



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO DE VIGAS
ADAPTATIVAS COM LIGAS DE Ni-Ti EM
TEMPERATURAS INFERIORES A M_f E SUPERIORES A A_f**

DIEGO ANDRÉS CAMPO CEBALLOS

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO DE VIGAS
ADAPTATIVAS COM LIGAS DE Ni-Ti EM
TEMPERATURAS INFERIORES A M_f E SUPERIORES A A_f**

DIEGO ANDRÉS CAMPO CEBALLOS

ORIENTADOR: FLAMINIO LEVY NETO

CO-ORIENTADOR: EMMANUEL PACHECO ROCHA LIMA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMA MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: ENM - DM 49A /12

BRASÍLIA/DF: 4 MAIO – 2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO DE VIGAS
ADAPTATIVAS COM LIGAS DE Ni-Ti EM TEMPERATURAS
INFERIORES A M_f E SUPERIORES A A_f

DIEGO ANDRÉS CAMPO CEBALLOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Flaminio Levy Neto, PhD (ENM-UnB)
(Orientador)

Prof. Emmanuel Pacheco Rocha Lima, Dr. (FGA-UnB)
(Co-Orientador)

Prof. Alberto Carlos Guimarães Diniz, Dr. (ENM-UnB)
(Examinador Externo)

Prof. Edson Paulo da Silva, Dr.-Ing. (ENM-UnB)
(Examinador interno)

BRASÍLIA/DF, 4 DE MAIO DE 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA

CAMPO CEBALLOS, DIEGO ANDRÉS.

Análise do Comportamento Elástico de Vigas Adaptativas com Ligas de Ni-Ti em Temperaturas Inferiores a M_f e Superiores a A_f [Distrito Federal] 2012.

xiii, 79 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2012).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica

1. Ligas com memória de forma

2. Compósitos Híbridos

3. Ensaio de flexão em três pontos

4. Polipropileno

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CAMPO C., D. A. (2012). Análise do Comportamento Elástico de Vigas Adaptativas com Ligas de Ni-Ti em Temperaturas Inferiores a M_f e Superiores a A_f . Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-49A/12, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 79 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Diego Andrés Campo Ceballos.

TÍTULO: Análise do Comportamento Elástico de Vigas Adaptativas com Ligas de Ni-Ti em Temperaturas Inferiores a M_f e Superiores a A_f .

GRAU: Mestre

ANO: 2012

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

Diego Andrés Campo Ceballos

Diego Andrés Campo Ceballos

SQN 409 bloco H Apto 304.

70857-080 Brasília – DF – Brasil.

Dedicatória

À minha avó Trinidad (in memoriam)

*Pessoa com um enorme coração.
Era tudo para os filhos e netos,
como se mais ninguém na vida tivesse.
Vivia para dar tudo o que podia,
Trabalhava imenso,
e nada lhe podia faltar enquanto trabalhava.
;Tudo o que fazia era bem feito!
Perdi-a com imensa dor
que ainda não recupero,
mas a ela levo no meu coração.*

Agradecimentos

A Deus, pela benção da vida e por tudo que ele nos dá em abundancia: Saúde, felicidade, prosperidade, e pelas múltiplas oportunidades para evoluir tanto pessoalmente quanto profissionalmente.

Aos meus amados pais Margarita e Harold, pelo seu amor e dedicação e por compreenderem minha ausência durante a longa jornada de estudos a qual tenho me dedicado.

Aos meus irmãos Mónica e Adrian, por estarem sempre acompanhando-me no caminho da vida e por compartilhar todos os eventos das nossas vidas com muito carinho. Aos meus familiares e amigos na Colômbia, pelas ações fundamentais na minha formação humana, cultural e social.

Ao professor Flaminio Levy Neto e ao professor Emmanuel Pacheco Rocha Lima, pelos profundos ensinamentos, experiências e conselhos ao longo da orientação deste trabalho de mestrado.

Ao professor Carlos Llanos, por sua vontade de ter sempre a mão estendida mediando o conhecimento, abrindo portas, mostrando caminhos!

Ao Peter, pela sua constante dedicação e espírito no trabalho de pesquisa, que com seus conhecimentos, experiências e profunda criatividade ajudaram ao bom desenvolvimento deste trabalho, e aos meus amigos e colegas do laboratório GRACO e SG9; pela disponibilização de recursos técnicos nos ensaios de DRX, DSC, MTS e MEV indispensáveis à execução dessa dissertação.

Aos meus amigos Diana e Camilo, pela sua amizade sincera e confiança total. Ao Rodrigo, Liliana, Jesús, Pili, Guillermo, Juan Pablo, Alejandro, Yina, Tatiana, Paola por estarem sempre presentes. À Rosita e os professores e amigos capoeiristas, pelo novo mundo descoberto, e aos amigos que fazem parte da família de Colombianos em Brasília.

À UnB pela formação e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq, pelo apoio financeiro.

RESUMO

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO DE VIGAS ADAPTATIVAS COM LIGAS DE Ni-Ti EM TEMPERATURAS INFERIORES A M_f E SUPERIORES A A_f .

Pesquisadores alemães desenvolveram o polipropileno copolímero random PP, na busca de um sistema de condução de água capaz de suportar altas pressões e altas temperaturas. Este material liberou a produção de tubos e conexões resistentes à água quente, mas, por ser um material polimérico, a rigidez destas tubulações decresce com o aumento da temperatura. Este trabalho apresenta a pesquisa do comportamento mecânico à flexão de vigas compósitas híbridas constituídas de um tubo cilíndrico de polipropileno (PP) e uma barra circular sólida de liga de Ni-Ti, incorporada na superfície externa do tubo, fixada com uma camada bobinada de nylon impregnada com resina epóxi. Os tubos de PP podem operar em temperaturas de até 80°C, aquecendo as ligas Ni-Ti até temperaturas acima de A_f , permitindo observar a contribuição do fio no aumento da rigidez das vigas compósitas fabricadas. Inicialmente, foi caracterizada a liga de Ni-Ti apresentando temperaturas de transformação de fase de $M_s = 46,24^\circ\text{C}$, $M_f = 31,72^\circ\text{C}$, $A_s = 37,67^\circ\text{C}$ e $A_f = 60,17^\circ\text{C}$, obtidas do ensaio de calorimetria diferencial de varredura (DSC), composição química média de 50,05% em peso de Ni a partir da espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e presença da fase monoclínica à temperatura ambiente, identificada pela difração de raios X (DRX). Posteriormente, tubos de PP de 500 mm de comprimento foram usados para fabricar vigas compósitas híbridas incorporando fios de aço e camada nylon/epóxi para aperfeiçoar o método de fabricação e testar o dispositivo de flexão em três pontos. Finalmente, vigas compósitas com fio de Ni-Ti e camada de nylon/epóxi, foram fabricadas e logo testadas em flexão de três pontos. Os resultados demonstraram que houve um aumento no valor do módulo efetivo em flexão das vigas E_{xF} de 18% a 32% quando o fio de Ni-Ti, alinhado no plano vertical de aplicação da carga do ensaio de flexão, aumentou sua rigidez pela transformação de fase martensita para austenita induzida pela mudança da temperatura de 21°C a 56°C.

ABSTRACT

ELASTIC BEHAVIOR ANALYSIS OF ADAPTIVE BEAMS BASED Ni-Ti ALLOYS AT BELOW M_f AND ABOVE A_f TEMPERATURES.

German researchers have been developed a polypropylene random copolymer PP, in the search for a water transportation system capable of withstand high pressures and temperatures. This material allowed the production of pipes and connections resistant to hot water, however, stiffness decreases with increasing temperature for the polymeric properties. This work presents the mechanical behavior investigation of hybrid composite beams based Ni-Ti alloy. The beams consist of a medium density polypropylene pipe (PP) with a bar of Ni-Ti alloy incorporated in the surface and manual winding with a coated layer of nylon/epoxy. PP pipes can work over 80 °C heating Ni-Ti alloy to above A_f temperature, which would show Ni-Ti contribution to increasing the stiffness of the hybrid composite beams. First, Ni-Ti alloy was characterized with differential scanning calorimetry (DSC), found the transformation temperatures at $M_s = 46,24$ °C, $M_f = 31,72$ °C, $A_s = 37,67$ °C and $A_f = 60,17$ °C. Energy dispersive spectroscopy (EDS) results indicated chemical composition of NiTi alloy of 50.05 wt% of Ni. X-ray diffraction (XRD) showed the monoclinic phase at room temperature. Subsequently, PP pipes of 500 mm in length were used to produce hybrid composite beams incorporating a steel bar coated with nylon/epoxy layer in order to improve the manual winding method and test the three point bending device. Finally, hybrid composite beams with Ni-Ti bar and nylon/epoxy layer were fabricated and then tested in three point bending. Results showed an increase on flexural elastic modulus of the beams E_{xF} of 18% to 32% because stiffness increase of Ni-Ti alloy, aligned in the vertical plane of load application in bending test, due thermal transformation from martensite to austenite phase induced by changes of temperature from 21 °C to 56 °C.

RESÚMEN

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ELÁSTICO DE VIGAS ADAPTATIVAS CON ALEACIONES DE Ni-Ti EN TEMPERATURAS INFERIORES A M_f Y SUPERIORES A A_f .

Investigadores alemanes desarrollaron el polipropileno copolímero random PP en la búsqueda de un sistema de conducción de agua capaz de soportar altas temperaturas e presiones. Este material posibilitó la producción de tubos e conexiones resistentes al agua caliente, sin embargo, por ser un material polimérico, su rigidez decrece con el aumento de la temperatura. Este trabajo presenta la investigación del comportamiento mecánico en flexión de vigas compósitas híbridas constituidas de un tubo cilíndrico de polipropileno y una barra circular sólida de Ni-Ti incorporada en la superficie externa del tubo, y fijada con una capa de revestimiento de nylon/epoxi. Los tubos de PP pueden trabajar en temperaturas superiores a 80 °C, logrando llevar al material de NiTi a temperaturas mayores que A_f , lo que permitiría observar su contribución al aumento de la rigidez de las vigas compósitas fabricadas. Inicialmente, la liga de Ni-Ti fue caracterizada presentando temperaturas de transformación de fase de $M_s = 46,24^\circ\text{C}$, $M_f = 31,72^\circ\text{C}$, $A_s = 37,67^\circ\text{C}$ e $A_f = 60,17^\circ\text{C}$, obtenidas de la calorimetría diferencial de barrido (DSC), composición química media de 50,05% en peso de Ni a partir de la espectroscopia de energía dispersiva (EDS) y presencia de fase monoclinica a temperatura ambiente, identificada mediante difracción de rayos X (DRX). Posteriormente, fueron usados tubos de PP de 500 mm de largo, para fabricar vigas compósitas híbridas con barras de acero e capa de revestimiento de nylon/epoxi en la superficie, con el fin de perfeccionar el método de fabricación y probar el dispositivo de flexión en tres puntos. Finalmente, fueron fabricadas las vigas compósitas híbridas con barras de Ni-Ti e capa de revestimiento de nylon/epoxi para los ensayos de flexión en tres puntos. Los resultados demostraron que hubo un aumento en el valor del módulo efectivo en flexión de las vigas compósitas E_{x_F} de 18% a 32% cuando la barra de Ni-Ti, alineada en el plano vertical de aplicación de la carga en el ensayo de flexión, aumenta su rigidez debido a la transformación de fase de martensita a austenita inducida por el cambio de temperatura de 21°C a 56°C.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - OBJETIVOS DO TRABALHO	3
1.1.1 - Objetivo geral.....	3
1.1.2 - Objetivos específicos	4
1.2 - JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	5
1.3 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	6
2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1 - MATERIAIS COMPÓSITOS.....	8
2.2 - MATRIZES POLIMÉRICAS	9
2.2.1 - Resinas termofixas	10
2.2.2 - Polímeros termoplásticos	10
2.3 - MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS.....	11
2.4 - MATERIAIS INTELIGENTES E ESTRUTURAS ADAPTATIVAS.....	12
2.5 - COMPÓSITOS HÍBRIDOS COM MEMÓRIA DE FORMA (SMAHC).....	14
2.5.1 - Ligas com memória de forma Ni-Ti.....	14
2.5.2 - Diagrama de Fases da Liga Ni-Ti	15
2.5.3 - Estruturas Cristalinas nas ligas de Ni-Ti.....	17
2.5.4 - Transformações martensíticas nas ligas Ni-Ti	17
2.5.5 - Mecanismos de memória de forma e pseudoelasticidade	20
2.6. ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS	23
2.6.1 - Equação diferencial básica.....	24
2.6.2 - Módulo de elasticidade, tensões e deformações normais.....	25
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 - MATERIAIS UTILIZADOS	28
3.1.1 – Liga Ni-Ti com memória de forma	28
3.1.2 - Tubos de Polipropileno (PP)	29
3.1.3 - Fios de aço.....	30
3.1.4 - Fibra de nylon	31
3.2 – METOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	32
3.2.1 - Caracterização da liga de Ni-Ti.....	32
3.2.2 - Caracterização geométrica dos tubos de polipropileno.....	35
3.2.3 - Classificação dos corpos de prova	40

3.2.4 – Detalhes na fabricação das vigas compósitas híbridas	41
3.2.5 - Relações teóricas do módulo de elasticidade efetivo em flexão	47
3.2.6 - Caracterização mecânica com o ensaio de flexão em três pontos.....	51
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 – CARACTERIZAÇÕES DA LIGA DE Ni-Ti	53
4.1.1 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	53
4.1.2. – Difração de raios X (DRX).....	55
4.1.3 - Calorimetria diferencial de varredura (DSC).....	57
4.2 - CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS TUBOS DE POLIPROPILENO (PP). 59	
4.3 – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS COM FIO DE AÇO. 61	
4.4 – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS COM FIO DE Ni-TI: VIGAS ADAPTATIVAS	65
5 - CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS	70
5.1 - CONCLUSÕES.....	70
5.2 - SUGESTÕES E TRABALHOS FUTUROS	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
APÊNDICE A – Data Sheet da liga Ni-Ti Memory-Metalle GmbH	77
APÊNDICE B – Arquivo de Difração do Ni-Ti: Sistema Monoclínico.....	78
APÊNDICE C – Arquivo de Difração do Ni-Ti: Sistema Cúbico	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Aumento do módulo de elasticidade da liga de Ni-Ti com a temperatura (Turner, 2001 modificado)	2
Figura 1.2 – Vista da seção transversal das vigas adaptativas.....	4
Figura 1.3 – Dependência do módulo de elasticidade do Polipropileno com a temperatura (Acqua system, 2008 modificado).....	6
Figura 2.1 - Tipos de materiais compósitos (Callister, 2002 modificado).....	8
Figura 2.2 – Classificação dos compósitos segundo o reforço (Levy e Pardini, 2006).....	9
Figura 2.3 – Bobinamento circunferencial (<i>hoop</i>) manual (Callister, 2002 modificado) ...	12
Figura 2.4 – Conceito de estrutura adaptativa (Janocha, 1999 modificado)	13
Figura 2.5 – Compósito híbrido com memória de forma SMAHC (Turner, 2001).	14
Figura 2.6 – Diagrama de fases do Ni-Ti (McNeese and Lagoudas, 2000).	16
Figura 2.7 – Células unitárias da fase (a) austenita, (b) martensita e (c) fase R	17
Figura 2.8 - Evolução do processo de transformação de fase das SMA	19
Figura 2.9 – Mecanismo do efeito de memória de forma e efeito superelástico (Otsuka, 1998 modificado).....	21
Figura 2.10 – Curvas tensão-deformação (a) efeito de memória de forma e (b) comportamento pseudoelástico.....	21
Figura 2.11 – As 24 diferentes variantes que podem crescer a partir dos seis planos equivalentes que passam através das faces diagonais (6x2x2) na estrutura CsCl.	22
Figura 2.12 – Análise da viga bi-apoiada com carga concentrada no meio do vão.	23
Figura 3.1 – Ligas de Ni-Ti de 520 mm de comprimento.	29
Figura 3.2 – Superfície do fio de Ni-Ti (a) oxidada (b) decapada com reagente Kroll.....	29
Figura 3.3 – Características geométricas do tubo de polipropileno (Acqua system, 2008). 30	
Figura 3.4 – Rolo de fio de nylon (Polietileno) usado no bobinamento.....	31
Figura 3.5 – Calorímetro diferencial de varredura (DSC), com bancada experimental de preparação e análise das amostras.	33
Figura 3.6 – Amostras de Ni-Ti cortadas com cortadeira de precisão Minitom de disco de diamante de baixa rotação e intenso fluxo de água.	33
Figura 3.7 – Curvas esquemáticas da análise geral de DSC com deconvolução.....	33
Figura 3.8 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV) da Biologia-UnB	35
Figura 3.9 – Pontos de medição da espessura e raios médios dos tubos.	36
Figura 3.10 – Parâmetros geométricos para a medição do raio médio do tubo.....	37

Figura 3.11 – Seções definidas para medição do raio externo nos tubos de PP.....	38
Figura 3.12 – Grau de circularidade dos tubos de polipropileno PP.	39
Figura 3.13 – Dispositivo de bobinamento manual: (a) usando o software “ <i>Solid Works</i> ” e (b) dispositivo terminado.....	41
Figura 3.14 – Sulco feito nos tubos de PP para incorporar os fios de aço ou Ni-Ti.....	42
Figura 3.15 – Detalhe da fabricação dos compósitos híbridos com fios de aço ou Ni-Ti com camada de revestimento de nylon/epóxi.....	43
Figura 3.16 – Momentos de inércia para cada camada da viga compósita.	46
Figura 3.17 – Dispositivo de flexão em três pontos projetado para a MTS – 810.	51
Figura 3.18 – Ensaio de flexão em três pontos do tubo de PP na MTS.	52
Figura 4.1 – Microestrutura da liga de Ni-Ti com aumento de a) 330X e de b) 950X.	54
Figura 4.2 – Análise EDS (a) da região e (b) de um ponto da superfície da liga de Ni-Ti.	55
Figura 4.3 – Padrão de difração da liga de Ni-Ti à temperatura ambiente.....	56
Figura 4.4 – Curvas de aquecimento e resfriamento dos ensaios DSC da liga de Ni-Ti.....	58
Figura 4.5 – Diagramas de (a)Deflexão-Tempo e (b) Força-Tempo de tubos de PP sob carregamento e descarregamento.....	59
Figura 4.6 – Resultado do ensaio de flexão em três pontos para os tubos a) PP1 e b) PP2.	60
Figura 4.7 – Resultados teóricos e experimentais do ensaio de flexão em três pontos dos tubos de PP.	61
Figura 4.8 – Orientações do fio da viga compósita no ensaio de flexão em três pontos.....	61
Figura 4.9 – Resultados do ensaio de flexão em três pontos do primeiro compósito com fio de aço (a) 0°, (b) 90° e (c) 180°.....	62
Figura 4.10 – Resultados do ensaio de flexão em três pontos do segundo compósito com fio de aço (a) 0°, (b) 90° e (c) 180°.	63
Figura 4.11 – Comparação de módulos elásticos efetivos E_{xF} , teóricos e experimentais, da viga compósita com o fio de aço orientado (a) 0° e 180° e (b) 90°.....	65
Figura 4.12 – Resultados dos ensaios de flexão em três pontos da primeira viga compósita com fio de Ni-Ti na fase martensita (21°C) e austenita (56°C).	66
Figura 4.13 – Resultados dos ensaios de flexão em três pontos da segunda viga compósita com fio de Ni-Ti na fase martensita (21°C) e austenita (56°C).	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Propriedades físicas da liga de Ni-Ti (Memory-Metalle GmbH).....	28
Tabela 3.2 – Especificações do tubo de polipropileno (PP) (Acqua system, 2008).....	30
Tabela 3.3 – Propriedades físicas do polietileno de alta densidade.....	31
Tabela 3.4 – Espessura média dos tubos de polipropileno PP.	36
Tabela 3.5 – Diâmetro interno médio dos tubos de polipropileno PP.....	37
Tabela 3.6 – Raio externo dos tubos de polipropileno PP.....	39
Tabela 3.7 – Dimensões médias padronizadas dos tubos de Polipropileno PP.....	40
Tabela 3.8 – Classificação e seleção dos corpos de prova utilizados.....	40
Tabela 3.9 – Parâmetros para o cálculo da fabricação do revestimento nylon/epóxi.....	43
Tabela 3.10 – Parâmetros utilizados para a fabricação da camada nylon/epóxi.	45
Tabela 3.11 – Parâmetros teóricos das relações de carga (P) - deflexão (ω_{max}) para o ensaio de flexão do tubo de PP.	47
Tabela 3.12 – Relações teóricas de carga - deflexão da viga com fio de aço.....	48
Tabela 3.13 – Parâmetros teóricos das relações de carga (P) - deflexão (ω_{max}) para o ensaio de flexão da viga compósita com fio de aço.....	49
Tabela 3.14 - Parâmetros teóricos das relações de carga (P) - deflexão (ω_{max}) para o ensaio de flexão da viga adaptativa com fio de Ni-Ti.	50
Tabela 3.15 – Relações teóricas de carga - deflexão da viga com fio de Ni-Ti.	51
Tabela 3.16 – Parâmetros utilizados no ensaio na MTS-810	52
Tabela 4.1 – Análise quantitativa do ensaio EDS para a liga Ni-Ti.....	55
Tabela 4.2 – Planos cristalinos da fase monoclinica do Ni-Ti relacionados aos picos de difração identificados.	57
Tabela 4.3 – Temperaturas de transformação de fase da liga Ni-Ti obtidas por DSC	59
Tabela 4.4 – Comparação dos valores teóricos e experimentais médios do módulo de elasticidade efetivo em flexão da viga compósita com fio de aço.....	64
Tabela 4.5 – Módulos de elasticidade médios efetivos em flexão das vigas adaptativas....	68
Tabela 4.6 – Relação do aumento do módulo de elasticidade da viga adaptativa.....	69

1 - INTRODUÇÃO

Novos materiais assumem uma posição cada vez mais relevante no cenário da engenharia, oferecendo propriedades, muitas vezes, não oferecidas pelos materiais tradicionais (Marinucci, 2011). Isto faz com que investir em conhecimento se torne necessário como forma de capacitar a decisão da escolha de materiais para novos projetos e atualização dos já existentes (Marinucci, 2011). Os compósitos poliméricos, ou seja, com matriz termofixa ou termoplástica, são uma classe de material que possui requisitos que os tornam fortes candidatos para utilização em projetos que buscam flexibilidade de formas, redução de peso, resistência química e elevada resistência mecânica e rigidez (Marinucci, 2011).

Um ramo dos estudos dos materiais especiais que alia, também, a utilização de materiais compósitos é a pesquisa acerca das estruturas adaptativas. Estas podem alterar suas propriedades e forma a partir de estímulos e excitações externas, como, por exemplo, variação de temperatura e aplicação de tensões. Estes materiais conseguem ter a propriedade de se adaptar ao meio ambiente ou à situação de serviço mecânico, sendo estruturas desejadas e solicitadas em projetos de engenharia, desde os mais simples até os mais complexos sistemas mecânicos em geral. Uma das principais áreas de pesquisa e desenvolvimento de estruturas adaptativas se dá no uso das ligas de memória de forma SMA (*Shape Memory Alloys*) inseridas nessas estruturas (Janocha, 1999, Srinivasan and McFarland, 2001).

As SMA são ligas metálicas com propriedades exclusivas, como a liga intermetálica de Níquel e Titânio (Ni-Ti), que tem sido muito estudada pelo fato do aumento do módulo de elasticidade em até três vezes (Turner, 2001), devido à transformação de fase martensita para a fase austenita, induzida por uma mudança de temperatura conforme ilustrado na Figura 1.1.

Dessa forma, podem-se obter diferentes comportamentos mecânicos para uma mesma estrutura, caracterizando sua capacidade de adaptação ao ambiente e ao serviço, gerando interesse no desenvolvimento de estruturas adaptativas, para controle de forma e geometria até controle da vibração (Turner, 2001).

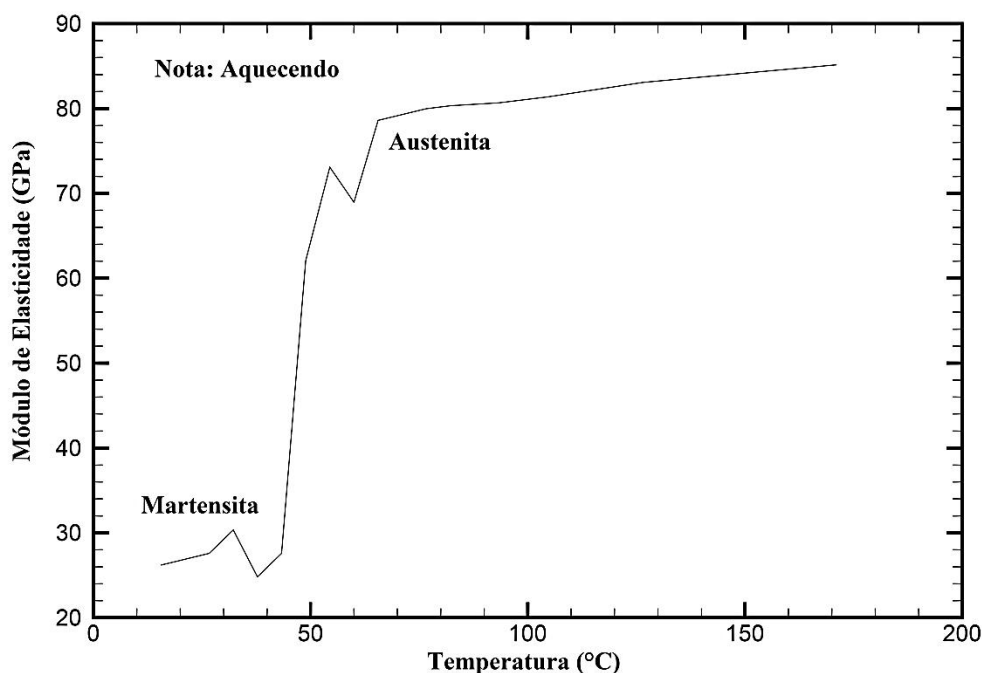


Figura 1.1 – Aumento do módulo de elasticidade da liga de Ni-Ti com a temperatura (Turner, 2001 modificado).

Pesquisas recentes (Saadat *et al.*, 2002, Zak *et al.*, 2003, Hahnen *et al.*, 2009, Leite *et al.*, 2010, Dlisani *et al.*, 2011) demonstraram que os componentes fabricados a partir de ligas com memória de forma podem ser integrados com sucesso a elementos estruturais, com a função de melhorar ou controlar características, como a rigidez e a frequência natural. Uma nova classe de aplicação de materiais surgiu quando se analisaram ligas de SMA como atuadores incorporados em estruturas compósitas. Estes compósitos foram chamados na literatura como SMAHC (*Shape Memory Alloy Hybrid Composite*) (Rogers, 1988).

Assim, inúmeras pesquisas se desenvolveram focando-se nas possibilidades da fabricação e uso de compósitos híbridos com memória de forma SMAHC, a caracterização mecânica de novas e específicas combinações de materiais adaptativos que poderão proporcionar avanços e soluções para as necessidades cada vez mais específicas da tecnologia. (Davis, 2005).

Hoje em dia, materiais poliméricos prometem maior flexibilidade e facilidade nas instalações hidráulicas de água quente, em substituição aos tradicionais tubos e conexões metálicos. Estes polímeros são muito atrativos devido à sua facilidade de fabricação,

economia, ausência de corrosão galvânica, e acabamento superior. Processos de injeção e extrusão são frequentemente usados para fabricação destes materiais (Canevarolo, 2002). Nesse sentido é importante entender as influências dos parâmetros que controlam as relações entre propriedades e estrutura para esta aplicação específica (Canevarolo, 2002).

Em contrapartida, os tubos poliméricos apresentam elevada dilatação térmica em relação aos tubos metálicos e uma dependência decrescente do valor do módulo de elasticidade com o incremento da temperatura (Mano, 2000). Os tubos plásticos próprios para a condução de água quente apresentam um coeficiente de dilatação térmica entre 3 a 9 vezes maiores do que o coeficiente de uma tubulação equivalente de cobre (Mano, 2000). Uma única restrição aparentemente permanece absoluta: a limitação ao uso em altas temperaturas da ordem de algumas dezenas de graus celsius (Mano, 2000).

Deste modo, este trabalho está dirigido e focado na pesquisa da influência da integração de ligas com memória de forma, em tubos poliméricos de condução de água quente, abordando o estudo e fabricação de uma viga compósita cilíndrica SMAHC, incorporando barras circulares contínuas de Ni-Ti na superfície de um tubo de polipropileno (PP) e uma camada de revestimento de nylon/epóxi, conforme ilustrado na Figura 1.2. Avaliando as propriedades mecânicas no regime elástico do compósito, com ensaios em flexão em três pontos, na procura de estabelecer ou quantificar o efeito da mudança do valor do módulo de elasticidade da liga de Ni-Ti pelo aumento da temperatura, sobre o módulo efetivo em flexão do compósito.

1.1 - OBJETIVOS DO TRABALHO

1.1.1 - Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo principal analisar o efeito da transformação de fase nas ligas com memória de forma, sobre a rigidez à flexão em três pontos de vigas compósitas cilíndricas híbridas fabricadas com uma liga de Ni-Ti incorporada na superfície de um tubo cilíndrico de polipropileno (PP), com camada de revestimento bobinada de nylon/epóxi para a fixação da liga, de acordo com o esquematizado na Figura. 1.2.

1.1.2 - Objetivos específicos

No que diz respeito à liga de Ni-Ti foram feitas as seguintes tarefas:

- Caracterizar termicamente a liga de Ni-Ti através da técnica de calorimetria diferencial de varredura (DSC) para determinação das temperaturas de transformação de fase martensíticas e auteníticas;
- Realizar o estudo de caracterização microscópica da liga de Ni-Ti utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) junto com espectroscopia de energia dispersiva (EDS) para conhecer sua microestrutura e composição química aproximada;
- Identificar as fases cristalinas presentes na liga de Ni-Ti à temperatura ambiente com auxílio da difração de raios-X.

No que diz respeito à fabricação e caracterização dos corpos de prova

- Confeccionar vigas adaptativas constituídas por tubos cilíndricos de polipropileno (PP) com uma barra contínua de Ni-Ti incorporada na superfície dos tubos, e com camada de revestimento de nylon/epóxi, conforme ilustrado na Figura 1.2, através de um sistema de bobinamento manual projetado para tal.

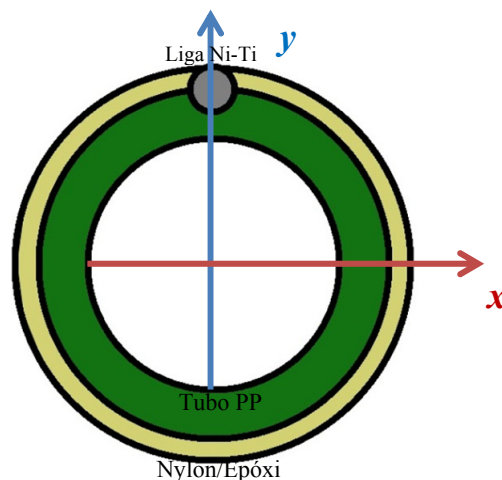


Figura 1.2 – Vista da seção transversal das vigas adaptativas.

- Quantificar o efeito da transformação de fase da liga de Ni-Ti (Martensita para Austenita) no módulo de elasticidade efetivo das vigas compósitas através de ensaios de flexão em três pontos, utilizando uma máquina de ensaios universais MTS.

1.2 - JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Os materiais que apresentam o efeito de memória de forma (EMF) ou *Shape Memory Alloys* (SMA) são considerados materiais inteligentes ou adaptativos porque apresentam, dentre outras, a característica de recuperar sua forma original aumentando sua rigidez, através do aquecimento após terem sido deformados quasiplásticamente (Janocha, 1999).

A recuperação de forma é resultado da transformação martensítica cristalograficamente reversível. A possibilidade de "lembrar" a forma memorizada resulta em diversas aplicações abrangendo escalas macro, micro e nanométrica. Essas ligas são utilizadas em áreas das engenharias mecânica, civil, de materiais, mecatrônica, química etc. A utilização de materiais compósitos híbridos (SMAHC), onde são usadas as ligas com memória de forma, é um campo que está crescendo em importância, quantidade e campos de aplicação (Turner, 2000, Davis, 2005). A sua caracterização requer, porém, o domínio de técnicas e critérios específicos, que diferem em muito das adotadas nos materiais convencionais de engenharia (Davis, 2005).

Na atualidade, as instalações hidráulicas que não sofrem oxidação são importantes para a garantia do conforto em qualquer edificação. Consistem em um conjunto de tubulações poliméricas, conexões, aparelhos e acessórios que levam a água do sistema até os pontos de consumo (Mano, 2000). Hoje em dia, as tubulações de Polipropileno (PP) para água quente suportam temperaturas contínuas de mais de 80°C, além de apresentarem bom acabamento e geometria bem definida (Acqua system, 2008). Mas, por ser um material polimérico, tem uma forte dependência de suas propriedades com a temperatura. Especificamente, a rigidez de tubulações de polipropileno tem dependência decrescente com o aumento da temperatura como pode ser observado na Figura 1.3.

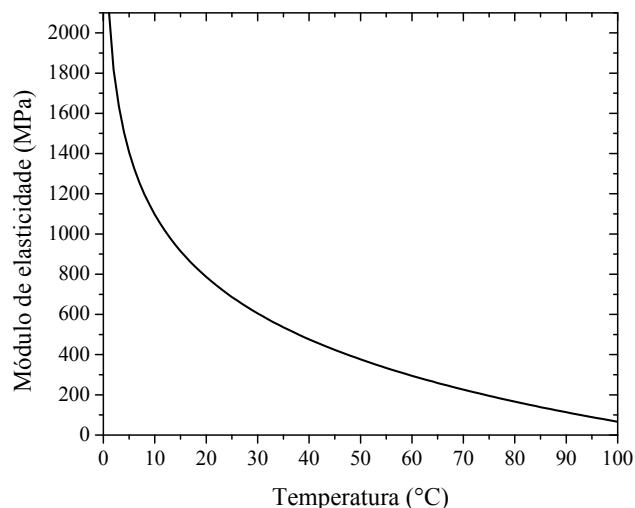


Figura 1.3 – Dependência do módulo de elasticidade do Polipropileno com a temperatura (Acqua system, 2008 modificado).

É por isso que foi interessante projetar a avaliação do módulo de elasticidade de uma viga adaptativa SMAHC, fabricada com tubulação comercial de polipropileno para água fria e quente, com um fio de SMA incorporado num sulco feito na superfície do tubo e fixado com uma camada de revestimento nylon/epóxi, e assim, considerando-se as condições de aumento de temperatura do sistema, estudar e quantificar a mudança no valor do módulo de elasticidade efetivo da viga adaptativa em flexão em três pontos.

1.3 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos com subitem devidamente assinalados, sendo o capítulo 1 a presente introdução.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão teórica dos temas centrais da pesquisa, i.e., materiais compósitos, métodos de fabricação, materiais inteligentes, ligas de Ni-Ti e materiais compósitos híbridos com memória de forma (SMAHC), assim como os princípios teóricos da técnica de ensaio de flexão em três pontos.

No capítulo 3, são apresentados os materiais utilizados com suas características iniciais de forma e composição. Também são abordados os procedimentos experimentais para as diversas técnicas utilizadas na caracterização das amostras de Ni-Ti entre outras,

i.e., a caracterização geométrica dos tubos de polipropileno usados, detalhes da fabricação e caracterização mecânica (ensaios de flexão em três pontos) das vigas compósitas híbridas com memória de forma (SMAHC), bem como a descrição do tratamento de dados.

Os resultados e a discussão são apresentados no capítulo 4. Esta discussão traz uma análise inicial da caracterização microestrutural, de composição química e de fases cristalinas presentes na liga de Ni-Ti, sempre que possível, comparando com a literatura. Finalmente são apresentados os resultados dos testes mecânicos a flexão dos corpos de prova definidos.

As conclusões, recomendações e perspectivas para trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 5.

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 - MATERIAIS COMPÓSITOS

Um material compósito é uma combinação de dois ou mais materiais, os quais um deles é a matriz, que confere a estrutura ao material e o outro é o reforço que realça as propriedades do compósito final, de modo a proporcionar ao material resultante certas características e propriedades geralmente superiores às dos constituintes (Jones, 1999). Alguns tipos de compósitos são mostrados na Figura. 2.1.

A importância dos compósitos na engenharia deve-se ao fato de obter um material com características diferentes, através de materiais já conhecidos ou convencionais e projetar um novo material em função das necessidades de cada aplicação com a ideia de que as características do compósito deverão superar às dos materiais iniciais. Uma grande vantagem dos compósitos é a capacidade de se obter materiais cujas características sejam dependentes da direção. Estes materiais são conhecidos como materiais ortotrópicos. (Jones, 1999; Levy e Pardini, 2006).

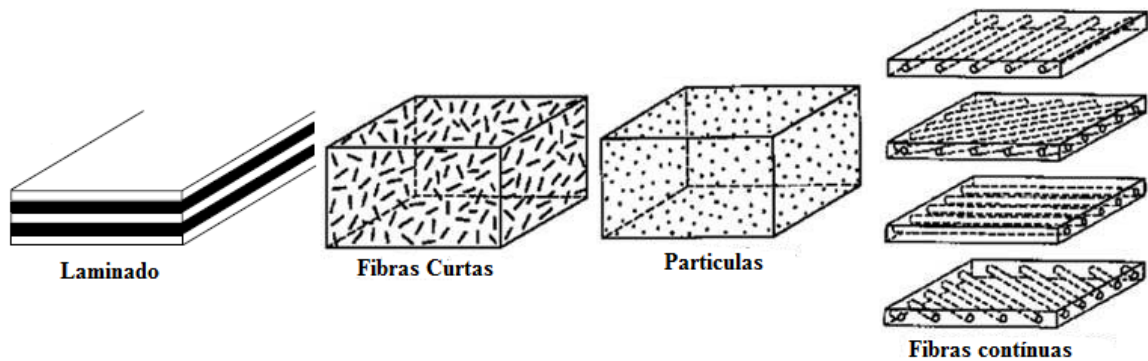


Figura 2.1 - Tipos de materiais compósitos (Callister, 2002 modificado).

Um compósito caracteriza-se por possuir duas partes distintas: a matriz e o reforço. A matriz pode ser metálica, cerâmica ou polimérica. De igual modo, os reforços podem ser de diferentes tipos como a metálica, cerâmica, etc. Quanto à forma na qual se podem apresentar estes reforços, estes podem ter a forma de partículas (pós) ou de fibras de diferentes comprimentos, recebendo o nome de fibras curtas e longas. Em função da sua

distribuição ao longo da matriz, dizemos que são alinhadas ou desalinhadas. Geralmente, os materiais de reforço são frágeis usados individualmente, mas embebidos numa matriz de outra substância apresentaram solidez ao conjunto; deste modo a matriz é a responsável de dar a estrutura ao material, além de proteger as fibras do exterior e as fibras ou material de reforço realçam as propriedades do compósito (Jones, 1999; Levy e Pardini, 2006). A classificação geral de compósitos é apresentada na Figura 2.2.

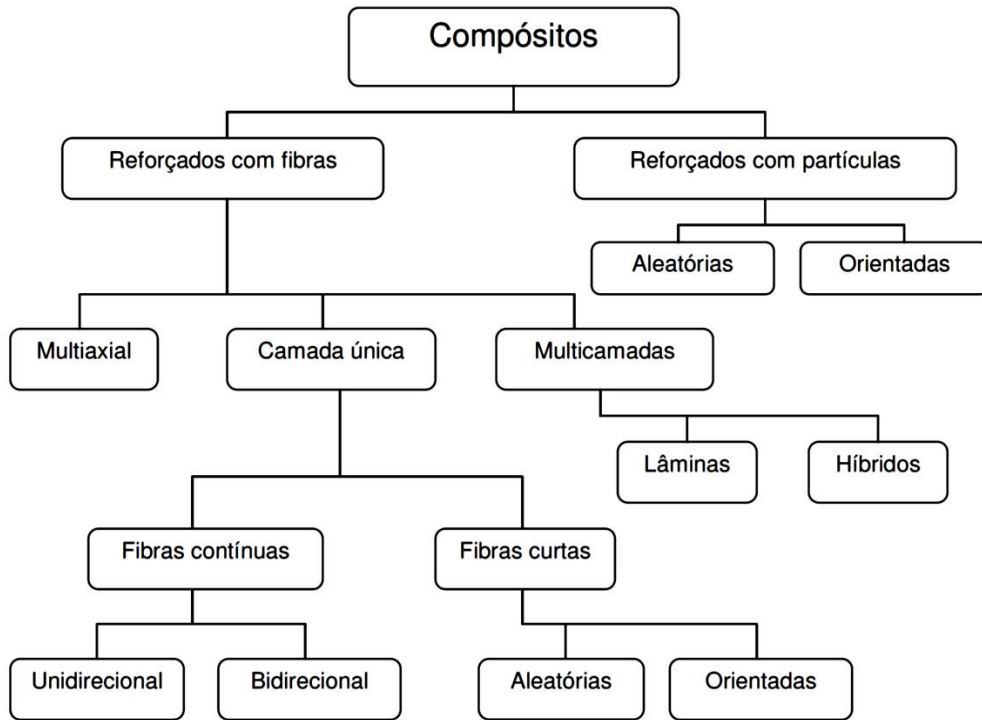


Figura 2.2 – Classificação dos compósitos segundo o reforço (Levy e Pardini, 2006).

2.2 - MATRIZES POLIMÉRICAS

Os materiais poliméricos vêm sendo utilizados cada vez mais na indústria das tecnologias atuais em centenas de aplicações. Algumas destas aplicações incluem embalagens, tubulações, pneus, revestimentos de fios e cabos, engrenagens e outros componentes mecânicos de máquinas, painéis, carcaças, coberturas estruturais, para-choques de carro, substratos e placas de circuito impressos eletrônicos bem como matriz de compósitos (Matthews and Rawlings, 1994).

Em todas estas aplicações, os materiais poliméricos são escolhidos exclusivamente pelas suas propriedades singulares relacionadas com o tipo de polimerização. Assim, é

possível obter homopolímeros (formados só por um tipo de monômero) e copolímeros (formado por mais de um tipo de monômero), cada um desses com propriedades específicas. Em geral, vêm sendo crescentemente empregados em substituição aos materiais tradicionais metálicos e cerâmicos. Em algumas destas aplicações, as propriedades mecânicas do polímero são de suma importância e estão aliadas às vantagens como sua leveza, baixo custo de transformação e facilidade de conformação em formas complexas. Em outros casos, a escolha do polímero se deve essencialmente às características especiais tais como o excelente isolamento térmico e elétrico ou resistência à corrosão galvânica (Matthews and Rawlings, 1994).

Uma classificação simples para as matrizes poliméricas as divide em termofixos, termoplásticos e elastômeros sendo todas importantes para compósitos (Matthews and Rawlings, 1994). As matrizes termofixas e termoplásticas serão comentadas a seguir.

2.2.1 - Resinas termofixas

Resinas termofixas (termorrígidos) são aquelas que sofrem transformação irreversível quando submetidas às influências de calor devido à formação de ligações covalentes, diferentemente dos termoplásticos que amolecem e fluem quando calor e pressão são aplicados em mudanças reversíveis (Billmeyer, 1971).

A reação de polimerização, responsável pela transformação, é geralmente chamada de cura e o produto forma uma estrutura de rede tridimensional que não pode ser fundida. Os termofixos não podem ser moldados após a cura e são normalmente curados em moldes já em sua configuração final (De and White, 1996). Os tipos mais comuns de termofixos são as resinas: poliéster, fenólicas e epóxi.

2.2.2 - Polímeros termoplásticos

A combinação de baixa densidade, resistência química, custo baixo e um balanço entre rigidez e tenacidade permitem que termoplásticos ocupem espaço de outros materiais em muitas aplicações importantes (Elmajdoubi and Vu-Khanh, 2003).

Termoplásticos consistem de longas moléculas com comprimento da ordem de 20 a 30 nm (Davis *et al.*, 1982) e fluem facilmente sob tensão mesmo em baixas temperaturas, permitindo assim serem moldados na forma solicitada e mantendo-a quando resfriado à temperatura ambiente. Estes polímeros podem ser repetidamente aquecidos, moldados e resfriados e, conseqüentemente, serem reciclados. Os termoplásticos bem conhecidos são acrílico (PMMA), nylon (poliamida), polietileno (PE), poli-éter-éter cetona (PEEK), poliestireno (PS) e polipropileno (PP) (Matthews and Rawlings, 1994).

O polipropileno é um material muito utilizado na indústria devido às inúmeras qualidades como a facilidade de produção, suas boas características mecânicas, relacionadas, em grande parte, à sua natureza semicristalina, e à inércia química, sendo possível sua aplicação mesmo em meios corrosivos (Callister, 2002).

2.3 - MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Existe uma série de métodos de fabricação de componentes de materiais compostos por plásticos reforçados por fibra. Ao mesmo tempo, ainda continua a pesquisa no campo do refinamento e desenvolvimento de novos processos de fabricação (Mendonça, 2005). O método de fabricação pode ser escolhido em função do custo do processo, da escala de produção, das dimensões físicas do componente, do volume relativo da fibra e da repetibilidade de características do material (Mendonça, 2005).

Os processos de fabricação de compósitos podem ser de conformação molhada ou moldagem, isto é, fabricação dos componentes enquanto a resina está líquida e o processo de cura ocorre numa única etapa (Mendonça, 2005). Entre estes processos estão o processo manual (*hand lay-up*), o bobinamento (*filament winding*), a pultrusão ou trefilação (*pultrusion*) e a moldagem por membrana (*bag molding*) (Mendonça, 2005). Em oposição, existem os processos de fabricação com pré-formados que constam de sistemas adquiridos já previamente preparados em formas de blocos, folhas ou fitas, e as fibras se encontram previamente impregnadas com resina. Nos chamados processos com preformados (*premixes*) são conhecidos os premix em bloco (*Bulk Molding Compound*), premix em folha (*Sheet Molding Compound*) e os prepegs (Pre-impregnado de resina polimérica). (Mendonça, 2005)

No caso deste estudo foi usado o processo de bobinamento manual, Figura. 2.3, pois é adequado para produção de componentes de superfície de revolução como tubos, cilindros e esferas. Uma das principais vantagens do método é o de produzir peças com alta percentagem de fibras uniformemente distribuídas e de forma bastante rápida. Volumes de fibra tão altos quanto 60 % são facilmente obtidos (Mendonça, 2005).

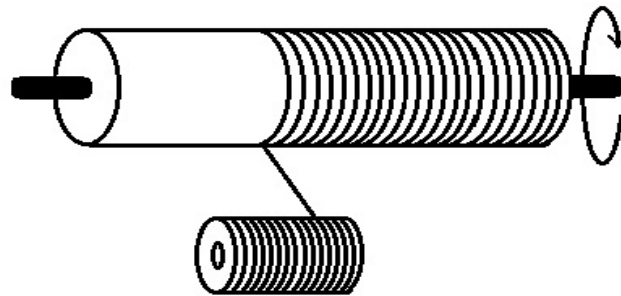


Figura 2.3 – Bobinamento circunferencial (*hoop*) manual (Callister, 2002 modificado).

2.4 - MATERIAIS INTELIGENTES E ESTRUTURAS ADAPTATIVAS

O estudo acerca dos materiais inteligentes tem sido intensamente explorado nas últimas décadas, porque são materiais capazes de realizar determinadas funções através de estímulos externos ou por sinais de controle (Ghandi and Thompson, 1992). Ou seja, são materiais cujas propriedades mecânicas, elétricas, magnéticas, óticas e reológicas podem variar segundo uma mudança no ambiente externo.

Outras mudanças e fenômenos relacionados podem ser explicados devido a variações que ocorrem nas micro-estruturas de alguns desses materiais. Exemplos desses são os materiais piezoelétricos, os fluidos eletorreológicos e magnetorreológicos e também, as ligas de memória de forma (SMA) usadas como atuadores em estruturas ditas como estruturas inteligentes (Janocha, 1999).

O termo estrutura inteligente ou adaptativa se refere a sistemas estruturais inspirados em modelos naturais (Janocha, 1999). Sistemas naturais apresentam qualidades admiráveis que as estruturas inteligentes procuram imitar, como por exemplo, a precisão, eficácia, funcionalidade, durabilidade, adaptabilidade e ultimamente auto reparo (Janocha, 1999).

As estruturas inteligentes empregam três elementos básicos: sensores que registram informações internas e externas, atuadores que realizam trabalho ou aplicam forças e sistemas de controle central que tomam decisões e expedem ordens gerando uma resposta como é apresentado na Figura 2.4.

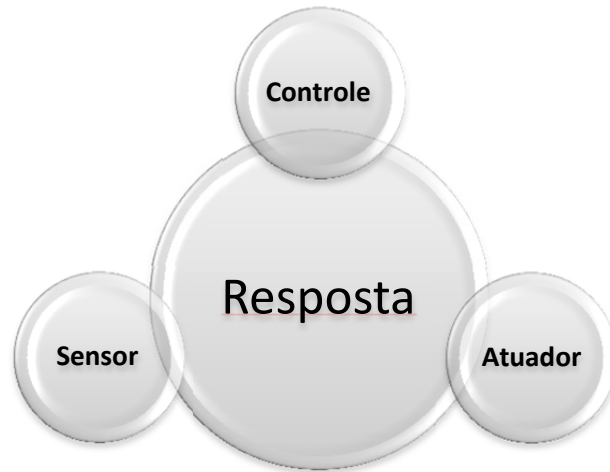


Figura 2.4 – Conceito de estrutura adaptativa (Janocha, 1999 modificado).

A combinação dessas propriedades confere “inteligência” ao sistema. Tais estruturas não apenas armazenam informações e executam tarefas, mas também percebem mudanças e se adaptam de acordo com elas, daí podem ser chamadas de estruturas adaptativas. Isto é, são estruturas capazes de se adaptar ao meio ambiente em resposta a estímulos ou sinais de controle, alterando sua forma, rigidez e outras propriedades. (Janocha, 1999).

O aumento da relação força – densidade dos materiais estruturais gerou compósitos, polímeros e superligas muito mais eficientes do que os materiais tradicionais, e proporcionou mesmo a esta categoria avanços como o desenvolvimento de ligas especiais de alto desempenho, introduzidas por exemplo, tanto na indústria aeronáutica na pesquisa em componentes para asas de avião “*winglet*” com controle de forma, quanto na automobilística em ailerons e autopeças; explorando as propriedades inteligentes desses novos materiais em favor destes avanços. Assim, o objetivo maior das pesquisas recentes baseia-se no estudo das propriedades inteligentes desses materiais, desenvolvendo aplicações na engenharia (Janocha, 1999).

2.5 - COMPÓSITOS HÍBRIDOS COM MEMÓRIA DE FORMA (SMAHC)

Um compósito é dito híbrido quando é obtido pelo uso de dois ou mais tipos de fibras ou fases diferentes no interior de uma única matriz (Leite *et al*, 2010). Na verdade, a variedade de compósitos híbridos que se pode produzir é imensa, onde podem ser utilizadas várias combinações de fibras e até fios metálicos na matriz. Os compósitos híbridos mais comuns são obtidos pelo uso de fibras de carbono e de vidro inseridas numa matriz polimérica (Leite *et al*, 2010). Com a variedade de combinações, os compósitos híbridos acabam por ter uma melhor combinação global de propriedades em relação a compósitos simples (Callister, 2002).

Uma nova classe de aplicação de materiais adaptativos surgiu quando se utilizaram ligas de Ni-Ti, com memória de forma, como atuadores embebidos ou incorporados em estruturas compósitas. Estes compósitos foram chamados de na literatura como SMAHC (*Shape Memory Alloy Hybrid Composite*) (Rogers,1988; Turner , 2001). Um exemplo dessas estruturas é apresentado na Figura 2.5, onde uma viga laminada híbrida vidro/epóxi tem fios de SMA embebidos com o propósito de controle da forma e/ou vibração (Turner, 2001).

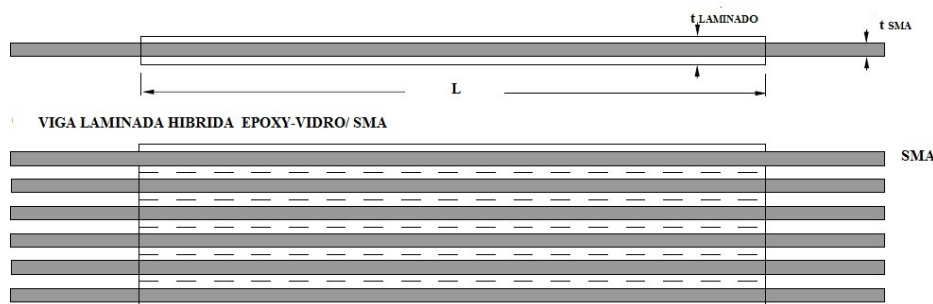


Figura 2.5 – Compósito híbrido com memória de forma SMAHC (Turner, 2001).

2.5.1 - Ligas com memória de forma Ni-Ti

No ano de 1932, Olander, realizando pesquisas sobre estrutura cristalina e comportamento eletroquímico de ligas de Au-Cd, observou um comportamento pseudoelástico, semelhante à borracha, desse material metálico (Wayman, 1989).

Anos mais tarde, Greninger e Mooradian (1938) observaram que, em ligas de Cu-Zn, ocorre formação de uma fase martensítica com a diminuição de temperatura e o desaparecimento dessa fase em temperaturas mais elevadas formando-se, portanto, martensita termicamente reversível. No ano de 1951, Chang e Read, realizaram estudos com ligas de Au-Cd e verificaram que o comportamento termoelástico da fase martensita desse material metálico estava associado ao efeito de memória de forma.

Dentre esses materiais, os mais comuns e mais usados são as ligas de níquel e titânio. Esse material e suas propriedades foram descobertos em 1962, quando William J. Buehler e seus colegas do laboratório naval de ordnance (NOL) observaram o efeito de memória de forma em ligas equiatômicas de níquel e titânio. A partir daí, essa liga em variadas composições foi chamada de Ni-TiNOL, em recordação ao laboratório (Srinivasan and McFarland, 2001).

A primeira aplicação comercial dessa liga, desenvolvida pela NASA, foi em sistemas de acoplamento hidráulico de tubulações dos aviões F-14, conforme mencionado por Jackson *et al* (1972). Com o passar dos tempos, os avanços de pesquisas se deram no interesse pelo emprego dessas ligas em aplicações que vão desde aparelhos de ortodontia até implantes medicinais (Machado, 2002; Ducos, 2006; Berzins and Roberts, 2010).

As ligas de níquel-titânio possuem duas diferentes fases dependentes da temperatura: martensita e austenita (Otsuka, 1998). Quando a liga está na fase martensita (M) e é submetida a um processo de aquecimento, ocorre uma mudança da fase da martensita para austenita, sendo A_s (*Austenite start*) e A_f (*Austenite finish*) as temperaturas de início e final da transformação austenítica. Do mesmo modo, quando a liga está na fase austenita (A) e é resfriada ocorre uma mudança de fase da austenita para martensita sendo M_s (*Martensite start*) e M_f (*Martensite finish*) as temperaturas de início e final da transformação martensítica. (Funakubo, 1987; Otsuka, 1998).

2.5.2 - Diagrama de Fases da Liga Ni-Ti

No diagrama de fases da liga Ni-Ti, pode ser observada a presença de uma região triangular denominada “Ni-Ti”, próxima da composição equiatômica. Esta fase tem estrutura cúbica de corpo centrada (CCC), em temperaturas acima de 1090 °C, e uma

estrutura cúbica ordenada B2 (fase austenita-cúbica) abaixo desta temperatura. Se da região B2, uma liga é resfriada em água, ocorre uma transformação martensítica de B2 para B19' (fase martensítica - monoclinica) abaixo da respectiva temperatura M_s (*martensite start*). (McNeese and Lagoudas, 2000).

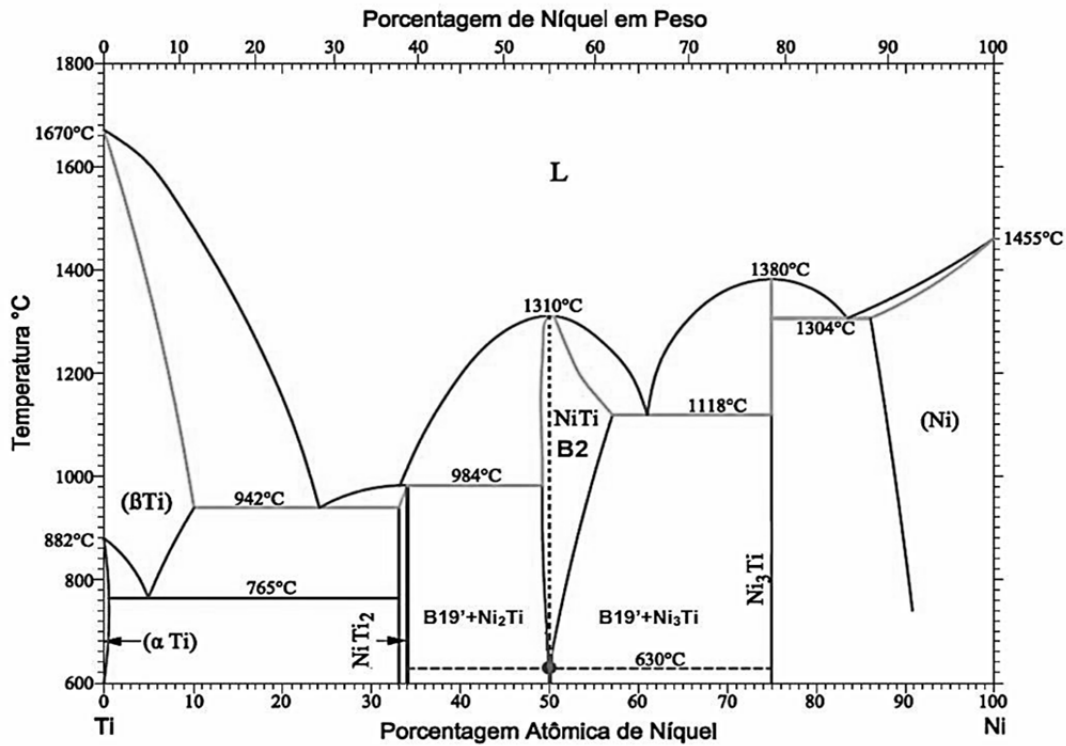


Figura 2.6 – Diagrama de fases do Ni-Ti (McNeese and Lagoudas, 2000).

Uma das características do diagrama de fases é a mudança da solubilidade com a temperatura do lado rico em Ni, Figura 2.6, que possibilita um endurecimento por precipitação da fase estável $TiNi_3$, mas outras fases Ti_3Ni_4 , também aparecem em curtos tempos e baixas temperaturas de envelhecimento. Esta fase, Ti_3Ni_4 , precipitada em finas plaquetas, é muito importante para melhorar as características do efeito memória de forma e a pseudoelasticidade (Otsuka, 1998), pois as ligas de Ni-Ti podem modificar suas propriedades através de transformações difusionais ou adifusionais, pela formação da fase Ti_3Ni_4 , no sentido de melhorar seu desempenho no efeito memória de forma, recuperando uma deformação inicial após aquecimento, e na pseudoelasticidade, recuperando a forma após descarregamento a temperaturas maiores a A_f no caso da liga Ni-Ti.

2.5.3 - Estruturas Cristalinas nas ligas de Ni-Ti.

Em temperaturas maiores a A_f (temperatura final de formação da fase austenita), a rede cristalina do Ni-Ti (Ti localiza-se nos vértices e o Ni no centro dos lados ou no centro do corpo) apresenta a matriz formada por austenita cúbica de corpo centrado, B2, representada na Figura 2.7.a. A fase produto, formada a temperaturas abaixo de M_f , constituída de martensita monoclinica B19', é representada na Figura 2.7.b (Zhang and Sehitoglu, 2004).

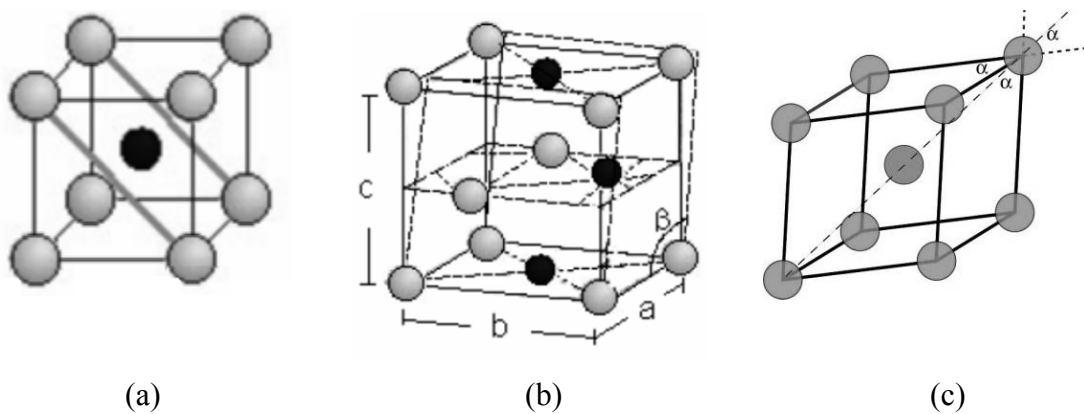


Figura 2.7 – Células unitárias da fase (a) austenita, (b) martensita e (c) fase R.

A martensita (B19') pode ser obtida por uma etapa da transformação $B2 \rightarrow B19'$. Contudo, sob outras condições como de trabalho a frio, ciclos térmicos ou um terceiro elemento na liga propicia o aparecimento da fase romboédrica R, representada na Figura 2.7.c (Mehta *et al.*, 2004), que aparece entre as fases austenita e martensita provocando um segundo estágio de transformação $B2 \rightarrow$ fase R $\rightarrow B19'$ (Krishnan. and Delaey, 1974; Zhang and Sehitoglu, 2004).

2.5.4 - Transformações martensíticas nas ligas Ni-Ti

A transformação martensítica pode ser definida como uma transformação de fase no estado sólido com ausência de difusão, resultante de um movimento coordenado e/ou cooperativo entre os átomos da fase matriz, inferior ao parâmetro da célula e que mantém uma estreita correspondência de reticulado entre a fase matriz e a fase produto, porém, com mudança da estrutura cristalina (Callister, 2002).

A transformação de fase martensítica, em ligas a base de Ni-Ti, é o fenômeno que promove a recuperação da deformação nas ligas com memória de forma. Quando algumas ligas são submetidas a um procedimento termomecânico elas podem apresentar o efeito memória de forma devido à reorientação das discordâncias, responsáveis pela geração de forças de restituição que recuperam completamente a forma original do material deformado (Otsuka, 1988).

Se for aplicada uma carga mecânica no material na fase martensítica maclada a temperatura menor a M_f , ocorre uma demaclação acompanhada da deformação quasiplástica correspondente. Entretanto, com o aquecimento acima da temperatura A_f o material recupera sua forma original da fase austenita, dando lugar ao efeito de memória de forma. Por outro lado, pode ocorrer transformação de fase induzida pela aplicação de uma tensão mecânica a temperaturas maiores a A_f . Após a retirada da carga, o material recupera seu formato e fase iniciais. É semelhante à elasticidade, sendo chamado pseudoelástico (Otsuka, 1998).

Como apresentado na Figura 2.8, a transformação da austenita em martensita, ou transformação martensítica, se inicia quando a liga passa, no resfriamento, por uma temperatura crítica, denominada M_s (*martensite start*), e termina em M_f (*martensite finish*), quando o material apresenta estrutura totalmente martensítica (menos a austenita que por algum motivo não tenha conseguido se transformar, e que por isso é chamada de austenita retida) (Otsuka,1998). No sentido oposto, a transformação reversa, ou transformação austenítica, se inicia, no aquecimento, na temperatura A_s (*austenite start*) e termina em A_f (*austenite finish*), quando o material é completamente austenítico. Esta transformação ocorre em uma faixa de temperaturas que varia de acordo com a composição química e a história termomecânica de cada liga (Otsuka,1998).

De maneira geral, definem-se a terminologia empregada para expressar as “temperaturas características relativas às transformações martensíticas”, definidas por Otsuka e Wayman em 1998 e inserida na norma *ASTM F 2005-5*, apresentada a seguir:

- M_s : a temperatura de início da transformação da austenita em martensita, sob resfriamento, em um processo de estágio único;

- M_f : a temperatura em que a transformação da austenita em martensita é completada, sob resfriamento, em um processo de estágio único;
- M_d : a mais alta temperatura na qual a martensita será formada, a partir da fase austenita, em resposta a uma tensão aplicada;
- M_p : a temperatura de pico exotérmico da transformação da austenita em martensita sob condição de resfriamento;
- A_s : a temperatura de início da transformação reversa da martensita em austenita, sob aquecimento, em um processo de estágio único;
- A_f : a temperatura em que a transformação reversa da martensita em austenita é completada, sob aquecimento, em um processo de estágio único.
- A_p : a temperatura de pico endotérmico em que a transformação da martensita em austenita é completada, sob condição de aquecimento, em um processo de estágio único.

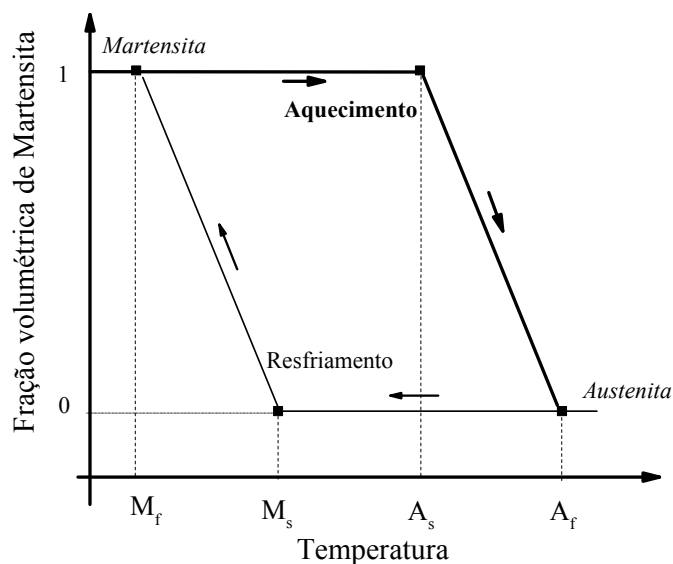


Figura 2.8 - Evolução do processo de transformação de fase das SMA.

A Figura 2.8 mostra a relação da fração martensítica versus a temperatura no estado livre de tensões. Durante o aquecimento, o material percorre a curva superior. Quando a temperatura A_s é atingida, tem-se o início da formação da austenita. A transformação continua até atingir 100% de austenita em A_f . No resfriamento o material percorre a parte inferior da curva da Figura 2.8. Para temperaturas abaixo de M_s começa a formação de martensita até atingir a temperatura M_f , quando a constituição do material é 100% martensítica (Shaw and Kyriakides, 1995).

A transformação martensítica é dividida em duas categorias: termoelástica e não-termoelástica. O comportamento termoelástico é característico das ligas de Ni-Ti (Otsuka e Kakeshita, 2002). Na transformação termoelástica, processo em que se impõe é um gradiente térmico ao sistema, ocorre o movimento da interface de várias maclas formadas a partir de uma estrutura de rede ordenada. Esse processo, associado à presença de discordâncias parciais no interior do cristal, permite que a transição de fase seja reversível cristalográficamente, no sentido de que a fase martensita ($B19'$), com estrutura monoclinica formada na etapa de transformação direta, é revertida para a fase matriz (austenita), com estrutura B2 (cúbica), seguindo o caminho (orientação) original de retorno e ocasionando desaparecimento das discordâncias (Otsuka and Kakeshita, 2002).

2.5.5 - Mecanismos de memória de forma e pseudoelasticidade

A origem do efeito de memória de forma está relacionada à presença das transformações martensíticas cristalográficamente reversíveis sob aquecimento, como discutido no item 2.5.4. A deformação quasiplástica provocada em uma liga, quando submetida a temperaturas inferiores a M_s , é eliminada pelo aquecimento desse material a temperaturas acima de A_f . Já, no caso do efeito pseudoelástico (superelástico), a deformação promovida em temperaturas acima de A_f é eliminada pela remoção da tensão aplicada. Dessa forma, o efeito de memória de forma ocorre quando a liga metálica é deformada abaixo da temperatura M_f (na condição totalmente martensítica), ou entre as temperaturas M_f e A_s (parcialmente martensítica), e aquecida acima da temperatura A_f em que a martensita torna-se instável (Funakubo, 1987).

Quando um monocristal na fase austenítica é resfriado abaixo de M_f , Figura 2.9.a, este pode transformar-se em até 24 variantes de martensita autoacomodantes (24 planos de hábito cristalográficamente equivalentes, como apresentado na Figura 2.11), sem mudança de forma macroscópica. Na Figura 2.9, são apresentadas duas variantes da fase martensita considerando-se um processo de deformação a temperatura menor a M_f , logo um aquecimento a temperatura maior que A_f e finalmente o resfriamento até temperaturas menores que M_f para mostrar o efeito de memória de forma. Outro processo de carregamento e descarregamento a temperaturas maiores que A_f é apresentado para

detalhar o efeito de superelasticidade (Otsuka, 1998). Além disso são apresentadas as curvas de tensão-deformação para os dois casos, Figura 2.10.

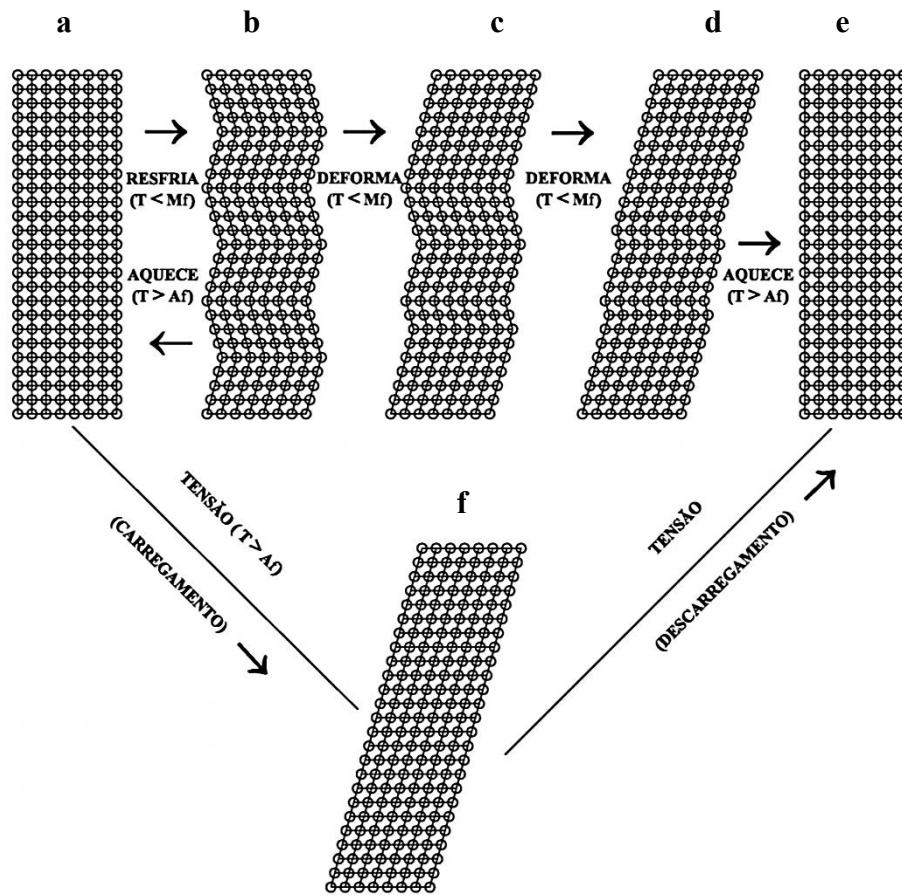


Figura 2.9 – Mecanismo do efeito de memória de forma e efeito superelástico (Otsuka, 1998 modificado).

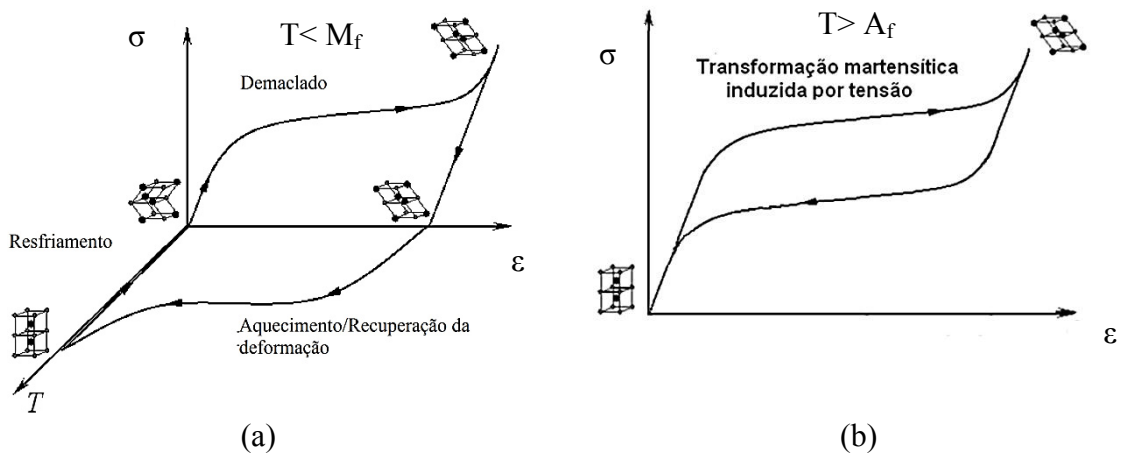


Figura 2.10 – Curvas tensão-deformação (a) efeito de memória de forma e (b) comportamento pseudoelástico.

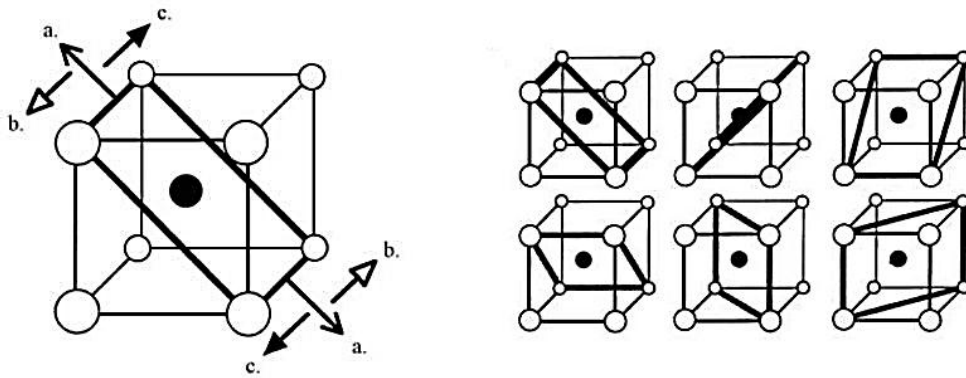


Figura 2.11 – As 24 diferentes variantes que podem crescer a partir dos seis planos equivalentes que passam através das faces diagonais (6x2x2) na estrutura CsCl.

Se uma tensão externa for aplicada, os contornos de macla movem-se por cisalhamento com a finalidade de acomodar essa tensão. De acordo com as Figuras 2.9.c e 2.9.d, a orientação em dois sentidos tenderá a desaparecer, resultando em uma martensita de orientação única e, portanto, uma deformação em escala macroscópica. A variante dominante (de orientação remanescente) é aquela cujo componente de cisalhamento permite o máximo de deformação na direção da tensão.

O monocristal de martensita obtido com a deformação em temperatura abaixo de M_f transforma-se em monocristal de austenita durante o aquecimento, e restaura a forma ou o tamanho original ao atingir temperaturas superiores a A_f , o que é considerado efeito de memória de forma, conforme mostrado na Figura 2.9.

O comportamento decorrente do efeito superelástico é ilustrado pela sequência das Figuras 2.9.a, 2.9.f e 2.9.e. Esse processo ocorre em temperatura constante a $T > A_f$. A transformação martensítica é iniciada com a imposição de tensão externa acima de A_f e a transformação reversa ocorre com o alívio de tensão. Com isso, o monocristal retoma a sua forma original da fase austenita.

O efeito de memória de forma pode ser classificado em simples ou duplo, conforme o comportamento mecânico da liga em função do ciclo térmico. A designação de efeito de memória simples (*one-way shape memory effect*) está ligada ao facto da recuperação da deformação introduzida a $T < M_f$, por reaquecimento a $T > A_f$, mas o resfriamento posterior até uma temperatura inferior a M_f não traz nova alteração de forma. Já no efeito

memória de forma duplo (*two way shape memory effect*) através do treinamento do material, isto é, aplicação de tratamentos termomecânicos adequados, tais como deformações sob tensão ou outros, consegue-se que um metal com memória de forma memorize também uma forma abaixo do M_f . Este fenômeno está baseado, cristalográficamente, na movimentação interna dos contornos de variantes ou intervariantes da martensita (Stoeckel, 1989).

Particularmente, observa-se também uma variação no valor do módulo de elasticidade da liga de Ni-Ti por causa da mudança de fase da martensita para austenita induzida pela temperatura, da ordem de três vezes, isto é $E_A \approx 3E_M$ sendo E_A e E_M os módulos de elasticidade da liga na fase austenita e martensita respectivamente (Turner, 2001).

2.6. ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS

Este ensaio é um método para medir comportamento de materiais submetidos a carregamento de viga simples. Aqui é conhecido o módulo de elasticidade a flexão, isto é, a relação do esforço máximo na fibra com a deformação máxima no limite elástico do diagrama tensão-deformação, num ensaio de flexão. Como apresentado na Figura 2.12, o ensaio de flexão em três pontos consta de colocar o corpo de prova em dois apoios como uma viga simples com uma carga aplicada no ponto médio.

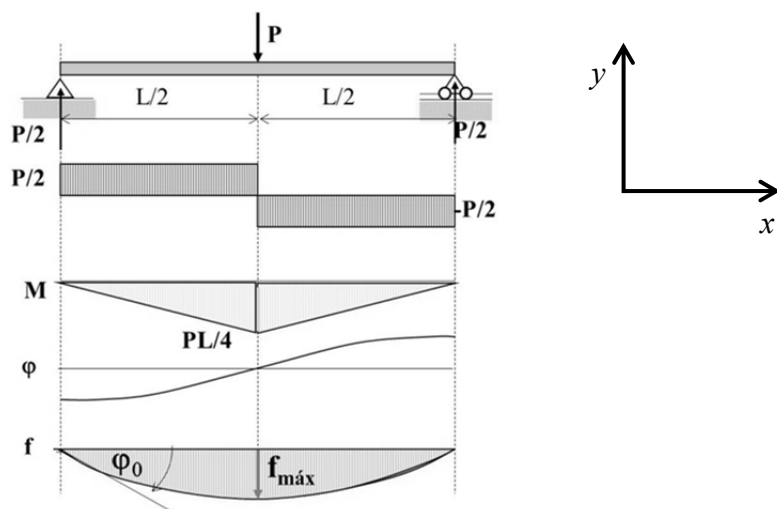


Figura 2.12 – Análise da viga bi-apoiada com carga concentrada no meio do vão.

A tensão máxima das fibras e a deformação máxima são calculadas para incrementos de carga. Os resultados são traçados em um diagrama de tensão-deformação ou carga-deflexão a partir da seguinte base teórica.

2.6.1 - Equação diferencial básica

A equação diferencial que relaciona o momento fletor, a rigidez à flexão e a curvatura, para pequenas deformações, pode ser escrita como (Hibbeler, 2009)

$$\frac{d^2\omega}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI}. \quad (2.1)$$

Onde ω é a deflexão, $M(x)$ é o momento fletor e EI é a rigidez à flexão. Fazendo uma análise da Figura 2.12. As condições de fronteira são

$$x(0 \rightarrow L/2) \rightarrow M(x) = \frac{1}{2} Px. \quad (2.2)$$

$$x(L/2 \rightarrow L) \rightarrow M(x) = \frac{1}{2} Px - P(x - L/2). \quad (2.3)$$

Onde P é a carga aplicada a traves do eixo y , L é o comprimento efetivo do ensaio e x é o eixo de referencia. Integrando a equação 2.1, avaliada no trecho $x(0 \rightarrow L/2)$, é obtida a seguinte relação. (Hibbeler, 2009)

$$EI \frac{d\omega}{dx} = \frac{Px^2}{4} + C1. \quad (2.4)$$

sendo $C1$ a constante de integração. A simetria permite dar conta que a inclinação da viga é $d\omega/dx = 0$, para $x=L/2$ por tanto, da equação 2.4:

$$C1 = -\frac{PL^2}{16}. \quad (2.5)$$

Integrando pela segunda vez a equação 2.1, avaliada no trecho $x(0 \rightarrow L/2)$:

$$EI \omega(x) = \frac{Px^3}{12} - \left(\frac{PL^2}{16}\right)x + C2. \quad (2.6)$$

sendo C_2 a segunda constante e integração. Como a deflexão é zero ($\omega = 0$) para $x=0$, então a constante $C_2 = 0$, e, finalmente, é obtida a equação da linha elástica $\omega(x)$ para uma viga bi-apoiada com uma carga no meio do vão: (Hibbeler, 2009; Gere, 2003)

$$\omega(x) = \left(\frac{P}{EI}\right) \left[\frac{x^3}{12} - \frac{xL^2}{16} \right]. \quad (2.7)$$

Também pode ser obtida a inclinação máxima da viga, isto é, o ângulo de inclinação máximo da viga nos apoios, derivando a equação 2.7 e avaliando para $x=0$, onde φ_0 é a inclinação máxima da viga.

$$\frac{d\omega}{dx}(x = 0) = \varphi_0 = \frac{PL^2}{16EI}. \quad (2.8)$$

Finalmente, a relação entre deflexão máxima ω_{max} e carga aplicada P para a viga biapoiada, pode ser obtida no valor de $x = L/2$:

$$\omega_{max} = \frac{PL^3}{48EI}. \quad (2.9)$$

sendo que,

P = Carga no meio do vão;

L = Comprimento efetivo do ensaio a flexão;

E = Módulo de elasticidade efetivo em flexão;

I = Momento de inércia da seção transversal da viga.

2.6.2 - Módulo de elasticidade, tensões e deformações normais

Como foi apresentado na Figura 1.2, uma seção transversal composta de diferentes camadas (k_a) foi estudada. Mesmo numa seção com diferentes fases, a análise de flexão da viga parte da mesma hipótese fundamental das vigas, que supõe a linearidade da deformação ε_x ao longo do eixo z , representada por (Mendonça, 2005):

$$\varepsilon_x(x, z) = zk_x(x) \cong z \frac{d^2\omega}{dx^2}. \quad (2.10)$$

Onde a curvatura está dada por;

$$k_x(x) = \frac{d^2 \omega}{dx^2}. \quad (2.11)$$

O equilíbrio dos momentos na direção y requer que;

$$M_{vy}(x) = \int_A d M_{vy} = \int_A z \sigma_x^k dA = \sum_{k=1}^N \int_{A^k} z E_x^{ka} z k_x(x) dA = \sum_{ka=1}^N \int_{A^k} z^2 E_x^{ka} k_x(x) dA. \quad (2.12)$$

$$M(x) = k_x(x) \sum_{k=1}^N E_x^{ka} I_{yy}^{ka}. \quad (2.13)$$

Onde M_{vy} é o momento fletor verdadeiro na direção y da seção da viga de largura d , e $\sigma_x^{ka} = E \varepsilon(x)$ é a tensão de cada camada. (Mendonça, 2005).

A expressão 2.13 permite obter a curvatura, se forem conhecidos o momento fletor, as propriedades elásticas em cada camada e o momento de inércia I_{yy}^{ka} de cada camada ka em relação ao eixo y . Esse momento de inércia é definido por:

$$I_{yy}^{ka} = \int_{A^{ka}} z^2 dA. \quad (2.14)$$

Comparando que para uma viga isotrópica o momento fletor verdadeiro, a equação 2.13 tem a forma,

$$M_{vy}(x) = k_x(x) E I_{yy}. \quad (2.15)$$

Isto permite obter um módulo de elasticidade equivalente para a viga não homogênea, de k camadas, para uso na flexão (Mendonça, 2005).

$$E_{xF} = \frac{1}{I_{yy}} \sum_{ka=1}^N E_x^{ka} I_{yy}^{ka}. \quad (2.16)$$

E então o módulo de rigidez flexural equivalente $D_v = E_{xF}I_{yy}$ tem a forma;

$$D_v = \sum_{ka=1}^N E_x^{ka} I_{yy}^{ka}. \quad (2.17)$$

Além disso, a deformação normal pode ser obtida substituindo nas equações a curvatura:

$$\varepsilon_x(x) = zk_x(x) = z \frac{M_{vy}(x)}{E_{xF}I_{yy}}. \quad (2.18)$$

Finalmente, a tensão normal em cada fase $k\sigma_x^{ka}(x, z)$ tem a forma (Mendonça, 2005).

$$\sigma_x^{ka}(x, z) = E_x^{ka} \varepsilon_x(x) = z \frac{M_{vy}(x) E_x^{ka}}{E_{xF}I_{yy}}. \quad (2.19)$$

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados e a metodologia para a realização de ensaios físicos, térmicos e mecânicos, nos corpos de prova fabricados.

3.1 - MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 – Liga Ni-Ti com memória de forma

Os materiais em estudo são ligas metálicas binárias em forma de barras cilíndricas de 6,2 mm de diâmetro, constituídas por Níquel (Ni) e Titânio (Ti), ricas em Ni de composição nominal 55,49 % em peso de Ni - 44,50 % em peso de Ti. A liga apresenta uma temperatura final de transformação austenítica em torno de $A_f = 55\text{ }^\circ\text{C}$ a $65\text{ }^\circ\text{C}$. Esta liga é usada em aplicações, onde é necessária uma mudança de forma ou rigidez devido a variações de temperatura.

Algumas propriedades físicas, da liga de memória de forma utilizada encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades físicas da liga de Ni-Ti (Memory-Metalle GmbH)

Propriedade	Ni-Ti Martensita (M)/ Austenita (A)
Ponto de fusão ($^\circ\text{C}$)	1310
Densidade (g/cm^3)	6,5
Resistividade Elétrica ($\mu\Omega\text{-cm}$)	76 (M) / 82 (A)
Coef. Expansão Térmica ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	6,7(M) / 10 a 11 (A)
Coef. Condutividade Térmica ($\text{W}/\text{m}\text{-}^\circ\text{C}$)	9 (M)/18 (A)
Módulo de Elasticidade (GPa)	22 a 41 (M) / 70 a 80 (A)

Na Figura 3.1, podem ser observados os fios da liga de Ni-Ti utilizada neste trabalho. A liga foi cortada em dois segmentos de 520 mm cada, os quais foram usados na fabricação das vigas adaptativas através da incorporação do fio, fixado usando adesivo

epóxi, num sulco feito na superfície de um tubo de polipropileno de 500 mm de comprimento e com as características descritas na seção 3.1.2.

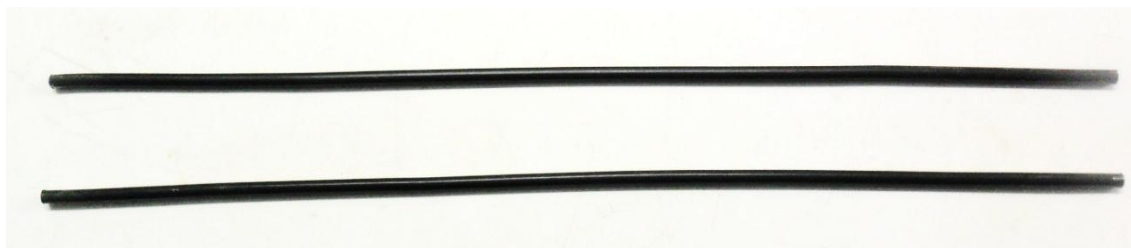


Figura 3.1 – Ligas de Ni-Ti de 520 mm de comprimento.

Uma grande variedade de procedimentos de acabamento da superfície da liga pode ser aplicada. No entanto, a qualidade da superfície padrão da liga de Ni-Ti usada é um óxido de cor cinza/preto ou azul brilhante, se o óxido preto foi removido antes do tratamento térmico final, durante o tratamento térmico no forno em atmosfera de ar. O óxido pode ser removido por procedimentos de decapagem, afiação e polimento, que tornam a superfície metálica brilhante como é verificado na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Superfície do fio de Ni-Ti (a) oxidada (b) decapada com reagente Kroll.

Para o processo de decapagem foi preparado o reagente de Kroll, de acordo com o metals handbook (Davis, 1998), preparando uma solução de 6 % em volume de ácido nítrico (HNO_3) e 3% em volume de ácido fluorídrico (HF) em 91% em volume de água destilada. As ligas foram deixadas por 1 dia nesta solução, até deixar a superfície livre de óxido e perceber uma aparência brilhante.

3.1.2 - Tubos de Polipropileno (PP)

Os tubos de polipropileno possuem um módulo de elasticidade inferior a 1 GPa. Ou seja, bem abaixo dos apresentados pelo Ni-Ti, e, neste caso, a variação do módulo da viga híbrida, provocado pela transformação de fase do Ni-Ti, de martensita, $T < M_f$, para

austenita , a $T > A_f$, poderá ser notada com mais facilidade. Assim, teoricamente quando o módulo do fio de Ni-Ti variar de 22 GPa para 66 GPa por efeito do aumento da temperatura, a expectativa é que o módulo da viga híbrida terá uma variação bem perceptível.

O tipo de tubos usados nesta pesquisa foi o PN 20 Magnum da linha Acqua System de pressão nominal 20 kgf/cm^2 , desenvolvido para instalações de água quente e fria em residências, hotéis, embarcações e construções de vários tipos. Este tubo, conforme mostra-se na Figura. 3.3, é identificado por sua marca e cor prateada e quatro linhas longitudinais na cor vermelha, e suas especificações encontram-se na Tabela 3.2.

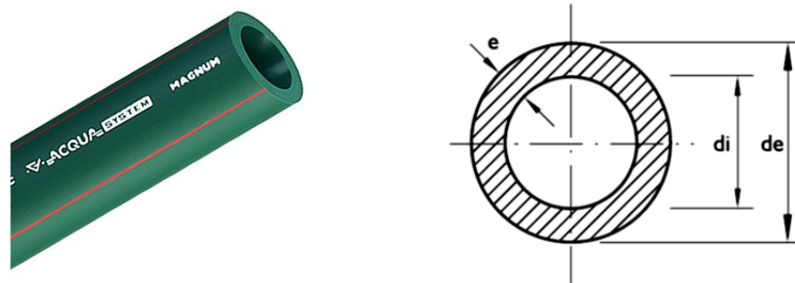


Figura 3.3 – Características geométricas do tubo de polipropileno (Acqua system, 2008).

Tabela 3.2 – Especificações do tubo de polipropileno (PP) (Acqua system, 2008).

Diâmetro externo (de) (mm)	Diâmetro interno (di) (mm)	Espessura (mm)	Seção interna (cm²)	Peso (Kg/m)	Módulo de elasticidade (MPa)
50	36,2	6,9	10,29	0,885	> 850

3.1.3 - Fios de aço

Para testar e aperfeiçoar o processo de fabricação das vigas SMAHC, antes de utilizar-se as barras de Ni-Ti, que custam cerca de US\$ 1000,00 por quilo, foi adquirida uma barra de liga ferrosa usada na construção civil, de diâmetro $\frac{1}{4}$ de polegada (i.e. um quarto de polegada, $\sim 6,4 \text{ mm}$), que possui um diâmetro bem próximo ao das barras de liga Ni-Ti, de 6,2 mm. Para que as barras tivessem o mesmo diâmetro, de forma a produzir vigas compósitas com exatamente a mesma geometria, as barras de liga ferrosa foram lixadas até apresentarem o diâmetro de 6,2 mm.

Esta liga ferrosa, por questão de simplicidade, será designada como de aço, mas deve-se registrar que sua composição é incerta. Assim, nas simulações teóricas do comportamento elástico das vigas de polipropileno reforçado com barra de aço e nylon/epóxi, serão adotados os módulos de elasticidade 69, 97 e 200 GPa, por conta da incerteza da composição da referida liga ferrosa.

3.1.4 - Fibra de nylon

Visando uma melhor fixação do fio de aço ou Ni-Ti ao tubo de polipropileno, foi usado um fio de nylon (polietileno PE). Neste trabalho foi usado polietileno de alta densidade. Eis algumas características que são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Propriedades físicas do polietileno de alta densidade

Grau de cristalinidade (%)	40 a 50
Densidade (g/cm ³)	0,94 a 0,97
Temperatura de Fusão (°C)	105 a 110
Módulo elástico E (N/mm ²)	1000
Coefficiente de expansão linear (K ⁻¹)	1,7 * 10 ⁻⁴

Foram usados fios de nylon (PE 100%) de 1 mm de diâmetro, em um rolo de 100 metros, marca POLIBEL para cada viga compósita fabricada.



Figura 3.4 – Rolo de fio de nylon (Polietileno) usado no bobinamento.

3.2 – METOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1 - Caracterização da liga de Ni-Ti

Para a caracterização do fio de Ni-Ti foram utilizados as técnicas de calorimetria diferencial de varredura (DSC), difração de raios X (DRX), e análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) junto com espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

3.2.1.1 – Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

DSC é a técnica que mede temperatura e fluxo de calor associados a transições de fase, no caso, em materiais como uma função do tempo e da temperatura em uma atmosfera controlada. Os detalhes da técnica em geral são apresentados na literatura (Skoog, 1998)

Os ensaios de DSC foram realizados na seção do laboratório de acústica e vibrações LAVI, da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Rio de Janeiro (UFRJ), empregando-se equipamento “NETZSCH DSC 200 F3 MAIA” de faixa de temperatura: -170°C , 600°C com atmosfera protetora de nitrogênio, a bancada experimental é apresentada na Figura 3.5. O objetivo do ensaio foi determinar as temperaturas de transformação de fase martensítica (M_s e M_f) e Austenítica (A_s e A_f) na liga de Ni-Ti. Os fios foram cortados cuidadosamente (a fim de evitar encruamento do material) em vários segmentos com aproximadamente 5 mm de comprimento de tal maneira que o peso total correspondesse de 15 a 20 mg aproximadamente; estes pedaços foram pesados em balança analítica, limpos com álcool, secos e colocados em um cadinho de alumínio. Este cadinho, que em seguida era tampado e selado, constituía uma amostra. Duas amostras foram preparadas repetindo-se o procedimento para elas, Figura 3.6.

As taxas de aquecimento e resfriamento foram fixadas em 10°C por minuto e as temperaturas inicial e final do ensaio foram fixadas em -10°C e 110°C para que os picos de transformação esperados, A_s e A_f , se apresentassem bem definidos. Como referência, foi utilizado um segundo cadinho de alumínio vazio, para evitar condensação de água e oxidação do material a câmara de aquecimento foi preenchida com nitrogênio. O aparelho foi calibrado antes da realização dos ensaios com padrão de índio e zinco.

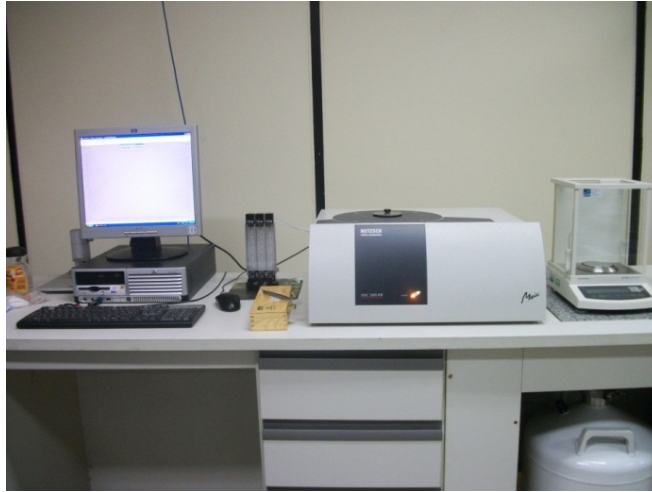


Figura 3.5 – Calorímetro diferencial de varredura (DSC), com bancada experimental de preparação e análise das amostras.

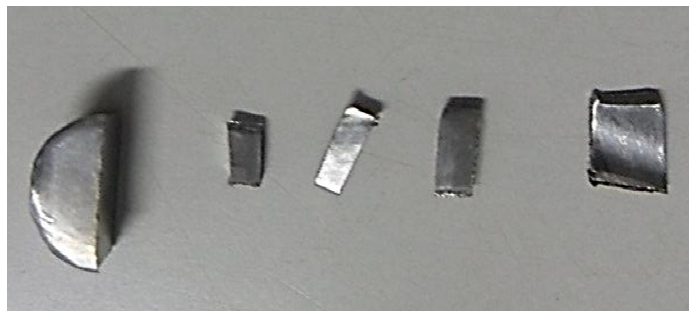


Figura 3.6 – Amostras de Ni-Ti cortadas com cortadeira de precisão Minitom de disco de diamante de baixa rotação e intenso fluxo de água.

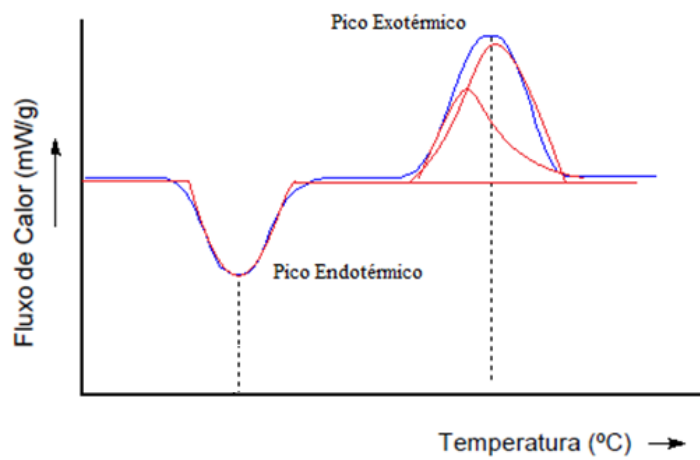


Figura 3.7 – Curvas esquemáticas da análise geral de DSC com deconvolução.

O resultado do ensaio de calorimetria são curvas apresentadas em gráficos que têm por abscissa a “Temperatura (°C)” e ordenada o “Fluxo de Calor por unidade de massa (mW/g)”, Figura. 3.7, proveniente da divisão do fluxo de calor total pela massa das amostras. Desta forma, as áreas existentes entre as curvas dos picos e a linha base podem ser comparadas com as áreas dos picos de outras amostras em uma escala de energia endotérmica ou exotérmica específica própria da transformação da fase. Neste trabalho, dois tipos de gráficos de DSC são basicamente apresentados. O primeiro ou geral mostra o ciclo completo de aquecimento e arrefecimento indicando as temperaturas máximas e mínimas utilizadas no ensaio e os intervalos de energia que separam as transformações endotérmicas e exotérmicas. O segundo apresenta os picos após subtração da linha base e se possível com deconvolução de picos sobrepostos.

3.2.1.2 - Difração de raios X (DRX)

A técnica de difração de raios X é utilizada neste trabalho para a identificação das fases cristalinas da liga de NiTi. Os procedimentos de análise de amostras diversas e os detalhes da técnica em geral são apresentados tanto na literatura especializada quanto na particular (Klug e Alexander 1954; Ewing, 1985; Campo, 2009). Os espectros das amostras foram coletados em um equipamento de difração de raios X (DRX) modelo D8 FOCUS da Bruker localizado no Instituto de Química da UnB, utilizando-se fonte de radiação $\text{CuK}\alpha$ de 1,5418 Å, com uma tensão de 30 kV e corrente de 20 mA; a velocidade do goniômetro foi de 0,05° por passo com tempo de contagem de 1,0 segundo por passo e coletados de 10 a 100°.

As amostras utilizadas para este ensaio foram preparadas cortando a liga de NiTi em forma circular de 6 mm de diâmetro e 2 mm de espessura. Após o corte, foi realizado um ataque químico com o reagente de Kroll (91 % Vol H_2O , 6 % Vol HNO_3 e 3 % Vol HF) de 10 a 20 minutos para remoção de óxidos e da camada superficial afetada pelo corte mecânico.

3.2.1.3 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As técnicas de análise empregadas, microscopia eletrônica de varredura (MEV) junto com a espectroscopia de energia dispersiva (EDS), tiveram como objetivo analisar a

microestrutura da superfície e a composição química (semiquantitativa) dos elementos presentes nas amostras da liga de Ni-Ti, respectivamente.

As análises foram feitas no laboratório de biologia molecular da UnB, utilizando um microscópio eletrônico de varredura marca JEOL modelo JSM 7001F, tensão de aceleração, empregada no processo operacional de análise de 15 kV, acoplado a um equipamento de análise por espectroscopia de energia dispersiva EDS, Figura 3.8. Amostras de Ni-Ti forma cortadas, lixadas e polidas com lixas 80, 100, 220, 400,1200 até polimento com pasta de alumina para conseguir uma superfície brilhante e livre de imperfeições. Depois um ataque químico com o reagente de Kroll, foi feito por 1 dia com o intuito de revelar a microestrutura.

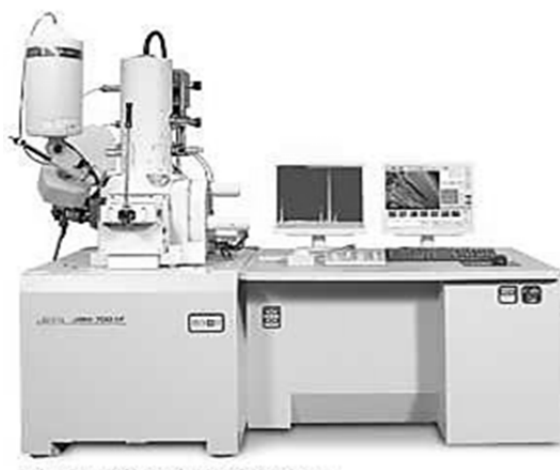


Figura 3.8 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV) da Biologia-UnB.

As análises relativas à superfície das ligas de Ni-Ti, permitiram a obtenção de micrografias de MEV das regiões de interesse para estudo.

3.2.2 - Caracterização geométrica dos tubos de polipropileno

Foram cortados 6 tubos de PP de 500 mm cada para um total de 6 experimentos planejados. Inicialmente foi feito uma caracterização geométrica dos tubos de polipropileno usados na pesquisa. As medidas dos valores médios do raio externo, raio interno e espessura dos tubos de PP foram realizadas no laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica (ENM).

A espessura média dos tubos foi medida a partir da medida em 12 pontos distintos (de 0° até 360°) em cada extremo do tubo, ou seja, 24 medidas, com auxílio de um paquímetro (CSE German Made Vernier) cuja resolução é de 0,05 mm, garra de 100 mm e faixa de medição de 300 mm.

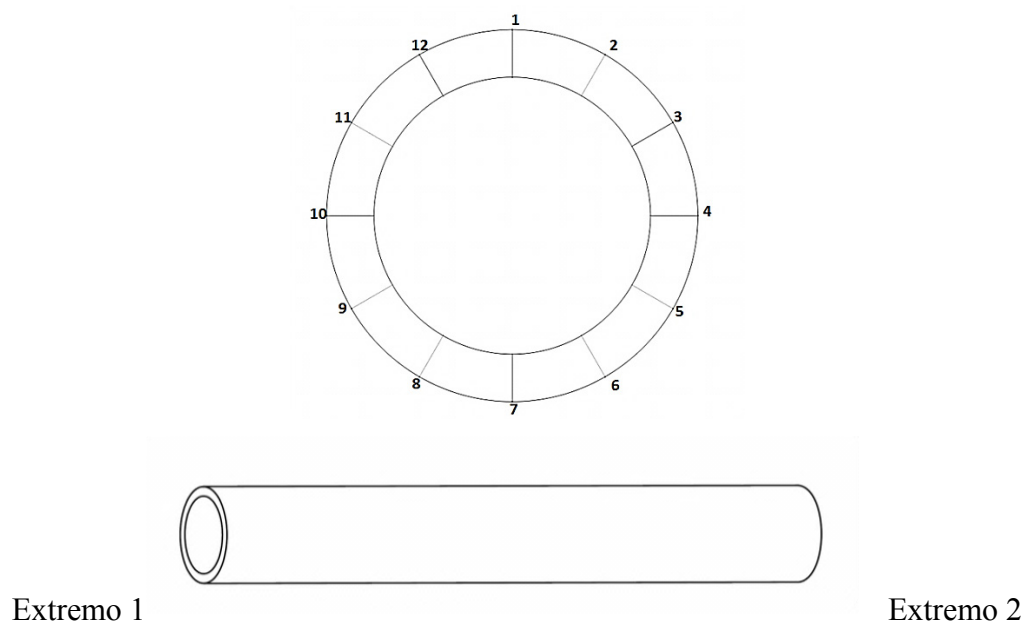


Figura 3.9 – Pontos de medição da espessura e raios médios dos tubos.

Os dados médios das 24 medições para cada tubo foram colocados na tabela 3.4 a seguir:

Tabela 3.4 – Espessura média dos tubos de polipropileno PP.

	Média de 24 medições da espessura dos tubos (mm)	Desvio Padrão (mm)
Tubo 1	7,26	0,05
Tubo 2	7,27	0,04
Tubo 3	7,16	0,04
Tubo 4	7,24	0,04
Tubo 5	7,24	0,05
Tubo 6	7,18	0,02
Média geral	7,22	0,04
Coeficiente de variação da espessura dos tubos		$\frac{100\% * 0,04}{7,22} = 0,55\%$

Da mesma forma foram feitas medições do diâmetro interno dos tubos em 12 pontos de cada extremo. Os dados foram coletados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Diâmetro interno médio dos tubos de polipropileno PP.

	Média de 24 medições do diâmetro interno dos tubos (mm)	Desvio padrão (mm)
Tubo 1	35,74	0,05
Tubo 2	35,79	0,17
Tubo 3	35,78	0,13
Tubo 4	35,78	0,15
Tubo 5	35,9	0,09
Tubo 6	35,90	0,07
Média geral	35,81	0,11
Coeficiente de variação do diâmetro interno do tubo $\frac{100\% * 0,11}{35,81} = 0,31\%$		

Por outro lado, o método usado para determinar a variação dos raios e quantificar-se a circularidade dos tubos de PP, baseia-se na comparação da variação da curvatura da superfície dos tubos (Piratelli, 1976). O instrumento usado para a determinação do raio médio do tubo neste procedimento foi o relógio comparador alemão marca Veb Feinmesszeugfabrik Suhl, com faixa de medição até 10 mm e resolução de 0,01 mm. A Figura 3.10 apresenta o esquema de medição da variação da curvatura com o relógio comparador.

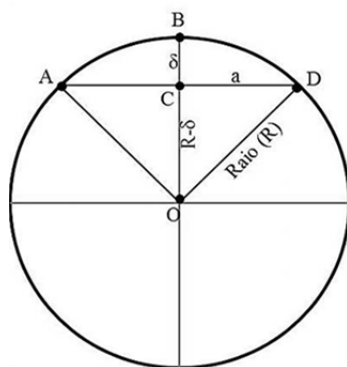


Figura 3.10 – Parâmetros geométricos para a medição do raio médio do tubo.

A Figura 3.10 mostra os pontos fixos A e D, onde é apoiado o esferômetro. um sensor mecânico que registra o deslocamento, δ , devido à curvatura do tubo é localizado no ponto B. Os principais parâmetros são “a” e “ δ ”, os quais foram medidos para determinação da variação do raio do tubo. O valor de “a” é uma constante do esferômetro de 16,5 mm, e “ δ ” é a variação do raio a ser medido, onde R é o raio do tubo. Assim, usando o teorema de Pitágoras no triângulo COD, obtém-se a seguinte relação:

$$R^2 = a^2 + (R - \delta)^2. \quad (3.1)$$

Evidenciando o raio R da equação 3.1, chega-se à relação matemática para a medição do raio médio a partir de medições das variações do raio “ δ ”:

$$R = \frac{a^2 + \delta^2}{2\delta}. \quad (3.2)$$

Considerando-se a relação anterior, foram projetadas linhas ou zonas de medição ao longo do tubo a cada 100 mm, totalizando 6 seções, Figura 3.11, e em cada linha foram feitas as medidas das variações do raio, δ , em 12 pontos marcados a cada 30° na superfície do tubo, como mostrado na Figura 3.9, totalizando 6*12=72 medidas do raio do tubo em todo seu comprimento.

Logo foram substituídos estes valores de δ na equação 3.2, para o cálculo do raio externo médio. Com a medição do raio nos 72 pontos para cada tubo, foi determinado o raio externo médio dos tubos e o desvio padrão correspondente como é especificado na Tabela 3.6.

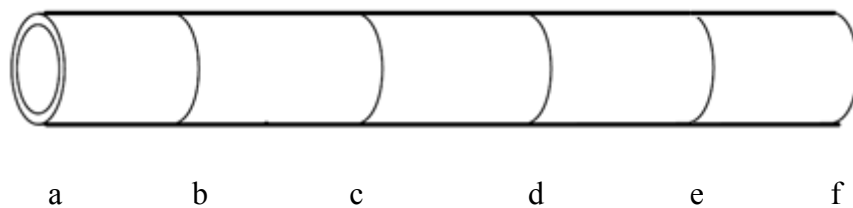


Figura 3.11 – Seções definidas para medição do raio externo nos tubos de PP.

Tabela 3.6 – Raio externo dos tubos de polipropileno PP.

	Média de 72 medições dos raios externos dos tubos (mm)	Desvio padrão (mm)
Tubo 1	24,84	0,22
Tubo 2	24,83	0,22
Tubo 3	24,84	0,21
Tubo 4	24,97	0,39
Tubo 5	24,94	0,38
Tubo 6	24,97	0,35
Média geral	24,90	0,29
Coeficiente de variação do raio externo do tubo $\frac{100\% * 0,29}{24,90} = 1,16\%$		

Por outro lado, foi feito um estudo do grau de ovalização ou circularidade dos tubos de polipropileno PP, com o intuito de estabelecer um padrão para as dimensões dos tubos usados na pesquisa e facilitar os cálculos posteriores.

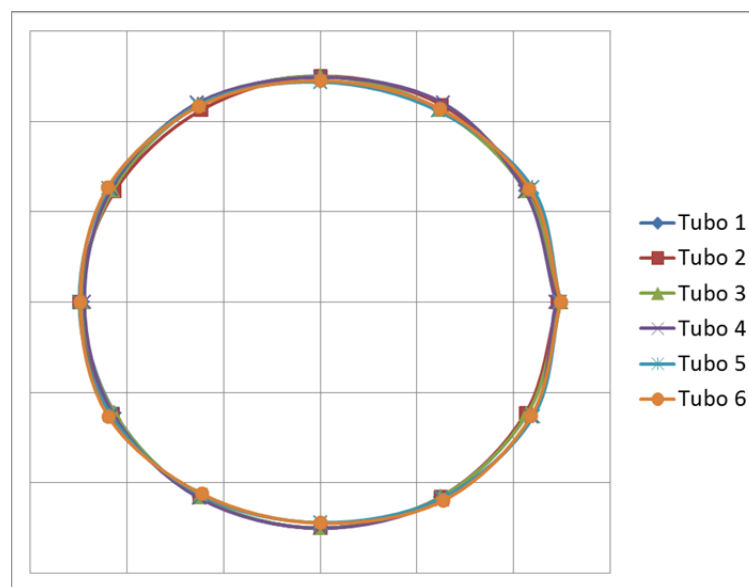


Figura 3.12 – Grau de circularidade dos tubos de polipropileno PP.

Percebe-se que nos 12 pontos de medida no tubo, os valores do raio externo tem uma variação de 1,16%, segundo a análise estatística dos valores da Tabela 3.6.

Esta análise permitiu atingir a estabilidade dimensional (dimensões padronizadas) tanto para os raios interno e externo quanto para a espessura de todos os tubos de polipropileno utilizados nesta pesquisa. Os valores foram coletados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Dimensões médias padronizadas dos tubos de Polipropileno PP

Dimensão	Valor (mm)
Raio interno dos tubos (r_I) de PP	17,91
Raio externo dos tubos (r_E) de PP	24,90
Espessura dos tubos de PP	7,22

3.2.3 - Classificação dos corpos de prova

Com a finalidade de analisar a influência das propriedades elásticas de cada material utilizado na fabricação dos corpos de prova nas propriedades mecânicas finais das vigas cilíndricas compósitas e adaptativas, foram selecionados seis corpos de prova especificados e classificados na tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Classificação e seleção dos corpos de prova utilizados

Corpo de prova	Especificações	Justificação
Tubo de Polipropileno Acqua system	2 tubos de 500 mm cada	Conferir o módulo de elasticidade a flexão
Tubo de polipropileno + fio de aço + revestimento Epóxi/Nylon	2 tubos de 500 mm cada, 2 fios de aço 1020 de 500 mm, com superfície limpa e decapada, Fração volumétrica Epóxi/Nylon 0,4/0,6	Avaliação do método de fabricação e comportamento mecânico do compósito.
Tubo de polipropileno + fio de Ni-Ti + revestimento Epóxi/Nylon	2 tubos de 500 mm cada, 2 fios de Ni-Ti de 520 mm, com superfície limpa e decapada com reagente de Kroll. Fração volumétrica Epóxi/Nylon 0,45/0,55	Avaliar o módulo de elasticidade da viga adaptativa, quando na liga Ni-Ti acontece uma mudança de fase (M → A) pelo efeito do aumento da temperatura.

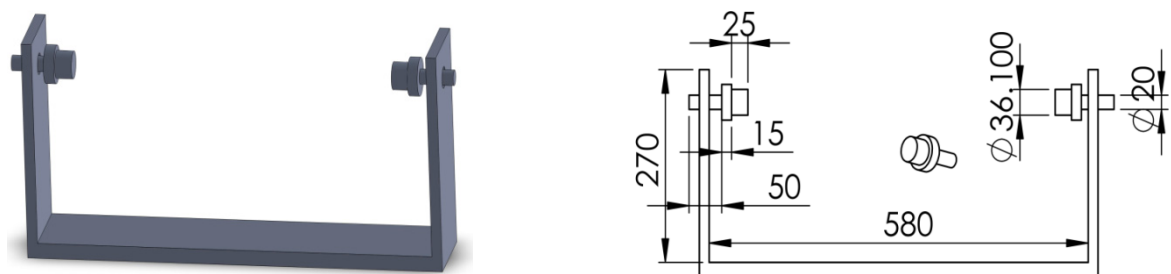
Na fabricação das vigas relacionadas na tabela 3.8, as matrizes utilizadas nos compósitos foram de resina epóxi de cura a frio *ARALDITE F* e endurecedor HY956 BR

ambos fabricados pela empresa *HUNSTMAN*. A formulação empregada foi de 25 partes em peso de catalisador para 100 partes em peso de resina epóxi.

Após a mistura dos componentes deve-se mexer bem durante 3 minutos, obtendo-se um composto homogêneo e pronto para aplicação. Além disso, pode ser usada a temperaturas relativamente altas, $T > 70^{\circ}\text{C}$, para ensaios e experimentos com a liga em fase austenítica estável, $T > A_f$.

3.2.4 – Detalhes na fabricação das vigas compostas híbridas

Inicialmente foi projetado e construído um dispositivo de bobinamento filamentar manual para facilitar e padronizar o bobinamento do nylon na superfície dos tubos de polipropileno. O dispositivo consiste de dois apoios cilíndricos concêntricos que fixam o tubo a uma plataforma de rolamento, promovendo a movimentação e rotação livre do tubo. A Figura 3.13 mostra o desenho original do dispositivo e também o dispositivo terminado e funcional do mesmo.



(a)



(b)

Figura 3.13 – Dispositivo de bobinamento manual: (a) usando o software “*Solid Works*” e (b) dispositivo terminado.

Os apoios cilíndricos ou rolamentos foram fabricados em nylon (poliamida), no torno do laboratório de fabricação do ENM, e a plataforma que sustenta estas peças foi elaborada em madeira seguindo as especificações e dimensões do desenho.

Para a incorporação do fio de aço ou de Ni-Ti no tubo de polipropileno foi feito um sulco na superfície do tubo a fim de manter o fio encostado na superfície do mesmo, Figura 3.14. O sulco foi feito utilizando a fresadora universal do laboratório de fabricação do ENM e uma ferramenta de corte com forma de meia lua adaptada, que consistiu de uma barra de aço de 50 mm de comprimento com um semicírculo na extremidade de valor aproximadamente igual ao do raio do fio de aço ou Ni-Ti (3,1 mm), que atuou como guia de corte através do comprimento do tubo. Ao início foi difícil fazer os sulcos com o aprofundamento requerido devido ao incorreto alinhamento do tubo, mas depois de ensaiar várias superfícies de um tubo de prova, foi alcançado um procedimento padrão para o aprofundamento certo do tubo.

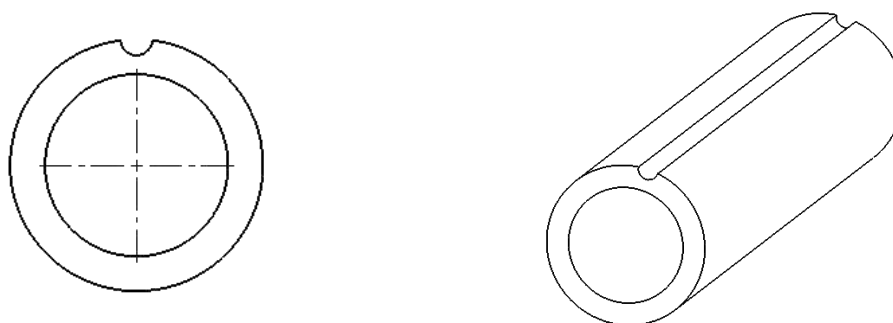


Figura 3.14 – Sulco feito nos tubos de PP para incorporar os fios de aço ou Ni-Ti.

Uma vez feito o sulco nos tubos de polipropileno, a confecção dos corpos de prova inicia-se considerando três camadas principais, a primeira é o tubo de PP, a segunda é o fio de aço ou de Ni-Ti e a terceira é a camada de revestimento de nylon/epóxi como apresentado no início deste documento na Figura 1.2.

O processo de fabricação dos compósitos começou com a limpeza da superfície dos tubos com álcool e jogando ar quente para deixá-la limpa e livre de gordura e sujeira. Depois foi preparado o fio de aço ou de Ni-Ti, este último, com a superfície livre de óxido com auxílio do processo de decapagem química com o reagente de Kroll (91% Vol H₂O, 6% Vol HNO₃ e 3% Vol HF). Em seguida, foram preparadas 6 gramas de resina epóxi

(Araldite F/HY 956) com o intuito de impregnar o sulco do tubo para a incorporação do fio de aço ou de Ni-Ti ao tubo, enquanto da início ao bobinamento do nylon (polietileno). O processo de bobinagem começa colando fortemente a ponta do nylon à superfície mais próxima à extremidade do tubo, logo, o sistema é girado lentamente para distribuir o nylon em todo o comprimento do tubo. Este procedimento tem uma duração de uma hora e meia, aproximadamente, para cada tubo. Na Figura 3.15 é apresentado o processo da fabricação. Finalmente, quando o tubo foi bobinado com o nylon, outra quantidade de resina epóxi, desta vez 40 gramas de resina (32 g de araldite F/ 8 g HY 956) foi preparada considerando uma relação de 100 pp de adesivo para 25 pp de endurecedor, e o volume da camada previsto de 31 cm^3 , considerando espessura da camada desejada de $t=1,5 \text{ mm}$ tendo em conta as dimensões do sistema incorporado (aço ou Ni-Ti). Na Tabela 3.9, são detalhados os cálculos e a metodologia que corresponde à fabricação do revestimento de nylon/epóxi.

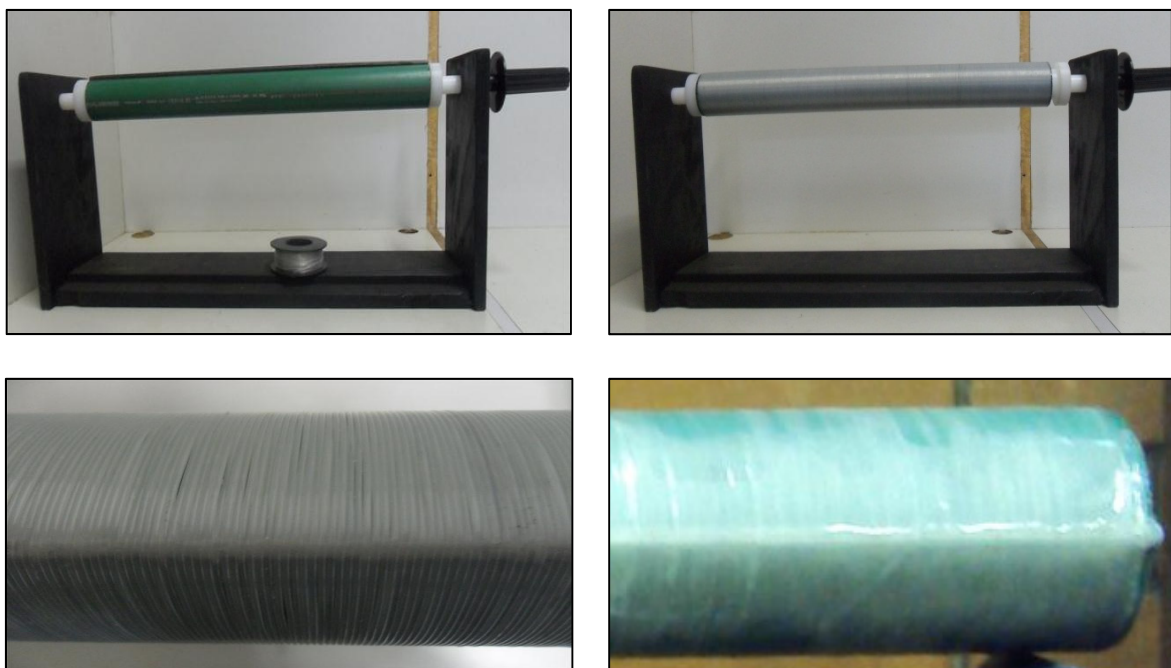


Figura 3.15 – Detalhe da fabricação dos compostos híbridos com fios de aço ou Ni-Ti com camada de revestimento de nylon/epóxi.

Tabela 3.9 – Parâmetros para o cálculo da fabricação do revestimento nylon/epóxi

Volume interno do composto	$243477,36 \text{ mm}^3$
Volume externo do composto, espessura prevista de 1,5 mm	$273695,55 \text{ mm}^3$
Volume da resina V_{resina}	$30218,19 \text{ mm}^3$

Como a densidade do epóxi é $\rho_{resina} = 1 \text{ g/cm}^3$, segundo o fabricante HUNTSMAN, a massa da resina vai ser de $M_{resina} = \rho_{resina} * V_{resina} = 30,2 \text{ g}$. Logo, com o intuito de fazer uma estimativa razoável de quanta resina deve, necessariamente, ser preparada e evitar desperdícios, é adotado um fator adicional de resina de 1,3, com o qual a massa de resina requerida seria de $M_{resina} = 1,3 * 30,2 \text{ g} \approx 40,0 \text{ g}$. Depois, considerando-se a relação de 100 pp de adesivo por 25 pp de endurecedor, (para um total de 125 pp), foram calculados os valores correspondentes para preparar as 40 gramas de resina. Assim, a quantidade de adesivo (ARALDITE F) a usar foi de: $40 \text{ g} * 100\text{pp} / 125\text{pp} = 32 \text{ g}$, e, por tanto, de endurecedor (HY956) de: $40 \text{ g} - 32 \text{ g} = 8 \text{ g}$.

No processo da bobinagem circular com o fio de nylon, foi preciso conhecer as frações volumétricas tanto de fibra quanto de matriz, a fim de calcular o módulo de elasticidade efetivo dessa camada. Neste caso como o nylon é bobinado a 90 graus em relação ao eixo vertical x da viga, as fibras são solicitadas mecanicamente na direção 2, ou seja, o módulo de elasticidade E_2 , calculado pela regra das misturas.

Considerando-se que inicialmente foram usadas 61 gramas de fibra de nylon na bobinagem dos compósitos com fio de aço, e só 48 gramas de fibra de nylon para as vigas compósitas com fio de Ni-Ti, foram calculadas as frações volumétricas da matriz e da fibra, respectivamente. Na tabela 3.10 é apresentado o cálculo das frações volumétricas da camada bobinada de revestimento de nylon/epóxi. Além disso, considerando-se que a fração volumétrica de vazios pode ser desprezada, por ter um valor muito pequeno em comparação com os valores relativos às fibras e às matrizes, a relação volumétrica é:

$$\vartheta_f + \vartheta_m = 1. \quad (3.3)$$

onde ϑ_f e ϑ_m são as frações volumétricas de fibra e de matriz, respectivamente. A equação 3.3, também pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{V_f}{V_C} + \frac{V_m}{V_C} = 1. \quad (3.4)$$

sendo V_f o volume de fibras, V_m o volume da matriz e V_C o volume do compósito.

Agora, substituindo na equação 3.4, a massa de fibra (m_f) e sua densidade (ρ_f), a massa da matriz (m_m) e sua densidade (ρ_m) e conhecendo a massa da camada (m_c), pode ser calculada a densidade (ρ_c) com a equação 3.5 e daí o volume do compósito e as frações volumétricas de fibra e de matriz, respectivamente, como é apresentado na tabela 3.10. Do mesmo modo foi calculada a fração volumétrica de fibra e de matriz para o revestimento bobinado do compósito com fio de Ni-Ti, pois foi usado menos quantidade de fibra de nylon para tentar favorecer uma melhor impregnação da resina epóxi tanto no tubo quanto na fibra de nylon.

$$\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m} = \frac{m_c}{\rho_c}. \quad (3.5)$$

Tabela 3.10 – Parâmetros utilizados para a fabricação da camada nylon/epóxi.

$m_{f \text{ nylon}}(\text{aço}) = 61 \text{ g}$		$\rho_{f \text{ polietileno}} = 0,94 \text{ g/cm}^3$	
$m_{f \text{ nylon}}(\text{Ni - Ti}) = 48 \text{ g}$		$m_{m \text{ resina}} = 40 \text{ g} - \rho_{m \text{ resina}} \approx 1 \text{ g/cm}^3$	
$m_c = m_{f \text{ nylon}} + m_{m \text{ resina}}$			
$\rho_c = \frac{m_c}{\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m}}$		$V_c = \frac{m_c}{\rho_c}$	
Frações volumétricas			
Viga com fio de aço	$\vartheta_f = \frac{m_f}{\rho_f V_c} = 0,6$	$\vartheta_m = 1 - \vartheta_f = 0,4$	
Viga com fio de Ni-Ti	$\vartheta_f = 0,55$	$\vartheta_m = 0,45$	

Em decorrência das características físicas de cada camada, há mudança no módulo de elasticidade efetivo e no momento de inércia total o que leva a definir os momentos de inércia para cada camada considerando a viga adaptativa como compósito híbrido de três camadas. O tubo de polipropileno é considerado a primeira camada do compósito, sua forma é de um cilindro de seção tubular fechada ou anel de raio externo, r_E , e raio interno, r_I , com momento de inércia dado por:

$$I_{\text{tubo}} = \frac{\pi}{4} (r_E^4 - r_I^4). \quad (3.6)$$

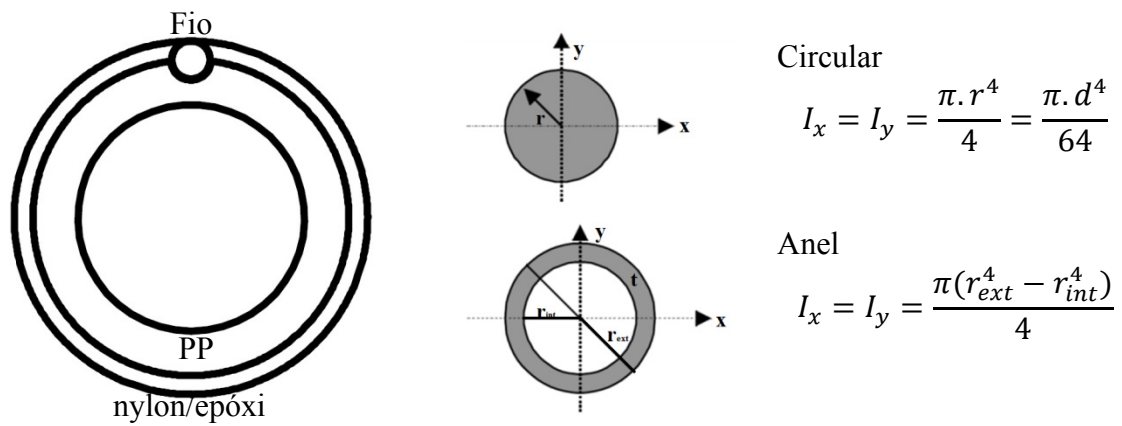


Figura 3.16 – Momentos de inércia para cada camada da viga compósita.

A segunda camada é o fio (aço ou Ni-Ti), o qual é considerado como uma fibra contínua dentro do compósito. Segundo o teorema dos eixos paralelos (Hibbeler, 2009), o momento de inércia em relação ao eixo y é:

$$I_{fio} = \frac{\pi d_{fio}^4}{64} + \left(\frac{\pi d_{fio}^2}{4} * D^2 \right). \quad (3.7)$$

sendo, D a distância do centro de coordenadas ao centro do fio, em relação ao eixo y , e d_{fio} é o diâmetro do fio (de aço ou Ni-Ti) incorporado na superfície do tubo.

Uma última camada é de nylon-epóxi, que corresponde à camada que prende o fio (aço ou Ni-Ti) ao tubo para evitar o escorregamento. A forma de esta camada é como se fosse um anel de raio interno r_E e raio externo r_0 e, de espessura t , como mostrado na Figura 3.16, com momento de inércia:

$$I_{revestimento} = \frac{\pi}{4} (r_0^4 - r_E^4). \quad (3.8)$$

Finalmente, para fazer os cálculos teóricos, a viga compósita toda é considerada como um cilindro de raio interno r_I e de raio externo r_0 , com momento de inércia global:

$$I_{yy} = \frac{\pi}{4} (r_0^4 - r_I^4). \quad (3.9)$$

Verifica-se que substituindo às expressões do momento de inércia na equação 2.9, a deflexão máxima, para o ensaio de flexão em três pontos teria a seguinte forma:

$$\omega_{m\acute{a}x} = \frac{PL^3}{48E_{xF}I_{yy}}. \quad (3.10)$$

Considerando-se um compósito de “ka” camadas, o módulo efetivo em flexão pode ser estimado como segue:

$$E_{xF} = \frac{1}{I_{yy}} \sum_{ka=1}^N E_x^{ka} I_{yy}^{ka} = \frac{1}{I_{yy}} \{E_x^{tubo} I_{tubo} + E_x^{fio} I_{fio} + E_x^{revest} I_{revest}\}. \quad (3.11)$$

3.2.5 - Relações teóricas do módulo de elasticidade efetivo em flexão

Tabela 3.11 – Parâmetros teóricos das relações de carga (P) - deflexão (ω_{max}) para o ensaio de flexão do tubo de PP.

Módulo de elasticidade teórico PP (E) (MPa)	850
Raio interno do tubo (r_i) (mm)	17,91
Raio externo do tubo (r_E) (mm)	24,90
Comprimento útil do ensaio (L) (mm)	467
Momento de inércia da seção (I_{tubo}) (mm ⁴)	221105,47
Rigidez à flexão ($E \cdot I_{tubo}$) (Nmm ²)	187939648,30
$P = \left[\frac{48 \cdot EI}{L^3} \right] * \omega_{max}$, sendo P em Newton e ω_{max} em milímetros e sendo $K = \frac{48 \cdot EI}{L^3}$ constante de proporcionalidade em N/mm. $E_{xF} = \frac{K * L^3}{48 * I_{yy}}$	
A relação teórica da carga com a deflexão para o tubo de PP é $P = [88,57 \text{ N/mm}] * \omega_{max}$	

Inicialmente foi escolhido o tubo de polipropileno de 500 mm de comprimento para calcular o módulo de elasticidade efetivo em flexão. Neste caso, deve-se tomar o valor do

módulo de elasticidade do polipropileno, que segundo o fabricante é de 850 MPa (Acqua System, 20008). Logo, considerando-se as dimensões médias dos tubos já estabelecidas e padronizadas, é calculado o momento de inércia da seção transversal do tubo. Os dados anteriormente descritos foram substituídos nas equações 2.14 e 2.16, obtendo a relação teórica do tubo submetido à flexão em três pontos e coletados na Tabela 3.11.

Da mesma forma, também foi calculada a relação teórica para flexão para o compósito incorporando o fio de aço no tubo e bobinando a camada de revestimento de nylon/ epóxi, considerando-se as propriedades mecânicas do fabricante do tubo de PP, do aço, do epóxi e do nylon (polietileno). Para estes dois últimos materiais é usada a regra das misturas para calcular o módulo de elasticidade perpendicular, como se apresenta na tabela 3.13.

Além disso, foram adotados três valores para o módulo de elasticidade do ferro fundido cinzento, chamado de fio de aço, para comparar aqueles valores.

Tabela 3.12 – Relações teóricas de carga - deflexão da viga com fio de aço

Módulo de elasticidade do aço (MPa)	Direção do fio	Relação carga - deflexão
200000	0° E 180°	$P = [1915,08 \text{ N/mm}] * \omega_{max}$
	90°	$P = [150,70 \text{ N/mm}] * \omega_{max}$
97000	0° E 180°	$P = [1002,91 \text{ N/mm}] * \omega_{max}$
	90°	$P = [147,18 \text{ N/mm}] * \omega_{max}$
66000	0° E 180°	$P = [728,37 \text{ N/mm}] * \omega_{max}$
	90°	$P = [146,12 \text{ N/mm}] * \omega_{max}$

As relações de carga-deflexão apresentados na tabela 3.12 permitem observar graficamente o comportamento do ensaio de flexão em três pontos teórico das vigas compósitas. Assim pode ser plotados tanto os resultados teóricos quanto os experimentais em uma figura só, e tirar conclusões no que diz ao respeito da validação do experimento. Aqui é obtida a correlação entre os resultados analíticos e os experimentais, permitindo analisar o comportamento da viga compósita no ensaio de flexão.

Tabela 3.13 – Parâmetros teóricos das relações de carga (P) - deflexão (ω_{max}) para o ensaio de flexão da viga compósita com fio de aço.

Módulo de elasticidade adotada do PP (E_t) (MPa)		850	
Módulo de elasticidade adotado do epóxi (E_e) (MPa)		5100	
Módulo de elasticidade adotado do náilon (E_n) (MPa)		1000	
Módulo de elasticidade do revestimento (E_r) (MPa)		1473,99	
Regra das misturas $\frac{1}{E_2} = \frac{\vartheta_n}{E_n} + \frac{\vartheta_e}{E_e}$ $\vartheta_n = 0,60$ e $\vartheta_e = 0,40$			
Raio interno do tubo (r_I) (mm)		17,91	
Raio externo do tubo (r_E) (mm)		24,90	
Raio externo global da viga (r_0) (mm)			
Direção do fio	0° e 180°	$r_E + \left(\frac{d_{fio}}{2}\right) + t_{bobinado}$	29,5
	90°	$r_E + t_{bobinado}$	26,4
Diâmetro do fio de aço (d_{fio}) (mm)		6,2	
Distancia do eixo central ao centro do fio (D) (mm)		24,90	
Comprimento útil do ensaio (L) (mm)		467	
Momento de inércia do tubo (I_t) (mm ⁴)		221105,47	
Momento de inércia do fio de aço (I_a) 0° e 180° (mm ⁴)		18791,07	
Momento de inércia do fio de aço (I_a) 90° (D=0) (mm ⁴)		72,53	
Momento de inércia do bobinado (I_c) (mm ⁴)		79592,91	
Módulo de elasticidade adotada do fio de aço (E_a) MPa	Direção do fio	Rigidez à flexão efetiva ($E \cdot I_{yy}$) (Nmm²)	Módulo de Elasticidade Teórico (MPa)
200000	0° e 180°	4063473164,00	7905,62
	90°	319765312,60	1063,15
97000	0° e 180°	2127992704,0	4140,07
	90°	312294396,10	1038,31
66000	0° e 180°	1545469459,00	3006,76
	90°	310045867,80	1030,84

Do mesmo modo, foram calculadas as relações teóricas para o ensaio de flexão nas vigas adaptativas, incorporando o fio de Ni-Ti, na superfície. Na Tabela 3.14 as relações teóricas de carga (P) – Deflexão (ω_{max}), para o ensaio de flexão em três pontos. Na tabela 3.15 são apresentadas as relações de proporcionalidade para a flexão em três pontos.

Tabela 3.14 - Parâmetros teóricos das relações de carga (P) - deflexão (ω_{\max}) para o ensaio de flexão da viga adaptativa com fio de Ni-Ti.

Módulo de elasticidade adotada do PP (E_t) (MPa)		850	
Módulo de elasticidade adotado do epóxi (E_e) (MPa)		5100	
Módulo de elasticidade adotado do náilon (E_n) (MPa)		1000	
Módulo de elasticidade do revestimento (E_r) (MPa)		1700	
Regra das misturas $\frac{1}{E_2} = \frac{\vartheta_n}{E_n} + \frac{\vartheta_e}{E_e}$ $\vartheta_n = 0,55$ e $\vartheta_e = 0,45$			
Raio interno do tubo (r_I) (mm)		17,91	
Raio externo do tubo (r_E) (mm)		24,90	
Raio externo global da viga (r_0) (mm)			
Direção do fio	0° e 180°	$r_E + \left(\frac{d_{fio}}{2}\right) + t_{bobinado}$	29,5
	90°	$r_E + t_{bobinado}$	26,4
Diâmetro do fio de Ni-Ti (d_{fio}) (mm)		6,2	
Distancia do eixo central ao centro do fio (D) (mm)		24,90	
Comprimento útil do ensaio (L) (mm)		467	
Momento de inércia do tubo (I_t) (mm ⁴)		221105,47	
Momento de inércia do fio de Ni-Ti (I_N) 0° e 180° (mm ⁴)		18791,07	
Momento de inércia do fio de Ni-Ti (I_N) 90° (D=0) (mm ⁴)		72,53	
Momento de inércia do bobinado (I_c) (mm ⁴)		79592,91	
Módulo de elasticidade adotada do fio de aço (E_M) MPa	Direção do fio	Rigidez à flexão efetiva ($E \cdot I_{yy}$) (Nmm²)	Módulo de Elasticidade Teórico (MPa)
Martensita $E_M = 22000$	0° e 180°	736651190,00	1433,19
	90°	324843326,40	1080,29
Austenita ($E_A = 2E_M$) 44000	0° e 180°	1150054783,00	2237,47
	90°	326439056,10	1085,60
Austenita ($E_A = 3E_M$) 66000	0° e 180°	1563458377,00	3041,75
	90°	328034785,80	1090,91

Tabela 3.15 – Relações teóricas de carga - deflexão da viga com fio de Ni-Ti.

Módulo de elasticidade adotado do Ni-Ti (MPa)	Direção do fio	Relação carga x deflexão
$E_M = 22000$	0° E 180°	$P = [347,18 \text{ N/mm}] * \omega_{max}$
	90°	$P = [153,01 \text{ N/mm}] * \omega_{max}$
$2E_M = 44000$	0° E 180°	$P = [542,01 \text{ N/mm}] * \omega_{max}$
	90°	$P = [153,85 \text{ N/mm}] * \omega_{max}$
$3E_M = 66000$	0° E 180°	$P = [736,85 \text{ N/mm}] * \omega_{max}$
	90°	$P = [154,60 \text{ N/mm}] * \omega_{max}$

3.2.6 - Caracterização mecânica com o ensaio de flexão em três pontos

Concluída a etapa de fabricação das vigas compósitas, foi realizada a análise e o ensaio mecânico de flexão. A finalidade foi caracterizar mecanicamente as vigas, determinando as constantes elásticas efetivas em flexão a três pontos. Para realização desse ensaio, foi utilizada a máquina de ensaio mecânicos universais MTS – 810 (*Material Test System*) situada no laboratório do grupo Gamma (Grupo de mecânica dos materiais) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília. A MTS-810 realiza testes mecânicos em corpos de prova, como tração, compressão e flexão, obtendo, através do software *Station Manager MTS system*, associado à máquina, os dados do experimento plotados em um gráfico de força (KN)-deslocamento (mm).

Devido às dimensões dos corpos de prova dos compósitos deste trabalho, 500 mm cada, foi necessário o projeto e fabricação de um dispositivo de flexão próprio. A Figura 3.17 apresenta com detalhe a peça elaborada em aço no laboratório de fabricação do SG9 da UnB.

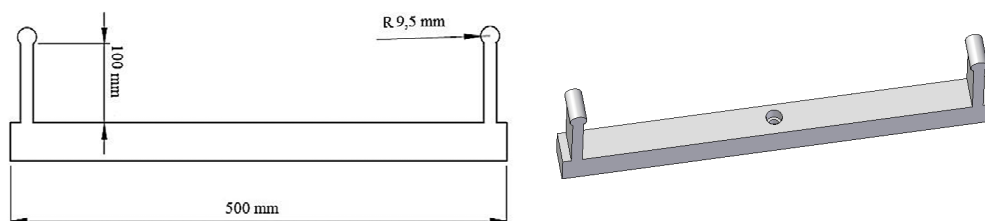


Figura 3.17 – Dispositivo de flexão em três pontos projetado para a MTS – 810.

O dispositivo foi desenhado com auxílio do software *Solid Works*, de acordo com as dimensões previstas na norma *ASTM D790-07* para fazer testes em flexão no regime elástico em corpos de prova plásticos reforçados. A Figura 3.18 mostra o detalhe da máquina realizando ensaio de flexão com o tubo de polipropileno.



Figura 3.18 – Ensaio de flexão em três pontos do tubo de PP na MTS.

A MTS-810 estava equipada com uma célula de carga de 10 KN e uma peça com um cilindro na extremidade que fica em contato com a viga ensaiada (vista superior), e uma peça com dois apoios (garra inferior) que submetem a viga a uma flexão em três pontos em ação combinada com a movimentação da garra inferior. O vão efetivo entre os dois apoios é de 467 milímetros. Isto é, distância real do ponto médio dos apoios cilíndricos do dispositivo de flexão. Os corpos de prova foram levados para a MTS-810 testados seguindo as especificações mostradas na tabela 3.16.

Tabela 3.16 – Parâmetros utilizados no ensaio na MTS-810

Tipo de ensaio	Flexão em três pontos (Ensaio no regime elástico)
Velocidade do ensaio	1 mm/min
Deflexão máxima 1% do Vão	Menor que 5 mm
Vão efetivo do dispositivo de flexão	467 mm

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho em duas partes.

A primeira parte corresponde à caracterização da liga de Ni-Ti, descrição das técnicas usadas para determinar a microestrutura da liga como recebida, determinação da fase cristalina da liga presente nessa condição inicial das temperaturas de transformação de fase (M_s , M_f , A_s e A_f).

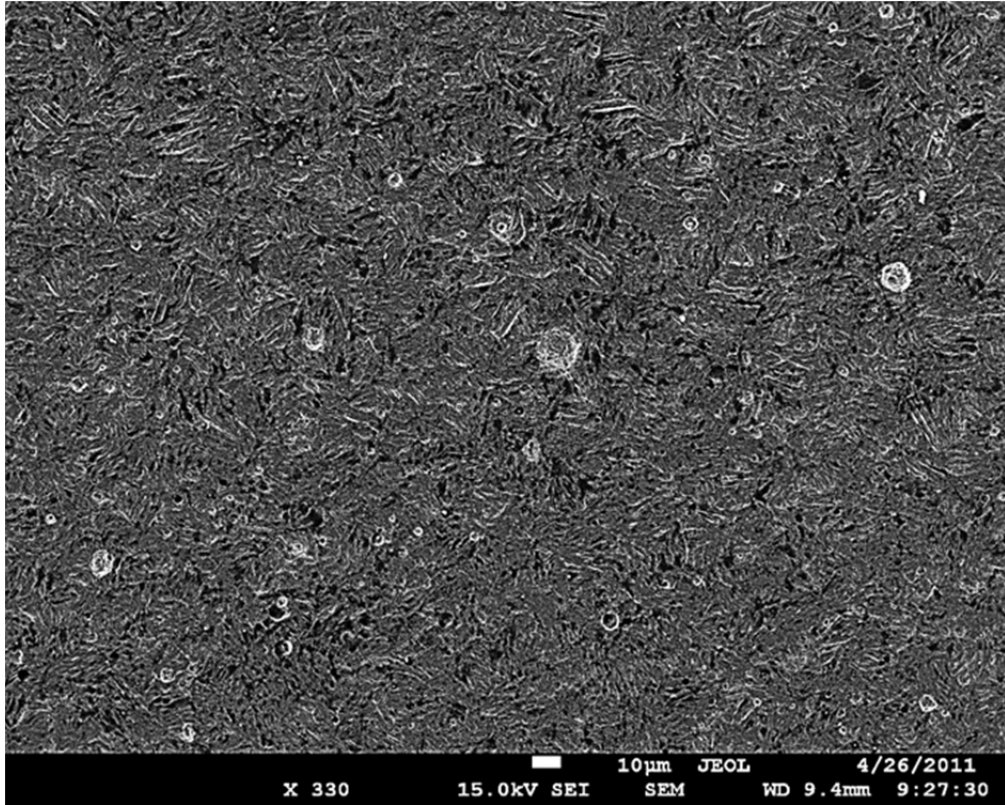
A segunda parte corresponde à caracterização mecânica dos corpos de prova, fazendo referência aos resultados obtidos nos testes de flexão em três pontos.

4.1 – CARACTERIZAÇÕES DA LIGA DE Ni-Ti

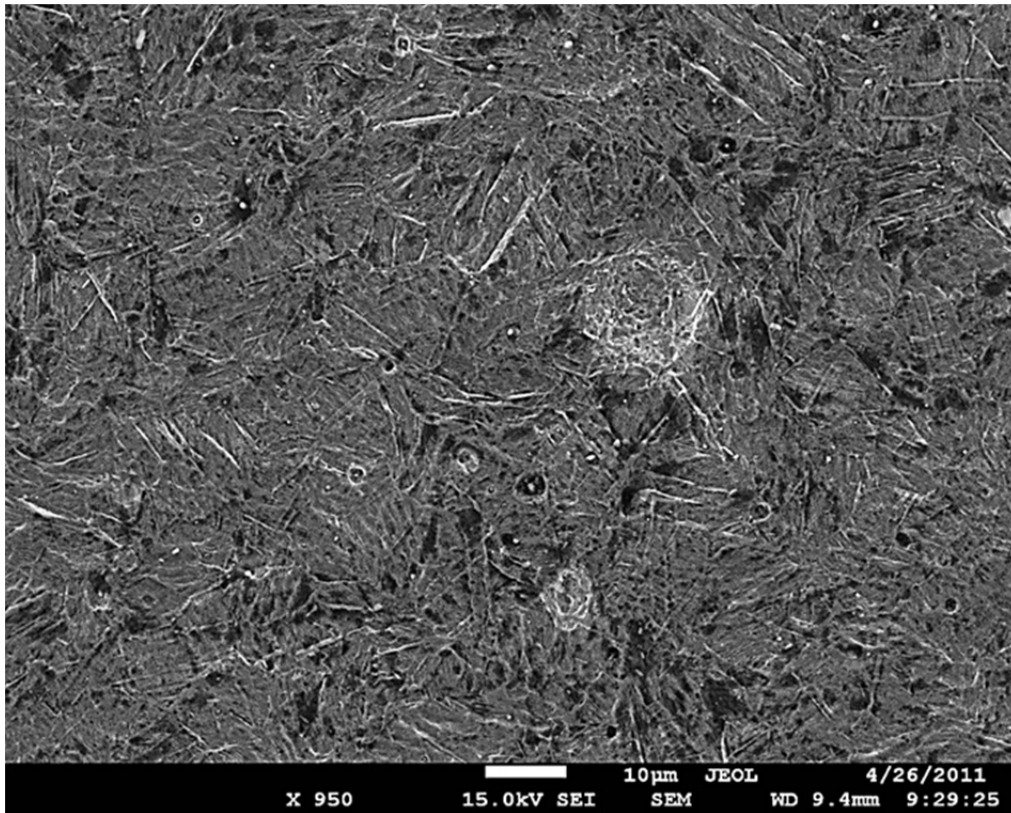
4.1.1 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Na Figura 4.1 são apresentadas micrografias de uma amostra da liga Ni-Ti cortada, polida e atacada quimicamente com reagente de Kroll. É possível observar uma microestrutura geral homogênea e pode ser observada uma microestrutura de placas alongadas desorientadas ou maclas que são características da presença de uma fase martensítica na liga, devido à acomodação da fase martensita na fase mãe austenita como referenciado pelo Otsuka, 1998. Além disso, Podem ser observadas partes da superfície expostas, devido ao efeito forte dos ácidos usados no ataque químico, além de pequenas partículas brancas brilhantes de forma ovalada que correspondem ao titânio precipitado.

Fazendo a microanálise de energia dispersiva de raios X, EDS, foi possível determinar a composição química média da liga de Ni-Ti, partindo de uma região ou algum ponto específico da superfície. Na Figura 4.2 é apresentada a análise EDS de uma região completa da superfície da liga. Uma análise pontual também foi feita. Assim foi determinada a composição química média da liga de Ni-Ti, com o intuito de comparar com os dados do fabricante (vide anexo A).



(a)



(b)

Figura 4.1 – Microestrutura da liga de Ni-Ti com aumento de a) 330X e de b) 950X.

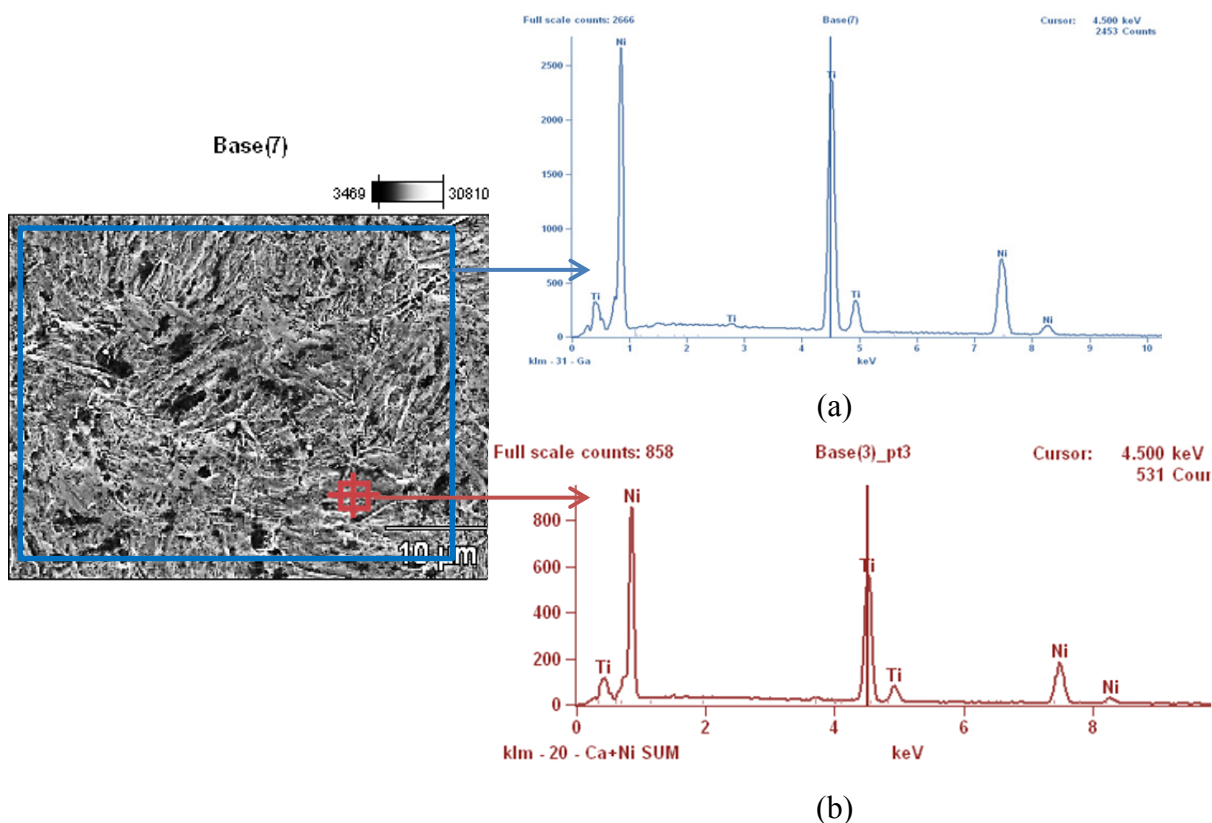


Figura 4.2 – Análise EDS (a) da região e (b) de um ponto da superfície da liga de Ni-Ti.

Segundo os resultados de EDS, apresentados na tabela 4.1, a liga tem uma composição média de 49,98 % atômico de Ni e 50,02 % Atômico de Ti (ou 55,05 % em peso de Ni e 44,95% em peso de Ti). Desvio padrão correspondente de 0,45%.

Tabela 4.1 – Análise quantitativa do ensaio EDS para a liga Ni-Ti.

Elemento	Contagem	% em peso	%atômico	%Composto
Ti	39409	44,95	50,02	44,95
Ni	14861	55,05	49,98	55,05

4.1.2. – Difração de raios X (DRX)

Uma amostra da liga de Ni-Ti foi levada para o difractômetro de raios X, do instituto de química da UnB. A seguir é apresentado o resultado desta análise que corresponde ao padrão de difração registrado da amostra da liga Ni-Ti.

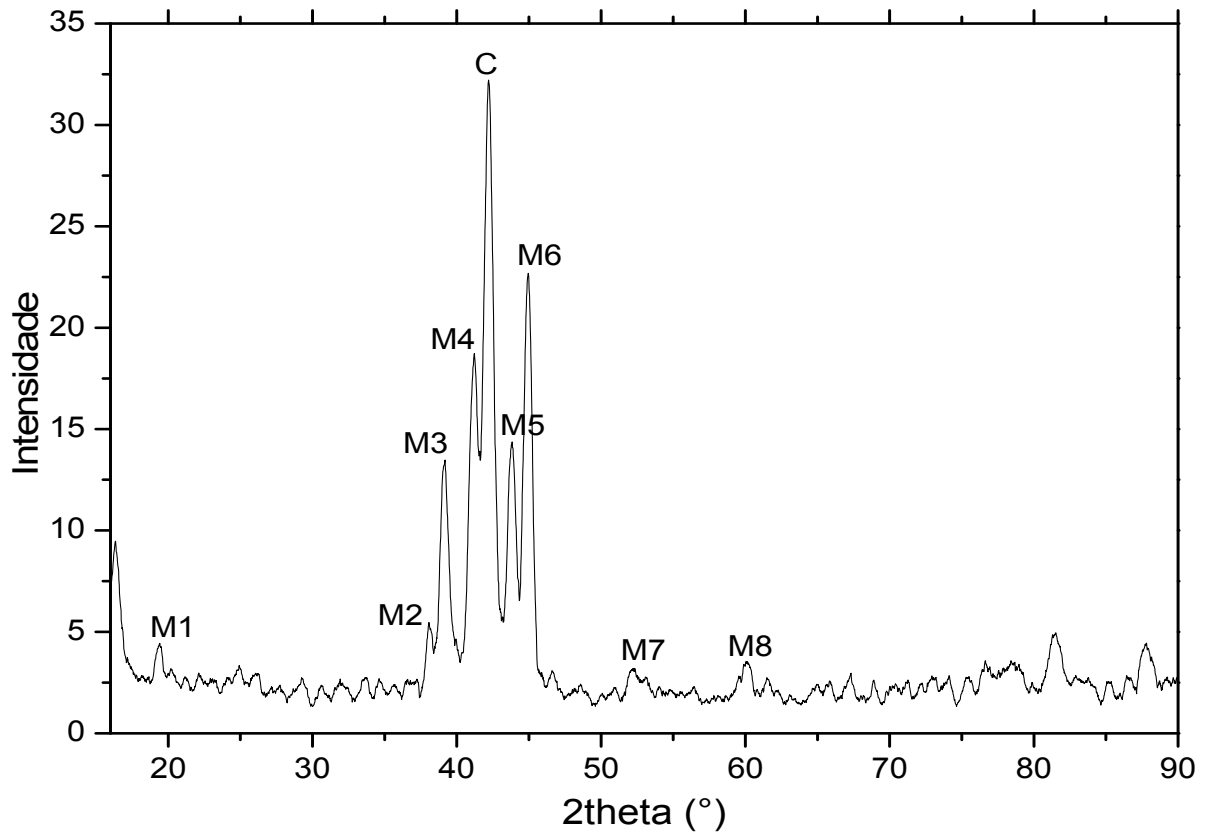


Figura 4.3 – Padrão de difração da liga de Ni-Ti à temperatura ambiente.

No difractograma da Figura 4.3 segundo a análise com o *software Crystallographica Search Math* (Campo, 2009) com auxílio da base de dados cristalográficos da ICDD. (*International Centre for Diffraction Data*), podem ser notados picos maioritários de difração, como é referenciado na ficha de difração do ICDD, PDF 27-344 (vide anexo B), que corresponde ao sistema monoclinico grupo espacial P21/m (no.11) e dimensões da célula unitária de $a=2,9$ Å, $b=4,1$ Å, $c=4,6$ Å, ou seja, a fase martensítica da liga de NiTi à temperatura ambiente.

Também foi identificado um pico de difração que corresponde à fase cúbica do Ni-Ti, localizado ao redor de $2\theta= 42^\circ$ por comparação com a ficha PDF 65-7711 (vide anexo C). Este pico foi designado com a letra C no difractograma da Figura 4.3, sendo o indicativo da presença da fase mãe austenítica da liga como comparado com Yuan *et al*, 2004.

Segundo o resultado da Figura 4.3, os picos de difração encontrados podem ser associados à dispersão dos raios X pelos planos cristalinos da estrutura da liga Ni-Ti. Na tabela 4.2 é apresentada a relação dos planos de difração associados a esses picos de difração identificados na análise de difração de raios X. Estes planos cristalinos encontrados permitiram a identificação da estrutura monoclinica e correspondem coerentemente com às intensidades normalizadas para os vários planos (hkl) que difratam construtivamente os raios X.

Tabela 4.2 – Planos cristalinos da fase monoclinica do Ni-Ti relacionados aos picos de difração identificados.

Pico	Plano de Difração		
	Índices de Miller		
	h	k	l
M1	0	0	1
M2	1	1	0
M3	0	0	2
M4	-1	1	1
M5	0	2	0
M6	0	1	2
M7	-1	1	2
M8	0	0	3

4.1.3 - Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

Na Figura 4.4 são apresentadas as curvas obtidas nos ensaios de DSC realizados à liga de Ni-Ti na faixa de temperaturas de -10 a 100°C, com atmosfera inerte de nitrogênio.

Observa-se que os pontos de inflexão no aquecimento com centro em 39,74 °C e no arrefecimento com centro em 50,23°C são facilmente identificados e representam a ocorrência das transformações martensítica e austenítica, respectivamente, o que permite determinar as temperaturas características de transformação de fase da liga de Ni-Ti, através de uma análise numérica (integração) dos picos, sendo possível, portanto, a determinação das temperaturas inicial e final de cada pico. Os picos exotérmicos (para a

transformação direta, durante resfriamento) e endotérmicos (para a transformação inversa, durante o aquecimento) permitem determinar o início e o final das transformações responsáveis, respectivamente, pela absorção ou pela liberação de calor.

Os resultados foram importados para o programa Origin 8.5. Os trechos de aquecimento e do resfriamento foram estudados em separado. Com o auxílio da ferramenta Peak Fitting, criou-se a linha base e os picos sugeridos pela curvatura.

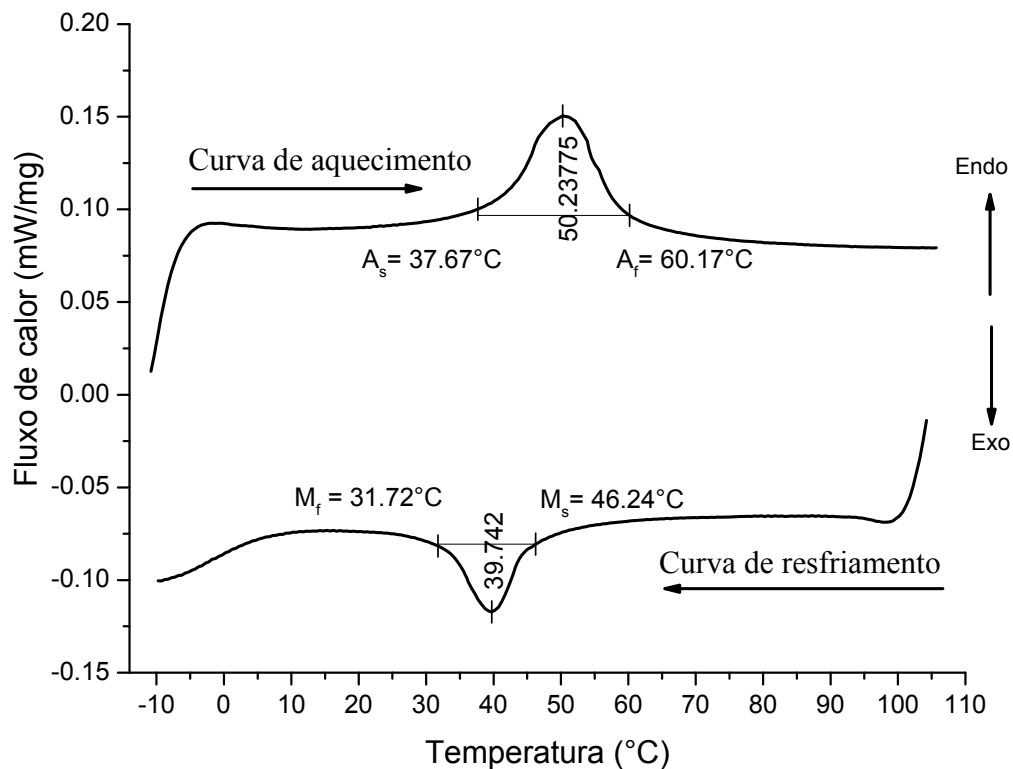


Figura 4.4 – Curvas de aquecimento e resfriamento dos ensaios DSC da liga de Ni-Ti.

A análise dos picos mediante integração mostra que as temperaturas de transformação da fase martensita foram: $M_s = 46,24^\circ\text{C}$ e $M_f = 31,72^\circ\text{C}$, do mesmo modo as temperaturas de transformação de fase da austenita foram $A_s = 37,67^\circ\text{C}$ e $A_f = 60,17^\circ\text{C}$.

Além disso, foi calculada a área do pico da transformação que corresponde à entalpia da transformação de fase. Neste caso é de 0,60 mW/mg para a fase austenita e de -0,2521 mW/mg para a fase martensita (o sinal negativo é o indicativo que a energia é liberada pois este é um processo de transformação exotérmico). Os resultados podem ser observados na tabela 4.3. Pode ser observado que o valor da entalpia de transformação é

menor para a formação da fase martensita, possivelmente devido a uma diferença na taxa de resfriamento, pois o calorímetro não controla de forma direta o processo de resfriamento do material.

Tabela 4.3 – Temperaturas de transformação de fase da liga Ni-Ti obtidas por DSC

Fase Martensita		Fase Austenita	
M _s (°C)	31,72	A _s (°C)	37,67
Centro do pico M _p (°C)	39,74	Centro do pico A _p (°C)	50,23
M _f (°C)	46,24	A _f (°C)	60,17
Entalpia de Transformação (mW/mg)	-0,25	Entalpia de Transformação (mW/mg)	0,60

4.2 - CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS TUBOS DE POLIPROPILENO (PP)

Inicialmente foram testados os tubos de polipropileno para conhecer o valor do módulo de elasticidade em flexão e assim compará-lo com o teórico, dado pelo fabricante, e avaliar o dispositivo de flexão fabricado.

Na Figura 4.5, é apresentado um teste de flexão nos tubos de polipropileno para avaliar um eventual comportamento viscoelástico dos mesmos.

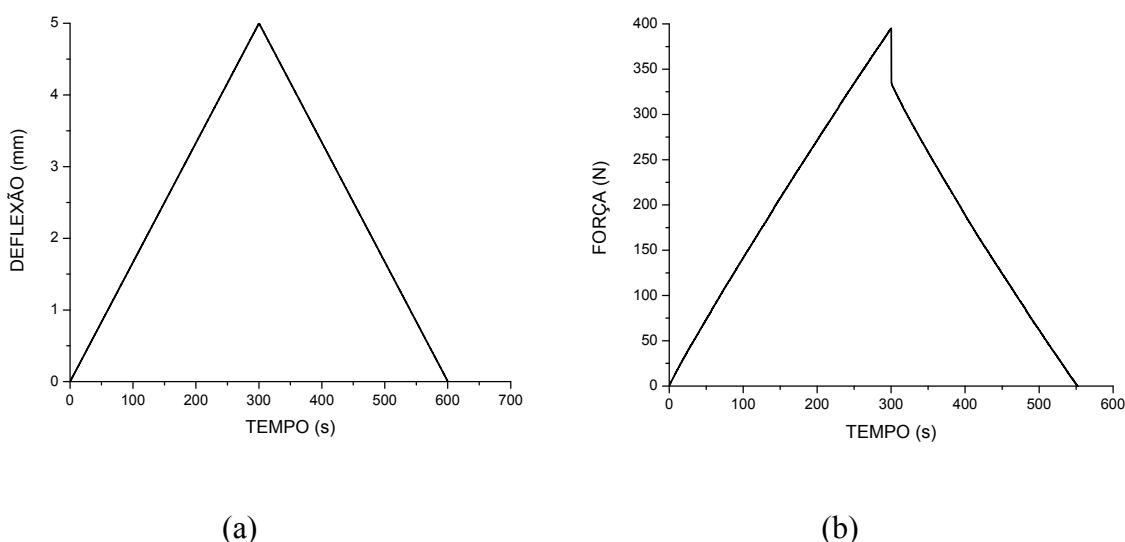


Figura 4.5 – Diagramas de (a) Deflexão-Tempo e (b) Força-Tempo de tubos de PP sob carregamento e descarregamento.

O tubo foi carregado até atingir uma deflexão de 5 mm a uma taxa de 1 mm/min, e depois foi descarregado à mesma taxa com o intuito de observar-se um eventual efeito viscoelástico nessas condições.

Na Figura 4.5.a, pode ser observado um comportamento linear da deflexão durante o procedimento de carregamento e descarregamento da força. Na Figura 4.5.b, uma faixa do gráfico onde a força diminuiu subitamente é observada no momento da parada do carregamento e o começo do descarregamento, este efeito pode estar relacionado com o processo de relaxação do polipropileno.

Após os testes iniciais, realizaram-se ensaios de flexão nos tubos de PP, onde foram calculados o módulo de elasticidade efetivo E_{xF} usando a equação 2.16. Os resultados obtidos dos ensaios de flexão, bem como as curvas Força – Deflexão para os dois tubos testados, podem ser visualizados na Figura 4.6. É importante esclarecer que foram feitos cinco testes em cada tubo e o resultado apresentado é a média geral.

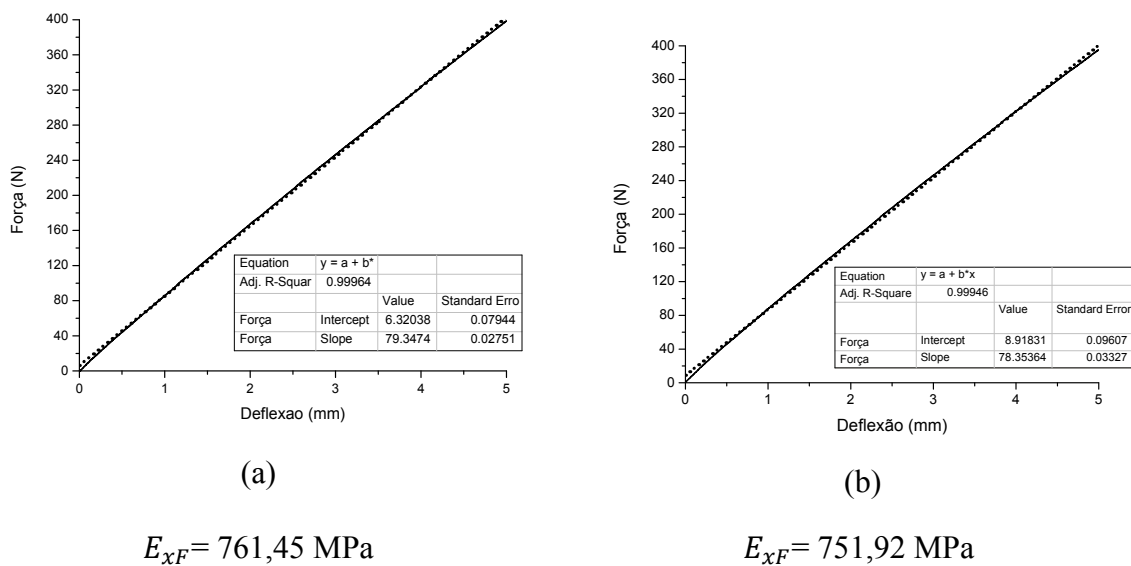


Figura 4.6 – Resultado do ensaio de flexão em três pontos para os tubos a) PP1 e b) PP2.

Tomando os valores obtidos da Figura 4.6, A média do valor do módulo de elasticidade efetivo em flexão obtido nos ensaios dos tubos foi de $E_{\text{experimental}} = 756,69 \text{ MPa}$. Para que fosse possível uma comparação direta e mais confiável entre os resultados teóricos e os experimentais do ensaio de flexão em três pontos foi plotado um diagrama

Força – Deflexão considerando-se o módulo efetivo em flexão teórico de $E_{\text{teórico}} = 850 \text{ MPa}$ do fabricante dos tubos (Acqua System, 2008).

Logo usando a expressão da tabela 3.14, são plotadas em conjunto as curvas tanto experimentais quanto teóricas como é observado na Figura 4.7.

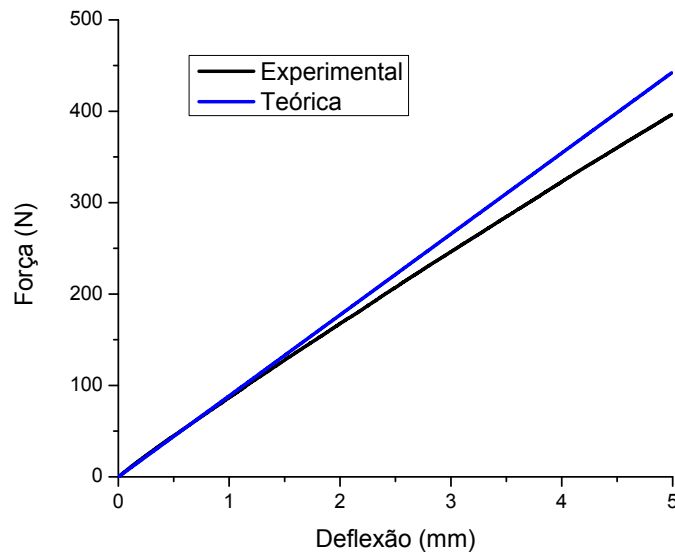


Figura 4.7 – Resultados teóricos e experimentais do ensaio de flexão em três pontos dos tubos de PP.

Considerando uma análise com estatística descritiva o erro padrão foi de 47,7 MPa. Pode notar-se uma boa correlação dos dados experimentais com os teóricos.

4.3 – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS COM FIO DE AÇO

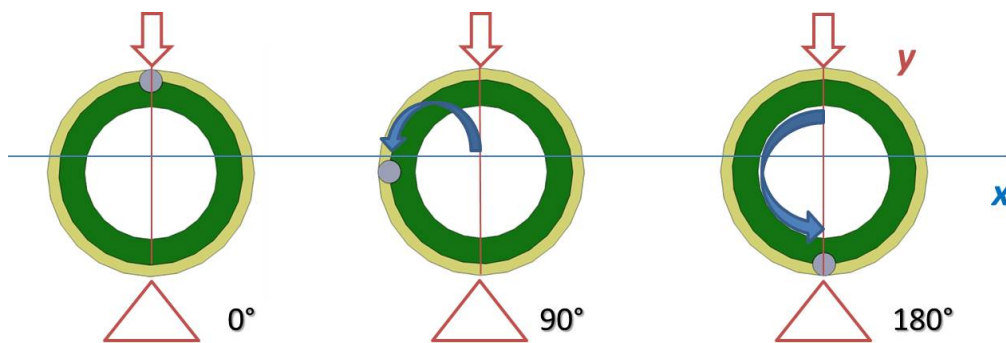


Figura 4.8 – Orientações do fio da viga composta no ensaio de flexão em três pontos.

Neste caso estes compósitos foram testados considerando os mesmos parâmetros na MTS (velocidade de 1 mm/min e deflexão máxima de 5 mm), além disso, estes corpos de prova foram testados em várias posições em relação às três orientações do fio de aço na horizontal do sistema coordenado, isto é, a 0°, a 90° e a 180° como mostra a Figura 4.8.

A seguir são apresentados os gráficos que resumem as curvas e os valores dos módulos de elasticidade efetivo em flexão dos compósitos mencionados.

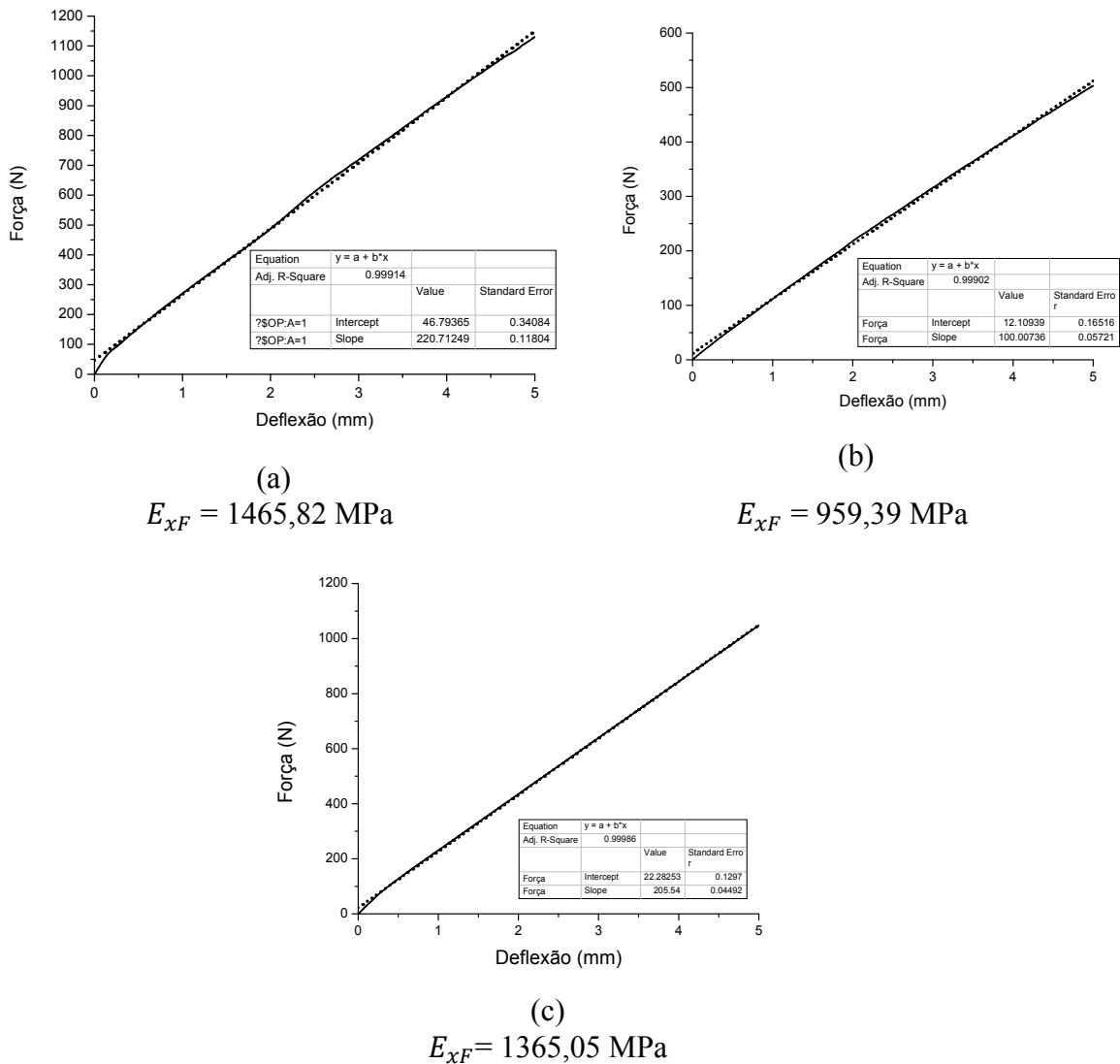
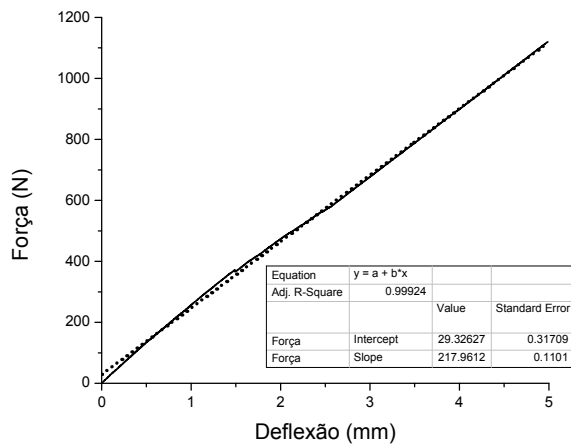
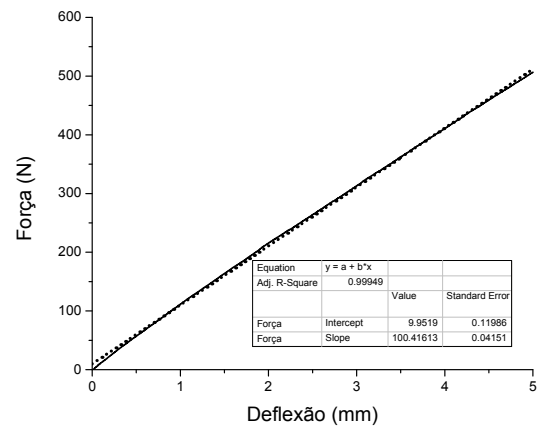


Figura 4.9 – Resultados do ensaio de flexão em três pontos do primeiro compósito com fio de aço (a) 0°, (b) 90° e (c) 180°.



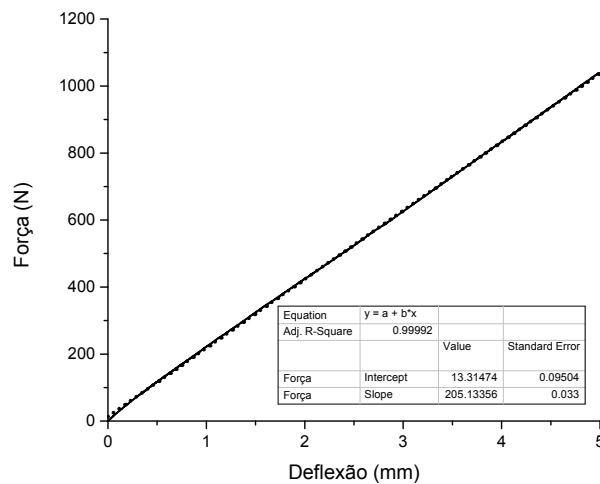
(a)

$$E_{xF} = 1447,55 \text{ MPa}$$



(b)

$$E_{xF} = 963,32 \text{ MPa}$$



(c)

$$E_{xF} = 1362,35 \text{ MPa}$$

Figura 4.10 – Resultados do ensaio de flexão em três pontos do segundo compósito com fio de aço (a) 0°, (b) 90° e (c) 180°.

É importante esclarecer que os compósitos com fios de aço foram feitos para testar o procedimento de bobinamento manual no dispositivo de enrolamento filamentar desenhado, assim como, para realizar ensaios de bobinamento e preparação da camada de revestimento de nylon/epóxi. É por isso que foi muito importante ensaiar estes corpos de prova na flexão com o intuito de avaliar tanto o método de fabricação dos compósitos quanto os resultados experimentais obtidos em relação aos cálculos teóricos do módulo de elasticidade efetivo em flexão.

Percebe-se que, quando o fio de aço está posicionado tanto a 0° quanto a 180° em relação à horizontal, o módulo de elasticidade é significativamente maior do que quando está do lado, a 90°. Isto significa que o fio de aço contribui de forma expressiva no aumento, por um fator de aproximadamente 1.5 vezes, no valor do módulo de elasticidade efetivo a flexão, quando os centróides do fio e do tubo estão alinhados com o plano vertical. E, de forma desprezível quando os centróides ficam no plano horizontal; e, portanto, com o fio a 90° em relação à linha de ação do carregamento. Os valores experimentais são bem próximos aos achados nos cálculos teóricos.

A partir das curvas apresentadas nas Figuras 4.9 e 4.10, foi determinado o módulo de elasticidade efetivo a flexão, E_{xF} . Os valores médios dos módulos de elasticidade efetivo em flexão do compósito com fio de aço foram de $E_{0^\circ} = 1456,69$ MPa, $E_{90^\circ} = 961,35$ MPa e $E_{180^\circ} = 1363,7$ MPa.

Percebe-se que nos casos analisados, nas Figuras 4.9 e 4.10, os valores de E_{0° e E_{180° são próximos em magnitude. Assim, com o intuito de comparar estes valores com os cálculos teóricos, foi calculado um valor médio $E_{\text{médio } 0^\circ \text{ e } 180^\circ} = 1410,19$ MPa. Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados dos valores dos módulos de elasticidade efetiva das vigas para as orientações do fio de aço estudadas. Como pode ser visto na Tabela 4.4, para efeitos de comparação, foi considerado o valor teórico mais próximo aos resultados experimentais, isto é, o módulo de elasticidade do ferro fundido de 66 MPa.

Tabela 4.4 – Comparação dos valores teóricos e experimentais médios do módulo de elasticidade efetivo em flexão da viga compósita com fio de aço.

Orientação do fio	Módulo de elasticidade experimental médio	Módulo de elasticidade efetivo teórico (aço de 66 MPa).	% do valor teórico
0° e 180°	1410,19 MPa	3006,76 MPa	46,9 %
90°	961,35 MPa	1030,84 MPa	93,3 %

Verificou-se que o valor experimental a 90° atinge 93,3%, do valor teórico apresentando uma correspondência aceitável muito afim dessa orientação da viga no

ensaio. Por outro lado o valor experimental com a orientação do fio de aço a 0° e 180° , alcançou apenas 46,9% do valor teórico.

Um possível desalinhamento do fio ou escorregamento da viga nestas orientações provocaria estas variações durante os ensaios para as pequenas deflexões usadas. Mesmo assim tem-se um comportamento coerente com os cálculos teóricos como apresentado na Figura 4.11.

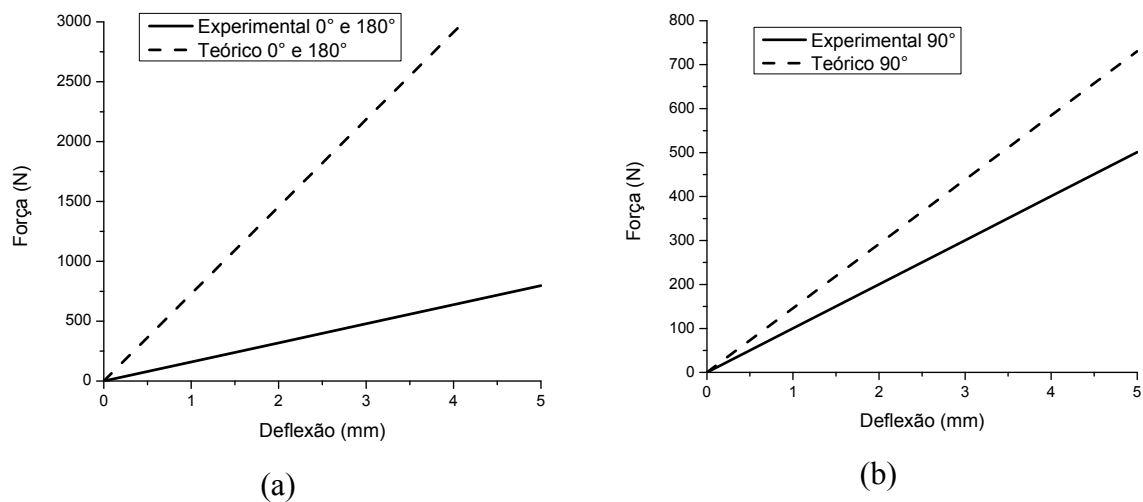


Figura 4.11 – Comparação de módulos elásticos efetivos E_{xF} , teóricos e experimentais, da viga compósita com o fio de aço orientado (a) 0° e 180° e (b) 90° .

4.4 – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS COM FIO DE NI-TI: VIGAS ADAPTATIVAS

Nos testes preliminares dos compósitos com o fio de Ni-Ti na fase austenita, foi adotada uma temperatura de 56°C que foi atingida por fluxo de ar quente durante 20 minutos com um aquecedor elétrico de 1 KW a uma distancia fixa. Após este processo, foi planejado repetir o procedimento de aquecer o fio de 5 a 10 vezes antes dos testes, visando manter a temperatura homogênea no fio de Ni-Ti o maior tempo possível. A temperatura do fio foi monitorada com um termopar tipo K localizado nos pontos extremos da viga compósita. Os resultados dos testes a flexão das duas vigas adaptativas testadas foram plotados nas Figuras 4.12 e 4.13, considerando-se uma temperatura de 21°C para o teste com fio na fase martensita e 56°C para o teste com fio na fase austenita.

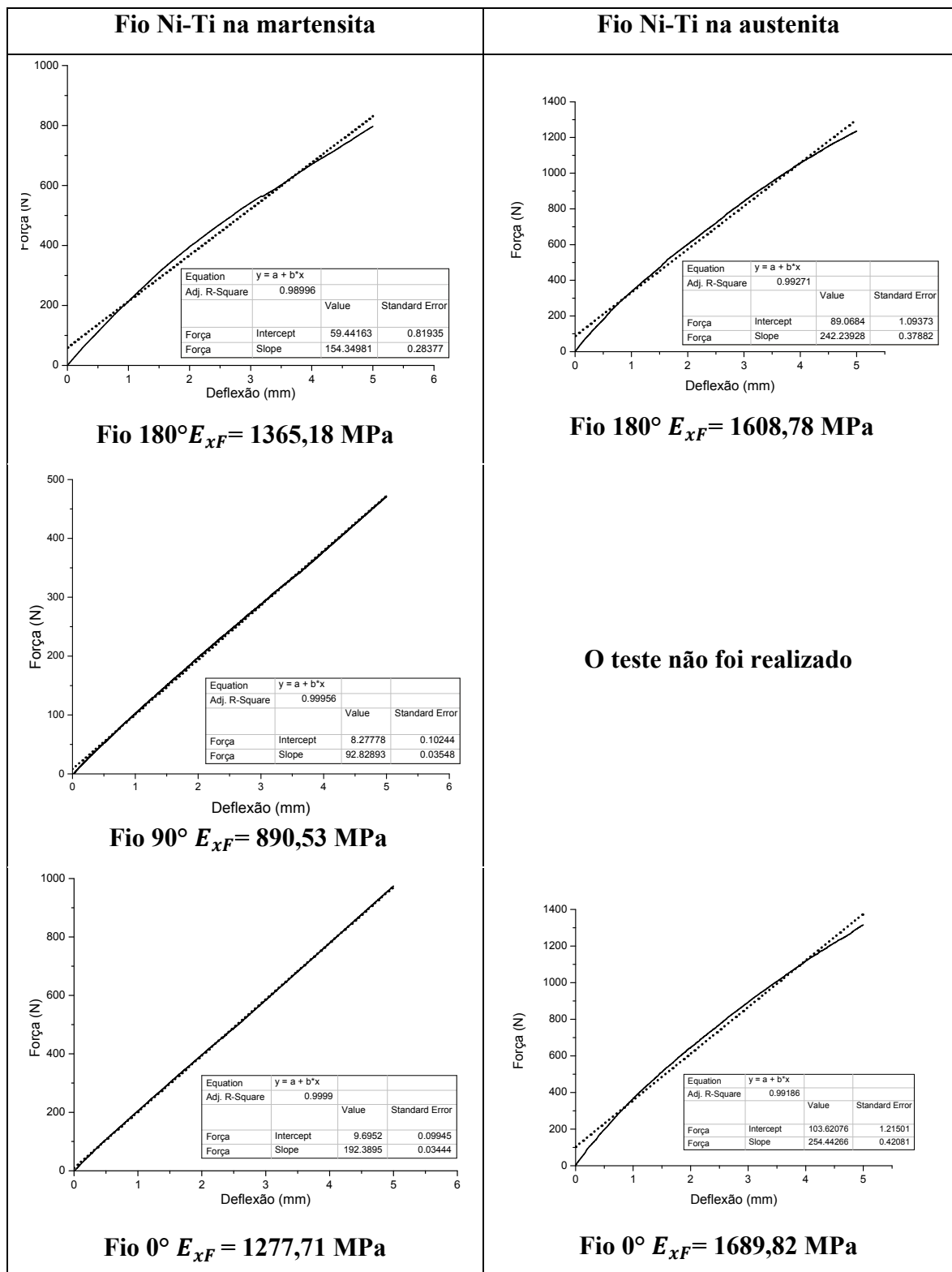


Figura 4.12 – Resultados dos ensaios de flexão em três pontos da primeira viga composta com fio de Ni-Ti na fase martensita (21°C) e austenita (56°C).

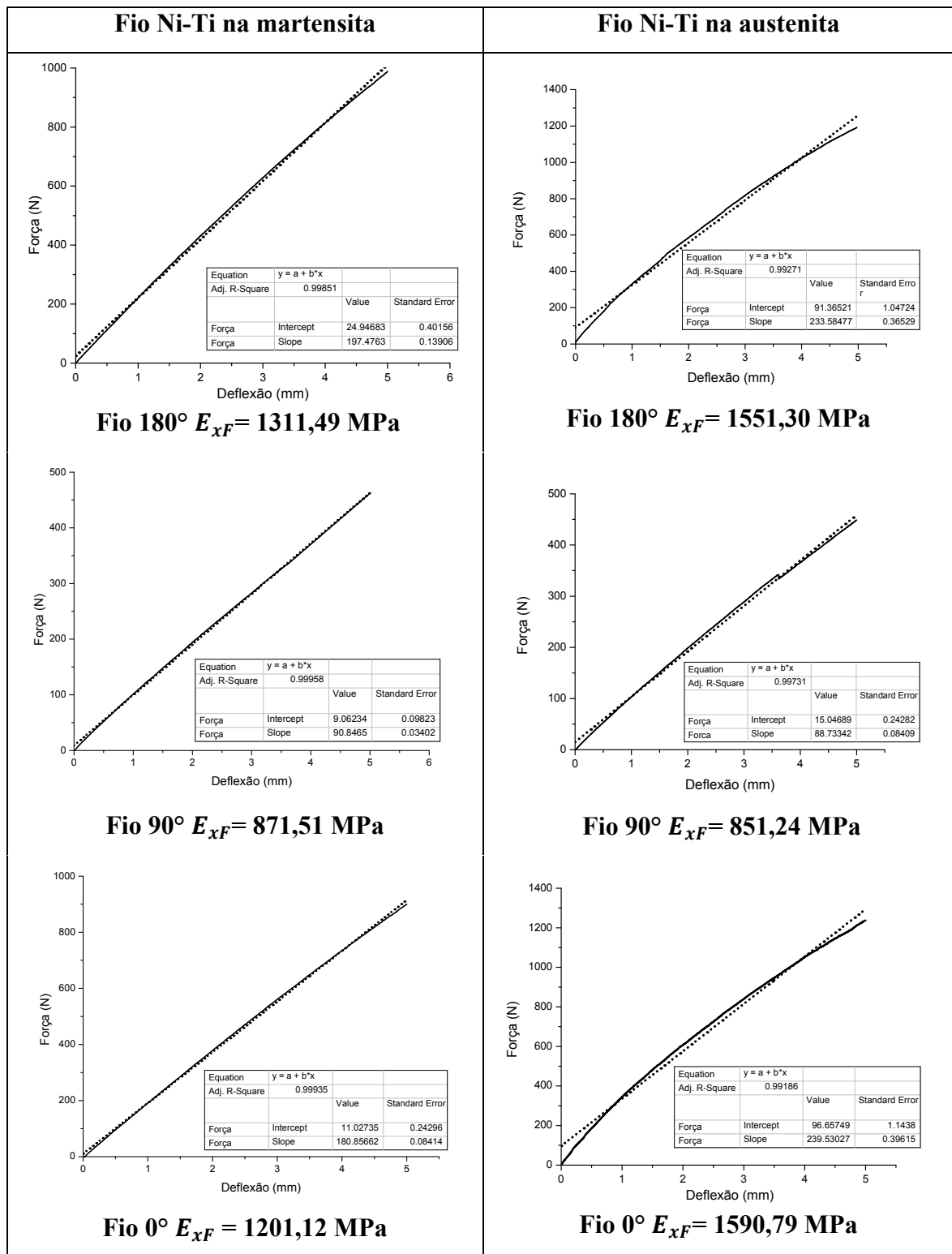


Figura 4.13 – Resultados dos ensaios de flexão em três pontos da segunda viga compósita com fio de Ni-Ti na fase martensita (21°C) e austenita (56°C).

Nos testes da viga compósita com fio de Ni-Ti na fase austenita, 56°C, pode ser observada uma pequena curvatura no gráfico Força-Deflexão, possivelmente devido à

dependência logarítmica decrescente tanto do módulo de elasticidade do tubo de polipropileno (vide Figura 1.1) quanto das características da geometria anisotrópica da viga, podendo ocasionar um possível desalinhamento nas extremidades na hora do ensaio.

Quando foram testadas as vigas com o fio orientado a 90° respeito ao eixo de aplicação da carga, foi observado que não ha contribuição significativa das propriedades mecânicas do fio de Ni-Ti ao valor do módulo efetivo em flexão da viga, por isso, foi feito só um teste com o fio de Ni-Ti aquecido até 56 °C, notando-se uma diminuição do módulo efetivo em flexão de $E_{xF} = 871,51$ MPa para $E_{xF} = 851,24$ MPa, Figura 4.13 fio 90°. Esta diminuição foi provocada possivelmente pelo amolecimento do tubo pelo aumento da temperatura induzida pela corrente de ar quente no fio nesta orientação, afetando as propriedades mecânicas da viga toda.

A partir das curvas apresentadas nas Figuras 4.12 e 4.13, foram encontrados os valores dos módulos de elasticidade da fase martensita e da fase austenita induzida pela temperatura. Esses dados podem ser visualizados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Módulos de elasticidade médios efetivos em flexão das vigas adaptativas.

Martensita (21°C)				Austenita (56°C)			
Módulo de elasticidade efetivo Médio E_M (MPa)		% do valor teórico	% do valor teórico	Módulo de elasticidade efetivo Médio E_A (MPa)		% do valor teórico	% do valor teórico
Experimental	Teórico			Experimental	Teórico		
E_{0°	1321,45	1433,17	92,20 %	E_{0°	1649,3	$2E_M=2237,47$	73,71%
						$3E_M=3041,75$	54,22 %
E_{90°	881,02	1080,29	81,55 %	E_{90°	851,24	1090,90	78,03 %
E_{180°	1256,31	1433,17	87,65 %	E_{180°	1571,1	$2E_M=2237,47$	70,21%
						$3E_M=3041,75$	51,65 %

De acordo à Tabela 4.5, verifica-se aumento no valor do módulo de elasticidade efetivo em flexão, E_{xF} , das vigas compósitas, para as orientações do fio em 0° e 180°. As comparações dos valores do módulo efetivo experimental com os teóricos superam o 70% para o modelo teórico adotado de $2E_M \approx E_A$ e o 50% para o caso de $3E_M \approx E_A$. É importante quantificar este aumento, pois descreve naturalmente o efeito da mudança de fase do fio de Ni-Ti, de martensita para austenita induzida pela temperatura, sobre o comportamento da

viga compósita híbrida nessas condições. A seguir é apresentada a relação de módulos efetivos em flexão E_{xF} da viga compósita, em relação às mudanças de temperatura da liga de Ni-Ti.

Embora os cálculos teóricos sugiram o mesmo valor no módulo de elasticidade nas configurações de orientação do fio de Ni-Ti de 0° e 180° , percebeu-se que houve um aumento maior do módulo E_{xF} da viga compósita quando o fio de Ni-Ti estava orientado a 0° com relação ao sistema coordenado. Este acontecimento pode ser atribuído às condições experimentais favoráveis, tais como melhor distribuição da temperatura no fio de Ni-Ti e à proximidade como apoio central de aplicação da carga. Além disso, quando a viga foi testada na flexão com o fio de Ni-Ti na orientação 0° , respeito ao eixo de carregamento, o fio é comprimido e pressionado contra o tubo pela ação da carga, observando melhor resposta no aumento do módulo de elasticidade efetivo. Por outro lado, com o fio de Ni-Ti na orientação 180° no ensaio de flexão, o fio vai ser tracionado pela ação da carga tentando jogar ele para fora da superfície do tubo, diminuindo a contribuição no valor do módulo de elasticidade efetivo da viga se comparado com o valor obtido na orientação a 0° como é apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Relação do aumento do módulo de elasticidade da viga adaptativa.

Especificação	$\frac{(E_A - E_M)}{E_M} * 100$
Fio de Ni-Ti orientado 0°	31,2 %
Fio de Ni-Ti orientado 180°	18,8 %

Finalmente, pode-se sugerir que o efeito da mudança de fase na liga de Ni-Ti, induzida pelo aumento da temperatura, confere um acréscimo nas propriedades mecânicas da viga compósita híbrida, podendo controlar a sua rigidez considerando-se o aumento ou diminuição da temperatura do fio de Ni-Ti incorporado na superfície da viga compósita. Desta forma, a viga pode ter um aumento de 31,2% na sua rigidez quando o fio de Ni-Ti, esteja na orientação de 0° graus com respeito ao eixo de aplicação da carga, e de 18,8 % na orientação de 180° , considerando que a temperatura aumente de 21°C até 56°C .

5 - CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

5.1 - CONCLUSÕES

A seguir são apresentadas as conclusões associadas aos resultados obtidos mediante a metodologia desenvolvida para a análise e caracterização das vigas compósitas híbridas projetadas no trabalho.

Inicialmente a conclusão geral do trabalho de acordo com os objetivos foi:

O módulo de elasticidade efetivo em flexão, de vigas cilíndricas compósitas híbridas com fio de Ni-Ti, apresentou aumentos de 18 % a 31% que estão associados à efeitos da mudança de fase do fio de Ni-Ti, de martensita para austenita, induzida em condições de aumento de temperatura no compósito, de 21 °C a 56 °C. Este efeito proporcionou ao compósito o caráter adaptativo, podendo ser utilizado em ambientes onde seja requerido e sob duas orientações preferenciais de 0° e 180° graus com respeito ao eixo de aplicação da carga.

Com relação à liga de Ni-Ti pode-se concluir que:

- Foi determinada uma composição química média da liga de Ni-Ti de 50,05 % em peso Ni, além das temperaturas de transformação de fase obtidas por DSC que tiveram os seguinte valores: $M_s = 46,24$ °C, $M_f = 31,72$ °C, $A_s = 37,67$ °C e $A_f = 60,17$ °C, esta última é bem próxima à temperatura dada pelo fabricante $A_f = 62$ °C (Vide anexo) e as outras temperaturas podem ser sugeridas como contribuição do trabalho, estabelecendo uma faixa de trabalho da liga como atuador de Ni-Ti de $M_f = 31,72$ °C e $A_f = 60,17$ °C.

Com relação à fabricação dos compósitos híbridos pode-se concluir que:

- Foi desenvolvida uma metodologia de fabricação de vigas compósitas cilíndricas, utilizando um dispositivo de bobinamento manual projetado para manipular adequadamente as vigas híbridas a serem bobinadas com nylon (polietileno) e impregnadas com resina epóxi. O processo de bobinamento circunferencial a 90° foi feito com sucesso,

conseguindo distribuir a fibra de nylon (polietileno) e impregnar com resina homogeneamente a traves de todo o comprimento das vigas.

- Foram fabricadas vigas cilíndricas compósitas híbridas, constituídas por três camadas bem definidas, constituídas por: tubo de polipropileno, fio de aço ou Ni-Ti encaixados em um sulco na superfície do tubo, bobinado com nylon e impregnação de resina epóxi. As vigas apresentaram propriedades mecânicas relacionadas tanto com o tipo de fio incorporado (aço ou Ni-Ti) quanto com a orientação do fio na linha de aplicação da força.

Com relação à caracterização mecânica pode-se concluir que:

- Tubos de polipropileno foram testados mecanicamente, no regime elástico, para avaliar o módulo elástico em flexão em um dispositivo de ensaio em três pontos projetado de acordo com a norma ASTM D790-07 aplicando uma força a velocidade de 1 mm/min até a deflexão máxima de 5 mm (1% do vão). O módulo de elasticidade em flexão dos tubos de polipropileno foi de 756,69 MPa, valor que foi próximo em magnitude ao valor dado do fabricante (850 MPa), o que permitiu avaliar tanto a metodologia do ensaio em três pontos quanto o dispositivo de flexão, mostrando a dependência do comprimento dos corpos de prova com a rigidez a flexão em três pontos.

- Verificou-se, teórica e experimentalmente, nos ensaios de flexão em três pontos que a orientação do fio de aço ou Ni-Ti, em relação ao plano de aplicação da carga, tem forte influência nas propriedades mecânicas da viga compósita utilizada, isto é, para orientação de 90° não há contribuição significativa das propriedades mecânicas do fio no valor do módulo de elasticidade efetivo; contudo, para as orientações a 0° e 180°, as contribuições são bem maiores por um fator próximo a 1,5 vezes.

-As vigas compósitas híbridas com fio de aço apresentaram módulos de elasticidade efetivos a flexão de 1410,19 MPa na configuração 0° e 180° e de 961,35 MPa para 90°, percebendo-se que o maior valor alcança apenas 17% do valor teórico do aço considerando-se 200GPa, 34% considerando-se 97 GPa e um valor de 49,6% considerando-se 66 GPa.

5.2 - SUGESTÕES E TRABALHOS FUTUROS

- Um dos parâmetros mais importantes na pesquisa em matérias compósitos são os métodos de fabricação, deste modo são garantidos aspetos tão importantes como a repetibilidade das características do compósito. No que se refere ao dispositivo de bobinamento manual, o tempo de fabricação e a disposição geométrica das fibras a serem bobinadas no processo são os maiores inconvenientes. A técnica pode ser melhorada com um sistema que ajuste com movimento constante em função da quantidade de fibra usada para a bobinagem. Um motor com controle de velocidade junto ao dispositivo pode ser pensado, no entanto, qualquer erro no controle da velocidade insere vibração na distribuição da fibra o que pode afetar a repetibilidade do processo.

- Neste trabalho foi incorporada uma barra de Ni-Ti ou aço na superfície de um tubo de polipropileno (PP) já terminado, o que levou a fazer um sulco nele para a fiação da barra e gerar possível prejuízo nele. Pode ser pensada a fabricação das vigas desde a fabricação dos tubos incorporando na hora o fio ou fios e garantir a completa fiação e melhor contato com a matriz, com o intuito de perceber uma melhor resposta do aumento do módulo de elasticidade efetivo das vigas fabricadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acqua system (2008). “Manual técnico Departamento de Desenvolvimento, Promoção e Assistência Técnica”. Grupo DEMA 5 Ed.
- Addington D.M, Schodek D.L. (2005) “Smart materials and technologies for the architecture and design professions”. Architectural Press (Elsevier Science), Oxford.
- ASTM D790 – 07. “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials”.
- Berzinsa D. W., Roberts H. W. (2010). “Phase transformation changes in thermocycled nickel–titanium orthodontic wires”. *Dental Materials*, Volume 26, Issue 7, p 666-674.
- Billmeyer F W. (1970). “Textbook of Polymer Science”, John Wiley & Sons, Inc. 6ª ed. New York.
- Boniek Evangelista Leite et al. (2010). “Processing Methodology to Embedding NiTi Shape Memory Fibers into a Polymer-Based Composite Plate”. *Materials Science Forum*, 643, 1.
- Callister Jr., W. D.(2002).“Ciência e Engenharia dos Materiais – Uma Introdução”. LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A. Rio de Janeiro.
- Campo D. (2009). “Análisis de Espectros IR y Difractogramas de rayos X con software especializado”, Universidad del Cauca. Colômbia.
- Canevarolo Jr., Sebastião V. (2002). “Ciência dos Polímeros – Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros”. Artliber Editora. São Paulo.
- Chang, L. C.; Read, T. A. (1951). “Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals – The gold-cadmium beta phase”. *Transactions AIME*, v. 191, p. 47-52.
- Davis H E, Troxell G E, Hauck G F W.(1982). “The testing of engineering materials”. McGraw- Hill 4 ed, USA.
- Davis, A.B. (2005). “Investigation of the Thermomechanical Response of Shape Memory Alloy Hybrid Composite Beams”. Master degree. North Carolina State University-NASA Langley Research Center, Raleigh. North Carolina.USA 135p.
- Davis, J. R., (1998). “Metals Handbook Desk Editions”, ASM International 2 Ed.
- De S. K., White J. R. (1996). “Short Fibre-Polymer Composites”. Woodhead, Publishing Limited England.

- Disani, M. P. (2011) "Development of aero morphing reinforced composite materials embedded with NiTi alloys". CPUT Theses and Dissertations. Paper 377.
- Du X.W., Sun G., Sun S.S. (2004) "A study on the deflection of shape memory alloy (SMA) reinforced thermo-viscoelastic beam". *Composites Science and Technology* 64, p 1375–1381.
- Elmajdoubi M, Vu-Khanh (2003). T. "Effect of cooling rate on fracture behaviour of polypropylene". Elsevier Science, Canada.
- Ewing, G. W. (1985). "Instrumental methods of chemical analysis". McGraw-Hill 5 ed. New York.
- Funakubo, H. (1987). "Shape memory alloys". Gordon & Breach: New York. Traduzido da lingua japonesa por Kennedy, J. B., Stanford University. Tokyo: University of Tokyo.
- Gandhi M.V, Thompson B.S.(1992). "Smart materials and structures". Chapman & Hall, London.
- Gere, J. M.(2003). "Mecânica dos materiais". Thomson Learning, São Paulo.
- Greninger, A. B.; Mooradian, V. G. (1938) "Strain transformation in metastable beta copperzinc and beta copper-tin alloys". *Trans. AIME* , v. 128, p. 337-368.
- Hamada H, Fujihara K, Harada A.(2000). "The influence of sizing conditions on bending properties of continuous glass fiber reinforced polypropylene composites". Elsevier Science, Japan.
- Hahnen R., Dapino M. J., Short M. and Graff K.(2009) "Aluminum-matrix composites with embedded Ni-Ti wires by ultrasonic consolidation", *Proc. SPIE 7290*, 729009.
- Harutun G. Karian (2003). "Handbook of polypropylene and polypropylene composites". Marcel Dekker, Inc 2 Ed, New York.
- Hibbeler, R.C.(2009). "Resistência dos materiais". Pearson Prentice Hall 7. ed. São Paulo.
- Jackson CM, Wagner HG, Wasiliewski RJ. (1972) "Nitinol the alloy with a memory: its physical metallurgy, properties and applications: a report". NASA.
- Janocha, H. (1999). "Adaptronics and smart structures – Basics, materials, design and applications". Springer – Verlag, Berlin Heidelberg, New York.
- Jia, J., Rogers, C. A. (1989). "Formulation of a Mechanical Model for Fiber Reinforced Composites with Embedded SMA Actuators". *Proceedings of 8th Biennial Conference on Failure Prevention and Reliability*, Montreal, Canada, pp. 203 – 210.
- Jones, R.M (1999). "Mechanics of Composite Materials". 2nd edition. Taylor & Francis.

- Klug, H. P.; Alexander, L. E. (1954). "X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials". John Wiley & Sons, New York.
- Krishnan, R. V.; Delaey, L.; Tas, H. (1974). "Thermoelasticity, pseudoelasticity, and the memory effects associated with martensitic transformation. Part 1, Structural and microstructural changes associated with the transformation". *Journal of Materials Science*, 9, pp. 1521 – 1544.
- Levy Neto, F., Pardini, L.C. (2006). "Compósitos Estruturais, Ciência e Tecnologia". Edgard Blücher, São Paulo.
- Mano, E. B.(2000). "Polímeros como Materiais de Engenharia". Edgard Blücher Ltda. São Paulo.
- Marinucci G.(2011). "Materiais Compósitos Poliméricos – Fundamentos e tecnologia". Artliber Editora. São Paulo.
- Matthews F L, Rawlings R D.(1994). "Composite Materials: Engineering And Science". Chapman and Hall, UK.
- Mcneese, M. D; Lagoudas, D. C.; Pollock, T. C.(2000). "Processing of Ni-Ti from elemental powders by hot isostatic pressing". *Materials Science and Engineering*. V. A280, pp.334- 348.
- Mehta, A., Imbeni, V., Ritchie, R. O., Duerig, T. W.(2004). "On the electronic and mechanical instabilities in Ni_{50.9}Ti_{49.1}". *Materials Science and Engineering A*, vol.378, pp. 130-137.
- Mendonça, P. T. R.(2005). "Materiais Compostos e Estruturas-Sanduiche: Projeto e análise". Manole. Barueri, SP.
- Nash, P. (1991). "Phase diagrams of binary nickel alloys". Materials Park,: Asm International, Ohio.
- Olander, A.(1932_1) The crystal structure of AuCd. *Zeit. für Kristal.*, v. 83A, p. 145.
- Olander, A.(1932_2) An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys. *J. Am. Chem. Soc.*, v. 54, p. 3819-3833.
- Otsuka, K. Wayman C.M. (1998). "Shape memory materials", Cambridge University Press. Cambridge.
- Otsuka, K.; Kakeshita, T.(2002). "Science and technology of shape-memory alloys: New Developments". *MRS Bulletin*, v. 27, n. 2, p. 91-98.
- Otsuka, K.; Ren, X. (2005). "Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys". *Progress in Materials Science*, v. 50, p. 511-678.

- Piratelli Filho, A.(1976). “Manual dos Equipamentos do Laboratório de Metrologia”, vol. II, apêndice II, Universidade de Brasília.
- Rogers, C. A. and Robertshaw, H. H. (1988) “Shape Memory Alloy Reinforced Composites”. Engineering Science Preprints 25, Society of Engineering Science, Inc., ESP25.8027.
- Saadat S. et al. (2002). “An overview of vibration and seismic applications of NiTi shape memory alloy”. Smart Mater. Struct. 11, p 218–229.
- Skoog, D. A., Holler F., Nieman T. (1998). “Principles of Instrumental Analysis”. McGraw-Hill 5 ed. New York.
- Shaw, J.A.;Kyriakides, S.(1995). “Thermomechanical aspects of Ni-Ti”. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 43 (8) pp. 1243-1281.
- Srinivasan V., McFarland D.M. (2001).“Smart structures: analysis and design”. Cambridge University Press, Cambridge.
- Stoeckel, D. (1989). “Fabrication and properties of nickel-titanium shape memory alloys wires. Wire” Journal International, v. 22, p. 30-40.
- Turner, L.T.; Lach; L.C.; Cano, R.J. (2001). “Fabrication and characterization of SMA hybrid composites. 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials; Active Materials: Behavior and Mechanics, C.S. Lynch (Ed.), SPIE Vol.4333, Paper No. 4333-60, Newport Beach, CA.
- Turner, T.L.(2001). “Thermomechanical Response of Shape Memory Alloy Hybrid Composites. NASA/TM-2001. Langley Research Center, Hampton, Virginia.
- Wayman, C. M.; Harrison, J. D. (1989). “The origins of the shape memory effect”. Journal of Minerals, Metals, and Materials (JOM), v. 41, n. 9, p. 26-28.
- Yuan B., Chung C.Y., M. Zhu. (2004). “Microstructure and martensitic transformation behavior of porous Ni-Ti shape memory alloy prepared by hot isostatic pressing processing”. Materials Science and Engineering A 382 p181–187.
- Zak, A.J. Cartmell, M.P.Ostachowicz, W. M.(2003). “Dynamics and control of a rotor using an integrated SMA/ composite active bearing actuator”. Key Engineering Materials, Suíça, vol. 245-246, p. 233-240.
- Zhang, X., Sehitoglu, H.(2004) “Crystallography of the B2-R-B19’ phase transformations in Ni-Ti”. Materials Science and Engineering A, v. 374, pp. 292-302.

APÊNDICE A – Data Sheet da liga Ni-Ti Memory-Metalle GmbH



Memory-Metalle GmbH
 Am Kesselhaus 5
 79576 Weil am Rhein
 phone +49 7621 799 121
 fax +49 7621 799 244
 www.memory-metalle.de

Material data sheet

Alloy		NiTi-Alloy M			
Date of delivery		02 April 2008			
Date of production		March 2008			
Customer		FINATEC			
Chemical composition					
	Ni [wt-%]	Ti [wt-%]	all others	C [ppm]	O [ppm]
nominal (a.r. from manufacturer)	55.49	44.50	n/a	310	185
own chemical analysis (through lab.)					
Trans. temp. [°C] (as cast condition, a.r. from manufacturer)	A _{peak} : n/a	A _s : 62 °C	M _{peak} :	M _s :	R:
Hot deformation					
<input type="radio"/> Extrusion		<input type="radio"/> Rolling sheet		<input checked="" type="radio"/> Rolling Bar	
Device					n/a
Deformation degree					n/a
Number of deformation					n/a
Deformation temperature					n/a
Temperature of tools					n/a
Duration of preheating					n/a
Duration of intermediate heating					n/a
Cold deformation					
Device / Source					n/a
Type of deformation	<input checked="" type="radio"/> Drawing		<input type="radio"/> Rolling	<input type="radio"/> None	
Cold Work (log)					n/a
Final heat treatment					
Temperature and duration					straight annealed
Furnace type					tube furnace
Medium					Air
Surface treatment					oxide
Geometry					
Outer diameter					0.410 mm
Length					47,0 m
Mech. Properties					
UTS					n/a
Elongation					n/a
Active A _r					n/a
Plateau stress					n/a
Plast. elongation					n/a
Content of hydrogen					n/a
Inventory Control #		1107			
Rawmaterial #		C7-7246-7-1			
Issued by:	Date:	Signature:			
Dr. Mertmann	02 April 2008				

APENDICE B – Arquivo de Difração do Ni-Ti: Sistema Monoclínico

Card Information

Names: Nickel Titanium
Formula: Ni Ti
PDF Number: 27-344
Quality: unknown
Subfiles: inorganic alloy

Cell and Symmetry Information

System: monoclinic **Space Group:** P21/m (no. 11)
a: 2.889 **b:** 4.120 **c:** 4.622
b: 96.8
Z: 2

Instrument Information

Radiation: CuK α **Wavelength:** 1.5418 **Filter:** Ni
Instrument(d): unknown
Instrument(I): diffractometer **I type:** unknown

Comments and Additional Information

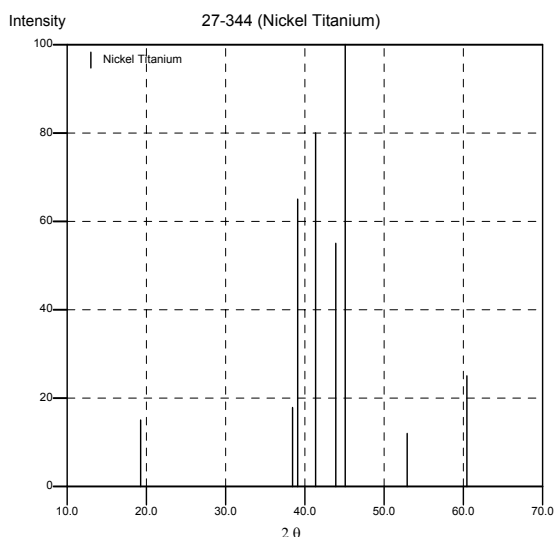
Temperature: Pattern at -192 C.

Literature References

General: Otsuka et al. *Phys. Status Solidi A* **5** 457 (1971)

Peak Data

PeakList



h	k	l	d	I
0	0	1	4.6000	15
1	1	0	2.3400	18
0	0	2	2.3000	65
-1	1	1	2.1800	80
0	2	0	2.0600	55
0	1	2	2.0100	100
-1	1	2	1.7300	12
0	0	3	1.5300	25

Note : Wavelength of 1.5418 Å used.

APENDICE C – Arquivo de Difração do Ni-Ti: Sistema Cúbico

Card Information

Names: Nickel Titanium
Formula: Ni Ti
PDF Number: 65-7711
Quality: calculated
Subfiles: inorganic alloy NST

Cell and Symmetry Information

System: cubic **Space Group:** Pm-3m (no. 221)
a: 3.01500
Z: 1

Instrument Information

Radiation: CuK α 1 **Wavelength:** 1.54060
Instrument(d): calculated
Instrument(I): calculated **I type:** peak heights
I/Icor: 9.88

Comments and Additional Information

MC A 42970 53682 0

Temperature factor: TF was not given, B set to 1.000 for calc.

Preparation: Prepared from equi-atomic amounts of Ni and Ti by arc-melting in an argon atmosphere.

Temperature: 353 K

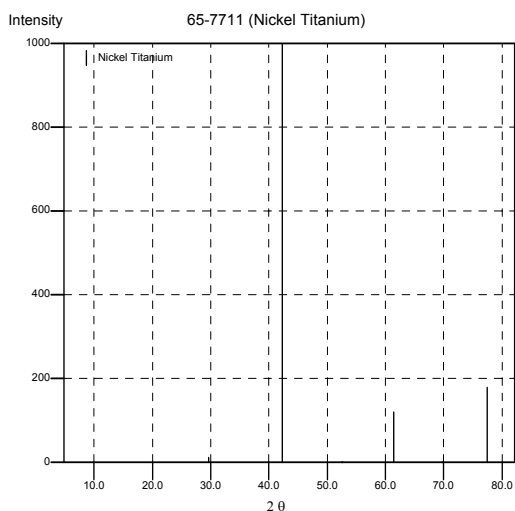
TI Hydrogen solubility and diffusion in the shape-memory alloy NiTi

Literature References

General: Calculated from NIST using POWD-12++ ()

Structure: Schmidt, R., Schlereth, M., Wipf, H., Assmus, W., Muellner, M. *J. Phys.: Condens. Matter* **1** 2473 (1989)

Peak Data



PeakList

h	k	l	d	I
1	0	0	3.0150	12
1	1	0	2.1319	999
1	1	1	1.7407	2
2	0	0	1.5075	120
2	1	0	1.3484	2

Note : Wavelength of 1.5406 Å used.