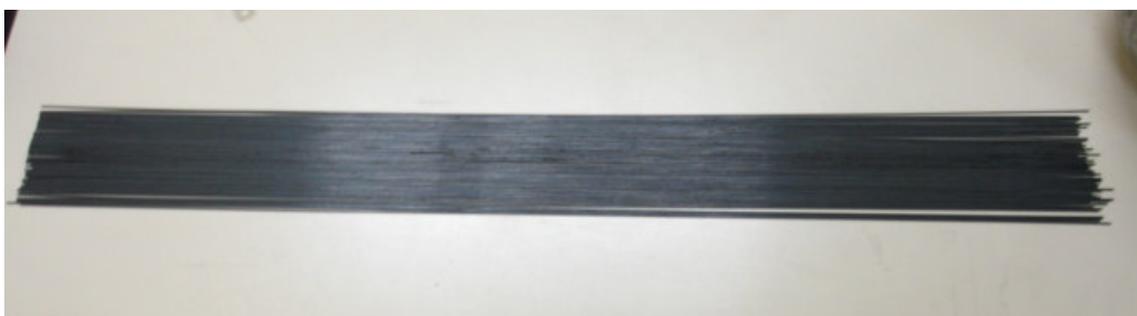


FIGURA 4.2– Fio completamente retilíneo.

Os fios foram aquecidos antes de serem alongados. Esse procedimento foi primordial para que um posterior alongamento de 8% fosse realizado na Máquina INSTRON, com os fios retilíneos, devido à facilidade de execução do ensaio.

As fibras foram cortadas em pedaços de um centímetro de comprimento, utilizando para isso, um alicate de setenta e cinco centímetros de comprimento com uma lâmina cortante de trinta centímetros, fixada com um sargento, conforme mostrado na FIG. 4.3 e FIG. 4.4.



FIGURA 4.3– Alicate para corte das fibras.



FIGURA 4.4– Fibras já cortadas.

4.2– Procedimento Experimental

O escopo do procedimento experimental seguiu o organograma apresentado na FIG. 4.5, que será detalhado em seguida.

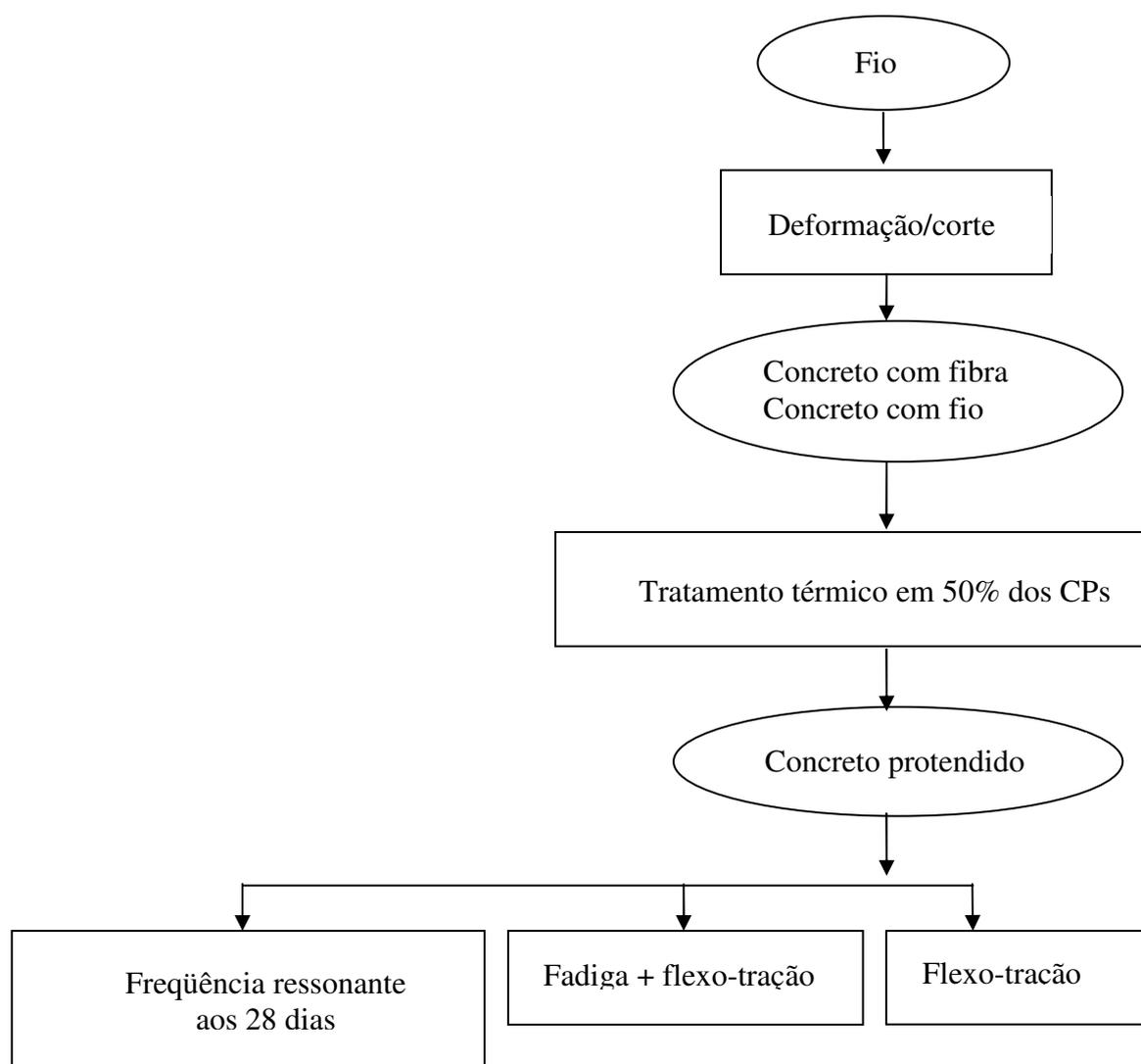


FIGURA 4.5– Esquema do procedimento experimental.

As fôrmas foram projetadas para que não houvesse perda de água durante e após a concretagem. Foi aplicada uma camada de silicone em todo tipo de fresta que poderia ter um vazamento de água. Esse procedimento foi realizado para garantir o fator água cimento da mistura.

Na TAB. 4.1 são apresentadas as dimensões das fôrmas, após um planejamento para evitar desperdícios com sobras.

TABELA 4.1 – Dimensões das fôrmas.

Tipo	Comprimento (cm)	Largura (cm)	Espessura (mm)
Laterais	20	5	3
	5	5	3
Base	20	5	3

As fôrmas foram fabricadas utilizando uma lâmina de poliestireno com dimensões de um metro de largura por dois metros de altura e três milímetros de espessura. Essa lâmina foi cortada, com uma serra de fita, em tiras e essas tiras cortadas em pedaços, conforme visto na FIG. 4.6.



FIGURA 4.6 – Corte das fôrmas.

Após o corte das laterais e do fundo das fôrmas, foi realizado um entalhe com dois centímetros e meio de profundidade nas laterais para servir de encaixe e sustentação da fôrma, conforme FIG. 4.7 e FIG. 4.8.



FIGURA 4.7 –Mesa com serra circular pronta para realizar o entalhe.



FIGURA 4.8 – Corte do entalhe da forma.

A fôrma pronta para ser concretada pode ser vista na FIG. 4.9.

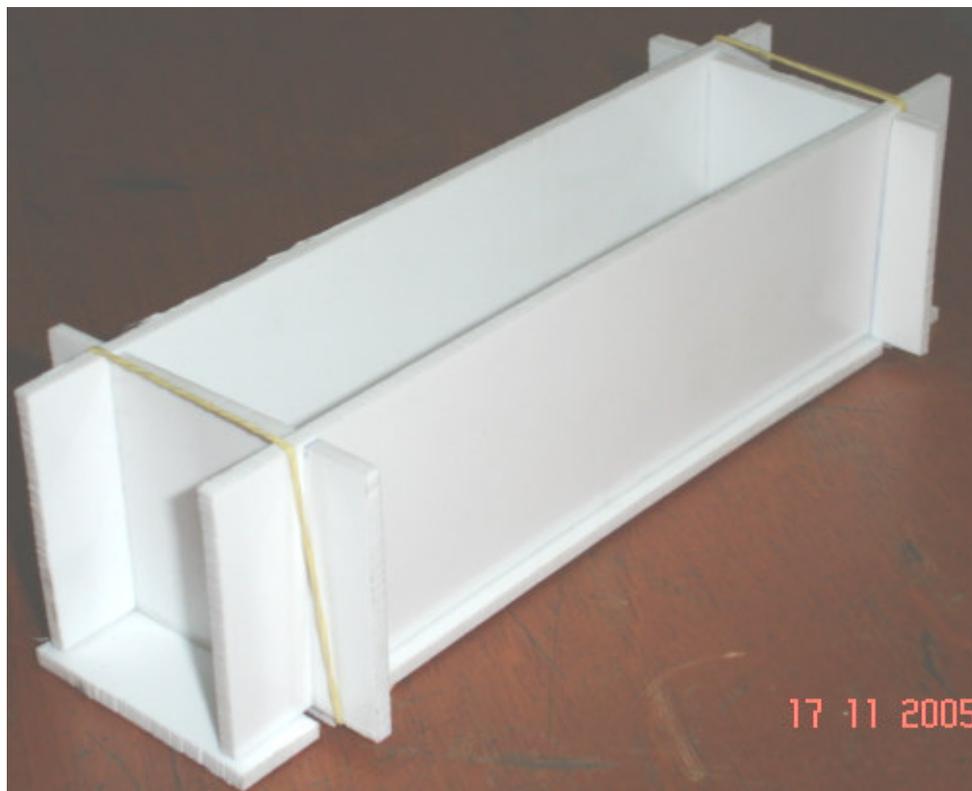


FIGURA 4.9– Fôrma com as laterais encaixadas e o fundo fixado com elástico.

A composição unitária do concreto utilizado foi de 1:3 (cimento, areia) medida em peso, e resistência à compressão da ordem de 32 MPa aos 28 dias. A ausência de agregado graúdo se justifica pelo fato de se poder confeccionar somente corpos de prova menores devido à pequena quantidade de fibra disponível (problemas com a importação). Os materiais foram caracterizados segundo a norma vigente.

Utilizou-se uma betoneira com capacidade de cento e vinte litros, para fazer a mistura do concreto, conforme visto na FIG. 4.10.



FIGURA 4.10 – Betoneira para mistura dos componentes do concreto.

O concreto foi confeccionado com cimento Portland Tipo II, sem agregado graúdo, com areia média natural silicosa, e fator água/cimento igual a 0,5 kg/kg. A água utilizada foi a potável consumida na região metropolitana de Belo Horizonte-MG, conforme TAB. 4.2

TABELA 4.2 – Caracterização da água

Parâmetro	Unidade	Número de amostras		Valor Médio	Limites
		Mínimo	Analisadas		
Cloro	mg/L Cl	571	628	1,08	0,2 a 2
Cor	UH	134	162	0,49	15
Fluoreto	mg/L F	67	162	0,70	0,6 a 0,85
Turbidez	UT	134	162	0,29	5
pH	-	134	162	8,40	6 a 9,5

Fonte: Copasa.

Uma verificação preliminar da temperatura de cura do concreto foi realizada. Foram instalados três termômetros analógicos em contato direto com o concreto já na forma. Esses termômetros foram colocados em profundidades diferentes no concreto, conforme FIG. 4.11, não foi constatada temperatura superior a 25°C o que não ativa o EMF do Nitinol utilizado que é de 80°C.

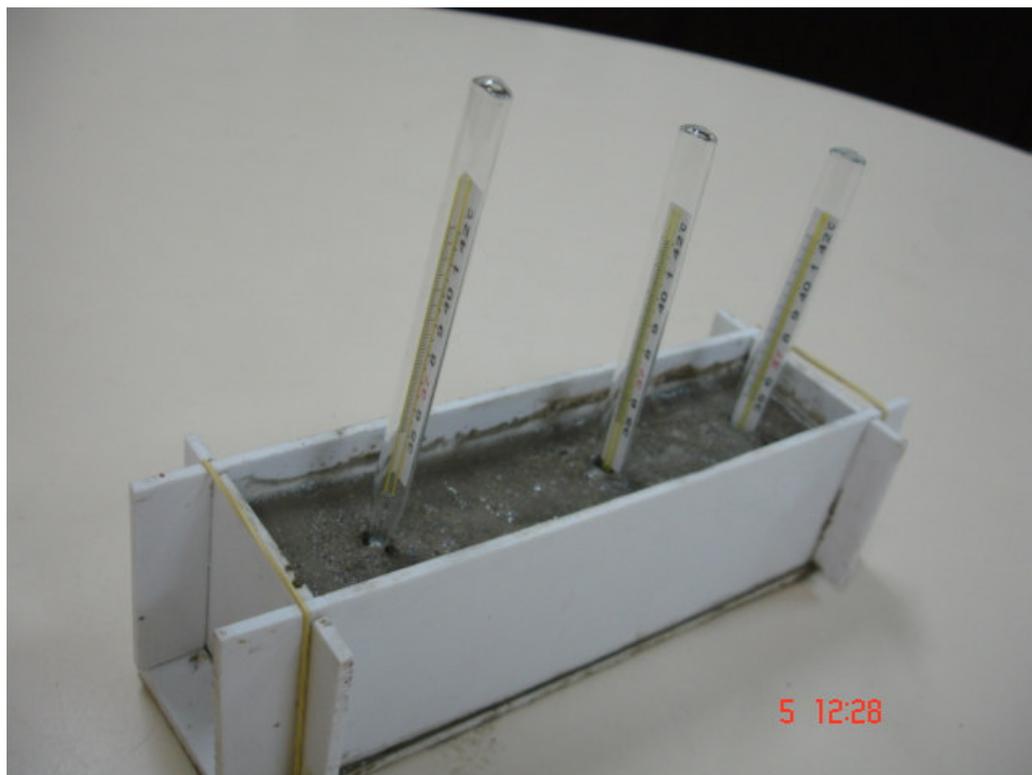


FIGURA 4.11 – Verificação preliminar da temperatura de cura do concreto.

Em 50% dos corpos de prova foi adicionada à matriz, 70 kg/ m³ em fibras com efeito memória de forma previamente deformadas, no restante foram colocados seis fios, previamente deformados, longitudinalmente ao corpo de prova.

Com estes materiais foram confeccionados 2 tipos de concreto: concreto com fibra e concreto com fio, ambos de Nitinol. A mistura foi realizada mecanicamente de acordo com a técnica corrente, para evitar-se a segregação e o alinhamento das fibras no fundo

das formas. Após a mistura foram moldados corpos de prova prismáticos (4 x 4 x 16 cm) para os ensaios de frequência ressonante aos 28 dias, fadiga seguido de flexo-tração e flexo-tração propriamente dita.

O concreto, apesar de ter um fator água/cimento 0,5 kg/kg, teve uma boa trabalhabilidade na hora da concretagem, conforme FIG. 4.12.



FIGURA 4.12– Concreto pronto para ser moldado.

Foi utilizada a mesa vibratória do Departamento de Materiais de Construção Civil, conforme visto na FIG. 4.13. A vibração do concreto foi fundamental para que o mesmo fosse adensado, evitando nichos de concretagem.



FIGURA 4.13 – Mesa Vibratória.

Todas as dimensões dos corpos de prova foram devidamente anotadas, cujas leituras foram realizadas com o auxílio de um paquímetro de acordo com FIG. 4.14.



FIGURA 4.14 – Paquímetro para aquisição das dimensões dos CPs.

Metade dos corpos de prova de concretos com fibras foram aquecidos em uma estufa com controle automático de temperatura, conforme FIG. 4.15. A temperatura foi de cento e cinquenta graus Celsius e o tempo de exposição foi de noventa minutos, pois foi constatado com um leitor laser de temperatura que com essa temperatura e esse tempo de exposição, o corpo de prova fica com uma temperatura de no mínimo oitenta graus

Celsius, que é a temperatura de ativação do efeito memória de forma do Nitinol utilizado nesse trabalho.



FIGURA 4.15 – Estufa usada para aquecer os corpos de prova.

O leitor laser para medir a temperatura dos CPs no forno, é mostrado na FIG. 4.16. Esse leitor tem capacidade de captar temperaturas entre -20°C a 500°C .



FIGURA 4.16 – Leitor laser de temperatura. (marca POLIMED LTDA).

A umidade do Laboratório de Ensaios Especiais da UFMG foi adquirida com o uso do leitor mostrado na FIG. 4.17.



FIGURA 4.17 – Leitor de umidade (marca POLIMED LTDA).

O equipamento utilizado para realizar os ensaios de alongamento de 8% em fios de Nitinol, ensaio de fadiga e ensaio de flexo-tração foi a Instron 5582 que está ligada a um computador para fazer a aquisição dos dados coletados de cada amostra ensaiada, conforme pode ser observado na FIG. 4.18.



FIGURA 4.18 – INSTRON 5582.

Como o corte foi feito na amostra após a deformação, foi verificada a influência do corte na recuperação da forma. Para isto pedaços de tamanhos definidos de arames da liga com efeito memória de forma em estado não deformado foram deformadas de 8% por tração, FIG. 4.19. Os arames foram então cortados e aquecidos a 80°C. Foram comparados os comprimentos das amostras antes da deformação e após o tratamento térmico e não foi constatada perda de EMF.



FIGURA 4.19– Liga Nitinol sendo deformada por tração de 8%.

Foi utilizado o equipamento de ensaios da marca Instron para a execução do alongamento das fibras, com o auxílio do clip-gage para aquisitar o alongamento da fibra.

Na FIG. 4.20 tem-se o CLIP-GAGE para captar a deformação de 8% nos fios de Nitinol.

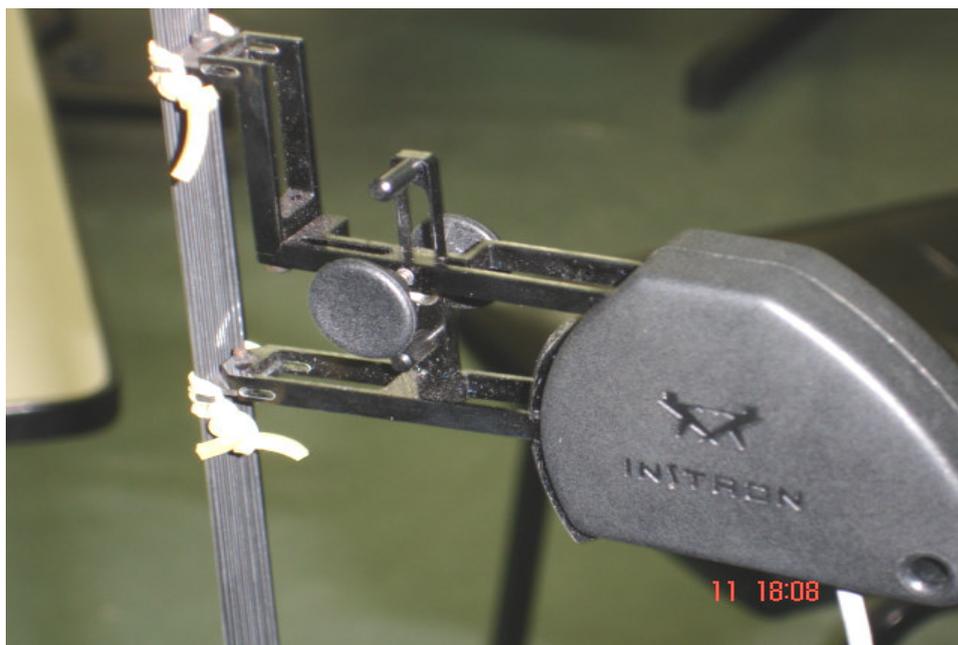


FIGURA 4.20 – CLIP-GAGE.

O sistema completo para os ensaios de fadiga e flexo-tração é mostrado na FIG. 4.21, onde foi utilizado o LVDT, com precisão de um milésimo de milímetro, para captar os deslocamentos do CP. O LVDT foi fixado com uma base magnética em uma extremidade e a outra foi apoiada diretamente em uma placa metálica firmemente fixada no CP, com um elástico extremamente tracionado.

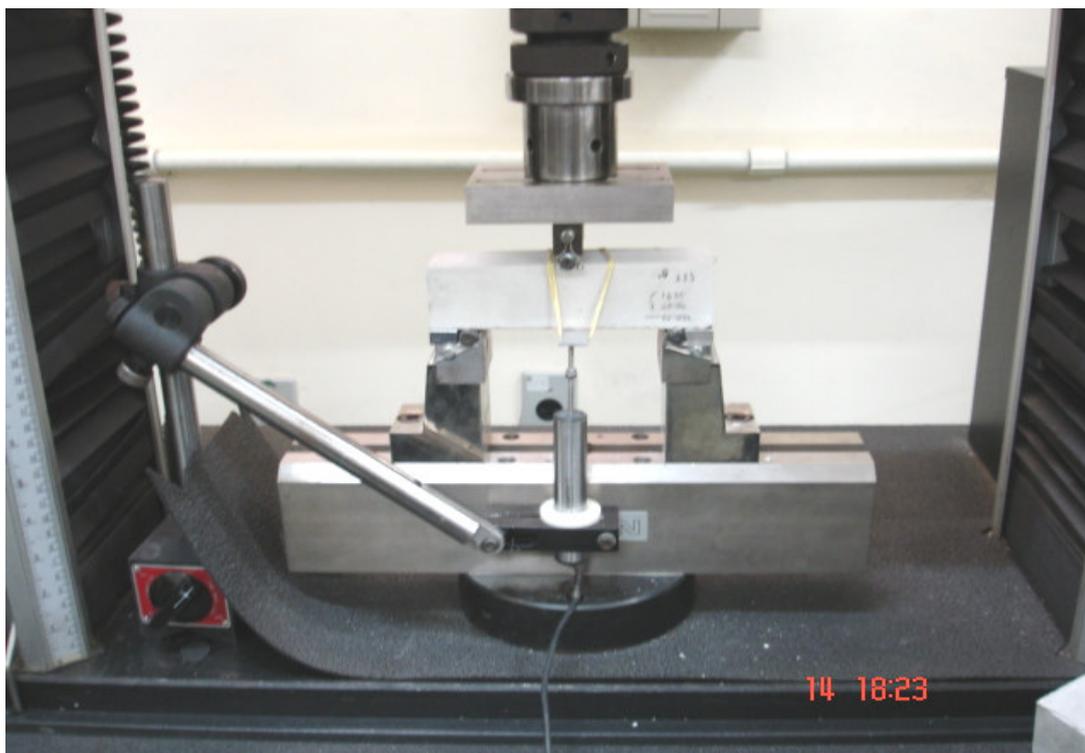


FIGURA 4.21– Sistema montado para captar deslocamentos do concreto

Foram realizados ensaios de fadiga seguida de flexo-tração e somente flexo-tração no concreto com adição de fibras ou fios de Nitinol, através dos quais foram observadas propriedades relativas à resistência mecânica e tenacidade do material.

O ensaio de flexo-tração consistiu em submeter um corpo de prova de seção quadrada a esforços de flexão, apoiado em três pontos, com controle de velocidade dado pela deformação do concreto, fazendo-se uso da máquina Instron 5582. É um ensaio realizado para avaliar sua tenacidade. A carga de ruptura considerada corresponde, geralmente, à tensão máxima obtida no ensaio antes do início da atuação das fibras ou fios.

Como resultado, obteve-se uma curva força-deslocamento a qual nos é permitido o cálculo da tenacidade, que é a quantidade de energia absorvida pelo compósito até a ruptura. Isto é, a tenacidade corresponde ao valor da área abaixo da curva força-deslocamento, que foi encontrada com o auxílio de um algoritmo feito no Excel.

Os ensaios de flexo-tração foram realizados, baseado em alguns parâmetros da norma americana ACI 544.1R(1986). A tenacidade é definida pelo ACI como a energia total absorvida antes da completa separação do corpo de prova. Essa energia foi medida tomando-se a área completa sob a curva força versus deslocamento no ensaio de flexão, que foi realizado em um equipamento da marca Instron 5582 com velocidade de deformação e aplicação de carga controlada por computador. Corpos de prova prismáticos foram ensaiados à flexão com aparato de três pontos de aplicação de carga, conforme se pode ver na FIG. 4.24. A taxa de aplicação de carga imposta foi de 0,00200 mm/min.

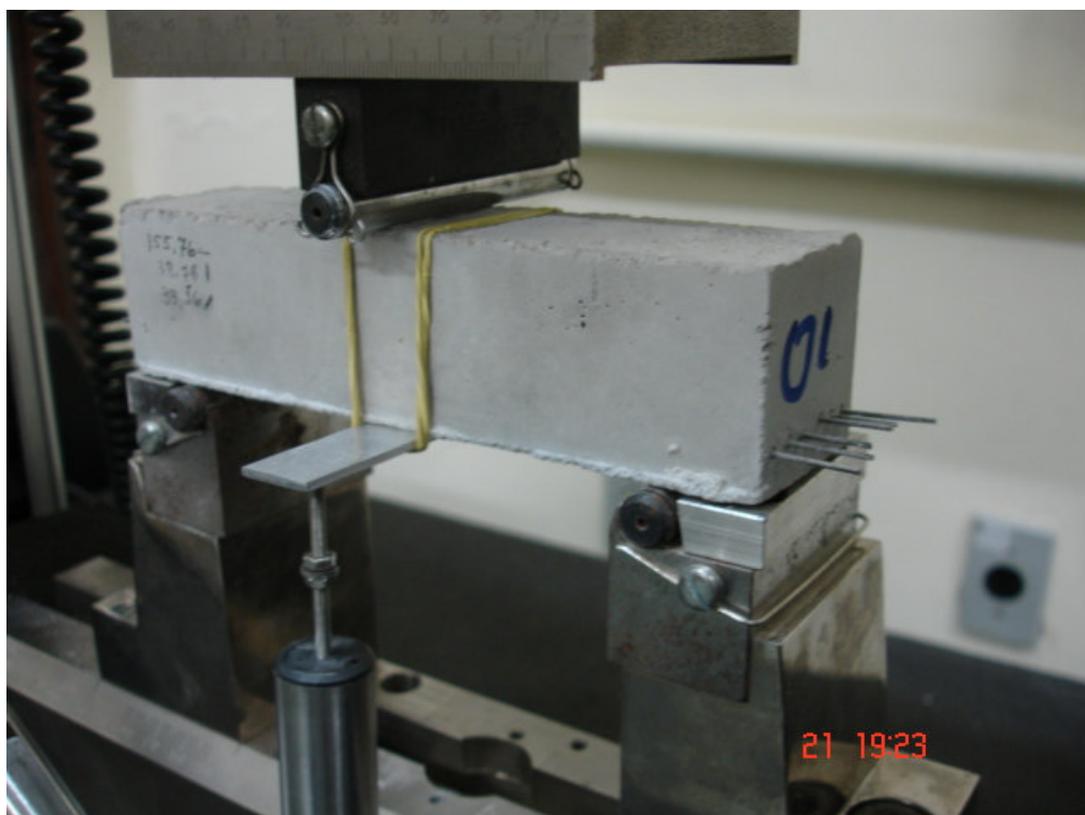


FIGURA 4.22– Corpo de prova apoiado em três pontos.

5

RESULTADOS

Foram dois, os tipos de resultados obtidos: comportamento do concreto estudado à flexo-tração, comportamento a flexo- tração após esforços cíclicos. Os dados experimentais obtidos são apresentados na íntegra no Anexo .

Com os dados experimentais, foi primeiramente realizada uma avaliação qualitativa dos resultados, baseados na análise comparativa dos diversos ensaios.

Baseado em cunhos estatísticos, foi feita uma segunda análise dos resultados, de forma descritiva. Para isso, foi utilizado o programa SPSS, que processou todos os dados e assim foi avaliada a confiabilidade do experimento.

A análise qualitativa consistiu em separar os gráficos com os fatores pertinentes ao presente estudo. As figuras 5.1 a 5.8 mostram os resultados característicos.

A análise da FIG. 5.1, indica que o concreto com reforço de fios de Nitinol, sujeito à flexo-tração, suportou uma carga menor. A presença de fibras curtas de Nitinol, de forma semelhante às fibras curtas de aço, aumenta a tenacidade e a pseudoplasticidade do composto.

O concreto com fibras vai se rompendo progressivamente, ou seja, as fibras funcionam como pontes para alívio de tensão. No entanto, observa-se que ocorre a fratura no composto (separação em duas partes) com fibras curtas. Isto estaria relacionado a baixa ancoragem da liga Nitinol. A presença de fibras curtas é mais eficaz, em relação à tenacidade no ensaio de flexo-tração, do que a presença de fios.

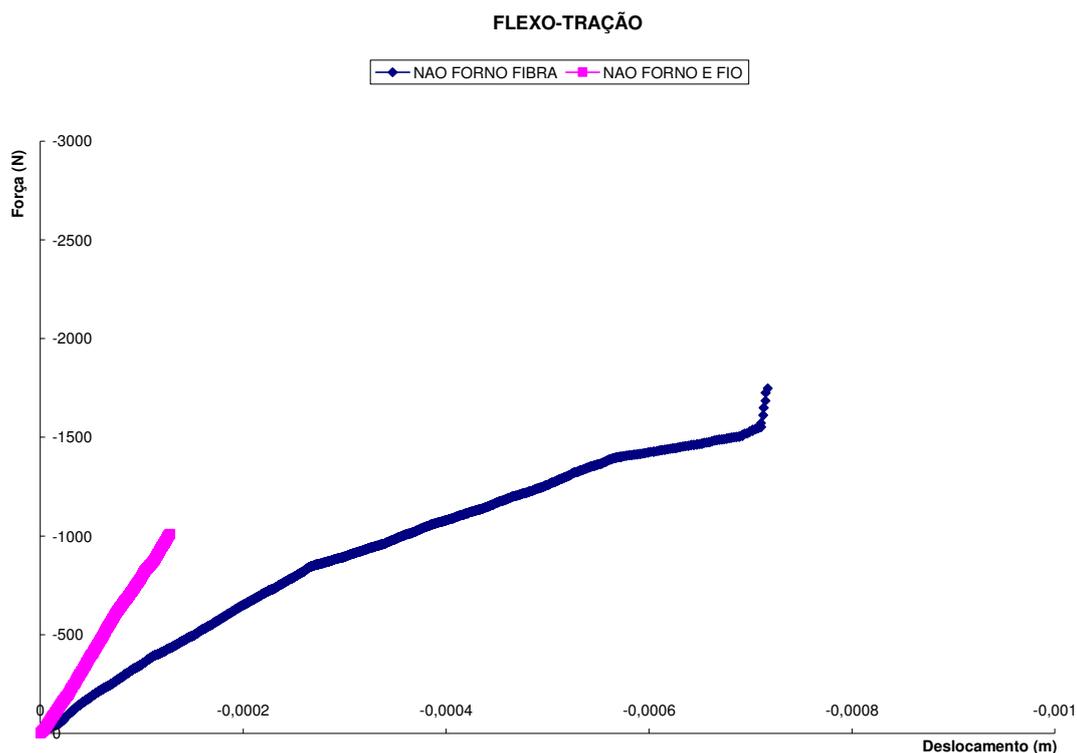


FIGURA 5.1 – Gráfico comparativo, não forno e fibra x não forno e fio.

Os dados da FIG. 5.2 indicam que a tenacidade dos concretos com fios é aumentada após o mesmo ser submetido a esforços cíclicos da ordem de 1000 vezes, assim como sua pseudoplasticidade. O mesmo parece ocorrer nos concretos com fibras. O mecanismo que explicaria tal efeito poderia estar relacionado a aderência das fibras com a matriz.

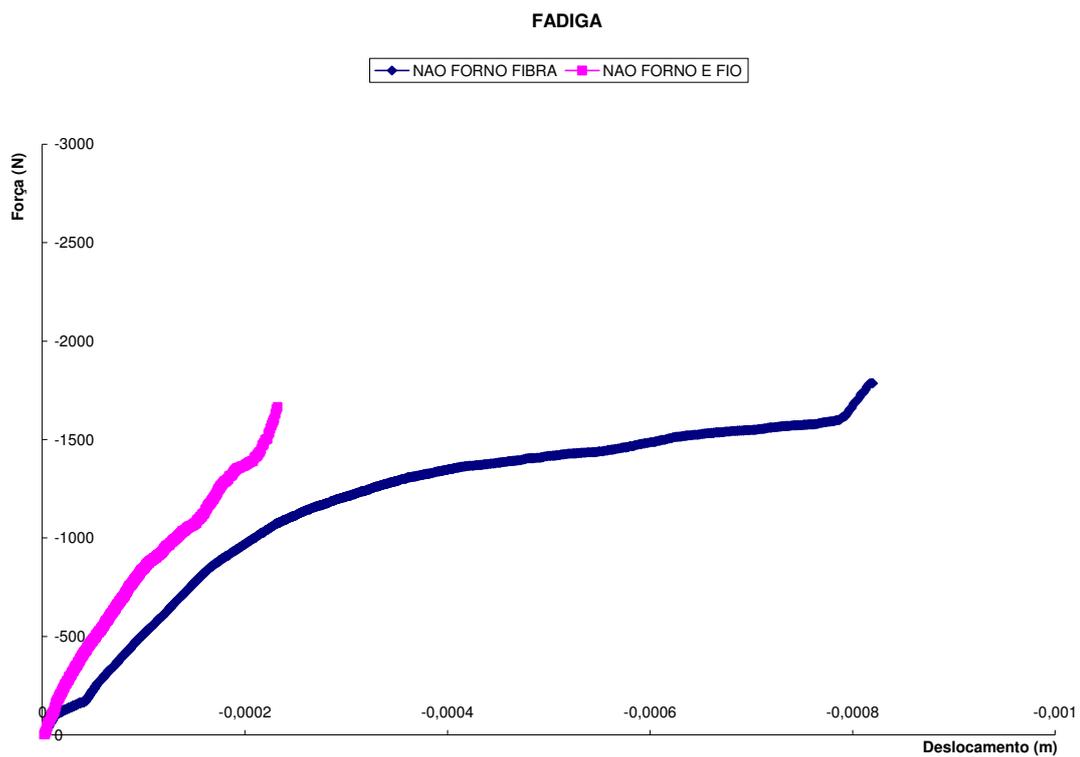


FIGURA 5.2 – Gráfico comparativo, não forno e fibra x não forno e fio

A Fig. 5.3 indica que o efeito memória de forma aumenta a capacidade portante e a pseudoplasticidade do composto. O efeito memória de forma aumenta a tenacidade em aproximadamente 100%.

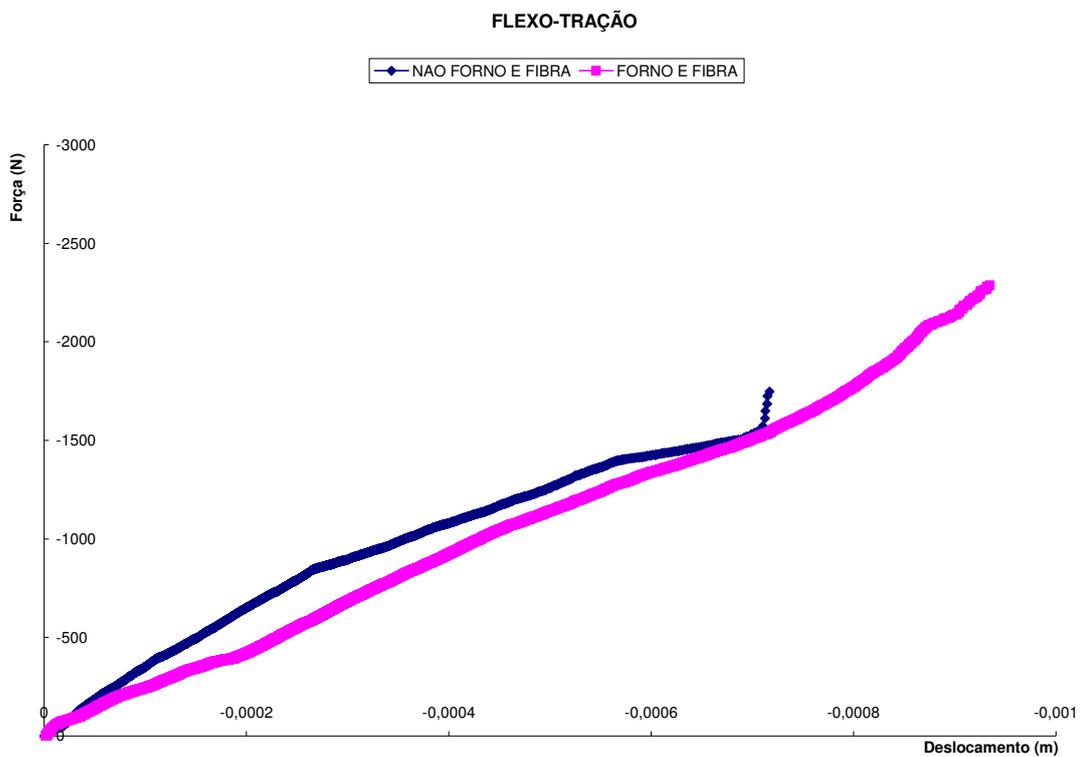


FIGURA 5.3 – Gráfico comparativo, não forno e fibra x forno e fibra.

Pode-se perceber na Fig. 5.4 que os concretos que foram ao forno suportam uma carga maior do que um concreto que não foi ao forno. A capacidade portante aumenta em aproximadamente 180%, evidenciando o efeito de protensão do concreto pelo efeito memória de forma.

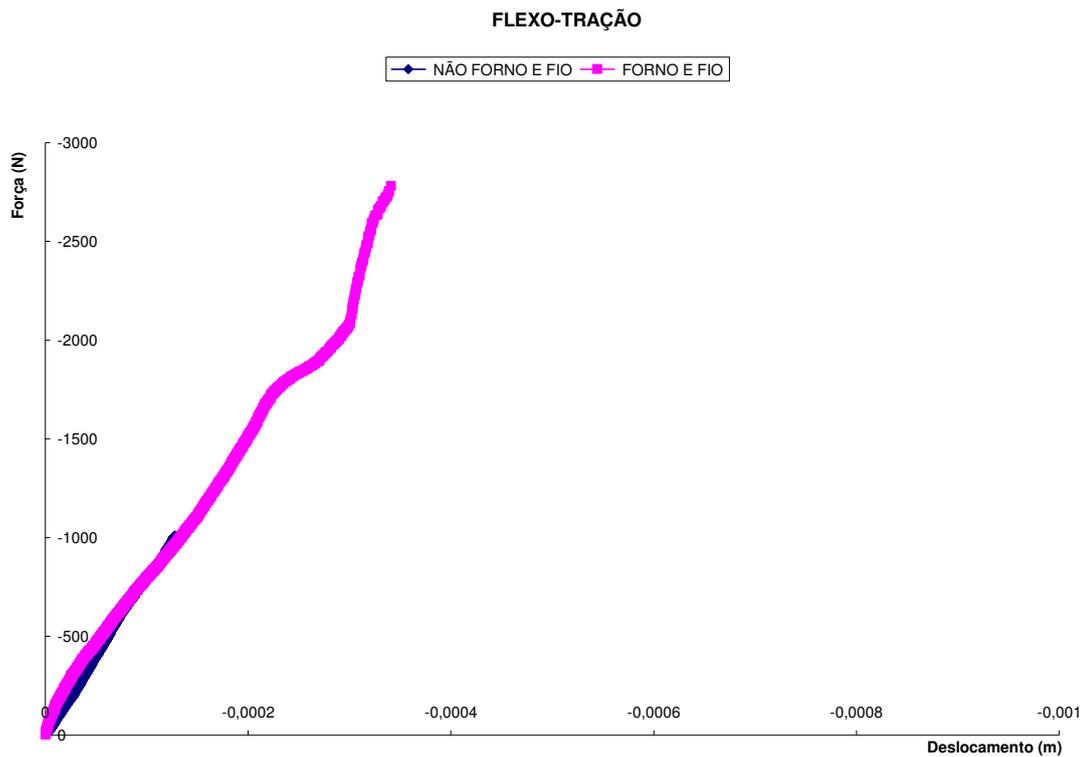


FIGURA 5.4 – Gráfico comparativo, não forno e fio x forno e fio

Pode-se perceber na Fig. 5.5 que o efeito memória de forma influencia em maior grau a pseudoplasticidade do concreto com fios em relação ao concreto reforçado com fibras curtas.

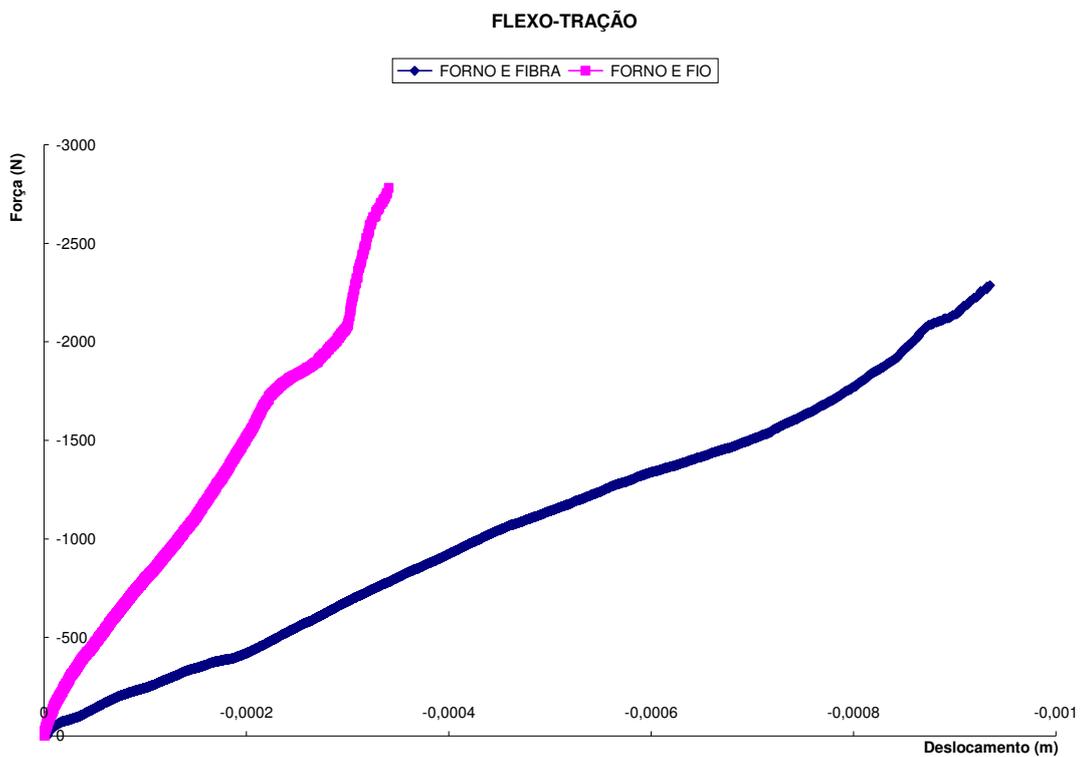


FIGURA 5.5 – Gráfico comparativo, forno e fibra x forno e fio.

Com a Fig. 5.6, pode-se ver que um concreto que foi ao forno e possui fibras, resiste a uma força maior do que um concreto que não foi ao forno, no entanto sua plasticidade fica prejudicada. O efeito memória de forma aumenta em aproximadamente 50% a capacidade de suportar cargas do concreto com fios de Nitinol após o mesmo ser submetido a esforços cíclico, o que indicaria a ação benéfica do efeito memória de forma na resistência a fadiga do concreto reforçado;

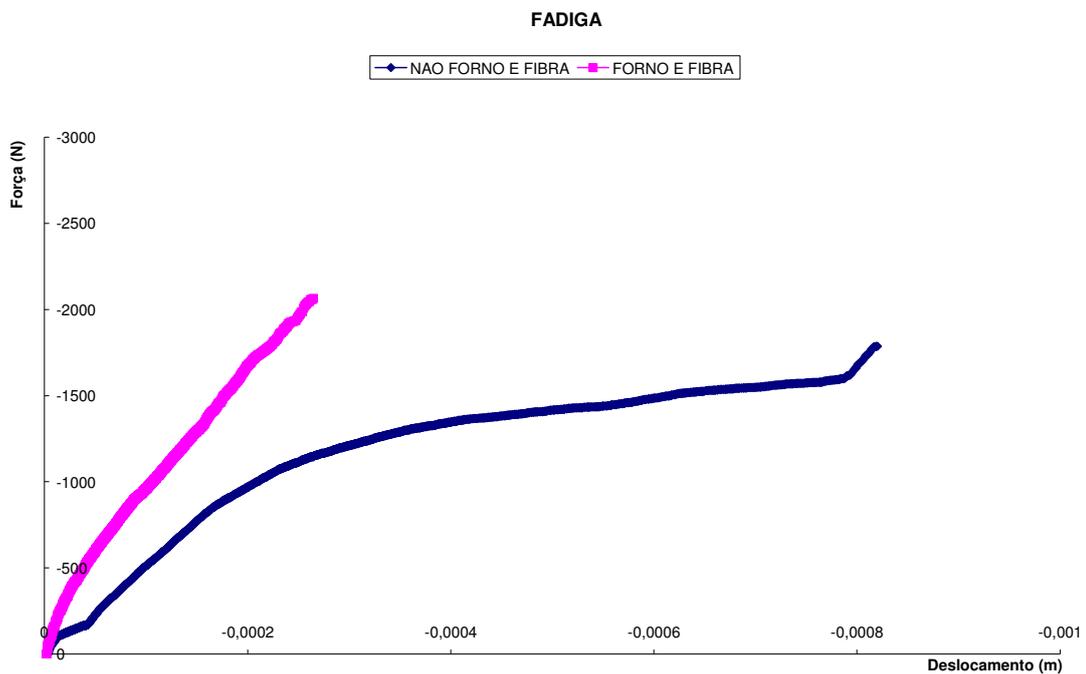


FIGURA 5.6 – Gráfico comparativo, não forno e fibra x forno e fibra.

Em relação à fadiga, o material que foi ao forno, suporta uma carga maior do que um concreto que não foi ao forno, conforme Fig. 5.7. O efeito memória de forma aumenta em aproximadamente 30% a capacidade de suportar cargas do concreto com fibras curtas de Nitinol após o mesmo ser submetido a esforços cíclico, por outro lado parece diminuir a pseudoplasticidade do composto.

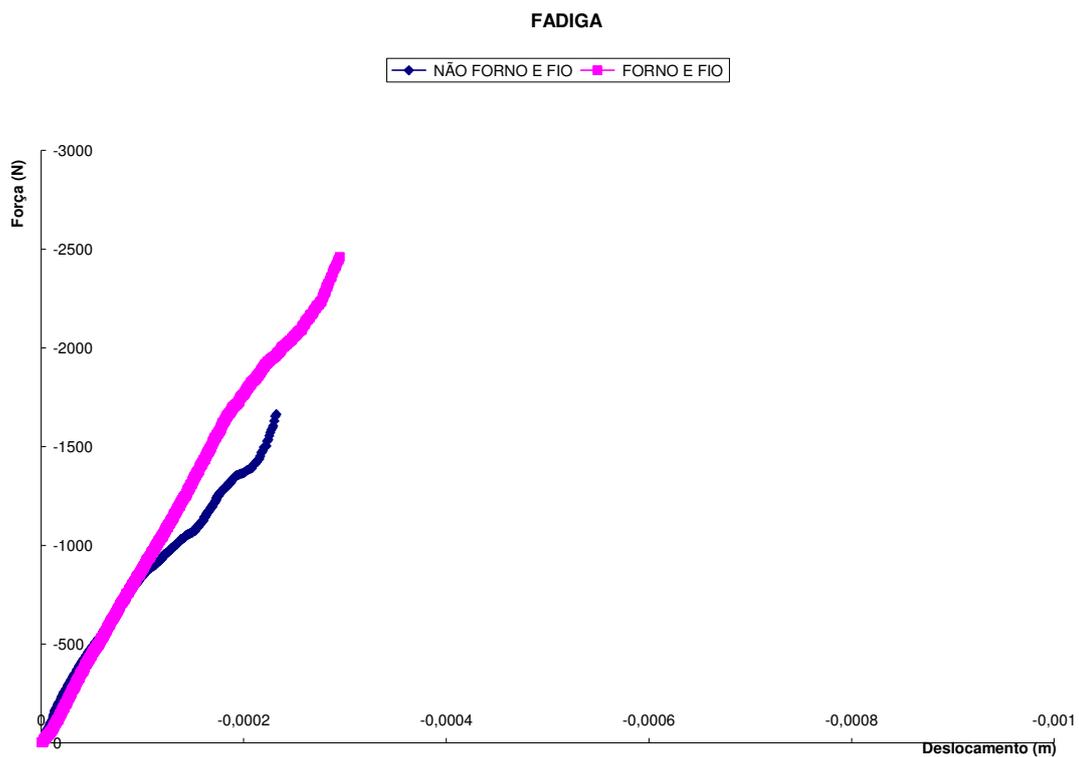


FIGURA 5.7 – Gráfico comparativo, não forno e fio x forno e fio.

Em relação à análise estatística, foi feita uma planilha com todos os CPs ensaiados, onde foram levados em conta os fatores como Tratamento (foi ao forno ou não foi ao forno), Tempo (sete dias de cura, quatorze dias de cura ou vinte e oito dias de cura), Mistura (CPs com fio ou com fibra), Ensaio (fadiga seguida de flexo-tração ou flexo-tração propriamente dita), Tensão máxima, Deslocamento máximo, Tenacidade, Comprimento, Altura e Largura dos CPs. Em cunhos estatísticos, adotou-se um erro aceitável de até 5% em relação à significância, sendo o efeito em estudo aceitável se o mesmo for menor ou igual a 5%. Após um processamento dos dados com o SPSS obteve-se os seguintes resultados:

A TAB. 5.1 mostra que o comprimento, altura e espessura apresentaram variações próximas ou inferiores a 5%, o que indica uma variação aceitável, no ponto de vista experimental. A força, deslocamento e a tensão tiveram grandes variações. A tenacidade teve uma discrepância muito grande em relação aos outros fatores. O comprimento, altura e a espessura, não tiveram grandes variações, sendo seus valores de 1,7% , 2,4% e 5,8% respectivamente, devido ao controle rigoroso no corte e confecção das fôrmas, assim como na concretagem das mesmas.

TABELA 5.1 – Estatística Descritiva Global dos Ensaios

Fatores Avaliados	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
Força [N]	587,28	2781,16	1553,91	427,61	27,5%
Deslocamento[m]	0,00	$9,35 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-4}$	$2,03 \times 10^{-4}$	70,3%
Tensão Máxima[Pa]	1,73	7,86	4,63	1,34	28,8%
Tenacidade[Nxm]	$5,3 \times 10^{-5}$	9,30	0,34	1,01	301,4%
Comprimento[m]	0,15	0,17	0,16	$2,75 \times 10^{-3}$	1,7%
Altura[m]	0,04	0,04	0,04	$9,66 \times 10^{-4}$	2,4%
Espessura[m]	$30,77 \times 10^{-3}$	$43,32 \times 10^{-3}$	$39,09 \times 10^{-3}$	$2,25 \times 10^{-3}$	5,8%

A TAB. 5.2 representa que a força teve uma significância de 2,1% e a sua análise na TAB. 5.3 expressa que os ensaios poderiam ser realizados aos sete e vinte e oito dias apenas, se a análise fosse estritamente a força.

TABELA 5.2– Estatística Descritiva Global dos Ensaio- Significância-Cura

Fatores Avaliados	Significância
Força [N]	2,1%
Deslocamento[m]	11,7%
Tensão Máxima[Pa]	4,5%
Tenacidade[Nxm]	30,8%

De acordo com a TAB. 5.3, apesar da significância ser acima de 5% pode-se verificar que de acordo com o programa SPSS, se existir um valor na Comparação 1 e na Comparação 2 simultaneamente, indica que o efeito em estudo, no caso a força, poderá ser adquirido apenas no Tempo referido, neste caso 14 dias. Essa análise garante uma avaliação mais precisa e econômica por direcionar os ensaios apenas a um período, reduzindo assim a quantidade de CPs dos outros períodos que não são relevantes.

TABELA 5.3 – Estatística Descritiva Global dos Ensaio - Força

Tempo (dias)	Comparação 1	Comparação 2
7	1441,82	
14	1488,59	1488,59
28		1737,884
Significância	90,7%	69%

A TAB. 5.5 indica que o deslocamento foi significativo, pois o valor foi de 0,1% e na TAB. 5.4 percebe-se que com a flexo-tração, houve um aumento de 72,5% no deslocamento em relação a um CP ensaiado apenas com fadiga seguida de flexo-tração.

TABELA 5.4 – Estatística Descritiva Global dos Ensaiois - Flexo-tração e Fadiga com Flexo-tração

Fatores Avaliados	Tipo de Ensaio	Média
Força [N]	Flexo-tração	1552,54
	Fadiga e Flexo-tração	1553,98
Deslocamento[m]	Flexo-tração	$3,40 \times 10^{-4}$
	Fadiga e Flexo-tração	$1,97 \times 10^{-4}$
Tensão Máxima[Pa]	Flexo-tração	4,72
	Fadiga e Flexo-tração	4,52
Tenacidade[Nxm]	Flexo-tração	0,45
	Fadiga e Flexo-tração	0,16

TABELA 5.5 – Estatística Descritiva Global dos Ensaiois- Significância- Flexo-tração e Fadiga com Flexo-tração

Fatores Avaliados	Significância
Força [N]	98,8%
Deslocamento[m]	0,1%
Tensão Máxima[Pa]	54,4%
Tenacidade[Nxm]	20%

A TAB. 5.7 indica que o deslocamento foi significativo, pois o valor foi de 0,1% e na TAB. 5.6 percebe-se os que CPs com a fibra, houve um aumento de 67,6% no deslocamento em relação a um corpo de prova ensaiado apenas com fio.

TABELA 5.6 – Estatística Descritiva Global dos Ensaios - Fio e Fibra

Fatores Avaliados	Tipo de Mistura	Média
Força [N]	Fio	496,23
	Fibra	356,89
Deslocamento[m]	Fio	$1,22 \times 10^{-4}$
	Fibra	$2,38 \times 10^{-4}$
Tensão Máxima[Pa]	Fio	1,57
	Fibra	1,02
Tenacidade[Nxm]	Fio	1,45
	Fibra	0,19

TABELA 5.7 – Estatística Descritiva Global dos Ensaios- Significância- Fio e Fibra

Fatores Avaliados	Significância
Força [N]	64,3%
Deslocamento[m]	0,1%
Tensão Máxima[Pa]	5,4%
Tenacidade[Nxm]	55,1%

A TAB. 5.9 indica que a força e a tensão foram significativas, e na TAB. 5.8 houve um acréscimo de 40% e 43,1%, para concretos que foram ao forno, se comparados com os que não foram ao forno.

TABELA 5.8 – Estatística Descritiva Global dos Ensaios - Não Forno e Forno

Fatores Avaliados	Tipo de Tratamento Térmico	Média
Força [N]	Não Forno	1297,60
	Forno	1816,47
Deslocamento[m]	Não Forno	$2,63 \times 10^{-4}$
	Forno	$3,16 \times 10^{-4}$
Tensão Máxima[Pa]	Não Forno	3,81
	Forno	5,46
Tenacidade[Nxm]	Não Forno	0,22
	Forno	0,46

TABELA 5.9 – Estatística Descritiva Global dos Ensaios- Significância- Não Forno e Forno

Fatores Avaliados	Significância
Força [N]	0%
Deslocamento[m]	24,3%
Tensão Máxima[Pa]	0%
Tenacidade[Nxm]	29%

A TAB. 5.10 indica os fatores em estudo conforme pode ser verificado no organograma abaixo (FIG. 5.8) .

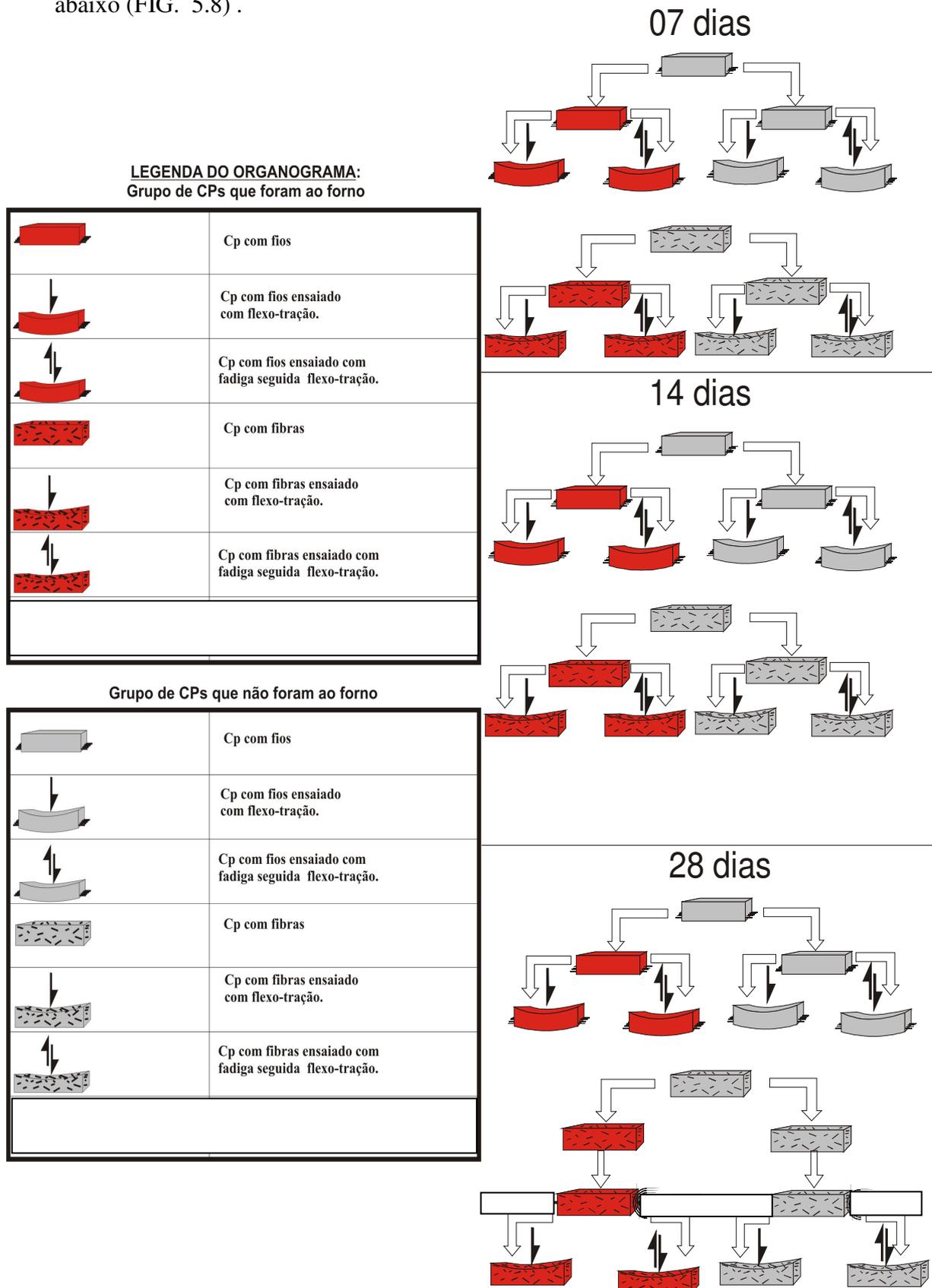


FIGURA 5.8 – Organograma dos ensaios.

TABELA 5.10 – Estatística Descritiva Global dos Ensaios – Fator em Estudo

Tipo de Tratamento Térmico	Não Forno Forno
Tempo	07 dias 14 dias 28 dias
Tipo de Mistura	Fio Fibra
Tipo de Ensaio	Flexo-tração Fadiga e Flexo-tração

A TAB. 5.11 indica que os efeitos em estudo como tratamento térmico e tratamento térmico X mistura foram significativos, e pode ser estudado estatisticamente.

TABELA 5.11 – Estatística Descritiva Global dos Ensaios - Significância - Combinações

Combinações Pertinentes	Significância
Tratamento Térmico (Forno / Não Forno)	0%
Tempo (7 / 14 /28 dias)	7,4%
Mistura (Fio / Fibra)	19,3%
Ensaio (Fadiga+Flexo-Tração / Flexo-Tração)	75,9%
Tratamento Térmico X Tempo	9%
Tratamento Térmico X Mistura	0%
Tempo X Mistura	55,8%
Tratamento Térmico X Ensaio	34,2%
Tempo X Ensaio	9,2%
Mistura X Ensaio	28%

A TAB.5.13 indica que a força, deslocamento e tenacidade foram estatisticamente significativos, pois os valores são inferiores a 5% e na TAB 5.12 percebe-se que os CPs com fibra e que não foram ao forno houve um aumento de 17,5% , 80,8% e 83,4% na força, deslocamento e tenacidade, respectivamente se comparado ao concreto com fios e que não foram ao forno.

TABELA 5.12 – Estatística Descritiva Global dos Ensaio – CP's Não Forno

Fatores Avaliados	Tipo de Mistura	Média
Força [N]	Fio	1193,30
	Fibra	1401,89
Deslocamento[m]	Fio	$1,88 \times 10^{-4}$
	Fibra	$3,39 \times 10^{-4}$
Tensão Máxima[Pa]	Fio	3,69
	Fibra	3,94
Tenacidade[Nxm]	Fio	0,15
	Fibra	0,28

TABELA 5.13 – Estatística Descritiva Global dos Ensaio – Significância - CP's Não Forno

Fatores Avaliados	Significância
Força [N]	0,9%
Deslocamento[m]	0,8%
Tensão Máxima[Pa]	26,7%
Tenacidade[Nxm]	3,4%

A TAB. 5.15 indica que a força, deslocamento e tensão máxima foram significativas, pois seus valores foram inferiores à 5% e na TAB. 5.14 percebe-se que os CPs com fio tiveram um acréscimo de 20,7% em relação aos CPs com fibra considerando-se a força. Considerando o deslocamento, os CPs com fibra tiveram um acréscimo de 55,1% em relação aos CPs com fio. Ao analisar a tensão máxima percebe-se que os CPs com fio tiveram um aumento de 32,6% em relação aos CPs com fibra.

TABELA 5.14 – Tipo de Tratamento Térmico - CP's Forno

Fatores Avaliados	Tipo de Mistura	Média
Força [N]	Fio	2000,95
	Fibra	1657,16
Deslocamento[m]	Fio	$2,44 \times 10^{-4}$
	Fibra	$3,78 \times 10^{-4}$
Tensão Máxima[Pa]	Fio	6,29
	Fibra	4,74
Tenacidade[Nxm]	Fio	0,69
	Fibra	0,26

TABELA 5.15 – Estatística Descritiva Global dos Ensaio – Significância - CP's Forno

Fatores Avaliados	Significância
Força [N]	0,5%
Deslocamento[m]	4,5%
Tensão Máxima[Pa]	0,0%
Tenacidade[Nxm]	33,9%

Pode-se verificar que a força e a tensão foram significativos, TAB. 5.17, no caso de se estudar um corpo de prova com fios, e comparando o tipo de tratamento percebe-se um ganho de 67,7% em um cp que foi ao forno, em relação à força e um ganho de 70,4% em relação à tensão, ambos em relação a um cp que não foi ao forno, conforme TAB. 5.16.

TABELA 5.16 – Estatística Descritiva Global dos Ensaiois - Tipo de Mistura - Fio

Fatores Avaliados	Tipo de Tratamento Térmico	Média
Força [N]	Não Forno	1193,30
	Forno	2000,95
Deslocamento[m]	Não Forno	$1,88 \times 10^{-4}$
	Forno	$2,48 \times 10^{-4}$
Tensão Máxima[Pa]	Não Forno	3,69
	Forno	6,29
Tenacidade[Nxm]	Não Forno	0,15
	Forno	0,69

TABELA 5.17 – Estatística Descritiva Global dos Ensaiois – Significância - Tipo de Mistura - Fio

Fatores Avaliados	Significância
Força [N]	0,0%
Deslocamento[m]	14,8%
Tensão Máxima[Pa]	0,0%
Tenacidade[Nxm]	27,9%

No caso de se analisar CPs com fibras, pode-se verificar que a força e a tensão foram significativos, TAB. 5.19, no caso de se estudar um corpo de prova com fios, e comparando o tipo de tratamento percebe-se um ganho de 18,2% em um cp que foi ao forno, em relação à força e um ganho de 20,4% em relação à força, ambos em relação a um cp que não foi ao forno, conforme TAB. 5.18.

TABELA 5.18 – Estatística Descritiva Global dos Ensaios - Tipo de Mistura - Fibra

Nota: tipo de mistura= Fibra	Tipo de Tratamento Térmico	Média
Força	Não Forno	1401,89
	Forno	1657,15
Deslocamento	Não Forno	$3,39 \times 10^{-4}$
	Forno	$3,78 \times 10^{-4}$
Tensão Máxima	Não Forno	3,94
	Forno	4,75
Tenacidade	Não Forno	0,28
	Forno	0,26

TABELA 5.19 – Estatística Descritiva Global dos Ensaios – Significância - Tipo de Mistura - Fibra

Fatores Avaliados	Significância
Força [N]	1,7%
Deslocamento[m]	59,7%
Tensão Máxima[Pa]	0,8%
Tenacidade[Nxm]	69,8%

A significância foi de 40% que é maior que 5%, ou seja, indica uma variação estatisticamente não aceitável, apesar disso, tem-se que o módulo de Elasticidade Dinâmico teve um acréscimo de 6,13%, se for comparado o Cp que foi ao forno com o que não foi ao forno, conforme TAB. 5.20.

6

CONCLUSÕES

Dos ensaios realizados pode-se concluir que:

- 1- a presença de fibras curtas de Nitinol, de forma semelhante às fibras curtas de aço, aumenta a pseudoplasticidade do composto;
- 2- a presença de Nitinol no concreto na forma de fibras curtas é mais eficaz, em relação à tenacidade no ensaio de flexo-tração, do que a presença de fios;
- 3- o efeito memória de forma das fibras curtas aumenta a tenacidade do concreto aproximadamente de 100 %;
- 4- a capacidade portante do concreto com fios Nitinol é fortemente influenciada pelo efeito memória de forma e a capacidade de carga aumenta em aproximadamente 180%;
- 5- o efeito memória de forma nos concretos com fios funciona como uma protensão;

6- o efeito memória de forma aumenta em aproximadamente 50% a capacidade de suportar cargas do concreto com fios de Nitinol após o mesmo ser submetido a esforços cíclico, o que indicaria a ação benéfica do efeito memória de forma na resistência a fadiga do concreto reforçado;

7- o efeito memória de forma aumenta em aproximadamente 30% a capacidade de suportar cargas do concreto com fibras curtas de Nitinol após o mesmo ser submetido a esforços cíclico, por outro lado parece diminuir a pseudoplasticidade do composto.

7

BIBLIOGRAFIA

ABNT- NBR 5739. Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto- Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1980, 3p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI – State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, 1974, pp. 535-551.

AIZAWA, S., KAKIZAWA, T., HIGASINO, M. – Case Studies of Smart Materials for Civil Structures. Smart Materials and Structures. v. 7, n. 5, October 1998, pp. 617-626.

AMARAL, E. M. – Concreto de Alta Resistência. Publicação da Associação Brasileira de Cimento Portland, 1993.

AURICCHIO, F. – Shape memory Alloys: Micromechanics, Macromodeling and Numerical Simulatio. Phd Thesis, Department Of Civil and Environmental Engineering, University of Califórnia at Berkeley, 1995.

BANTHIA, N., TROTTIER, J. F. – Influence of Fiber Geometry in Steel Fiber Reinforced. Wet-Mix Shotcrete. *Concrete International*, June 1994, pp. 27-32.

BANTHIA, N., TROTTIER, J. F. – Concrete Reinforced with Deformed Steel Fiber Part II: Toughness Characterization. *ACI Materials Journal*, March-April 1995, pp. 146-154.

BARATTA, A, CORBI, O – On TheDynamic Behaviour of Elastic-plastic Structures Equipped.with Pseudoelastic SMA Reinforcements, *Computational Materials Science*, 2002.

BASTOS, P. S. DOS S., PINHEIRO, L. M. Influência da Brita 2 em Concretos com fibras-de-aço, 42º Congresso Brasileiro do Concreto. Fortaleza, IBRACON, 2000.

BAZ, A., POH, S., RO, J., GILHEANY, J. – Control of Natural Frequencies of Nitinol-Reinforced Composite Beams. Department of Mechanical Engineering, The Catholic University of America, Washington, 1994, pp. 171-185.

BERNARDINI, D., BRANCALEONI, F., PAPACHARALABOUS, E., ZISIADIS, A. – Shaking Table Tests for reinforced Concrete Frames with Conventional and Shape Memory Alloy Seismic Protection. Università di Roma Ter, Italy, AIAS Inc., Athens. Greece, 1999.

BONCI, A., CARLUCCIO, G., CASTELLANO, M. G., CROCI, G., INFANTI, S., VISKOVIC, A. – Use of Shock Transmission Units and seismic Protection of Monuments. University of Roma “La Sapienza”, 2001.

BRUNO, S., VALENTE, C. – Comparative Response Analysis of Conventional and Inovative Protection Strategies. *Earthquake Engineering and Structural dynamics*, 2002.

CARRASCO, E.V.M. – Análise experimental de tensões. Belo Horizonte, DEES-UFGM, 2003.

CROCI, G., BONCI, A., VISKOVIC, A. – Use of shape memory alloy devices in the Basilica of San Francesco of Assisi, in Shape memory alloy devices for Seismic Protection of Cultural Heritage Structures, Final Workshop – ISTECH Project, June 2000.

DESROCHES, R., LEON. R., RES, G., OCEL, J. – Seismic Design and retrofit Using Shape memory Alloy. 2002.

DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653p.

DOLCE, M., NICOLETTI, M. – Guide-Lines for SMA-Based Seismic Devices. University of Basilicata, Potenza. Italy, 2000.

FIGUEIREDO, A. D., HELENE, P. R. L. – Estudo da Dosagem do Concreto Projetado Via Úmida Reforçado com fibras de Aço. International Congress on High Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures, Junho 1996, pp. 248-259.

FUGAZZA, D. – Shape Memory Alloy Devices in Earthquake Engineering: Mechanical Properties, Constitutive Modeling and Numerical Simulations. Pavia, September, 2003.

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

FURLAND Jr., S. Vigas de Concreto com taxas reduzidas de Armadura de Cisalhamento: Influência do emprego de Fibras Curtas e de Protensão. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, 1995.

GHOMSHEI, M. M., TABANDEH, N., GHAZAVI, A., GORDANINEJAD, F. – Nonlinear Transient Response of Thick Composite Beam with Shape Memory Alloy Layers. Department of mechanical Engineering, University of Gilan, Iran, 2004.

HOLLAND, I. – State of the Art of Design Aspects and Research Needs in the Future. Bulletin d'information 193, CEB Comité Euro-International du Béton.

KEER, J.K. – Fiber Reinforced Concrete, in new reinforced concretes. Surrey University Press, v. 2, 1984.

LAU, K. – Vibrations Characteristics of SMA Composite Beams with Different Boundary Conditions. Department of Mechanical Engineering. The Hong Kong Polytechnic University, 2002.

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

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.

MONTEIRO, R. V. J, PEREIRA, L. A. M, COSTA, M. M. J. – Novos Materiais com Potencialidades em Engenharia Eletrotécnica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2002/2003. pp. 8-11.

MORAIS, W. A., ABREU, A. L. T, GODEFROID, L. B. – Simulação Computacional de Fratura por Tração Monotônica e por Fadiga em Materiais Compósitos Fibrosos.

MOTA, A. R., – Introdução ao Estudo da Transformação Martensítica em ligas de Cobre com Memória de Forma. Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP-DEMA, Outubro 2002.

NASCIMENTO, F. C., – Efeito do Tamanho de Grão nas Propriedades Mecânicas e na Recuperação de Forma de Ligas Inoxidáveis com Efeito de Memória de Forma, Tese de Doutorado, DEMA/FEM/UNICAMP, Campinas, SP, 2002.

NEVILLE, A. M. – Propriedades do Concreto. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1986.

OTSUKA, K., WAYMAN, C. M. – Shape Memory Materials. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

PINTO JÚNIOR, N. DE O., MORAES, A. A. DE. Concreto reforçado com fibras-de-aço – CRFA, 38ª Reunião Anual do IBRACON. Ribeirão Preto, IBRACON, 1996.

PFEIL, WALTER – Concreto Protendido, Introdução, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., volume 1, 1985.

PORTER, H.F. –Preparation of Concrete from Selection of Materials to Final Disposition. Proc. National Association of Cement Users. ACI, v. 6, 1910, pp.296.

SAADAT, S.; SALICHS, J.; NOORI, M.; HOU, Z.; DAVOODI, H.; BAR-ON, I., SUZUKI, Y.; MASUDA, A., – An Overview of Vibration and Seismic Applications of NiTi Shape Memory Alloy, Smart Mater. Struct. 11, 2002, 218-229.

SHAH, S.P.; SWARTZ, S.E.; OUYANG, C. – Fracture Mechanics of Concrete - Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-brittle Materials. New York, John Wiley & Sons, 1995.

SOROUSHIAN, P., BAYASI, Z. – Fiber Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced. ACI Materials Journal, March-April 1991, pp. 129-133.

SURENDRA, P. S. – Do Fibers Increase the Tensile Strength of Cement-Based Matrixes? ACI Materials Journal, November-December 1991, pp. 595-602.

SÜSSEKIND, J. C., Curso de concreto - I, II e III. Porto Alegre, Ed. Globo, 1980.

SWAMY, R. N., MANGAT, P. S. – Influence of Fiber Geometry on the Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete. Cement and Concrete Research, v. 4, May 1974, pp. 451-465.

SWAMY, R.N. – Fiber Reinforcement of Cement and Concrete. Matériaux et Constructions, v. 8, Mai-Jun 1975, pp. 235-254.

VENUGOPALAN, R., TRÉPANIÉ, C. – Assessing the Corrosion Behavior of Nitinol for Minimally-Invasive Device Design, Fremont, California, USA. 2000.

YOUNG, J. F. et al. The Science and Technology of Civil Engineering Materials. First Edition. United States of America: Prentice-Hall, Inc., 1998. 384p.

8

ANEXO

2

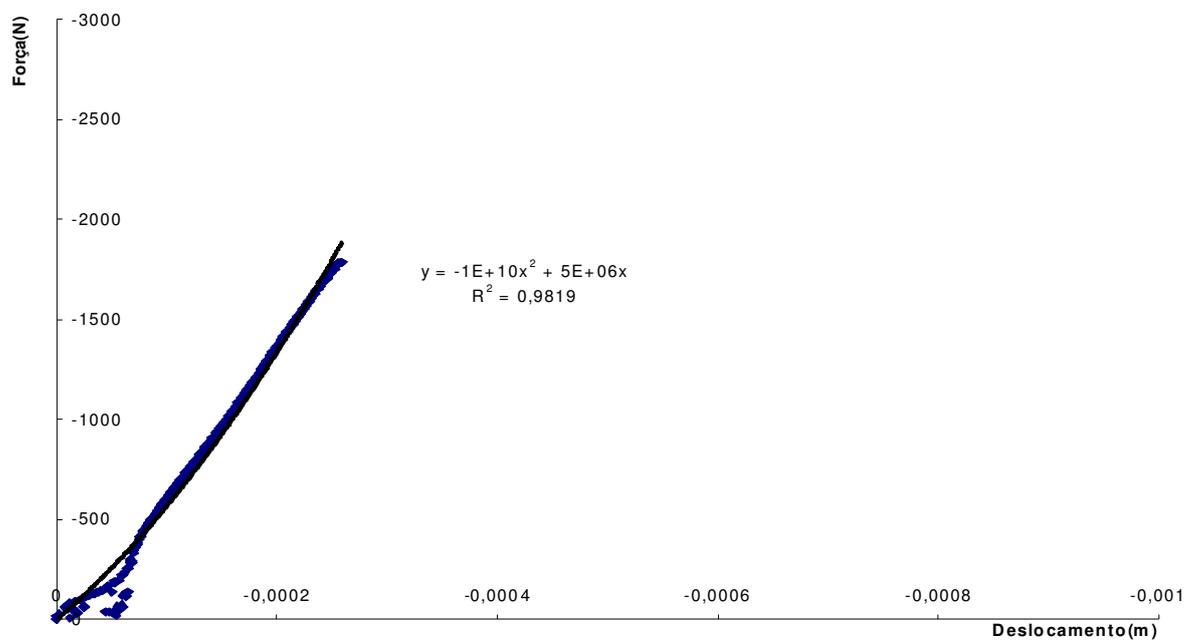


FIGURA 01 – Gráfico cp 02 (não foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

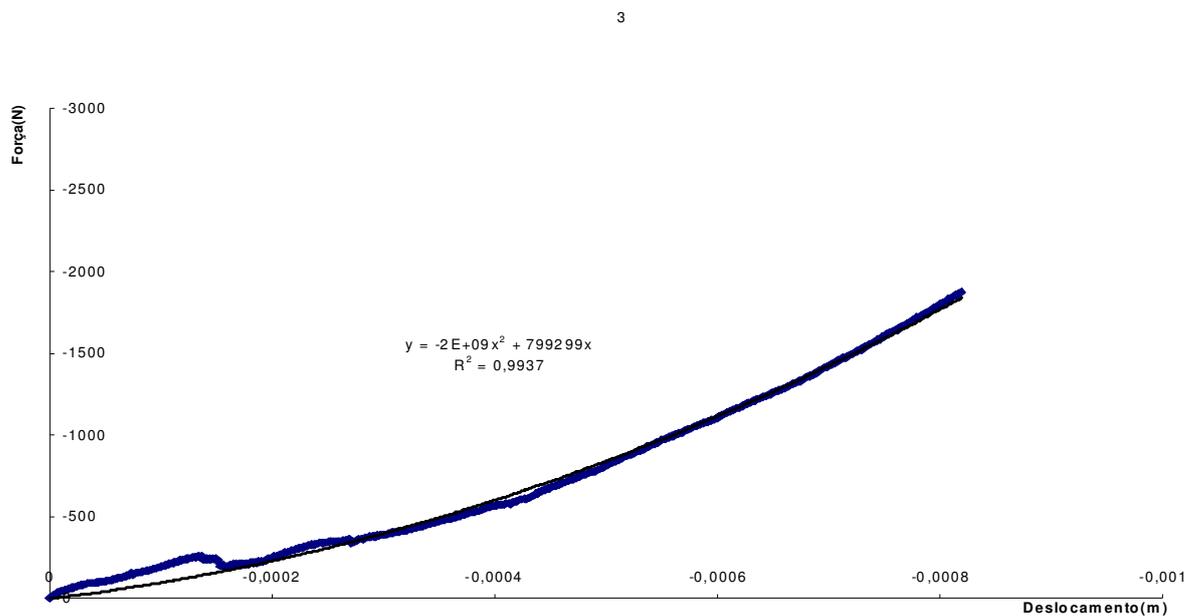


FIGURA 02 – Gráfico cp 03 (não foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

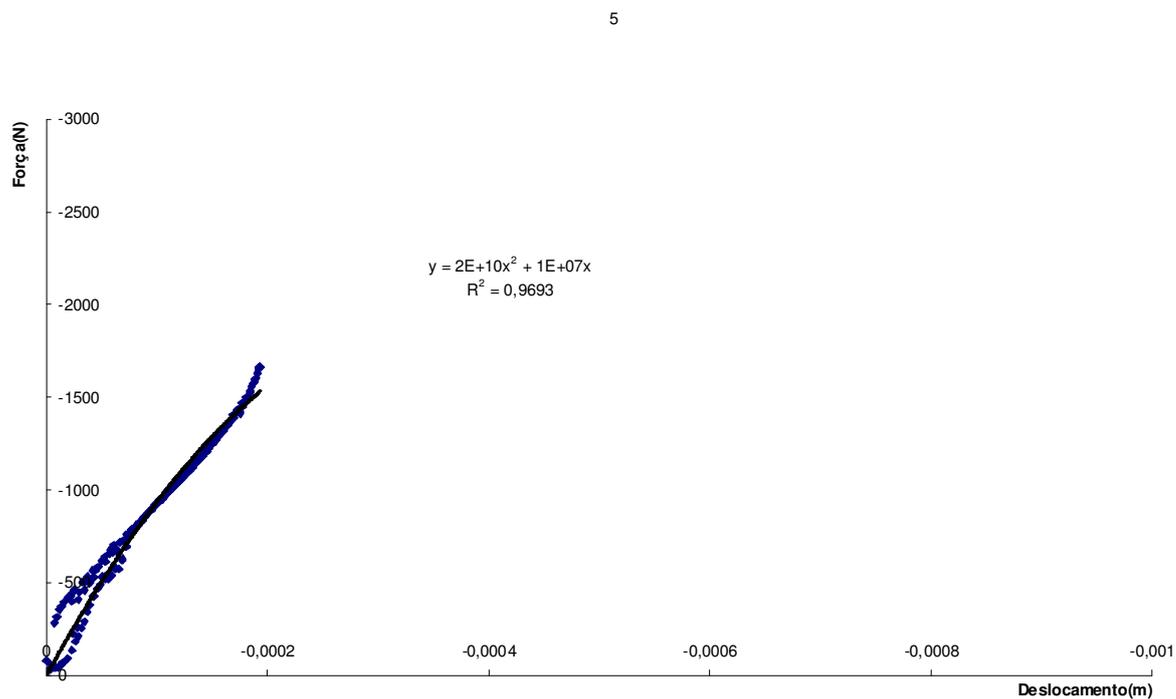


FIGURA 03 – Gráfico cp 05 (não foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

6

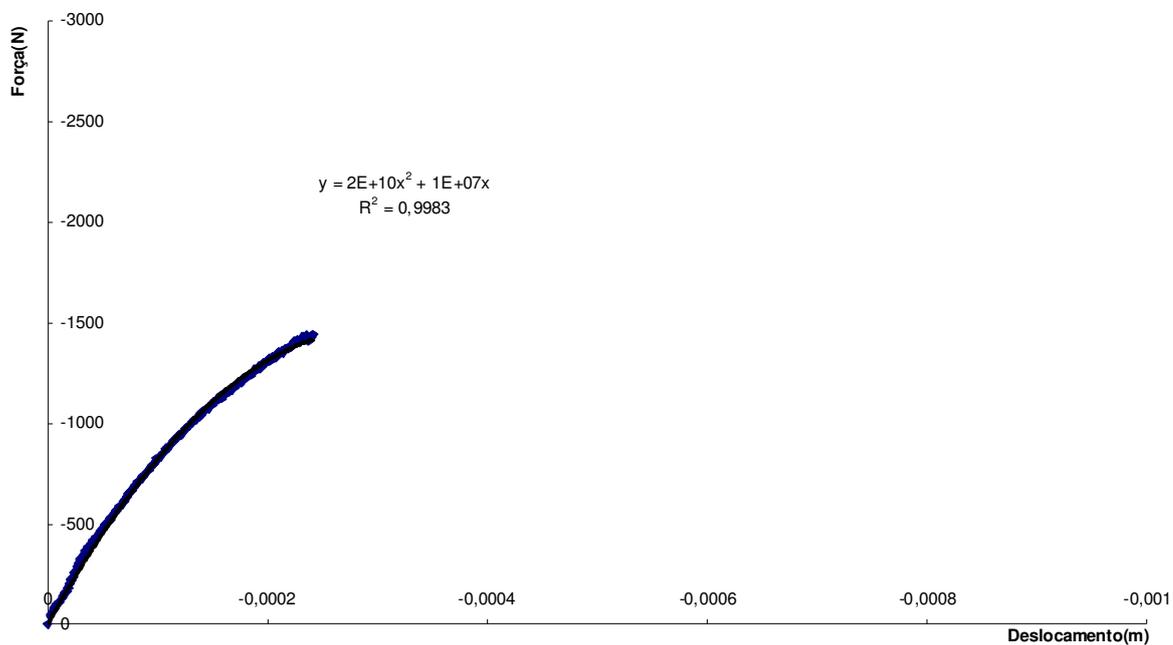


FIGURA 04 – Gráfico cp 06 (não foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

7

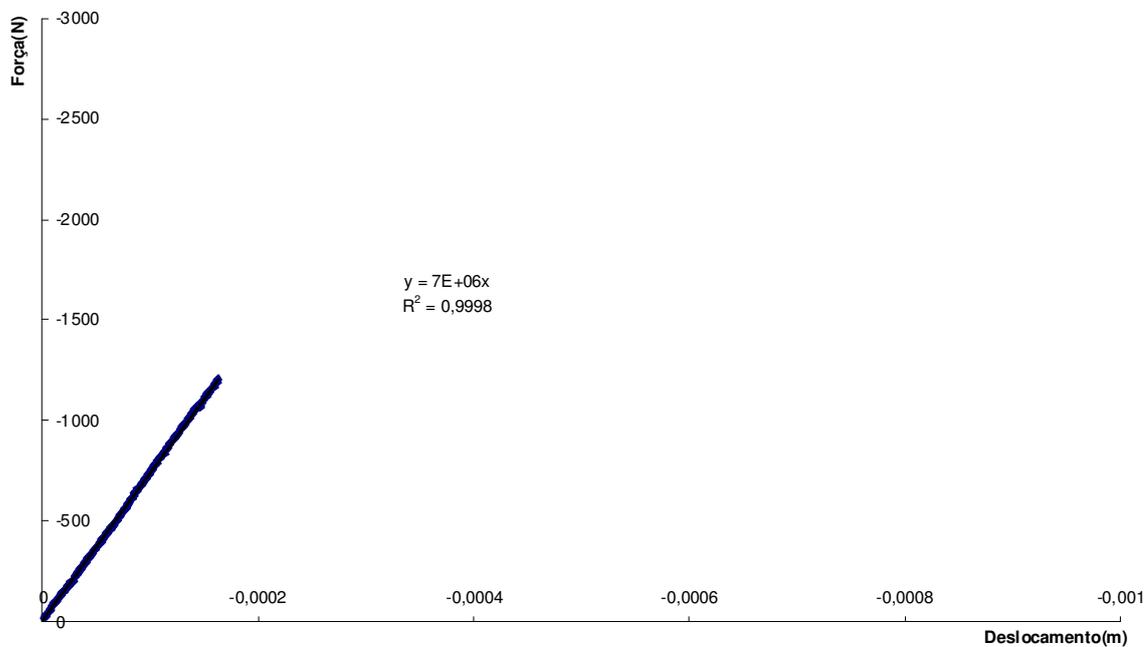


FIGURA 05 – Gráfico cp 07 (foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

8

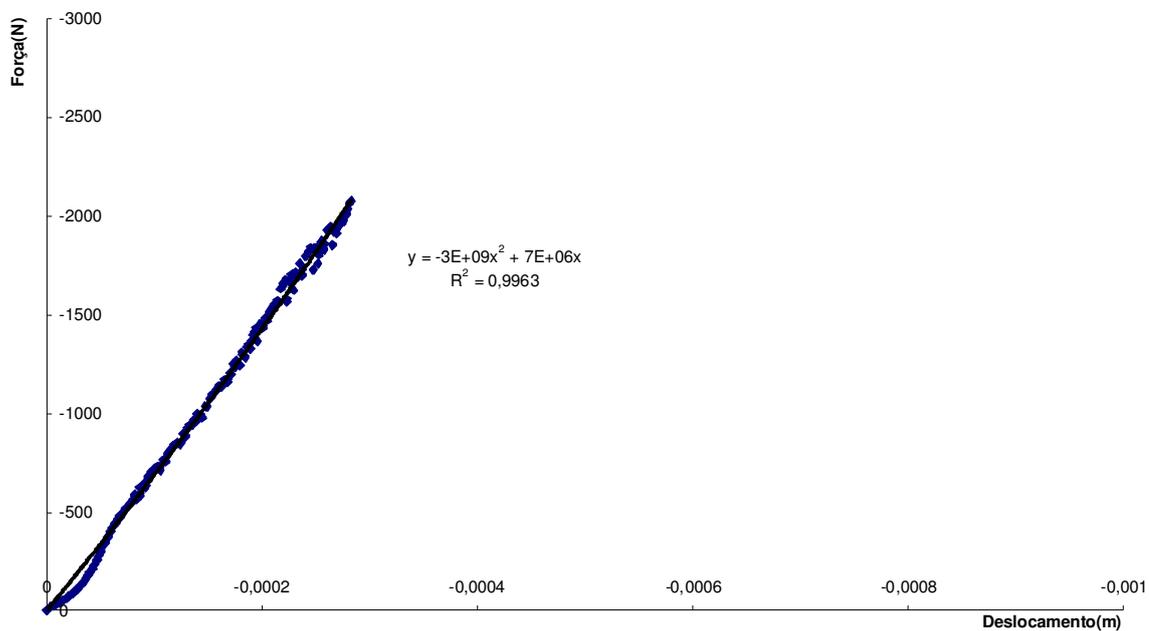


FIGURA 06 – Gráfico cp 08 (foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

9

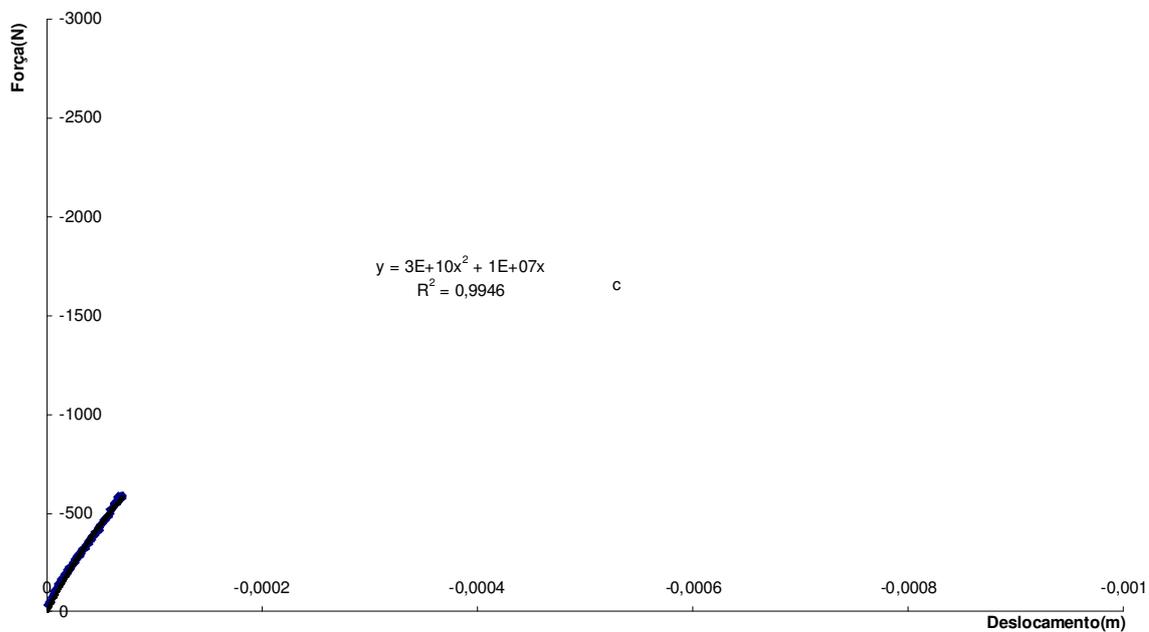


FIGURA 07 – Gráfico cp 09 (não foi ao forno, fio, flexo-tração).

10

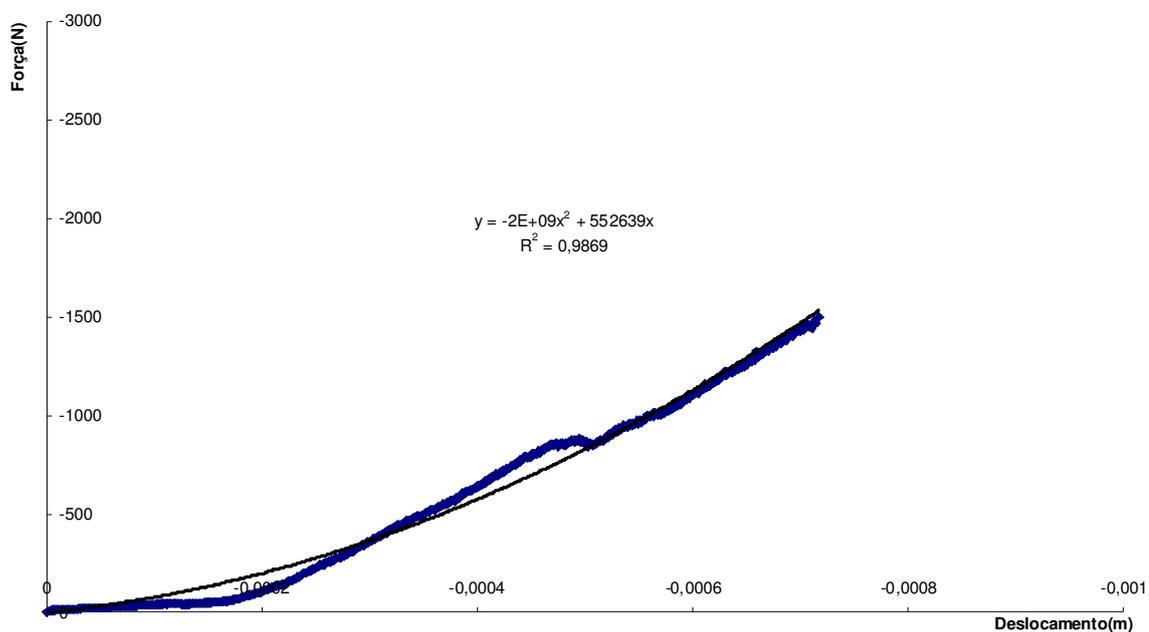


FIGURA 08 – Gráfico cp 10 (não foi ao forno, fibra, flexo-tração).

11

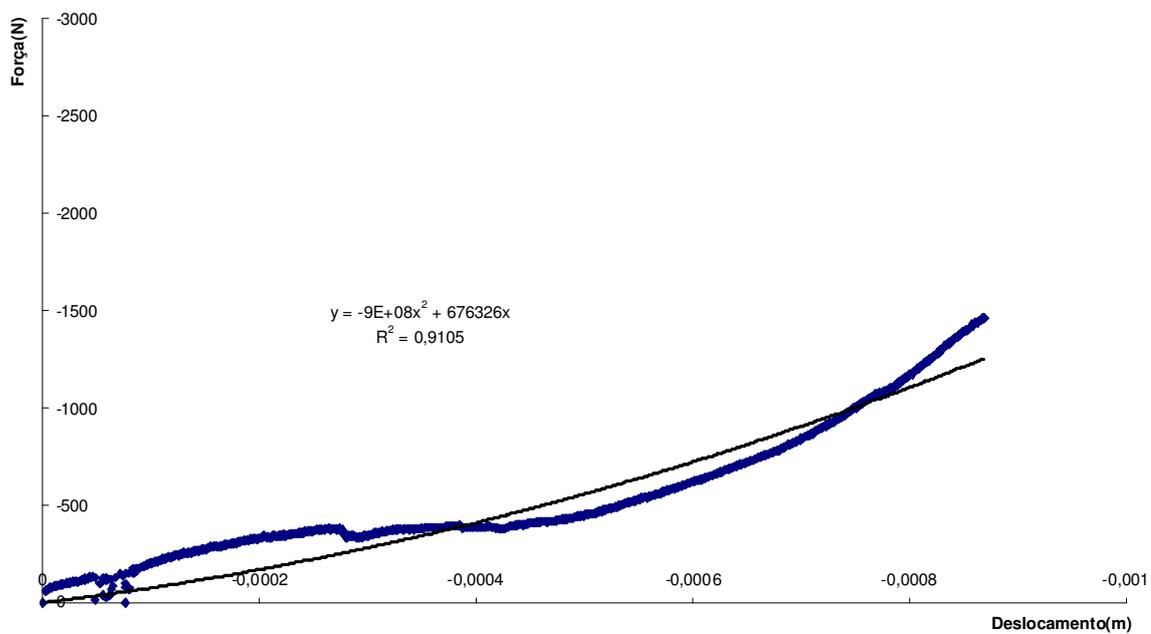


FIGURA 09 – Gráfico cp 11 (foi ao forno, fibra, flexo-tração).

12

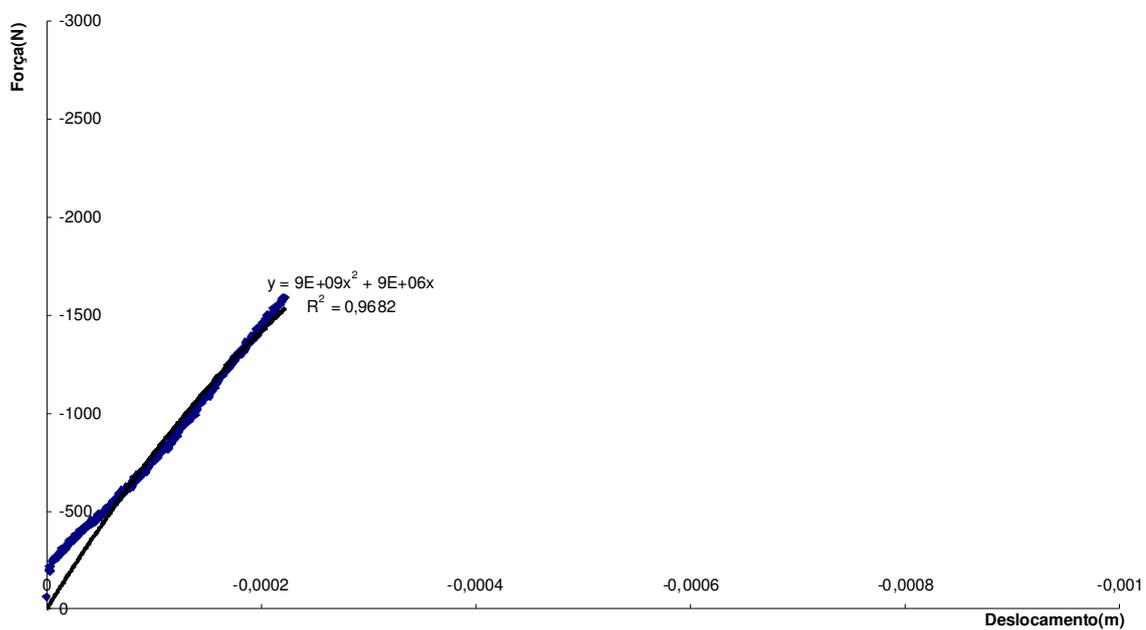


FIGURA 10 – Gráfico cp 12 (foi ao forno, fio, flexo-tração).

13

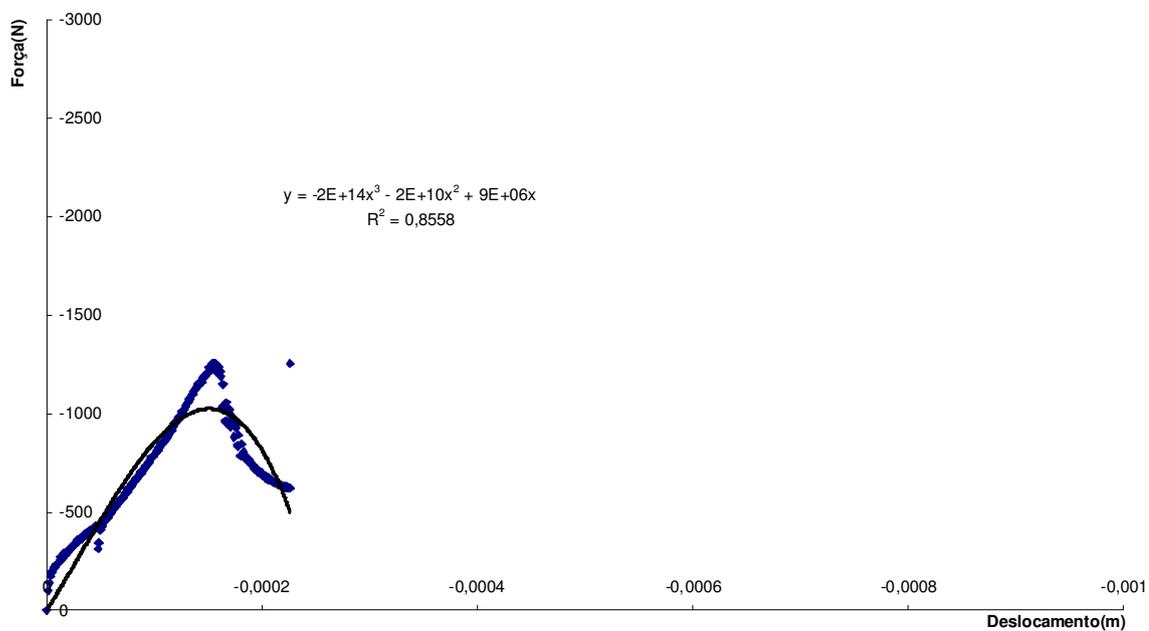


FIGURA 11 – Gráfico cp 13 (não foi ao forno, fio, flexo-tração).

14

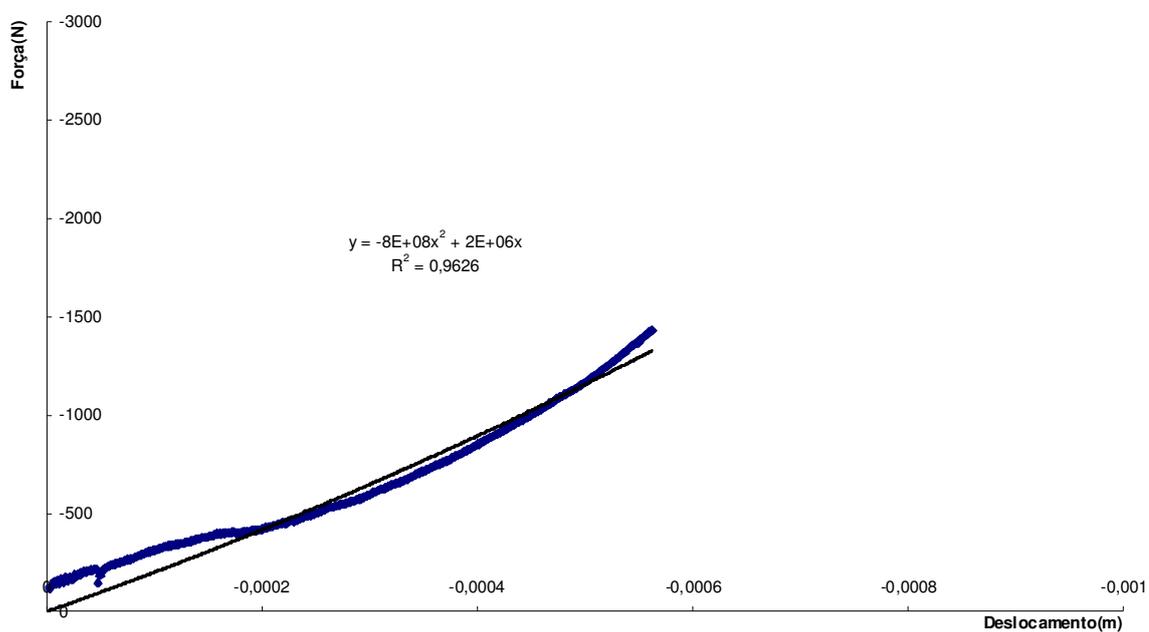


FIGURA 12 – Gráfico cp 14 (não foi ao forno, fibra, flexo-tração).

15

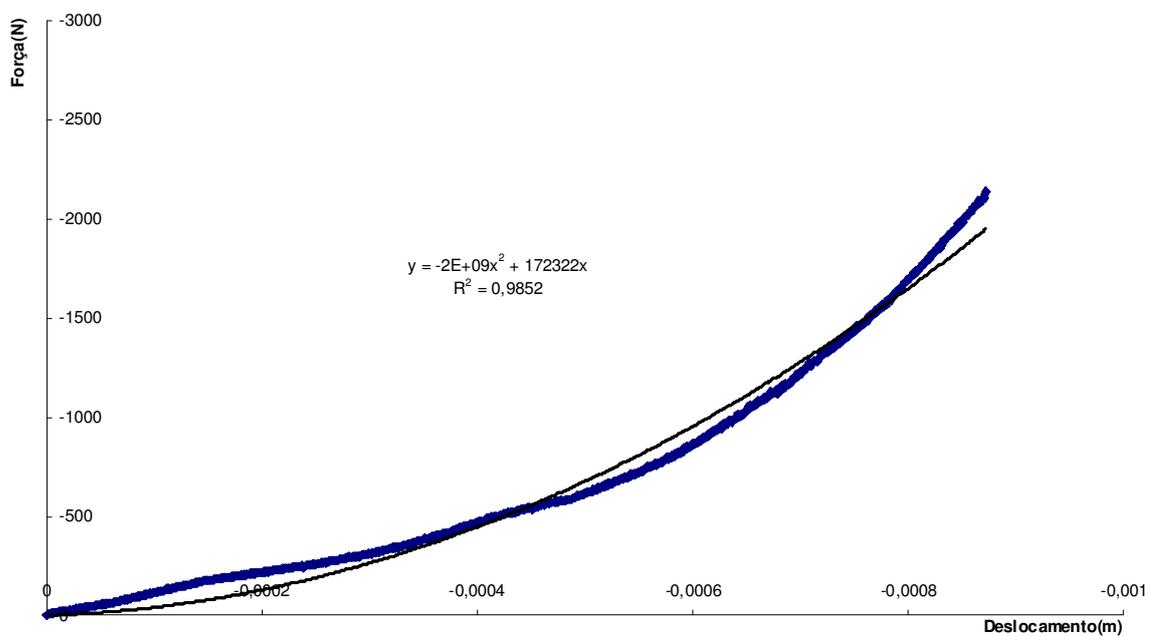


FIGURA 13 – Gráfico cp 15 (foi ao forno, fibra, flexo-tração).

16

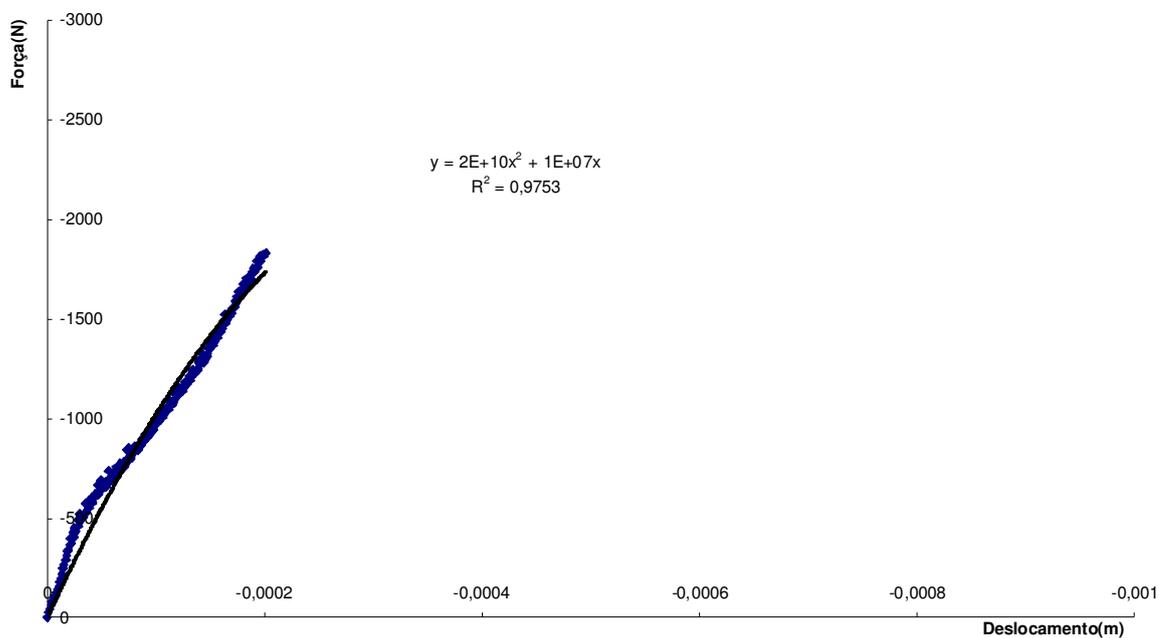


FIGURA 14 – Gráfico cp 16 (foi ao forno, fio, flexo-tração).

19

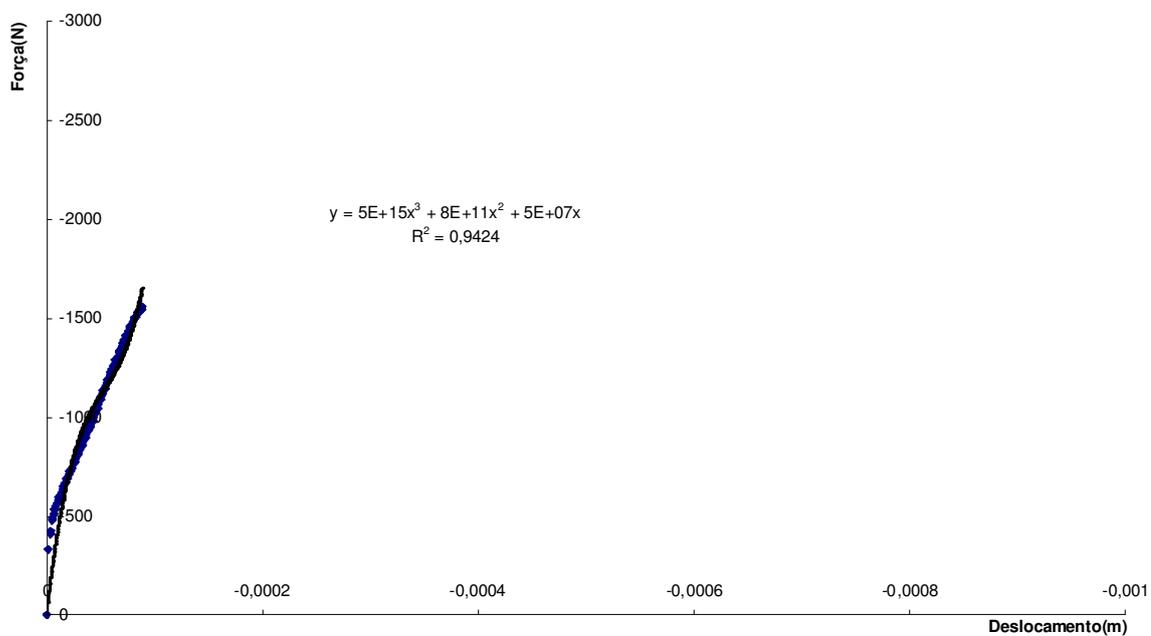


FIGURA 15 – Gráfico cp 19 (foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

20

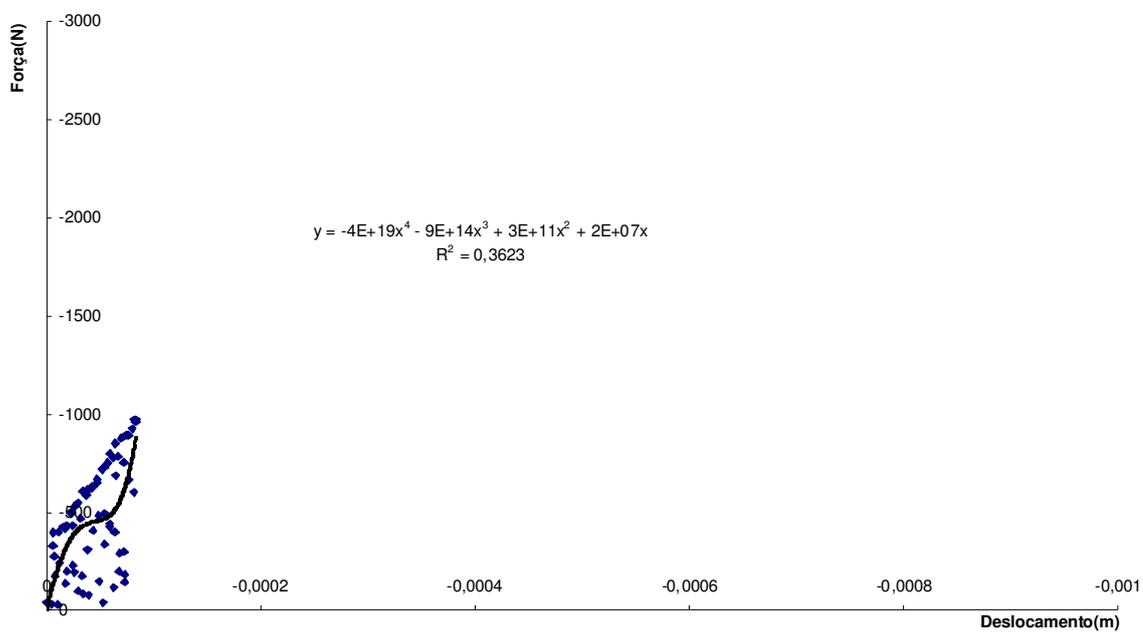


FIGURA 16 – Gráfico cp 20 (não foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

21

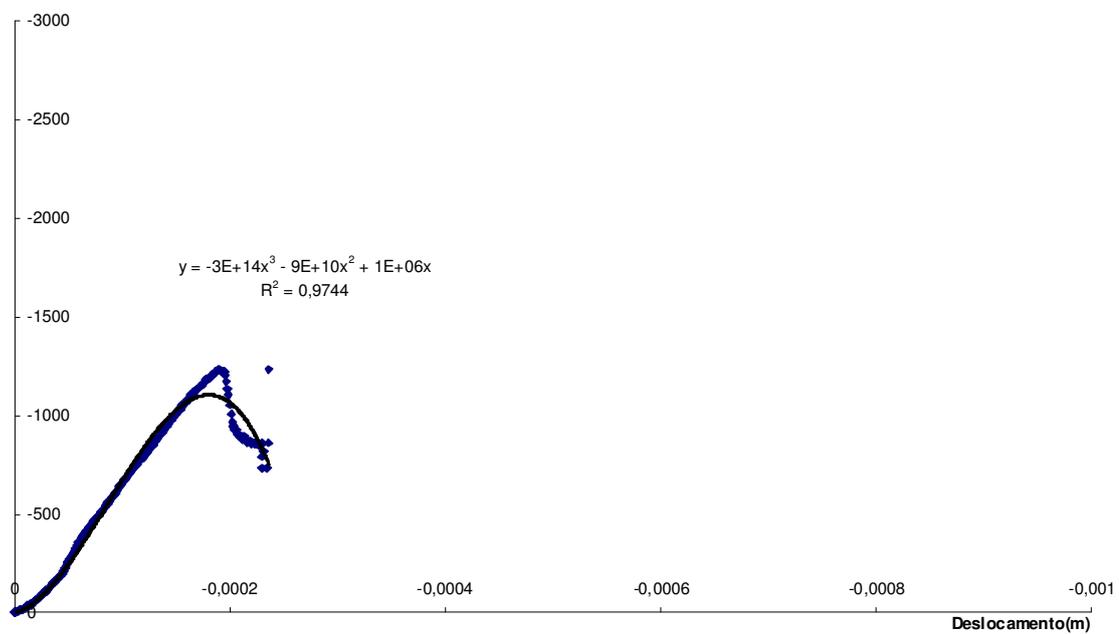


FIGURA 17 – Gráfico cp 21 (não foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

23

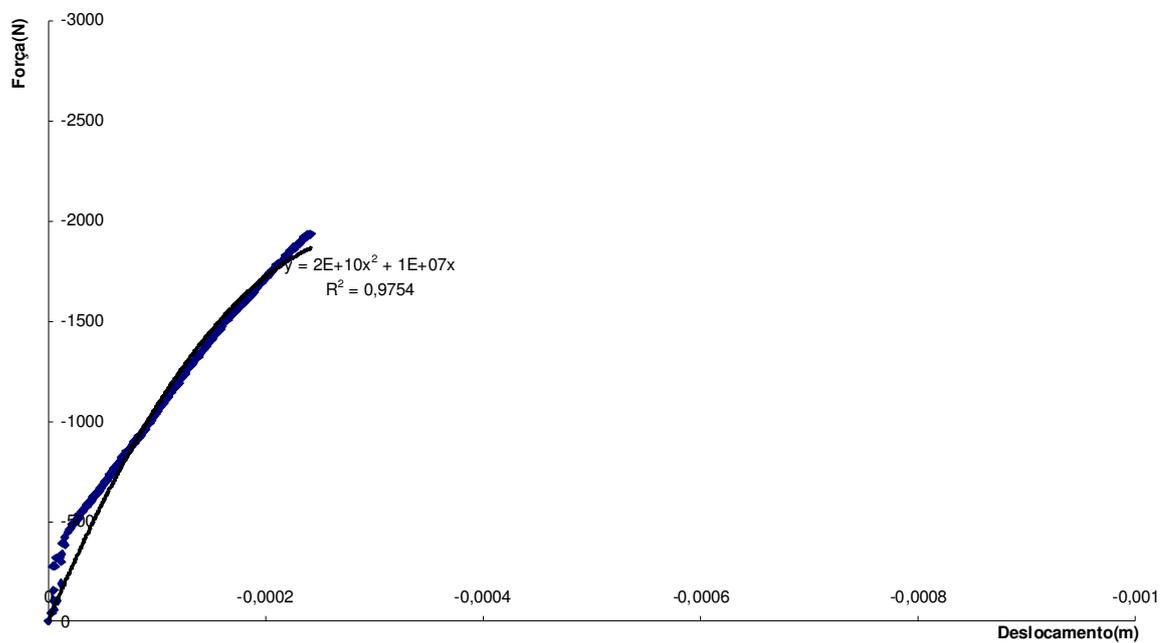


FIGURA 18 – Gráfico cp 23 (foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

24

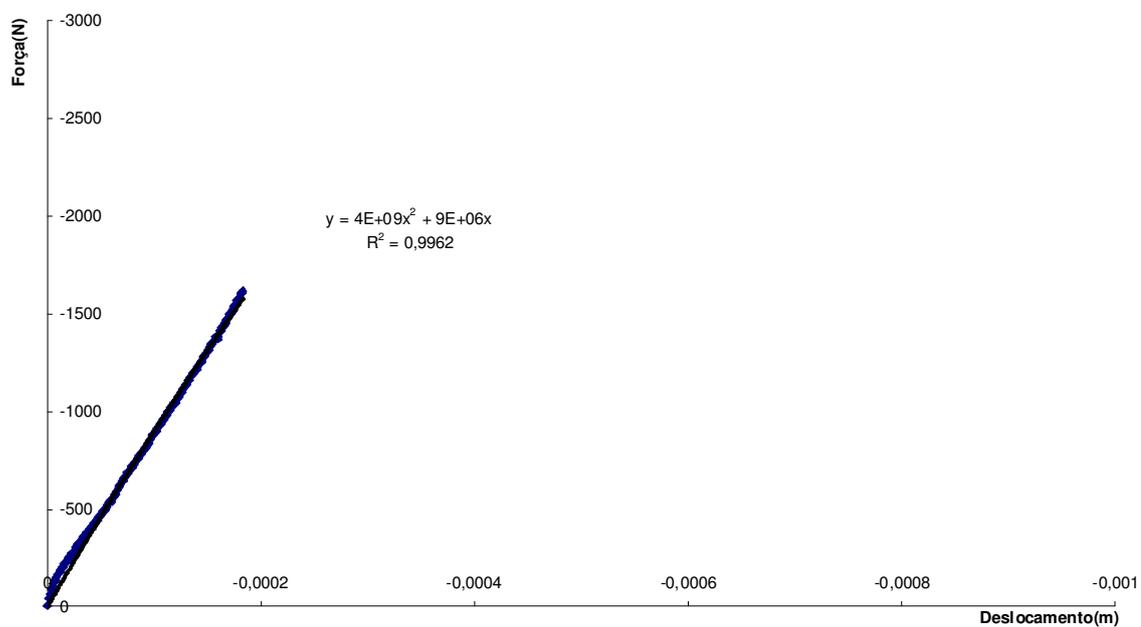


FIGURA 19 – Gráfico cp 24 (foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

25

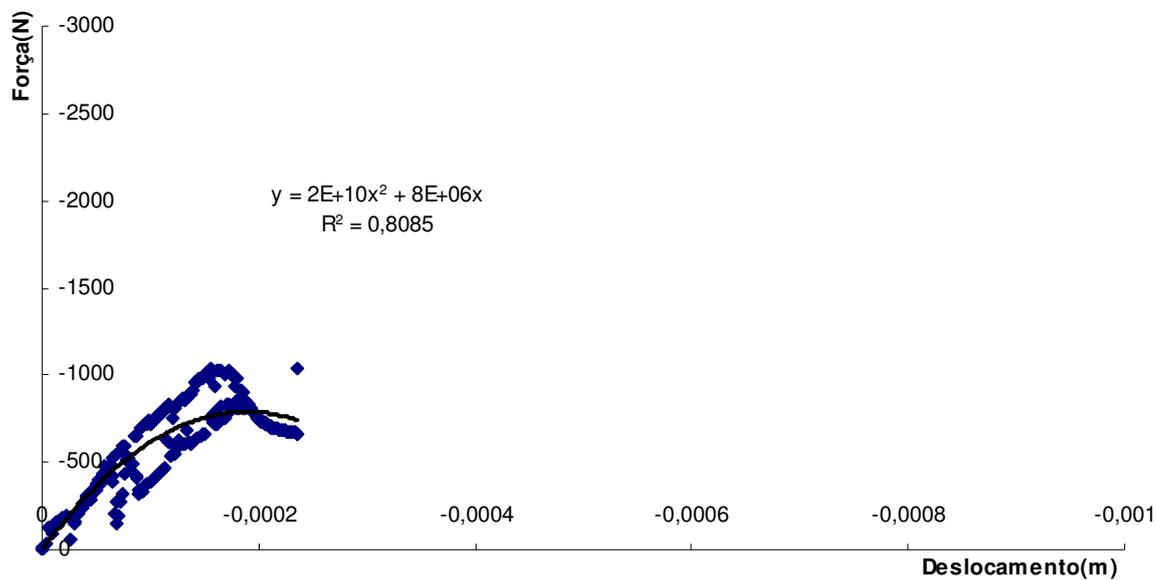


FIGURA 20 – Gráfico cp 25 (não foi ao forno, fio, flexo-tração).

26

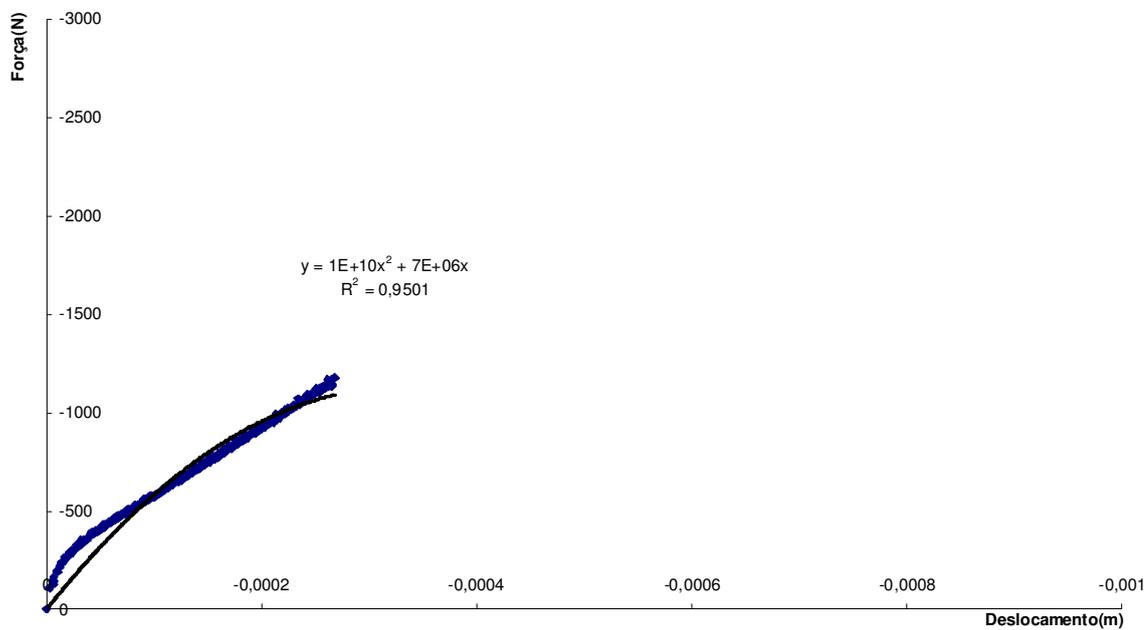


FIGURA 21 – Gráfico cp 26 (não foi ao forno, fibra, flexo-tração).

27

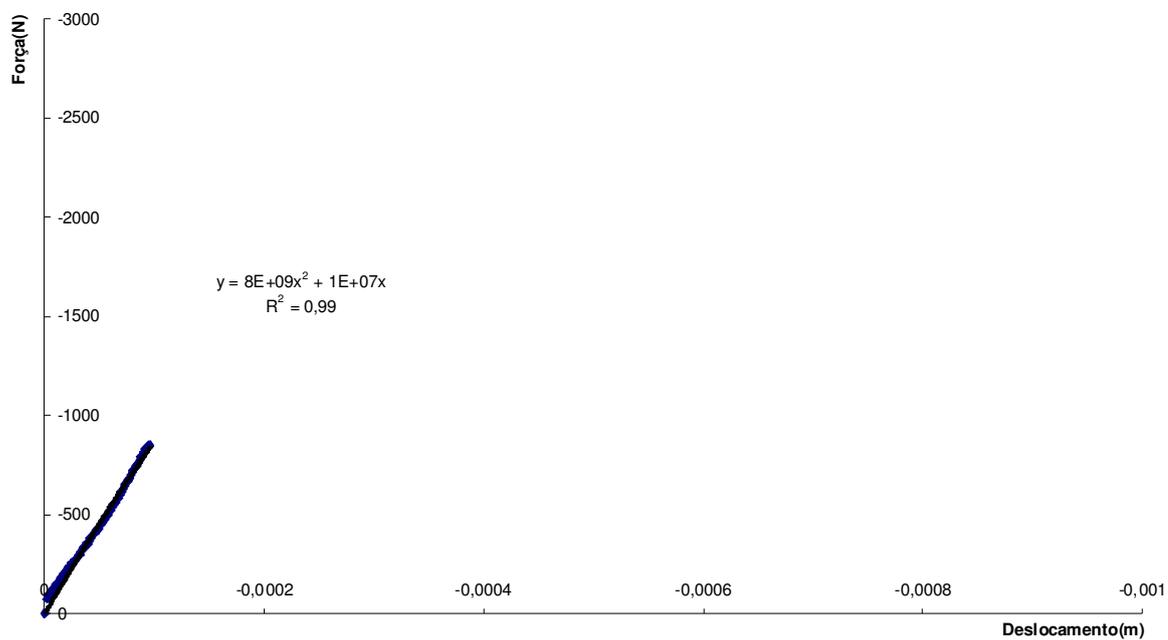


FIGURA 22 – Gráfico cp 27 (foi ao forno, fibra, flexo-tração).

28

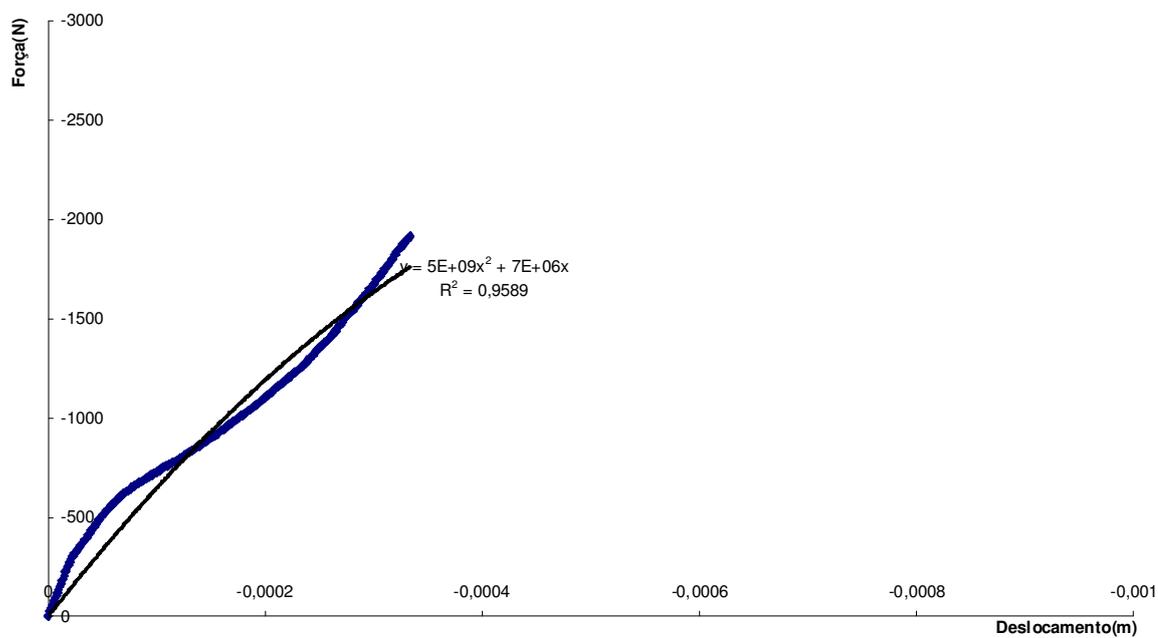


FIGURA 23 – Gráfico cp 28 (foi ao forno, fio, flexo-tração).

29

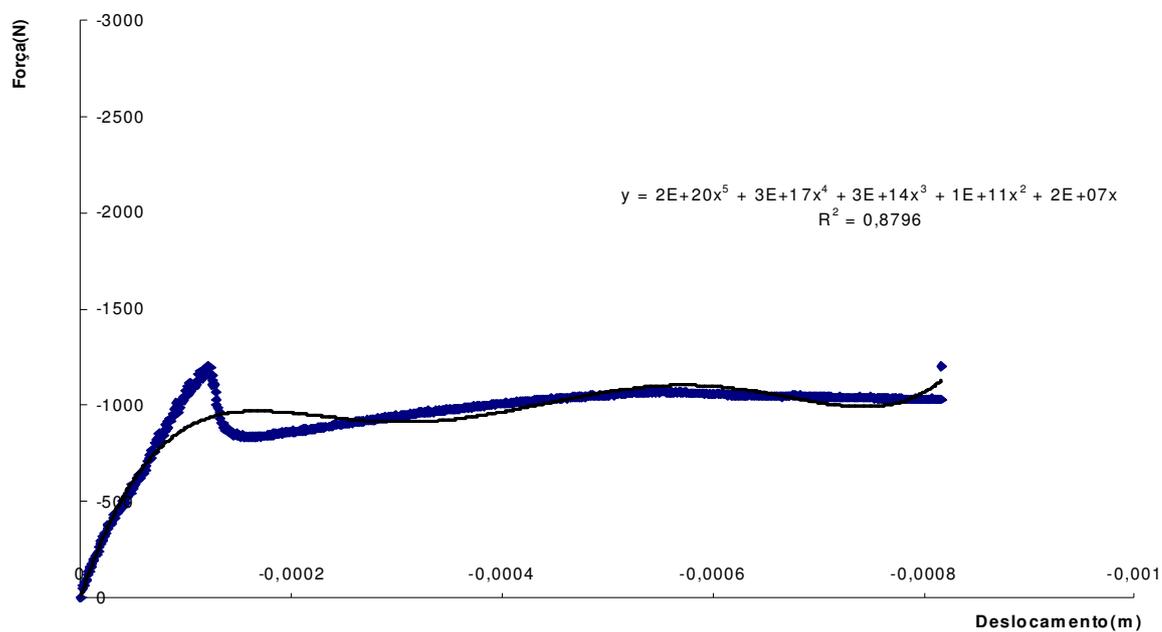


FIGURA 24 – Gráfico cp 29 (não foi ao forno, fio, flexo-tração).

30

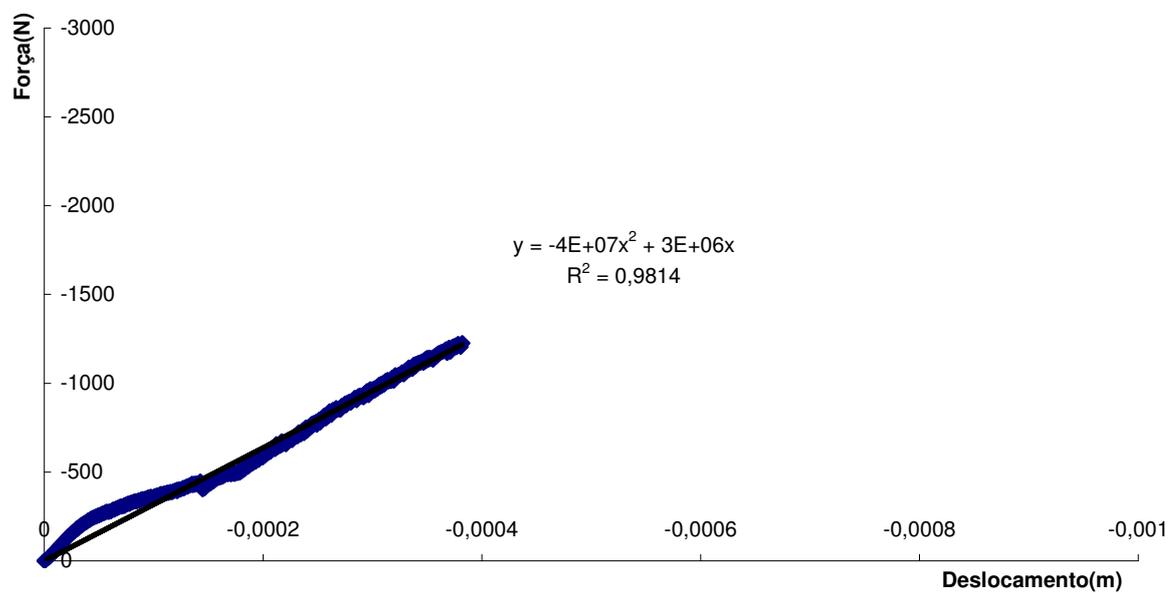


FIGURA 25 – Gráfico cp 30 (não foi ao forno, fibra, flexo-tração).

31

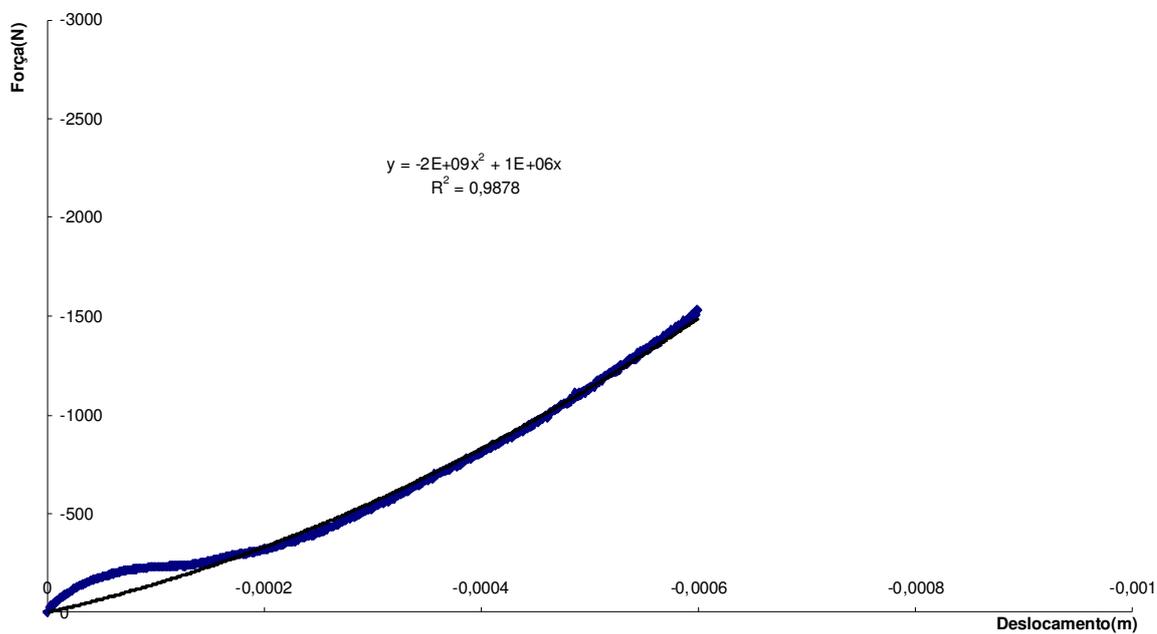


FIGURA 26 – Gráfico cp 31 (foi ao forno, fibra, flexo-tração).

32

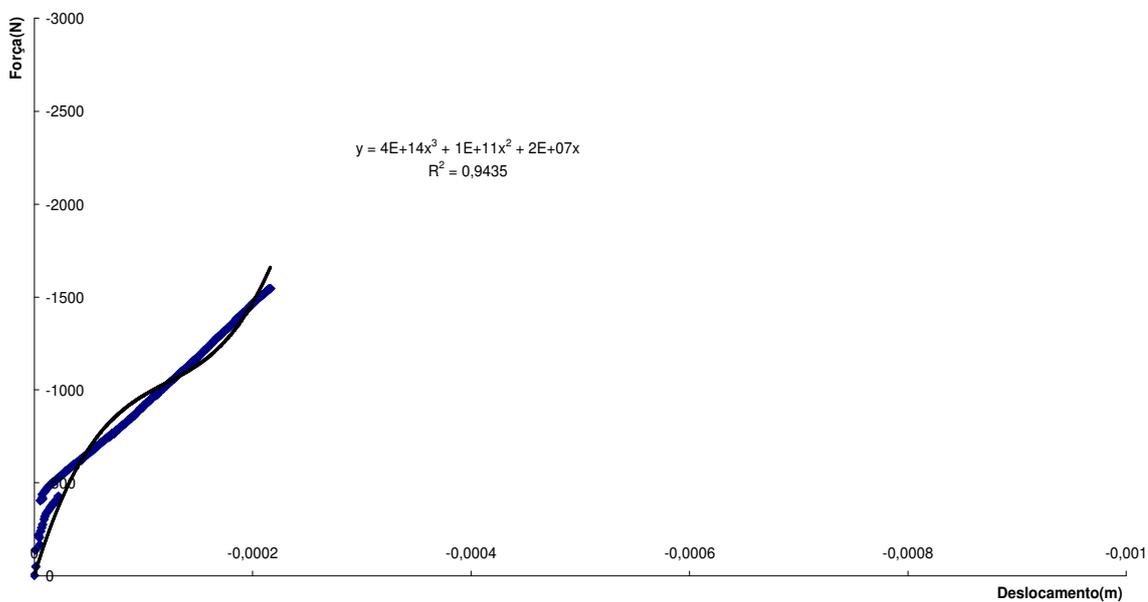


FIGURA 27 – Gráfico cp 32 (foi ao forno, fio, flexo-tração).

34

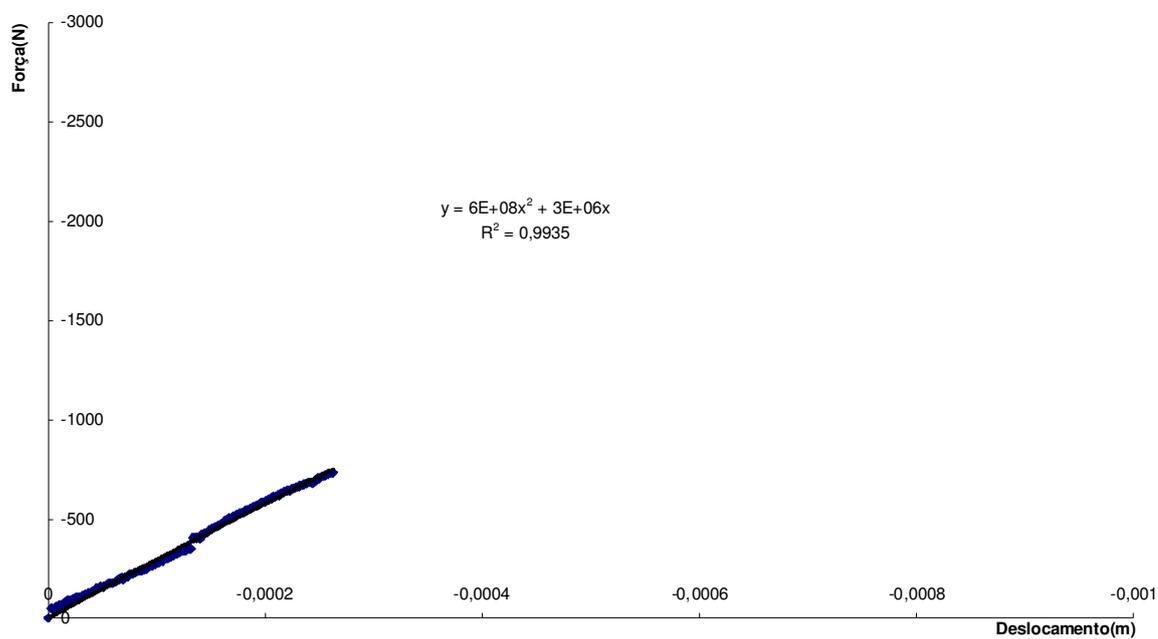


FIGURA 28 – Gráfico cp 34 (não foi ao forno, fibra, flexo-tração).

35

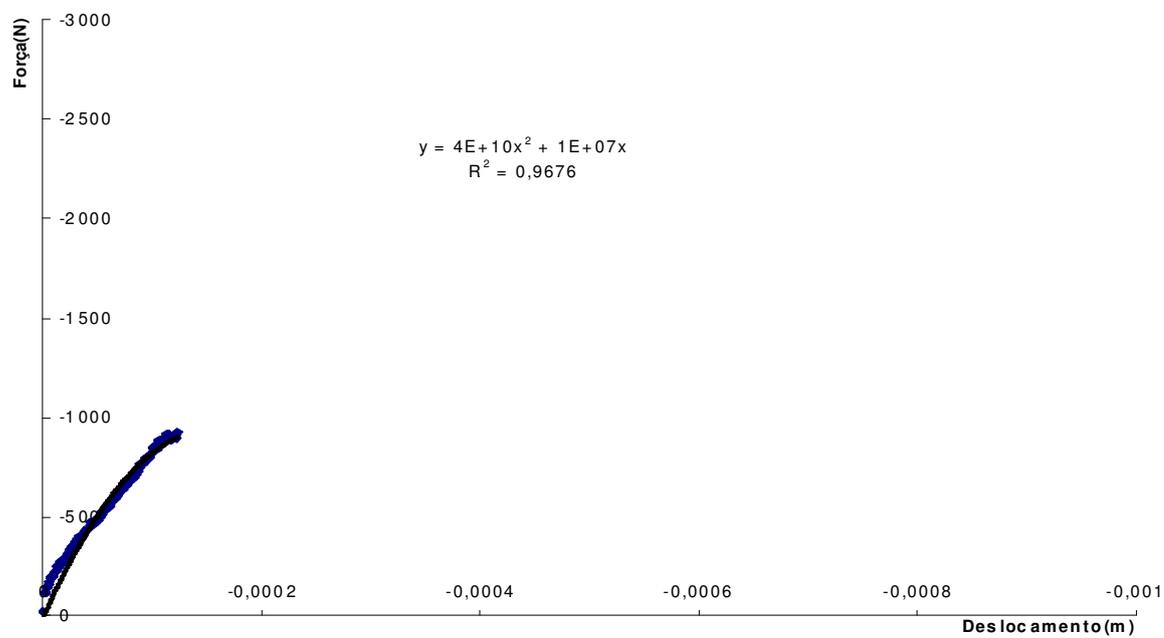


FIGURA 29 – Gráfico cp 35 (não foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

38

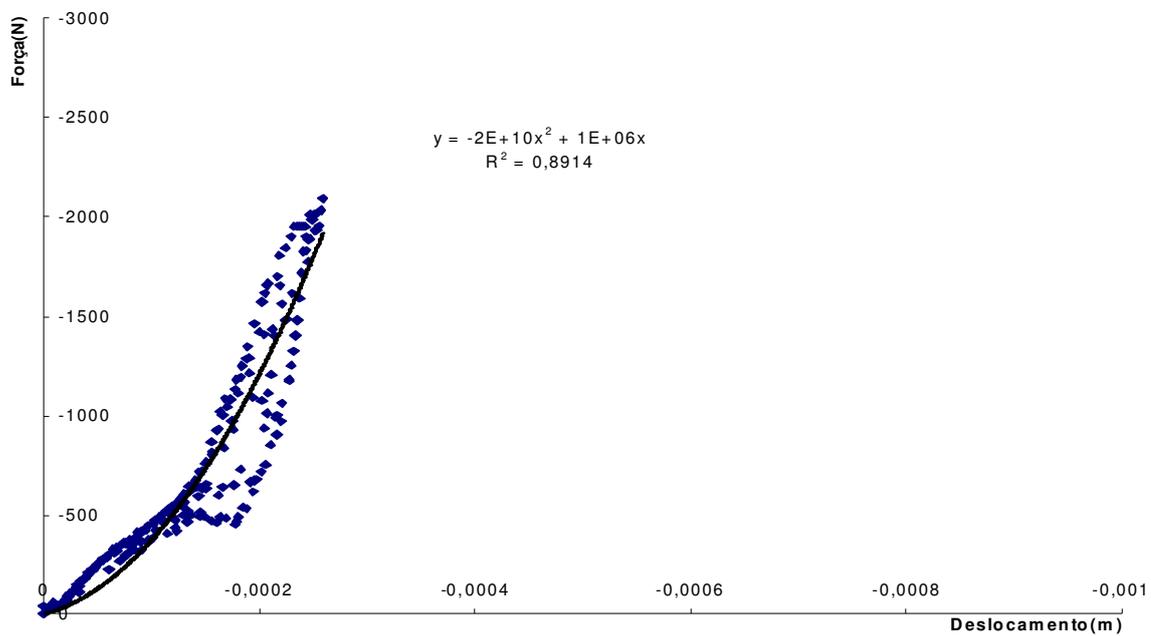


FIGURA 30 – Gráfico cp 38 (foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

39

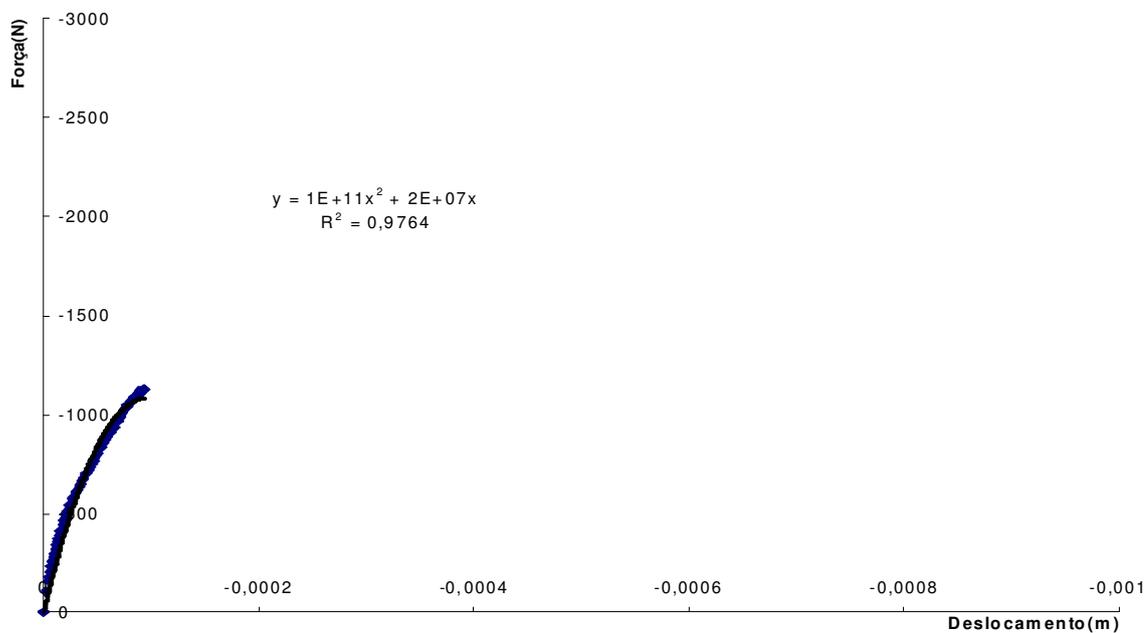


FIGURA 31 – Gráfico cp 39 (não foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

40

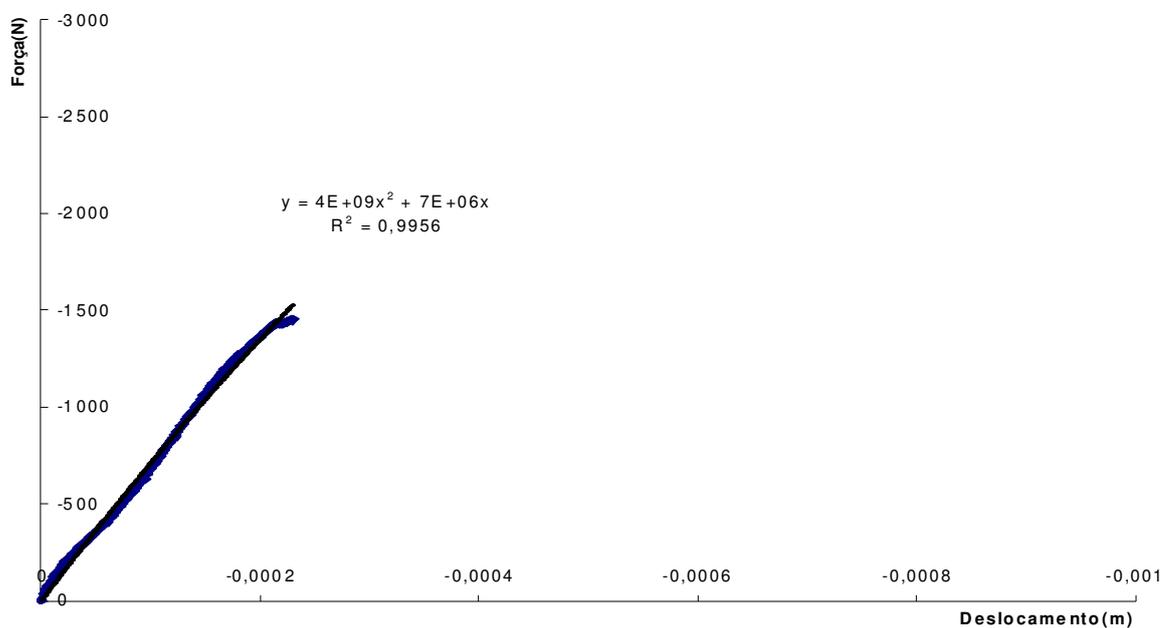


FIGURA 32 – Gráfico cp 40 (não foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

41

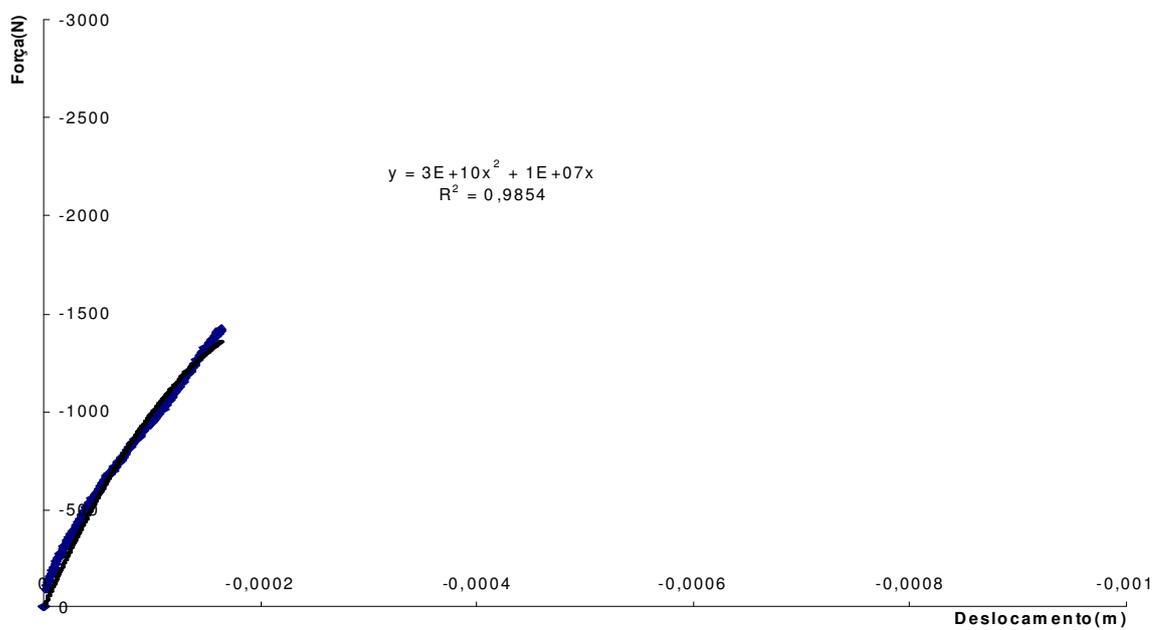


FIGURA 33 – Gráfico cp 41 (foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

43

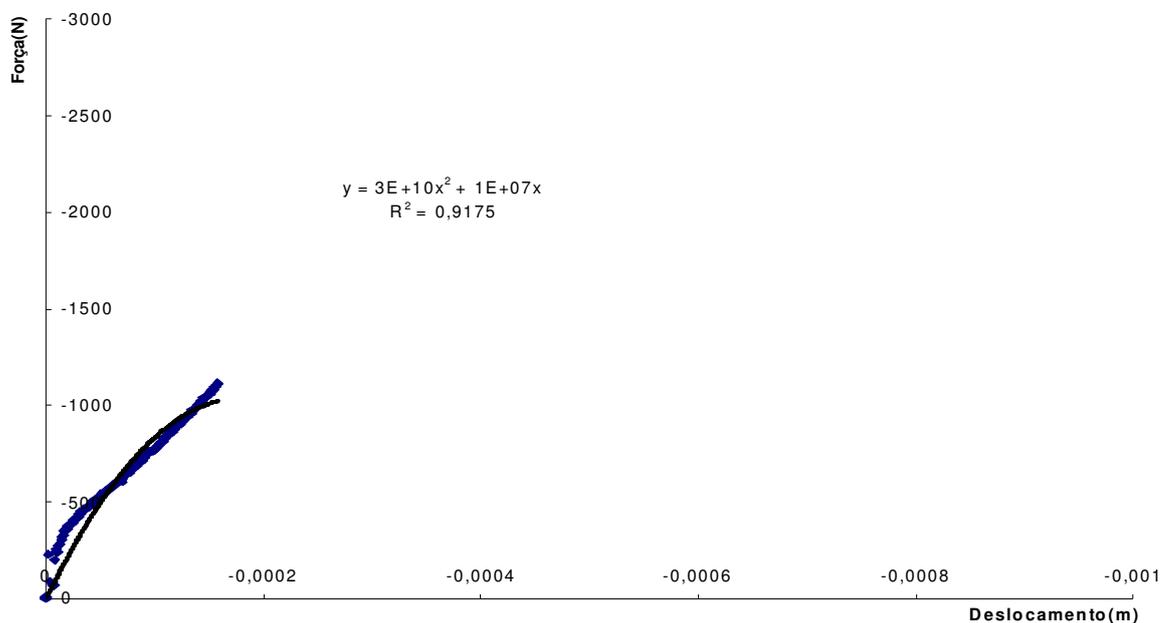


FIGURA 34 – Gráfico cp 43 (não foi ao forno, fio, flexo-tração).

44

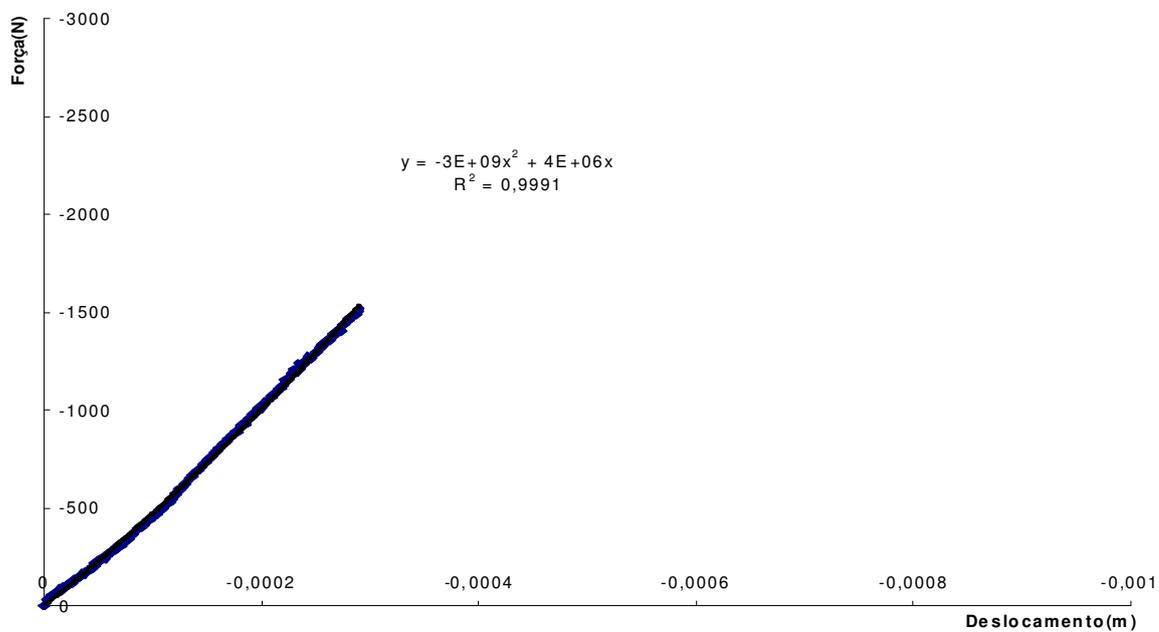


FIGURA 35 – Gráfico cp 44 (não foi ao forno, fibra, flexo-tração).

45

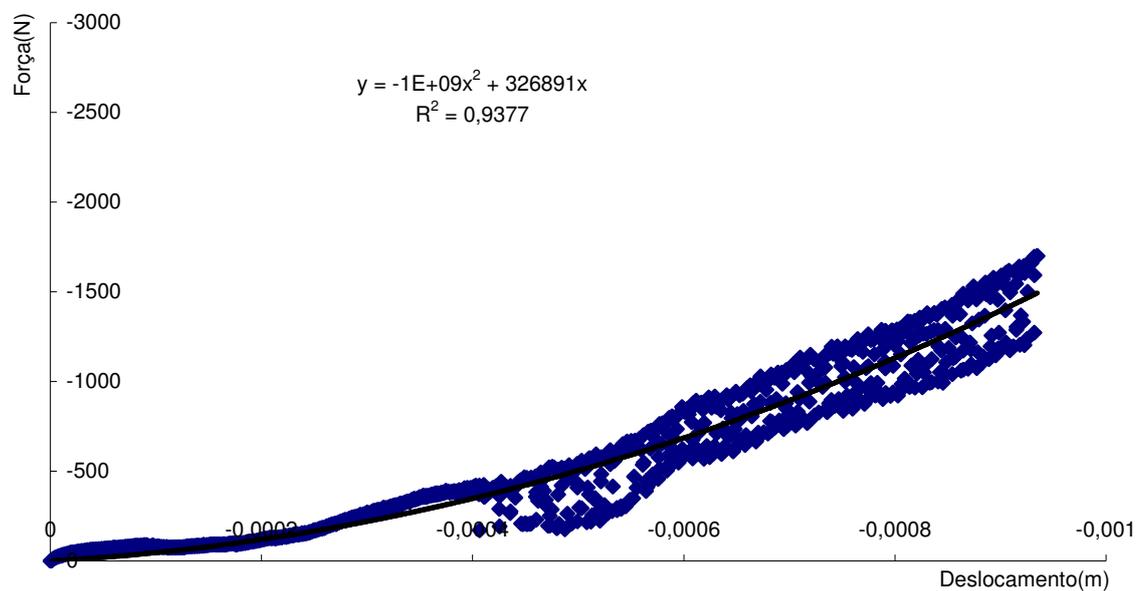


FIGURA 36 – Gráfico cp 45 (foi ao forno, fibra, flexo-tração).

46

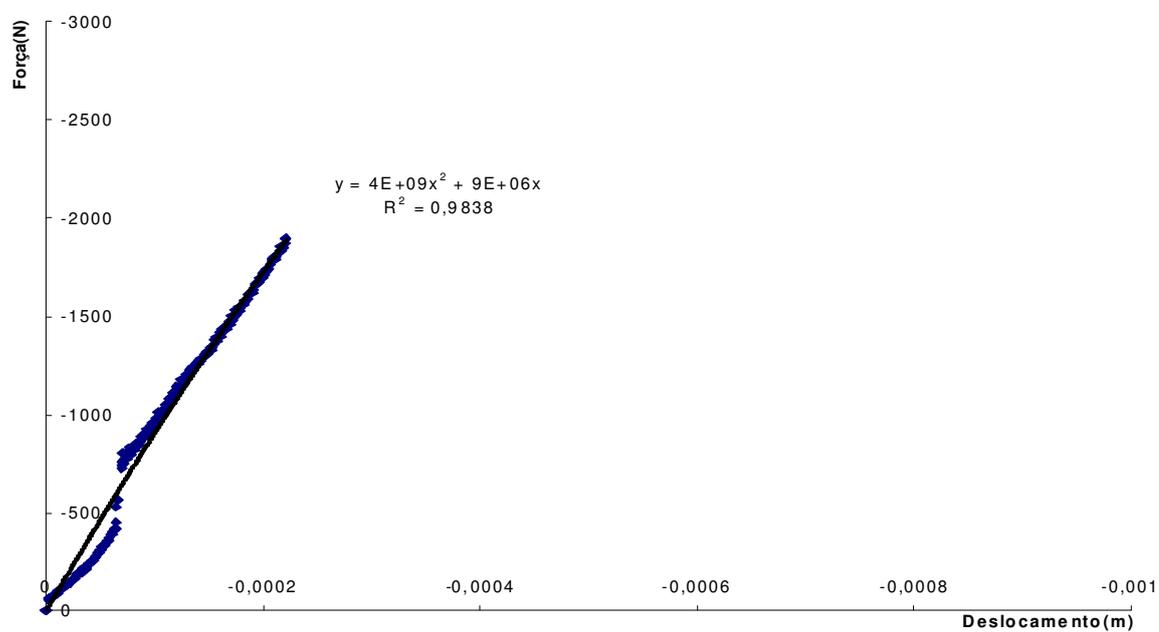


FIGURA 37 – Gráfico cp 46 (foi ao forno, fio, flexo-tração).

47

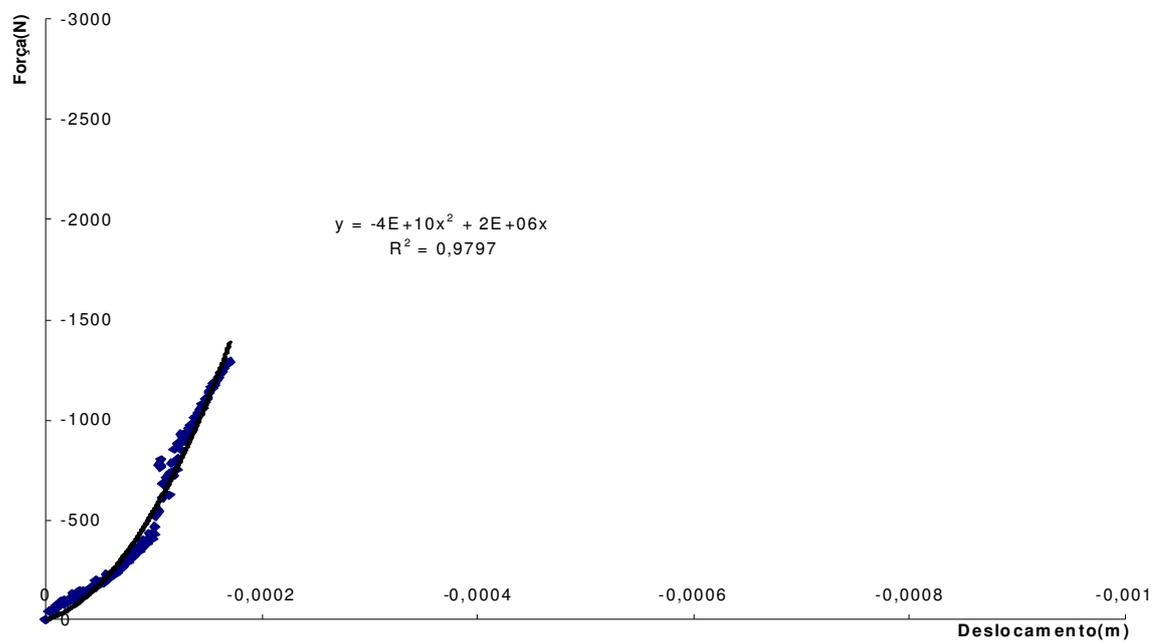


FIGURA 38 – Gráfico cp 47 (não foi ao forno, fio, flexo-tração).

48

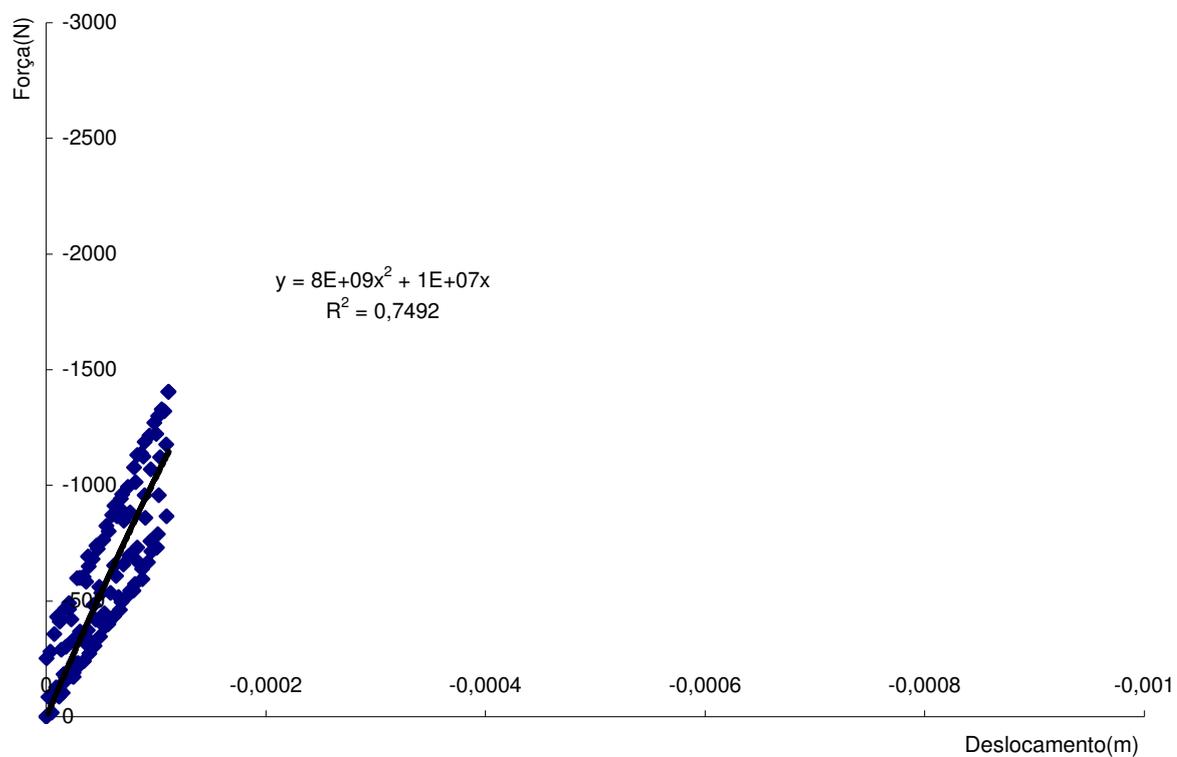


FIGURA 39 – Gráfico cp 48 (não foi ao forno, fibra, flexo-tração).

49

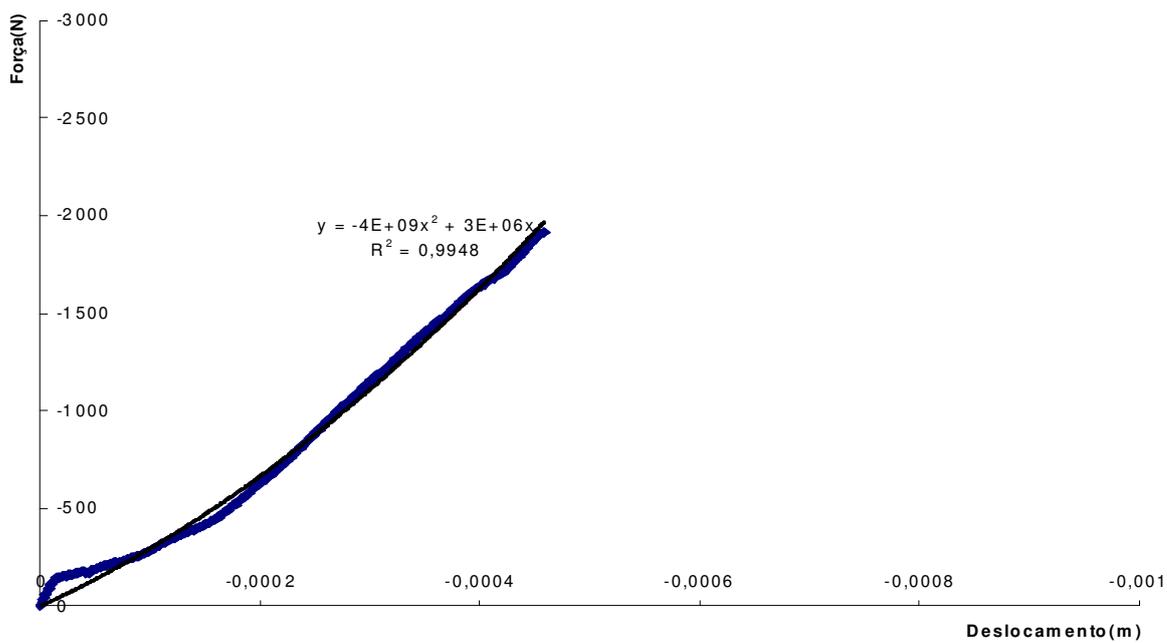


FIGURA 40 – Gráfico cp 49 (foi ao forno, fibra, flexo-tração).

50

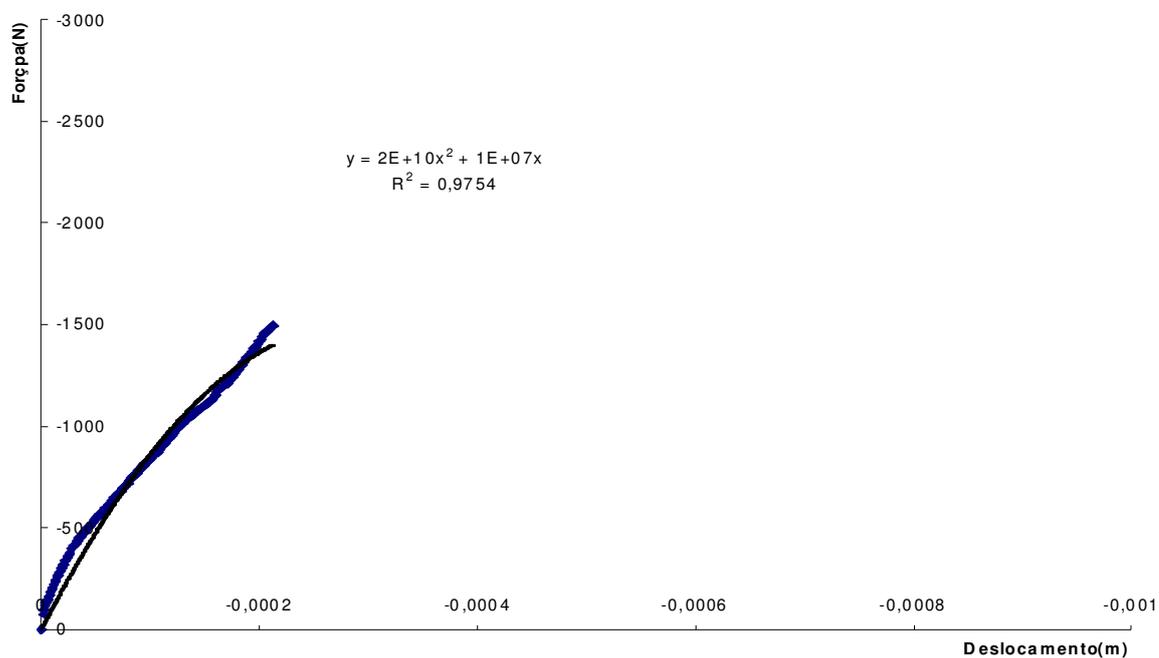


FIGURA 41 – Gráfico cp 50 (foi ao forno, fio, flexo-tração).

51

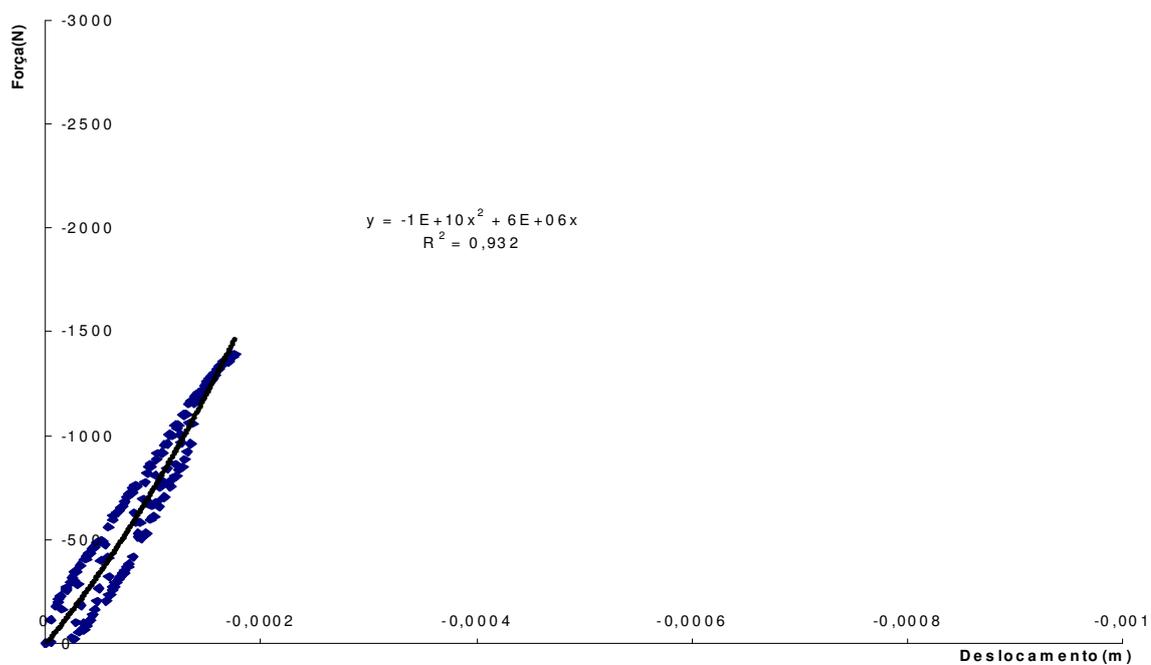


FIGURA 42 – Gráfico cp 51 (não foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

52

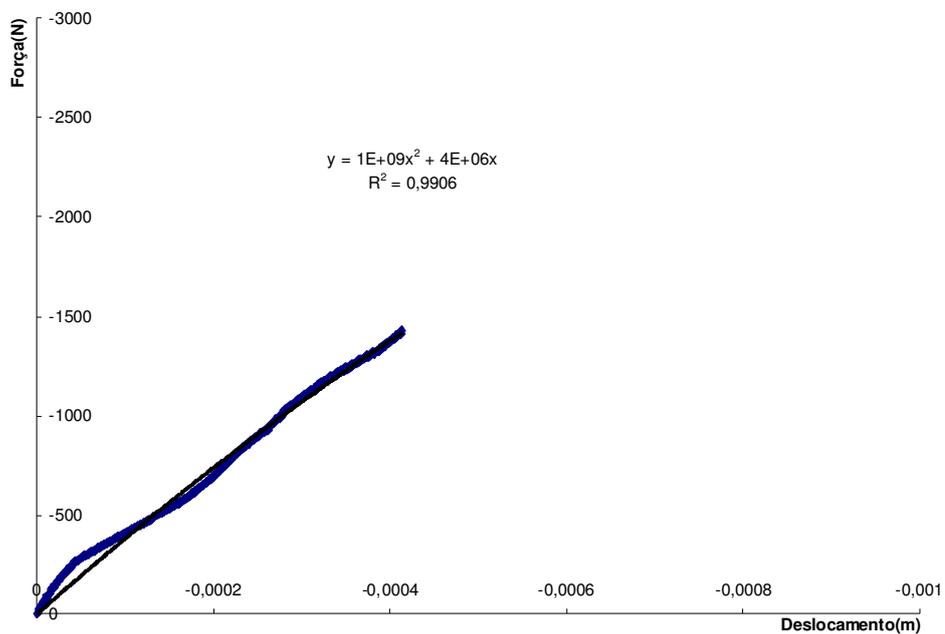


FIGURA 43 – Gráfico cp 52 (não foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

53

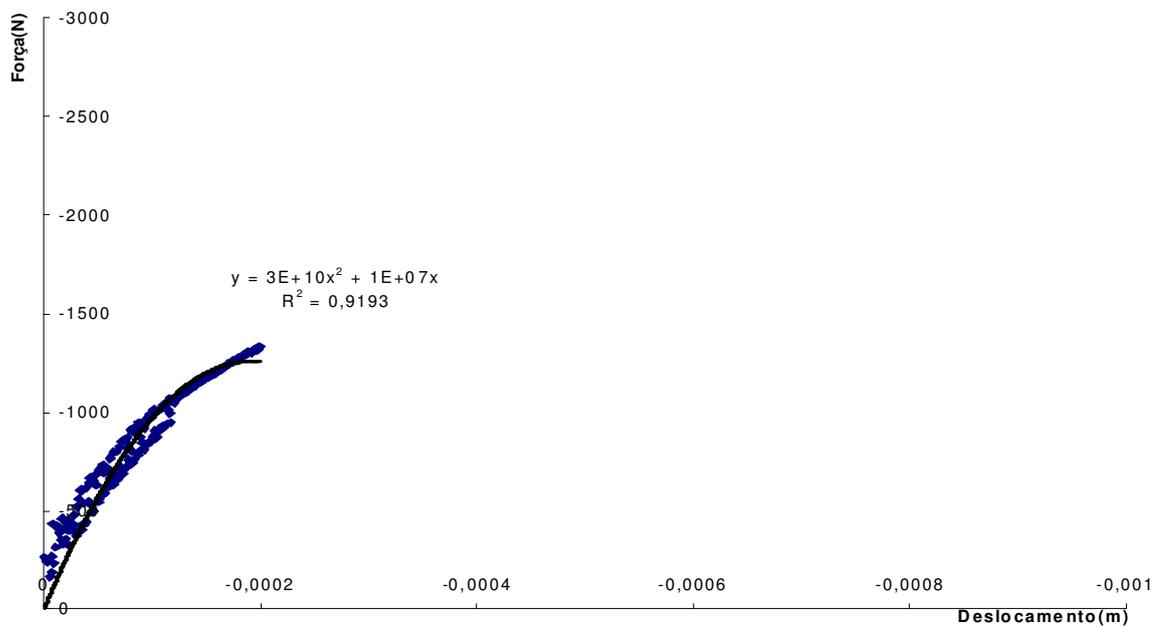


FIGURA 44 – Gráfico cp 53 (foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

55

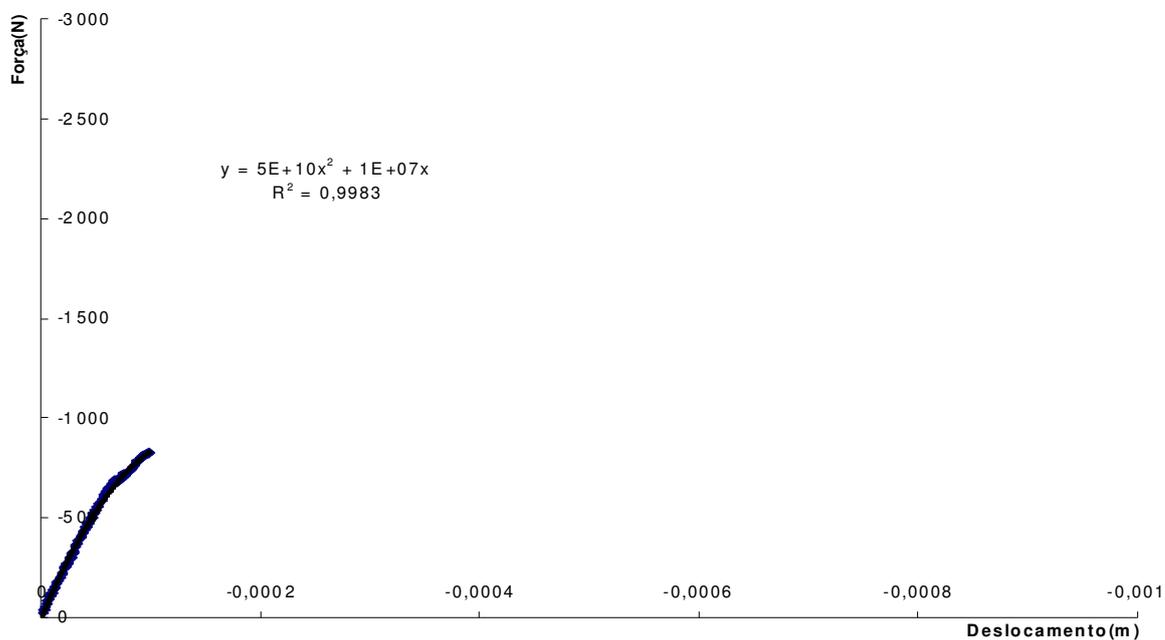


FIGURA 45 – Gráfico cp 55 (não foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

57

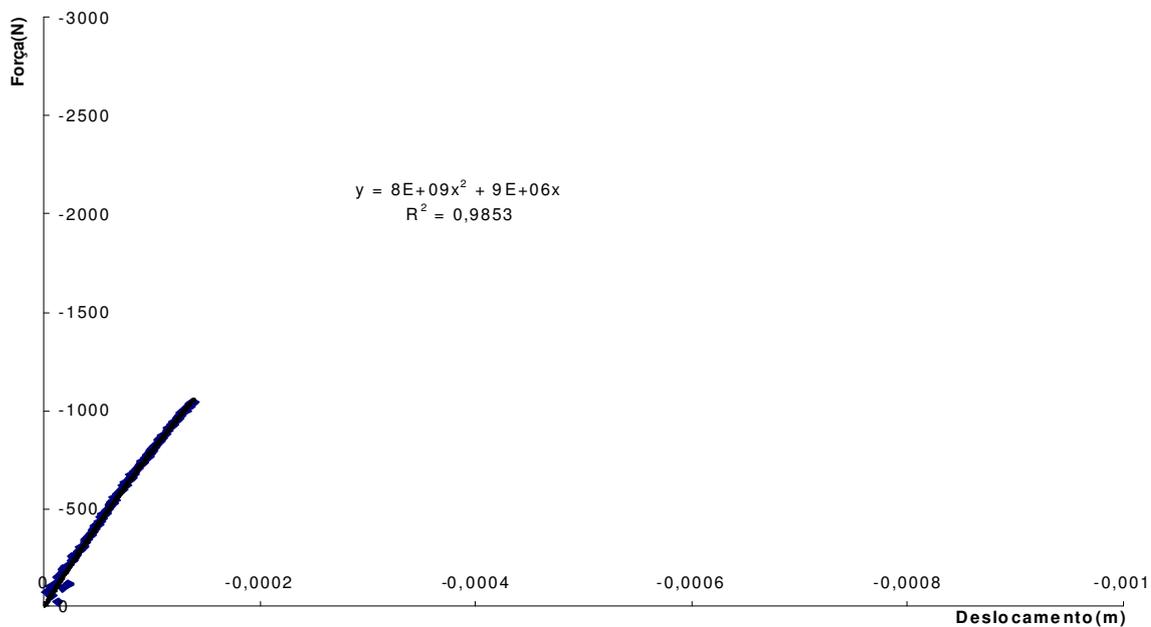


FIGURA 46 – Gráfico cp 57 (não foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

58

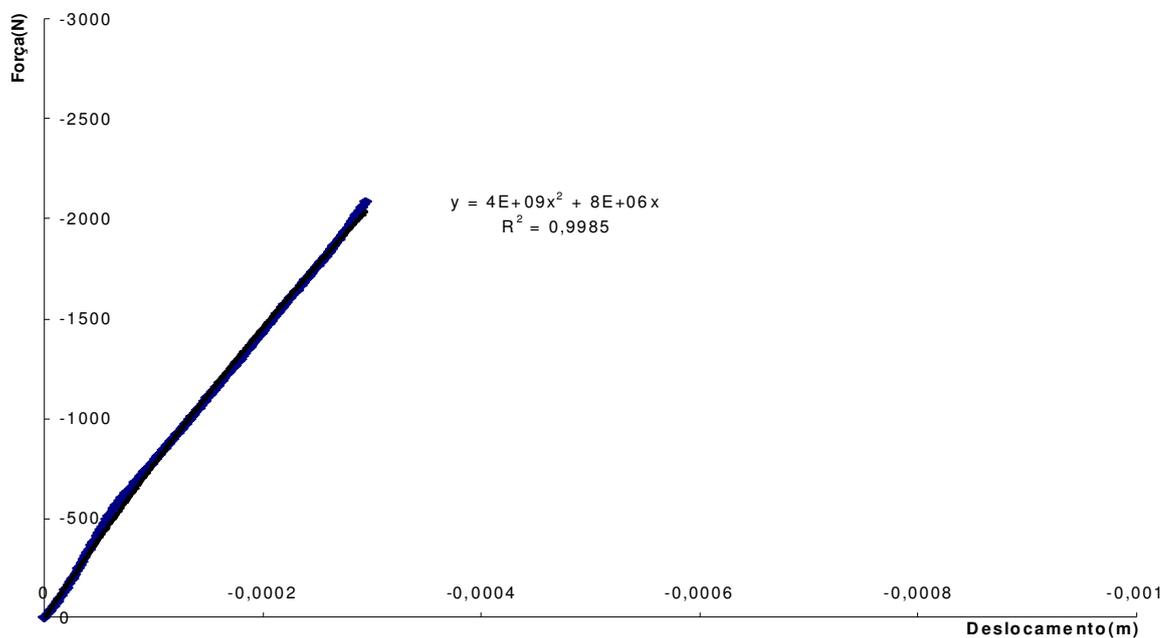


FIGURA 47 – Gráfico cp 58 (foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

59

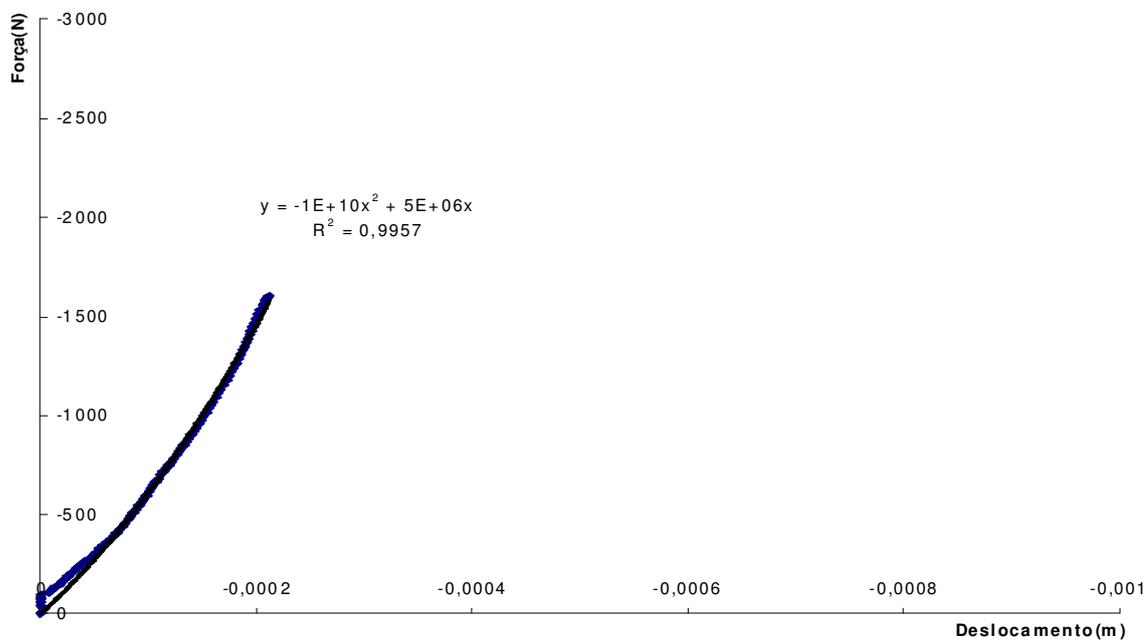


FIGURA 48 – Gráfico cp 59 (não foi ao forno, fio, flexo-tração).

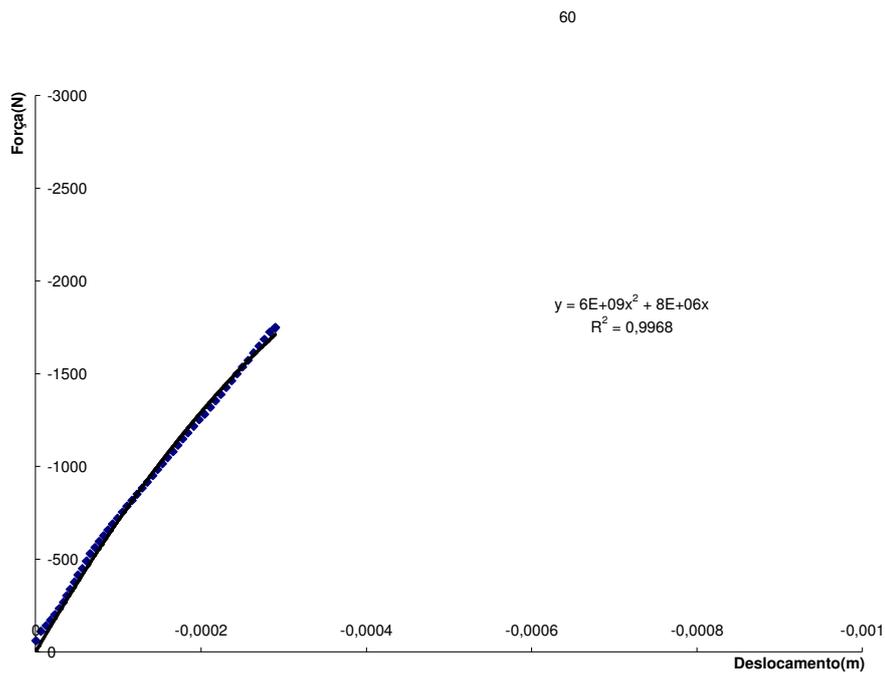


FIGURA 49 – Gráfico cp 60 (não foi ao forno, fibra, flexo-tração).

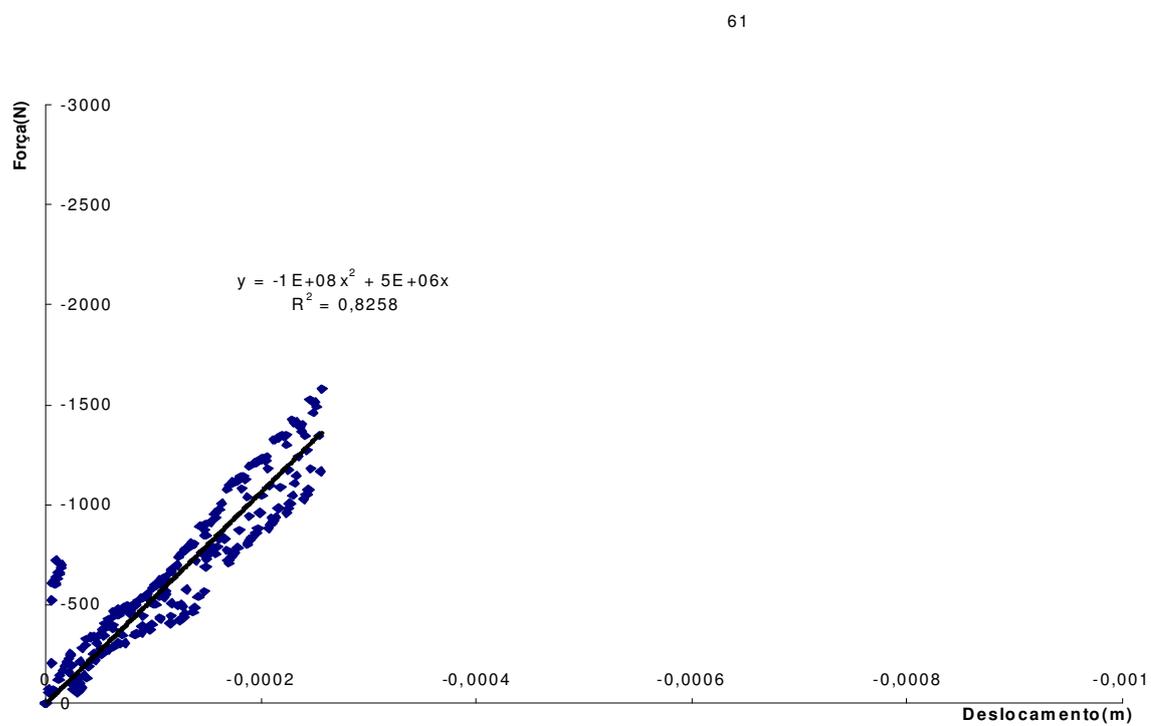


FIGURA 50 – Gráfico cp 61 (foi ao forno, fibra, flexo-tração).

62

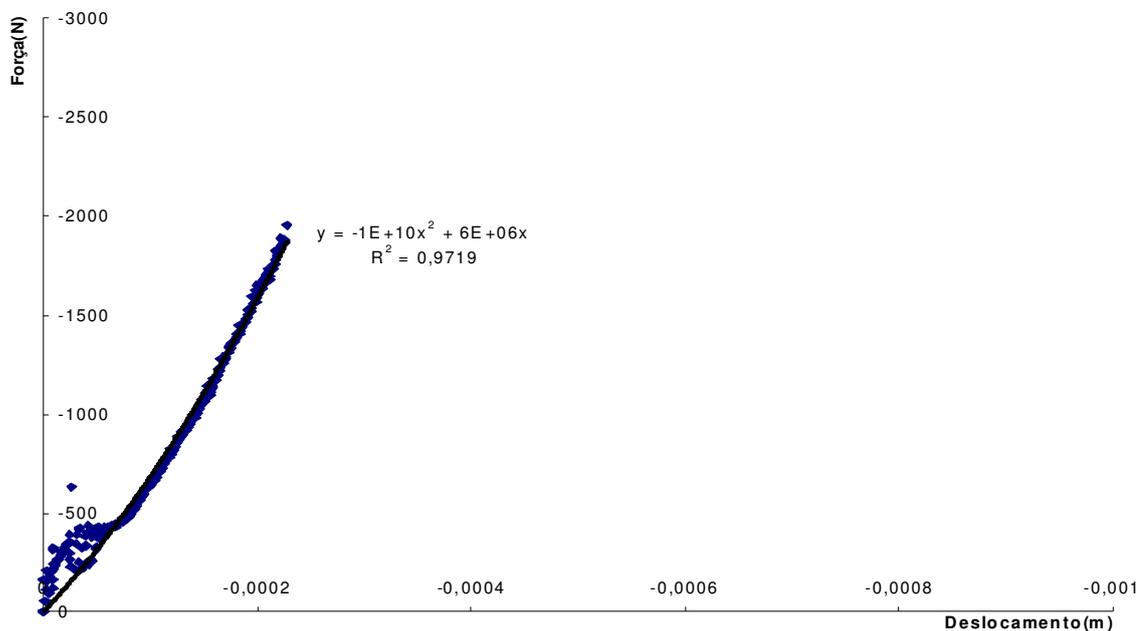


FIGURA 51 – Gráfico cp 62 (foi ao forno, fio, flexo-tração).

64

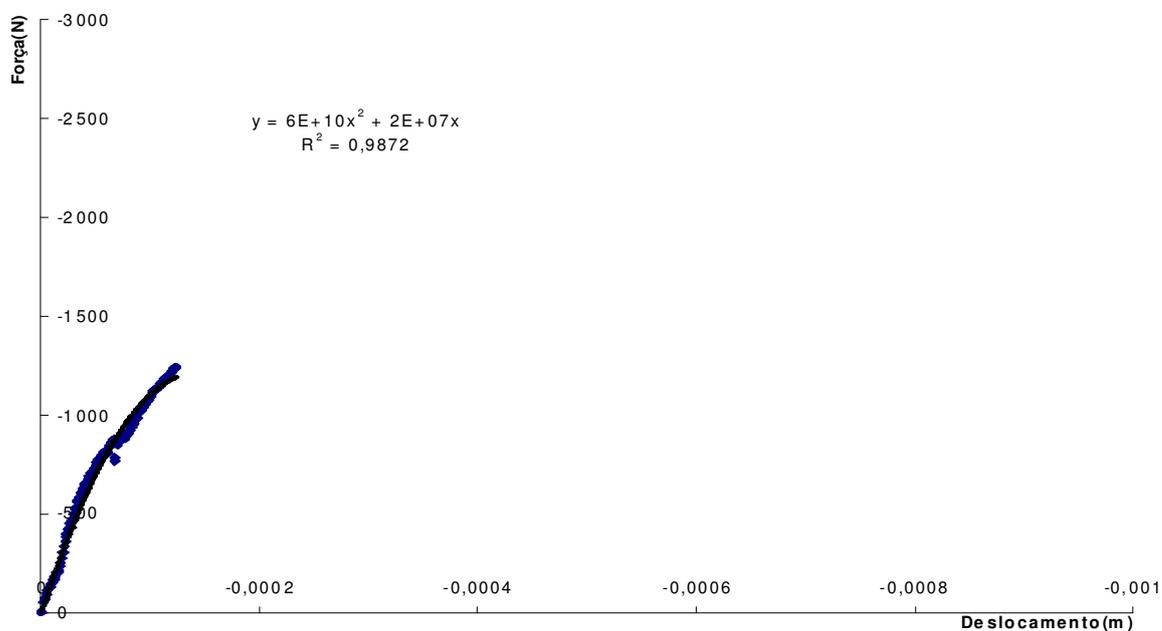


FIGURA 52 – Gráfico cp 64 (não foi ao forno, fibra, flexo-tração).

66

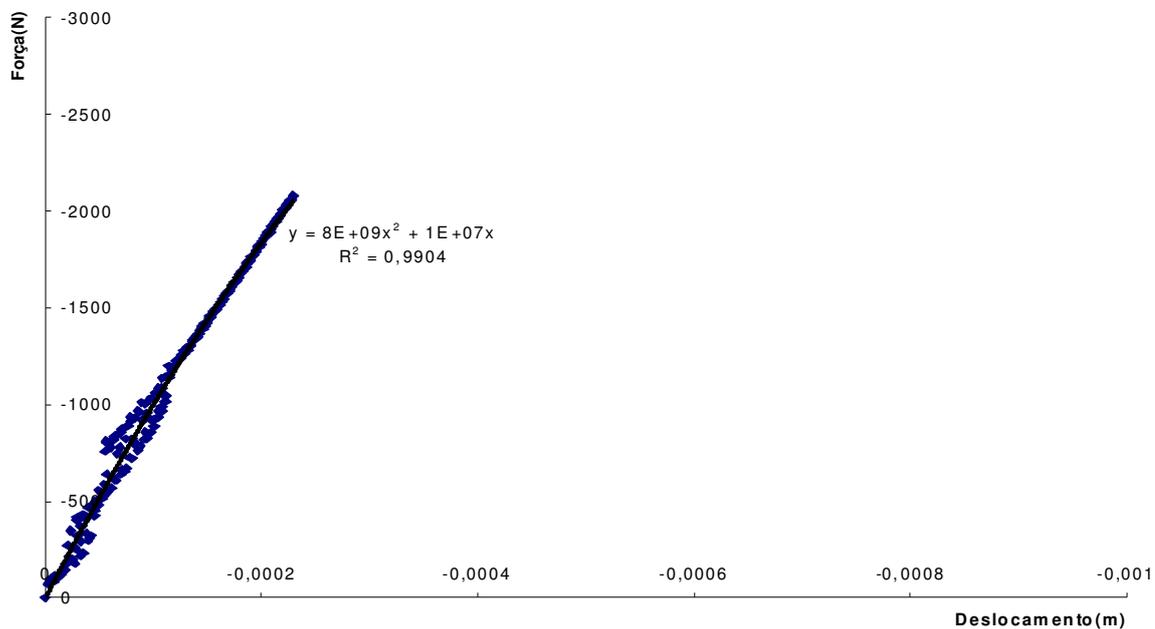


FIGURA 53 – Gráfico cp 66 (foi ao forno, fio, flexo-tração).

68

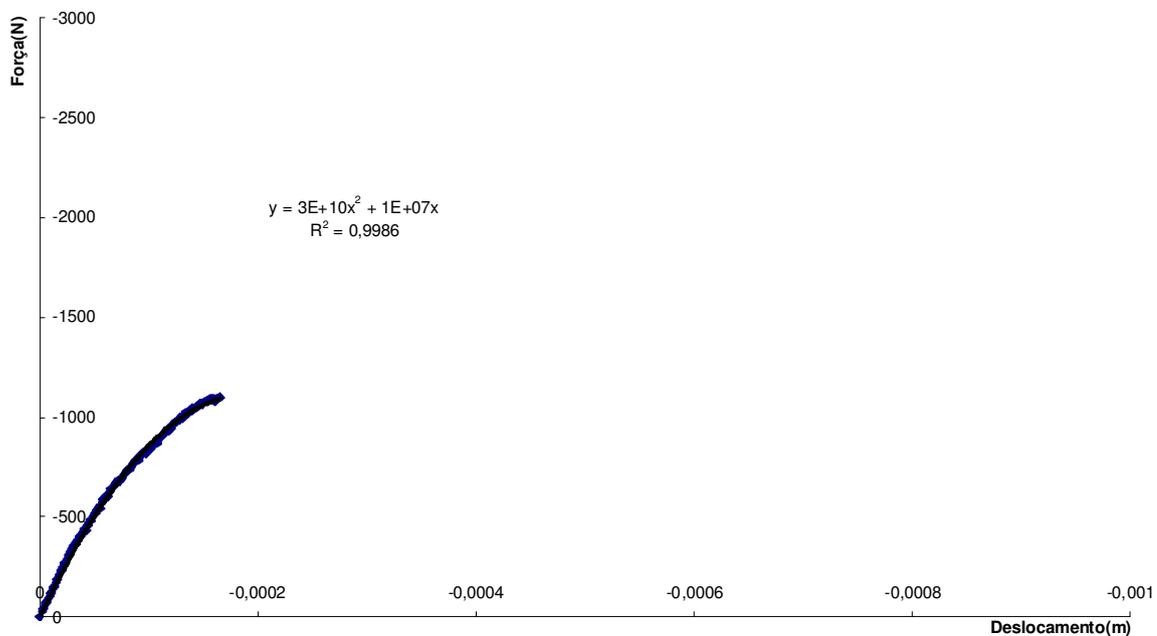


FIGURA 54 – Gráfico cp 68 (não foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

69

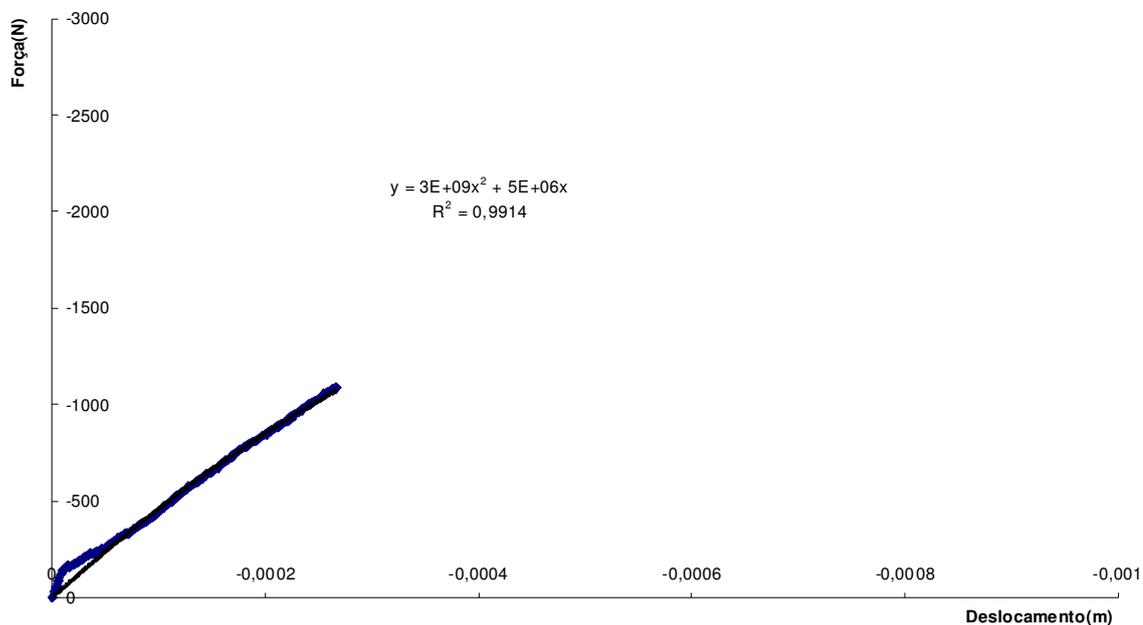


FIGURA 55 – Gráfico cp 69 (não foi ao forno, fibra, flexo-tração).

70

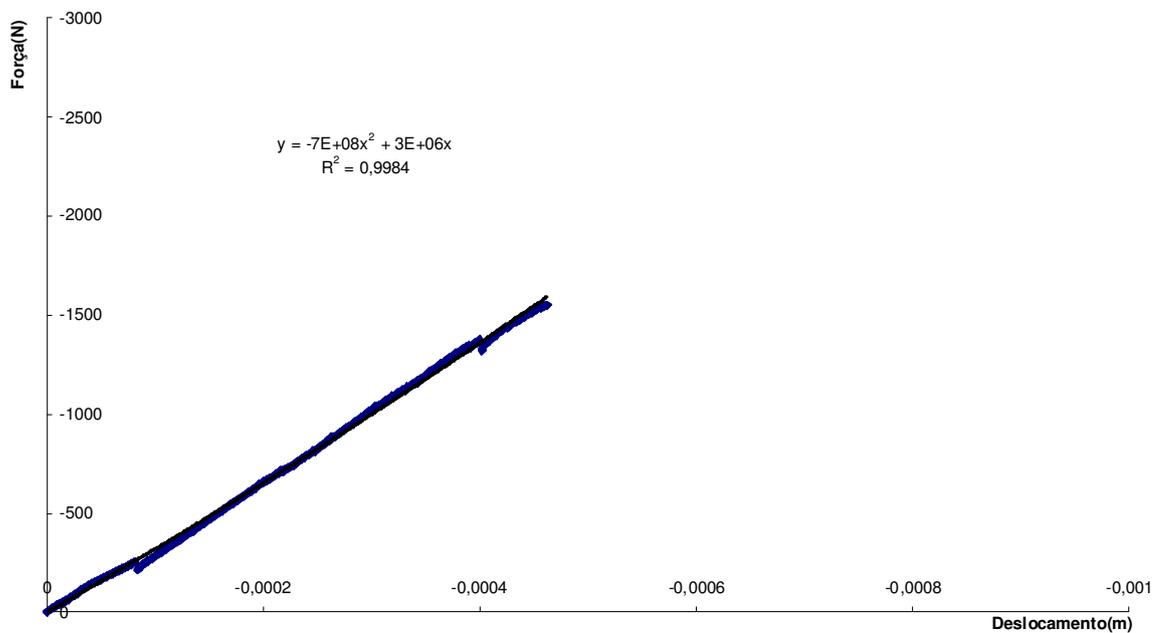


FIGURA 56 – Gráfico cp 70 (não foi ao forno, fibra, flexo-tração).

71

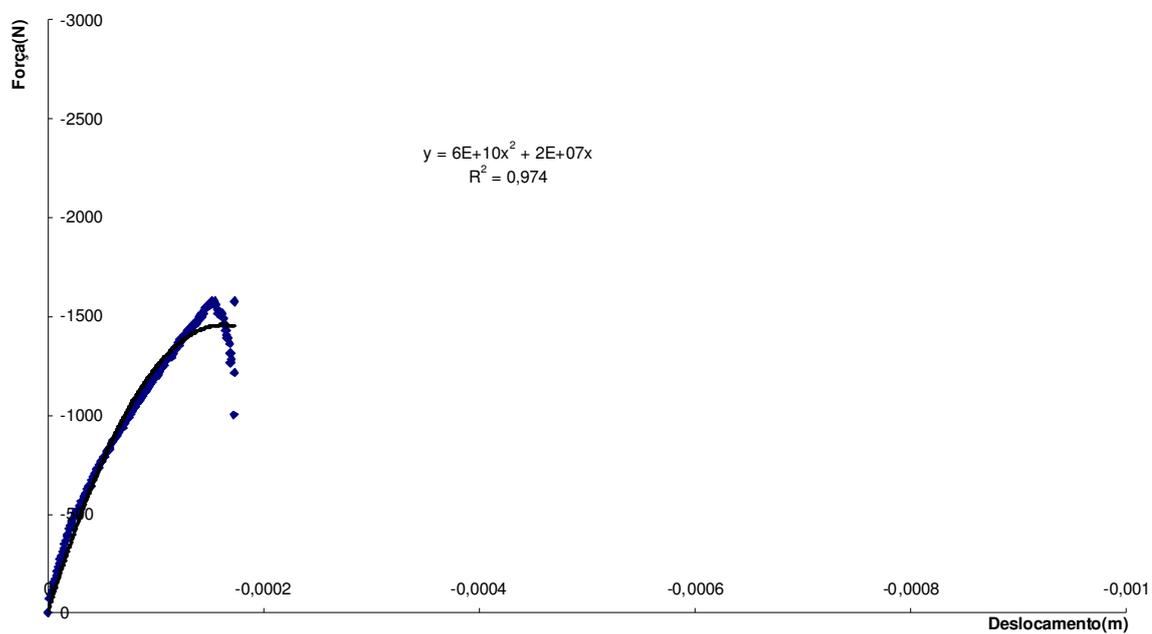


FIGURA 57 – Gráfico cp 71 (não foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

72

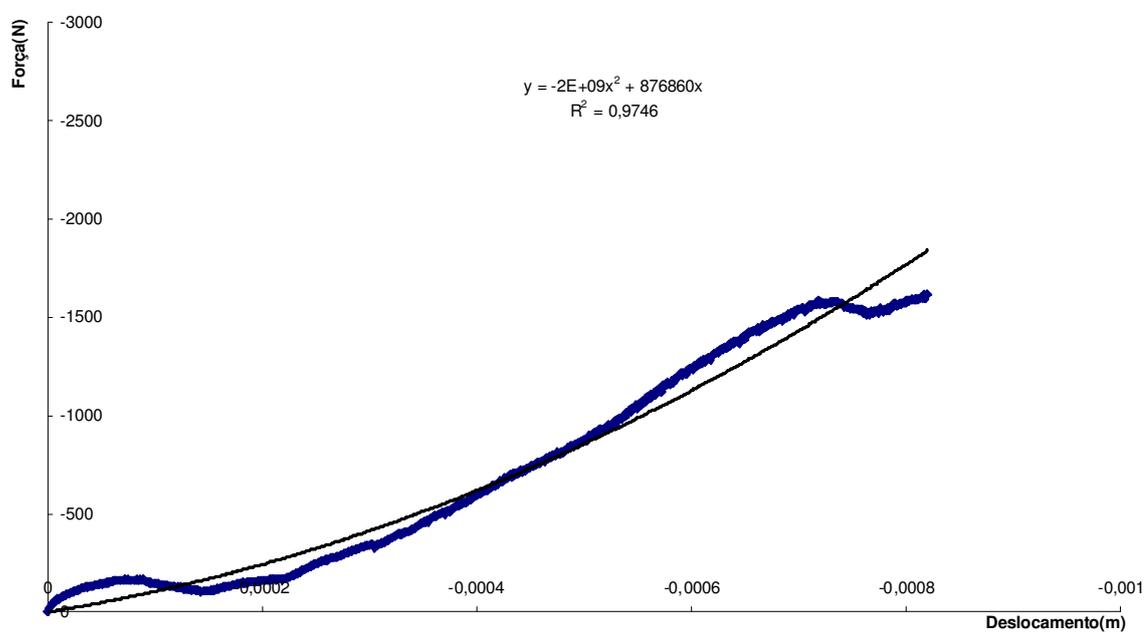


FIGURA 58 – Gráfico cp 72 (não foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

74

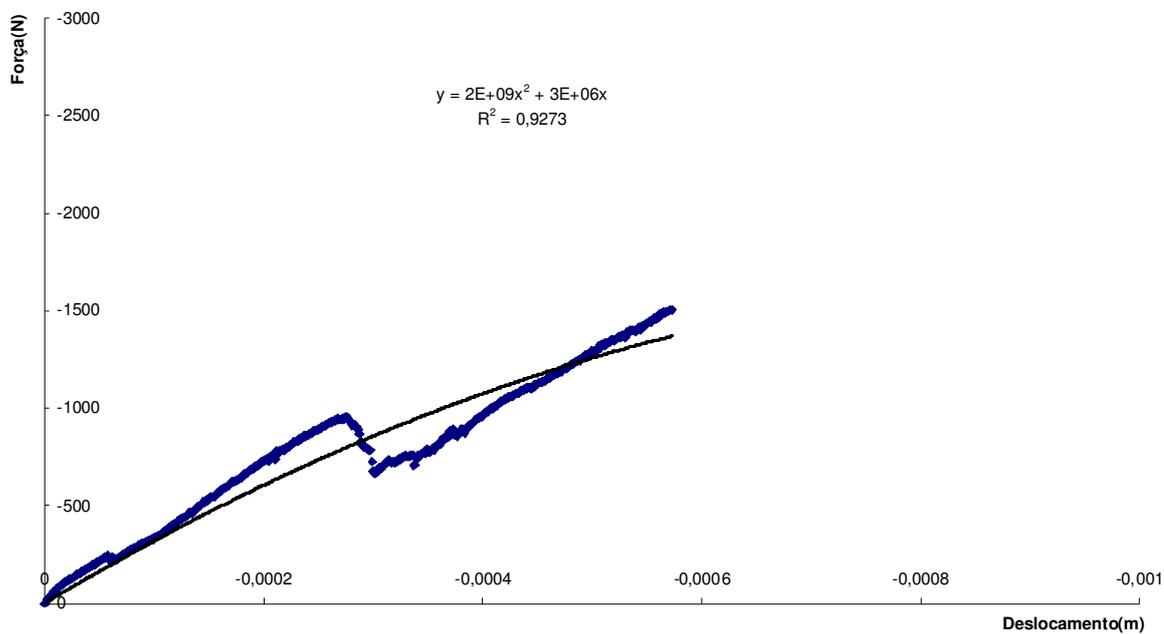


FIGURA 59 – Gráfico cp 74 (não foi ao forno, fibra, flexo-tração).

75

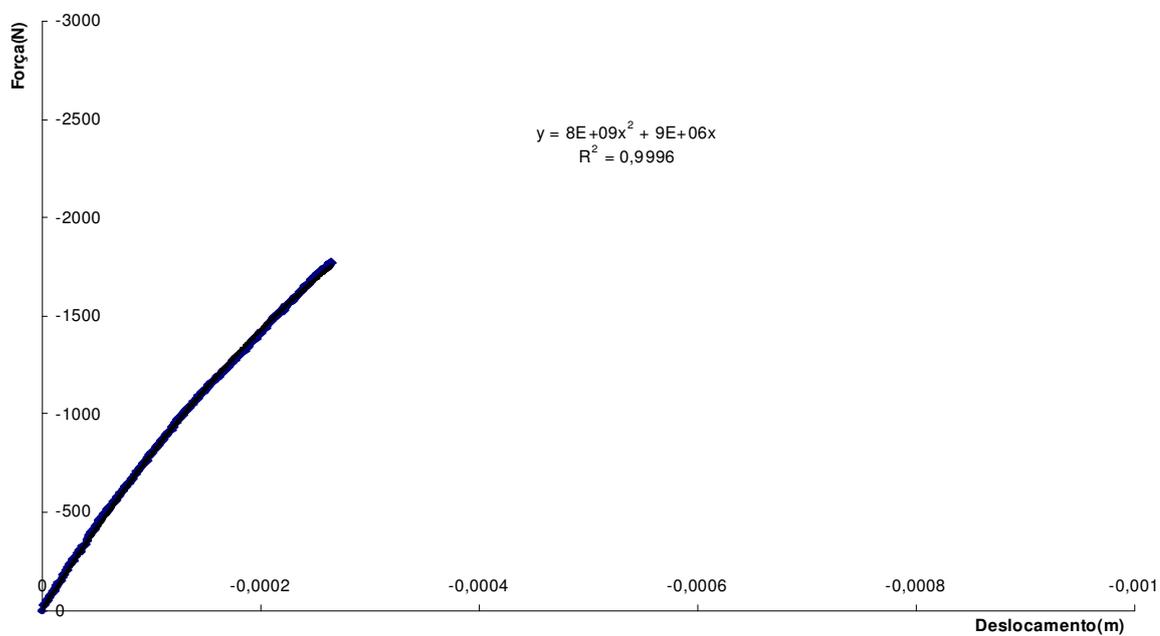


FIGURA 60 – Gráfico cp 75 (foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

76

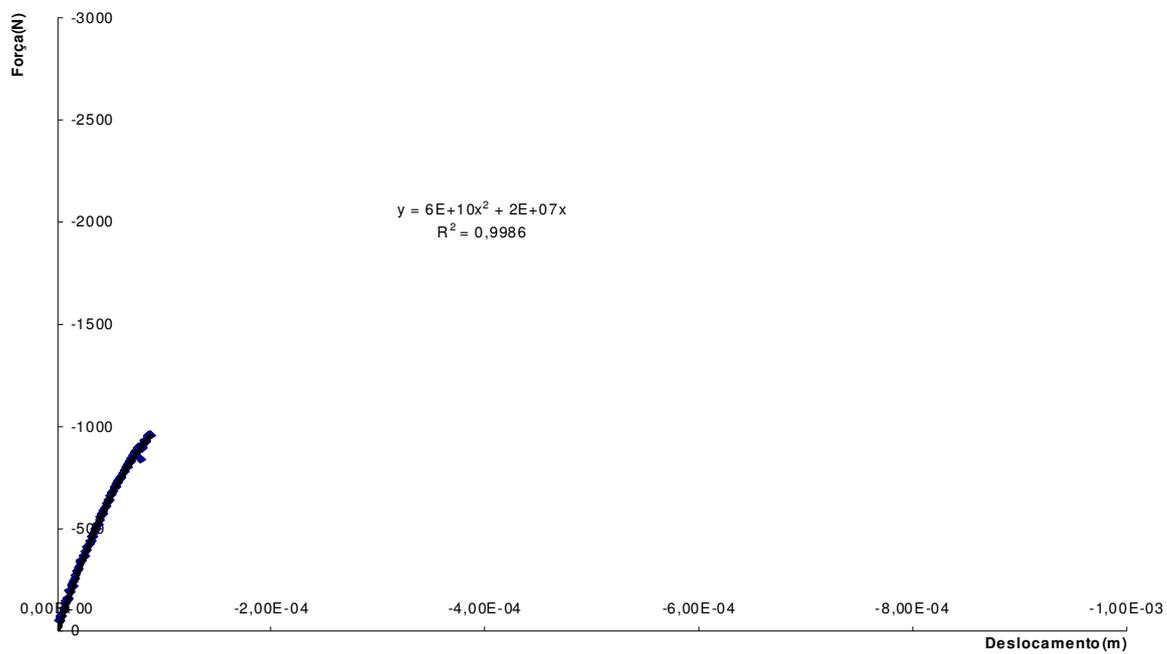


FIGURA 61 – Gráfico cp 76 (foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

77

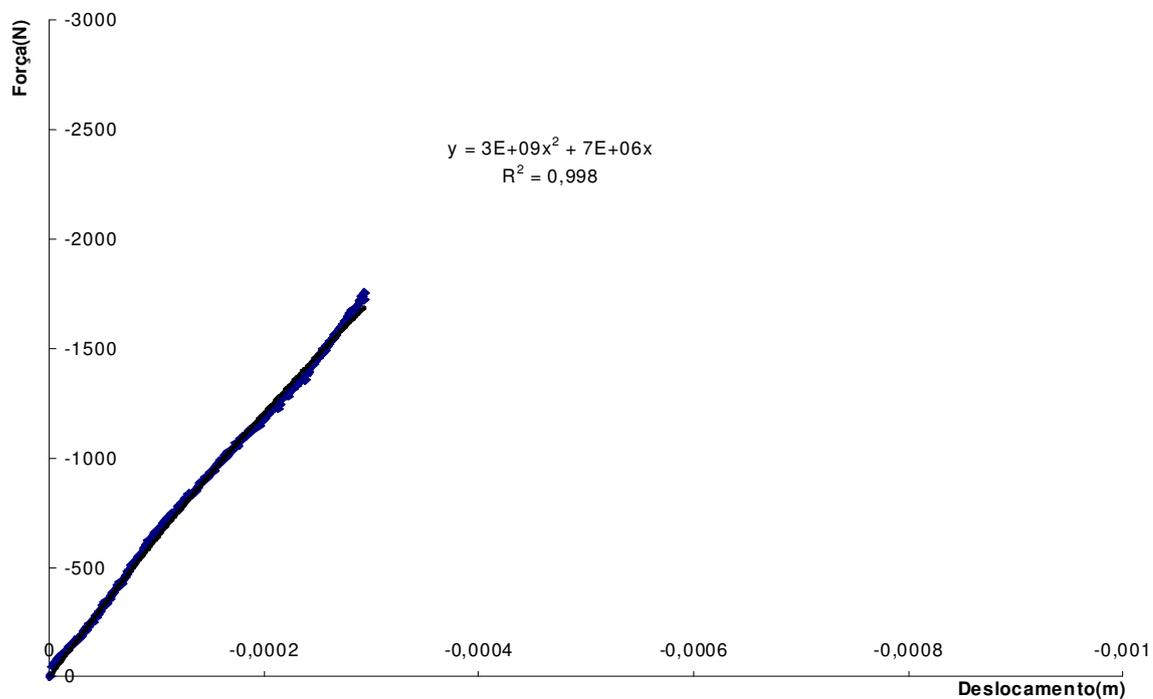


FIGURA 62 – Gráfico cp 77 (foi ao forno, fibra, flexo-tração).

78

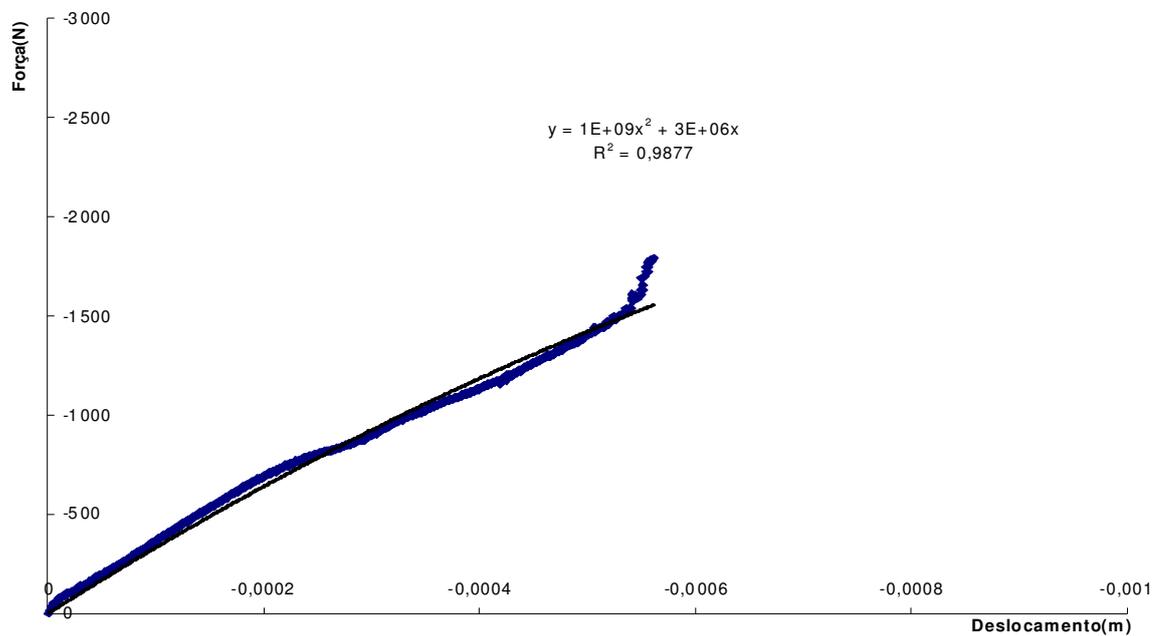


FIGURA 63 – Gráfico cp 78 (foi ao forno, fibra, flexo-tração).

79

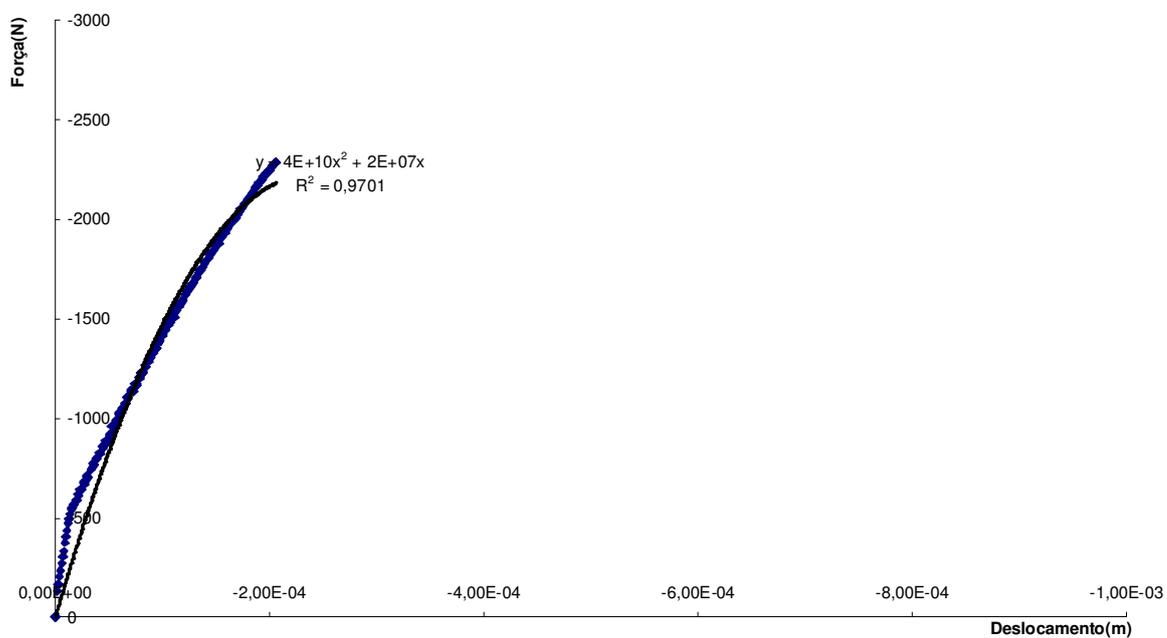


FIGURA 64 – Gráfico cp 79 (foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

80

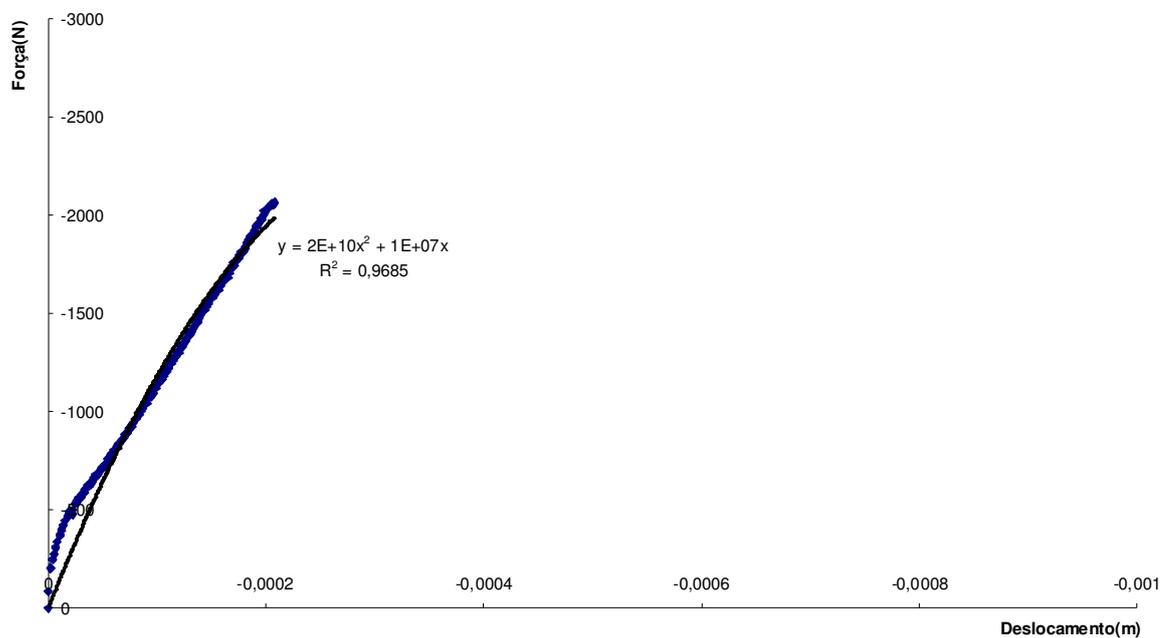


FIGURA 65 – Gráfico cp 80 (foi ao forno, fibra, fadiga seguida de flexo-tração).

81

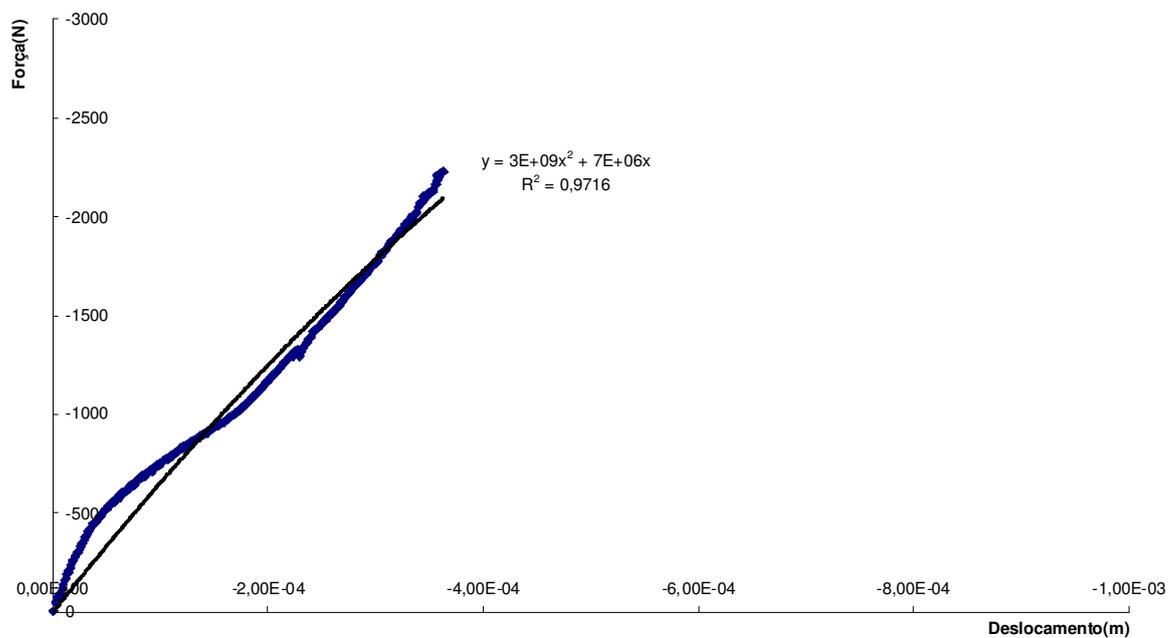


FIGURA 66 – Gráfico cp 81 (foi ao forno, fibra, flexo-tração).

82

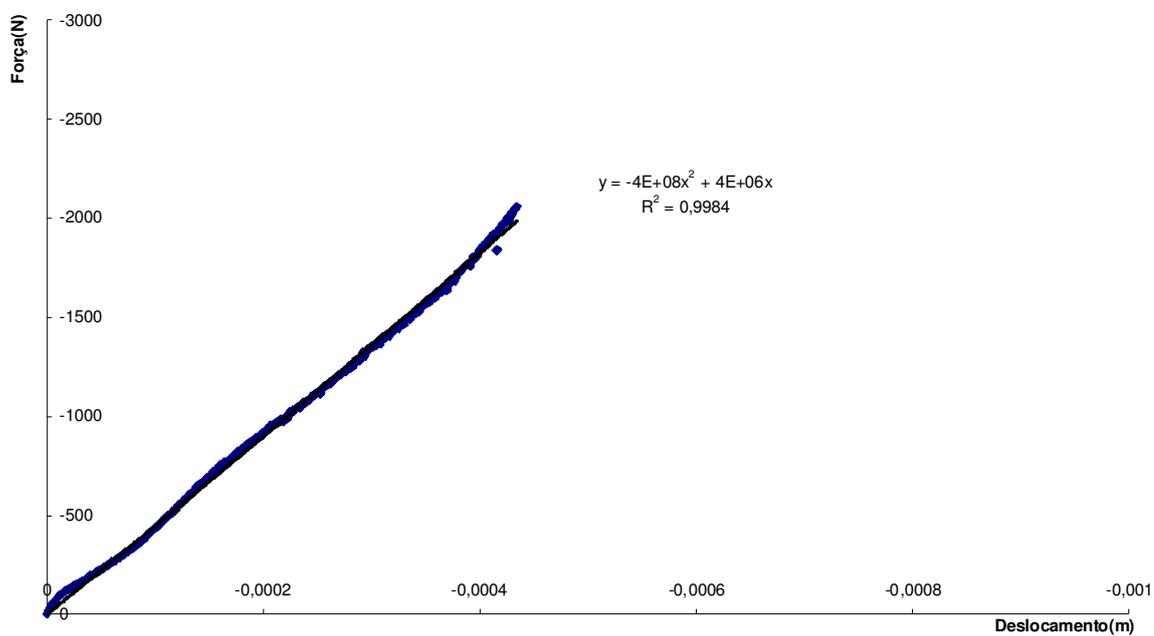


FIGURA 67 – Gráfico cp 82 (foi ao forno, fibra, flexo-tração).

83

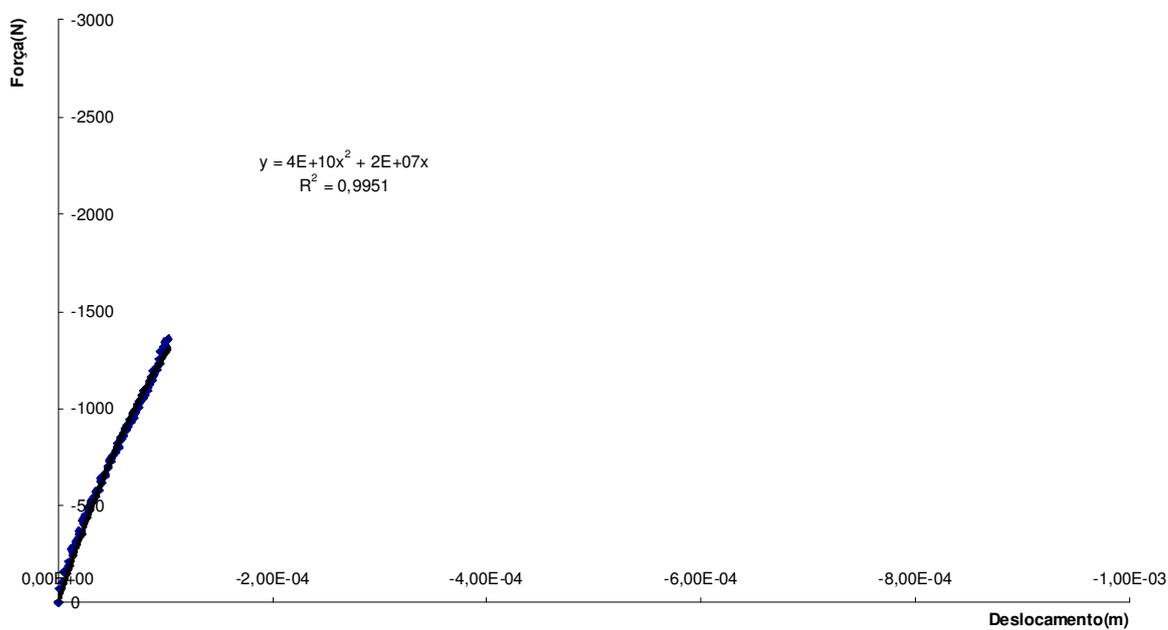


FIGURA 68 – Gráfico cp 83 (não foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

85

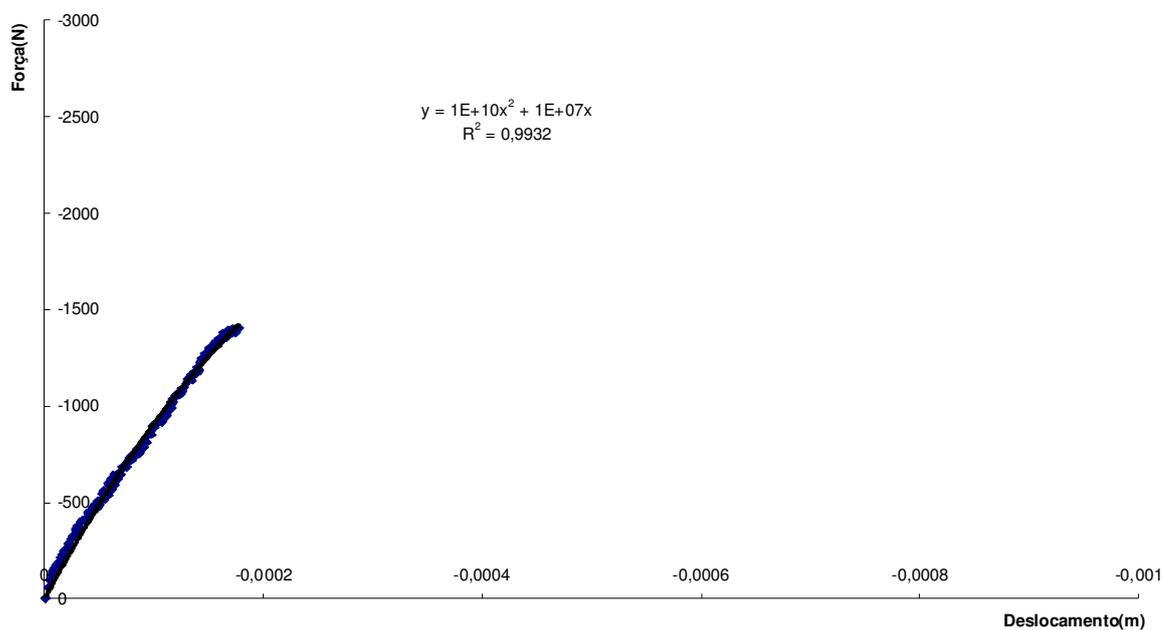


FIGURA 69 – Gráfico cp 85 (não foi ao forno, fio, flexo-tração).

86

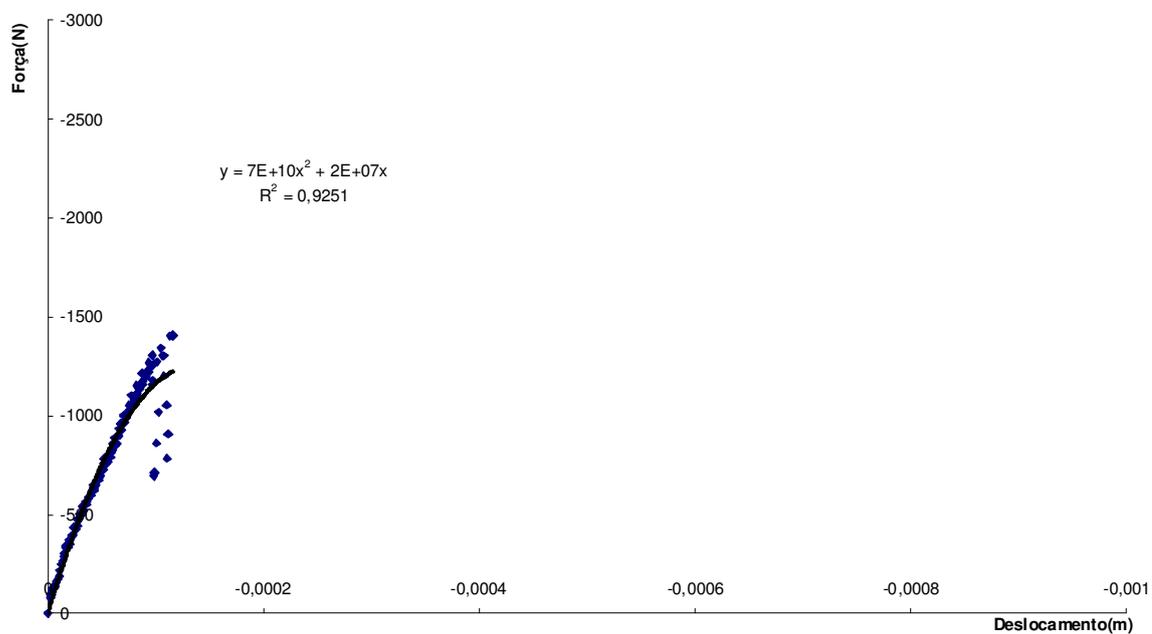


FIGURA 70 – Gráfico cp 86 (não foi ao forno, fio, flexo-tração).

87

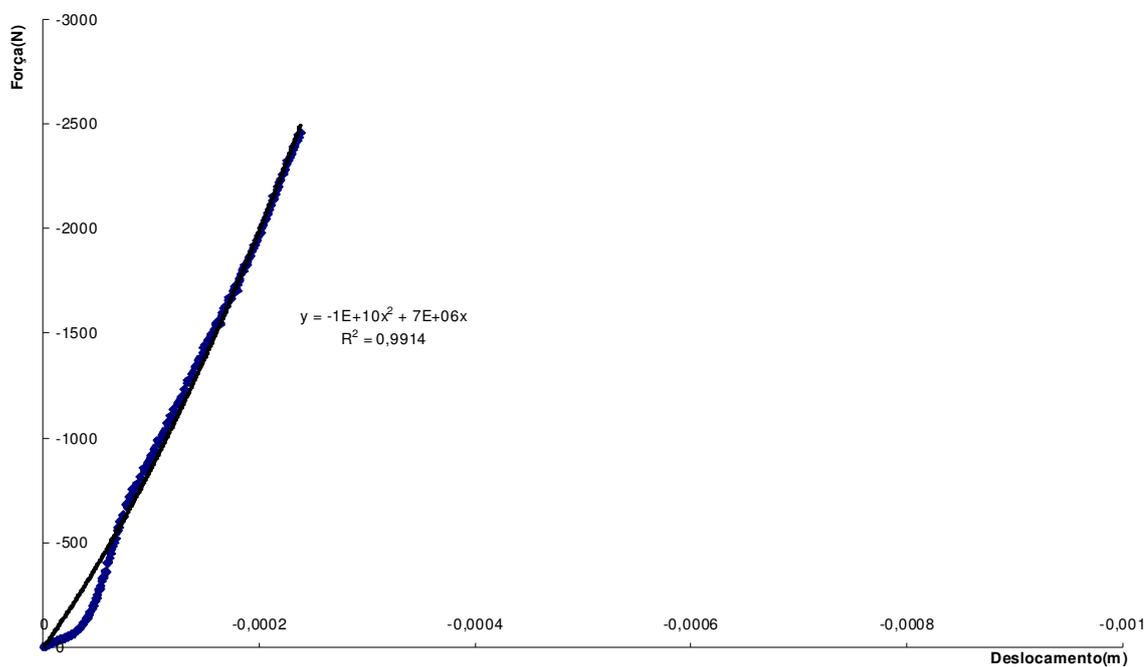


FIGURA 71 – Gráfico cp 87 (foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

88

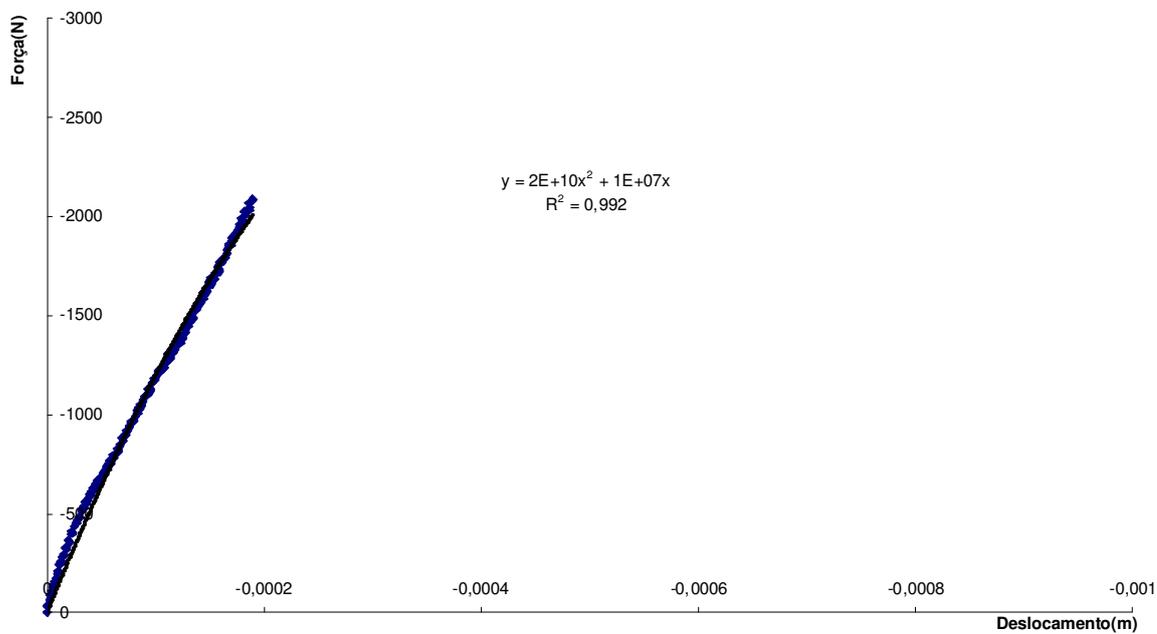


FIGURA 72 – Gráfico cp 88 (foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

90

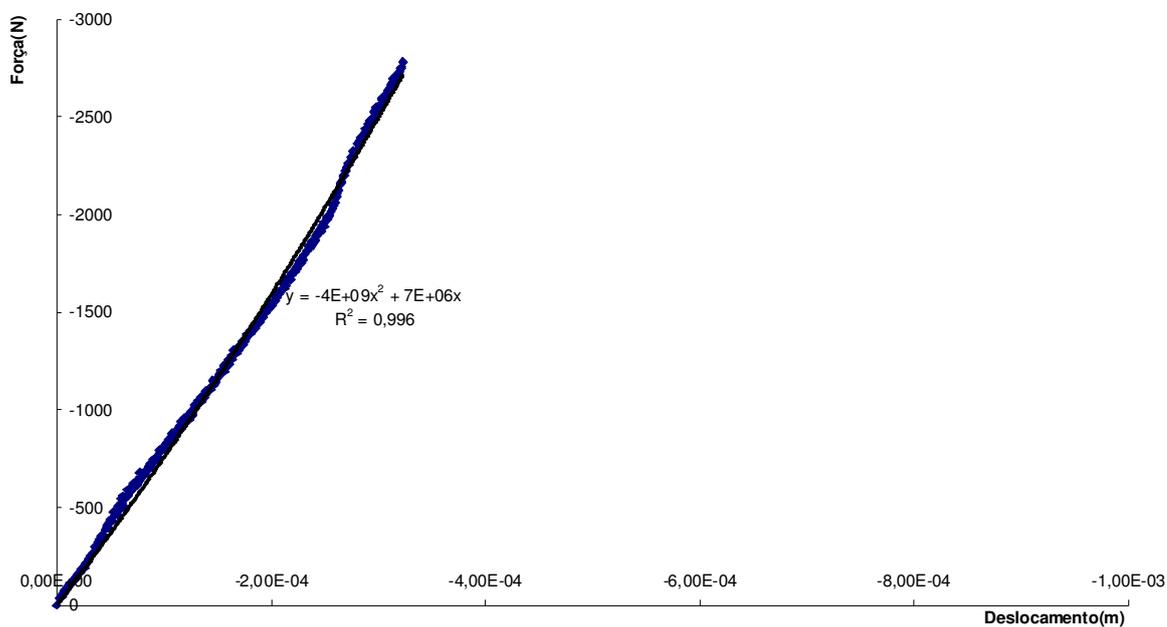


FIGURA 73 – Gráfico cp 90 (foi ao forno, fio, flexo-tração).

92

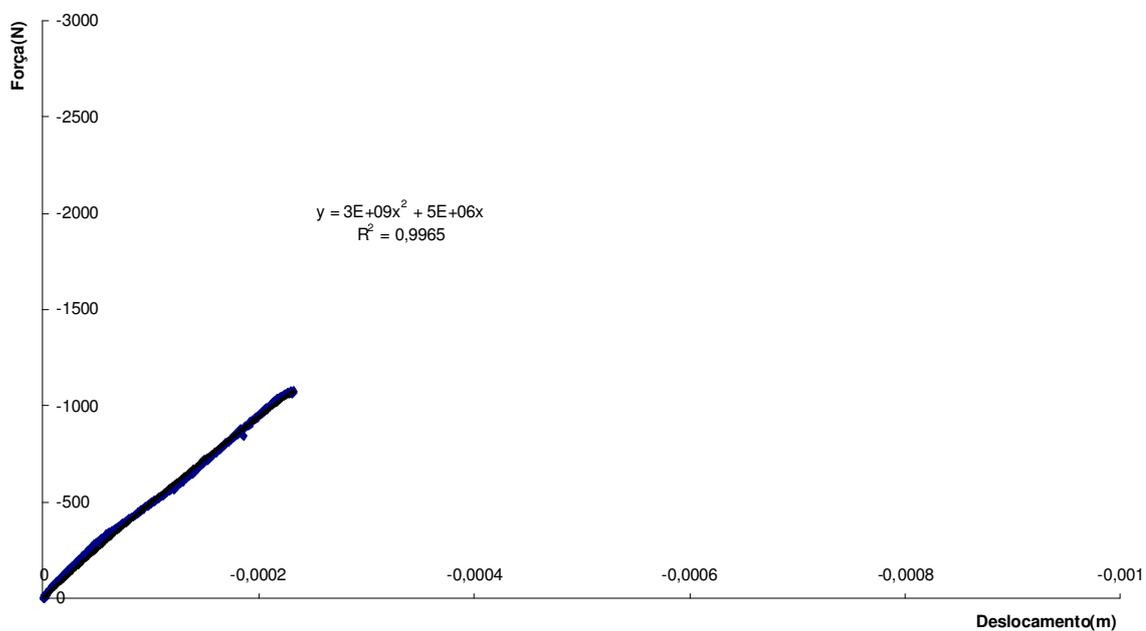


FIGURA 74 – Gráfico cp 92 (não foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

93

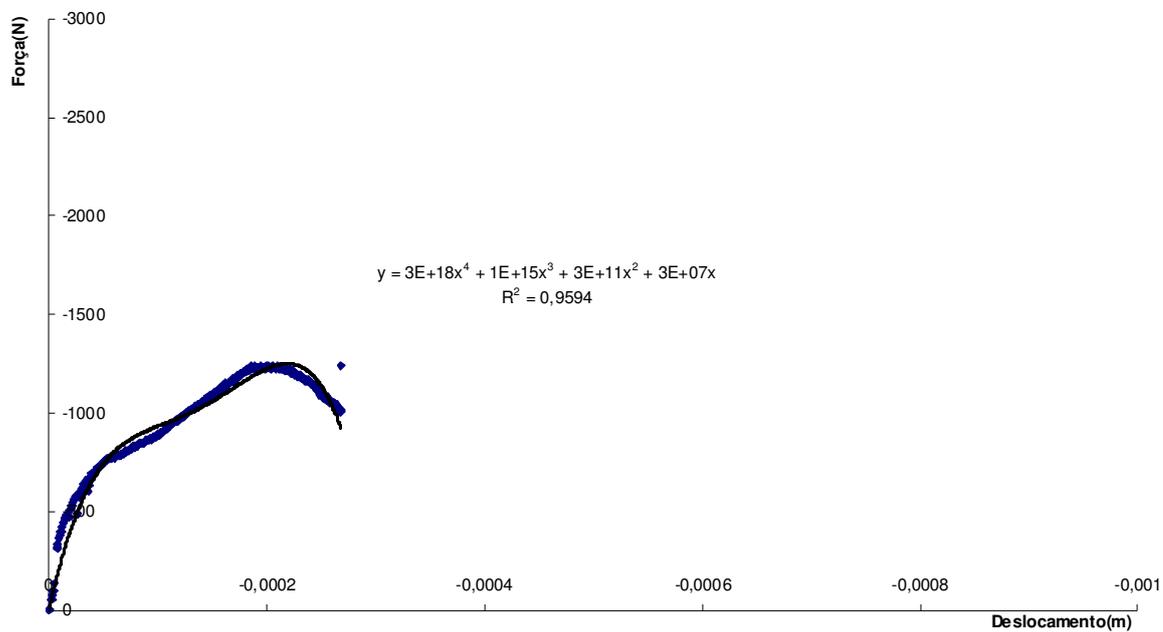


FIGURA 75 – Gráfico cp 93 (não foi ao forno, fio, flexo-tração).

94

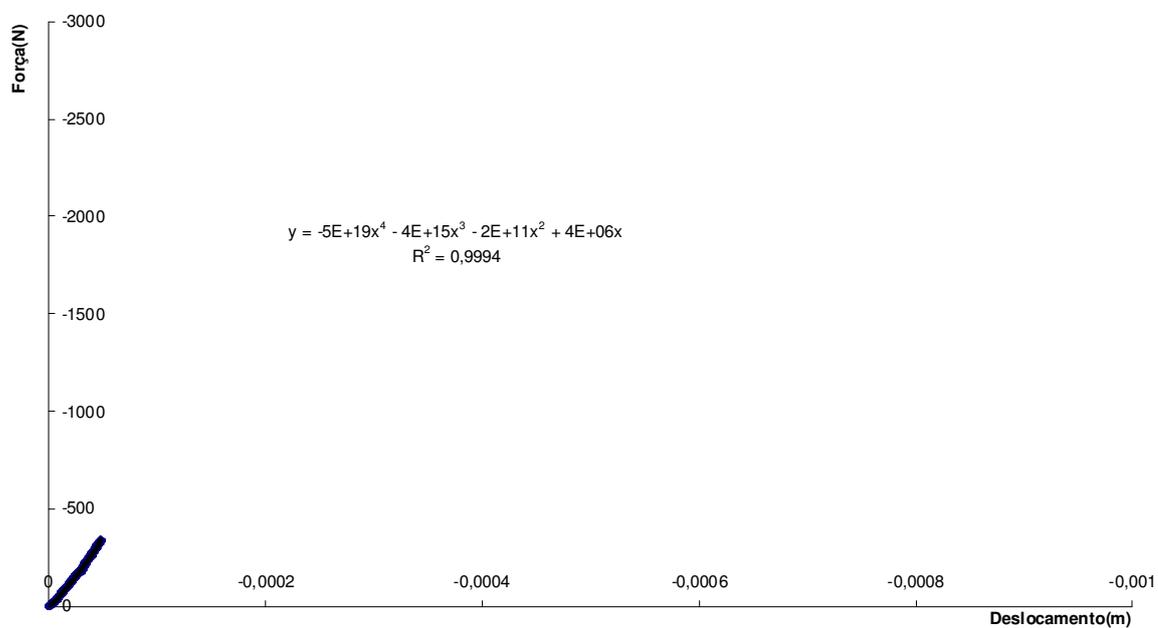


FIGURA 76 – Gráfico cp 94 (não foi ao forno, fio, flexo-tração).

95

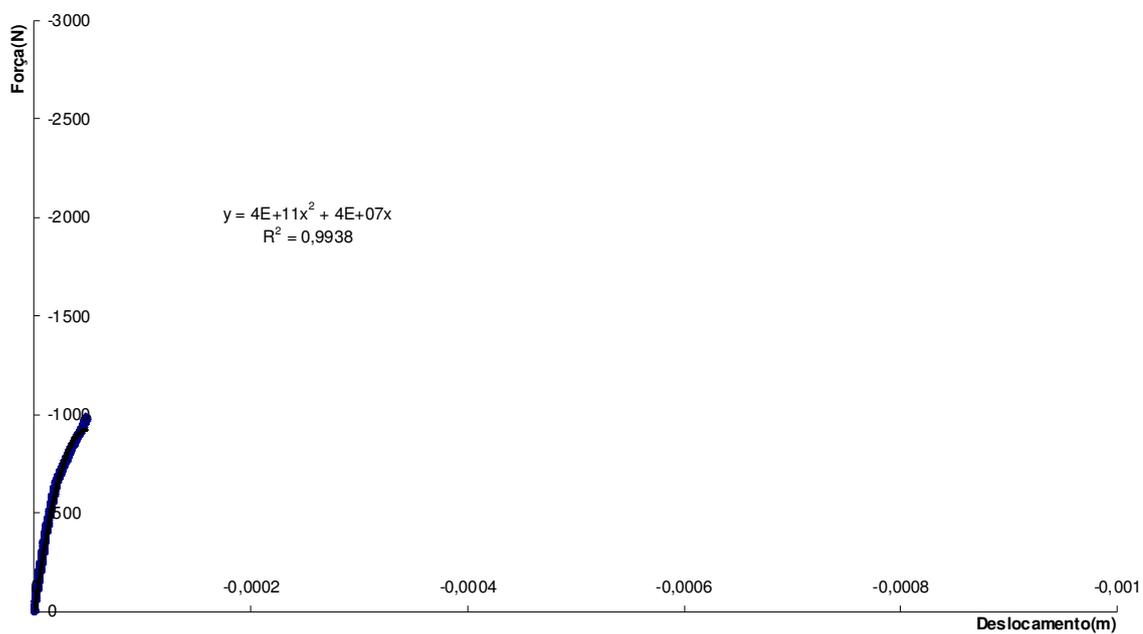


FIGURA 77 – Gráfico cp 95 (foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

96

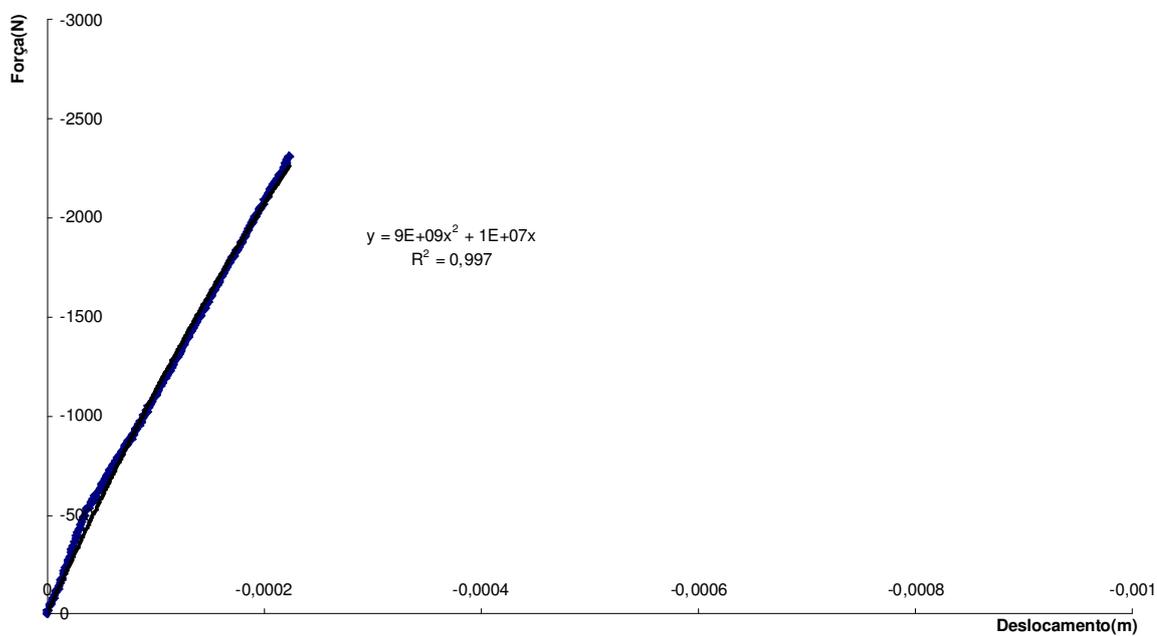


FIGURA 78 – Gráfico cp 96 (foi ao forno, fio, fadiga seguida de flexo-tração).

97

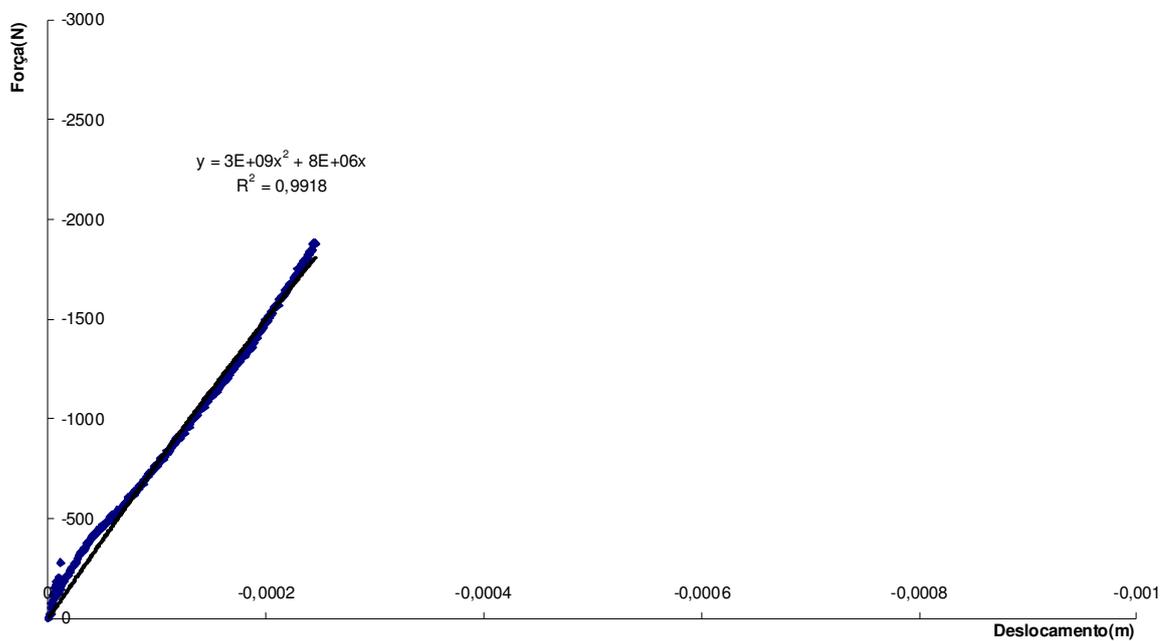


FIGURA 79 – Gráfico cp 97 (foi ao forno, fio, flexo-tração).

98

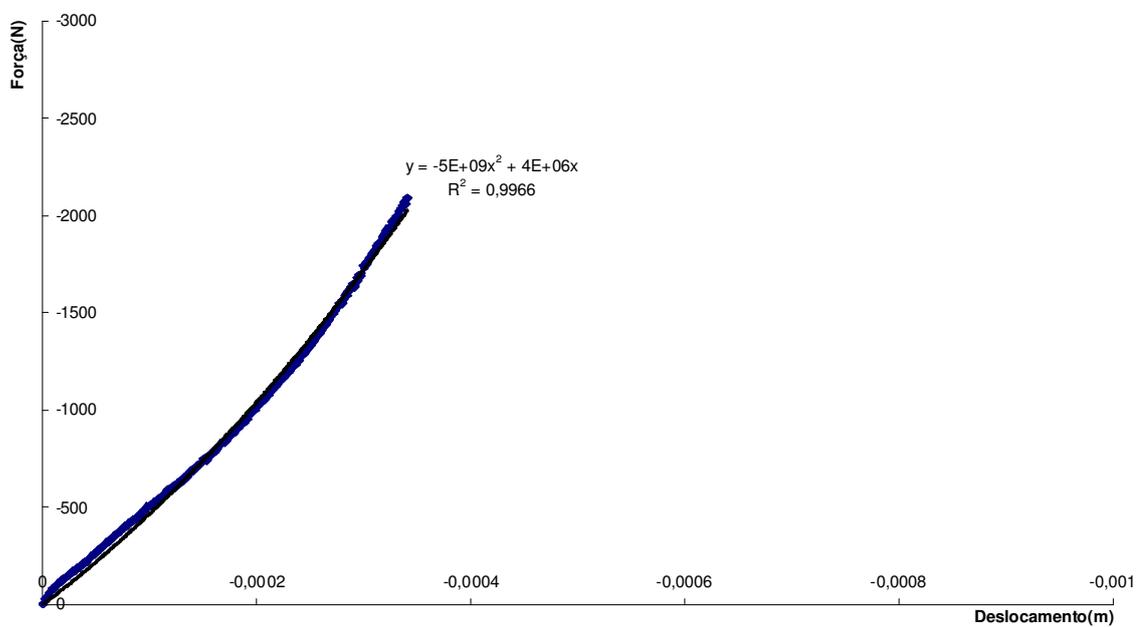


FIGURA 80 – Gráfico cp 98 (foi ao forno, fio, flexo-tração).