

**CENTRO DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA - CEFET/RJ**

**Análise da Adesão de SMA em Matriz Polimérica
para Aplicações em Estruturas Inteligentes**

**Danúbia Baltazar da Cruz
Rodrigo Delpreti de Siqueira**

**Rio de Janeiro
Novembro /2017**

**CENTRO DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA - CEFET/RJ**

**Análise da Adesão de SMA em Matriz Polimérica
para Aplicações em Estruturas Inteligentes**

Danúbia Baltazar da Cruz

Rodrigo Delpreti de Siqueira

Orientadores: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Doina Mariana Banea

Projeto final apresentado em cumprimento
às normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica Industrial

Rio de Janeiro

Novembro /2017

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

C957 Cruz, Danúbia Baltazar da
Análise da adesão de SMA em matriz polimérica para
aplicações em estruturas inteligentes / Danúbia Baltazar da Cruz,
Rodrigo Delpreti de Siqueira.—2017.
xi, 46f. + anexos : il. (algumas color.) , graf. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.

Bibliografia : f. 42-46

Orientadores : Ricardo Alexandre Amar de Aguiar
Doina Mariana Banea

1. Engenharia mecânica. 2. Ligas com memória de forma. 3.
Materiais inteligentes. 4. Materiais compostos. 5. Polímeros. I.
Siqueira, Rodrigo Delpreti de. II. Aguiar, Ricardo Alexandre Amar
de. III. Banea, Doina Mariana (Orient.). IV. Título.

CDD 621

DEDICATÓRIA

Aos nossos pais.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por nos dar forças para prosseguir no nosso caminho acadêmico e profissional.

Aos nossos familiares pelo apoio inestimável ao longo destes anos, especialmente aos nossos pais Alberto e Vitória, Marcos e Rosiana.

Aos amigos que fizemos na graduação por seu constante suporte e compaixão, em especial Bruno Salgado, Bruno Dias, Edson, Marcus e Pedro.

Aos professores Ricardo Alexandre Amar de Aguiar e Doina Mariana Banea não somente por terem nos orientado, mas por terem nos acolhido em nossa jornada nessa instituição.

Aos projetos de extensão e de iniciação científica do CEFET/RJ, por terem nos aproximado de novas realidades na área de pesquisa e de pessoas que contribuíram para nossa formação, notoriamente Daniel, Jorge, Lucas e Rosemere.

Aos técnicos do CEFET/RJ Brenno e Hiron pelo suporte técnico à pesquisa e pelo compromisso com a instituição.

RESUMO

Os materiais compósitos com matriz polimérica estão adquirindo visibilidade e sua utilização tem se mostrado promissora nas áreas de Aeronáutica, Automobilística e Médica, entre outras, pela sua leveza e resistência mecânica. Os materiais inteligentes, materiais capazes de alterar suas propriedades físicas ao receberem estímulos externos, são objeto de estudo relativamente recente e podem ser aliados a sistemas compósitos. Esta união visa, em função da aplicação desejada, reunir propriedades distintas em um mesmo material. No presente trabalho, será analisada a adesão de fios de ligas com memória de forma, SMA do inglês “Shape memory alloy”, com matrizes poliméricas do tipo epóxi para criar um material com capacidade para ser um compósito inteligente. Foram realizados ensaios de tração e de DSC para caracterizar os fios de SMA. Para analisar a adesão dos fios de SMA na matriz de epóxi foram realizados ensaios de Pullout. Foram analisadas duas resinas epóxi e também a influência do lixamento na adesão dos fios no epóxi. Os resultados mostraram que fios não lixados apresentaram desempenho maior que fios lixados, ainda que a diferença tenha sido dentro da margem de tolerância para a resina Araldite™ LY5052.

Palavras-chave: Ligas com memória de forma, compósito, comprimento embutido.

ABSTRACT

The polymeric matrix composite materials are gaining visibility and potential usage in Aeronautic, Automotive and Medical fields because of lightness and mechanical resistance, to name a few. Smart materials are capable of changing their physical properties under external stimulus so they became an object of recent studies and can be embedded to composite systems. This union aims to bring together different properties in the same material, according to the desired application. This study aims to analyze the adhesion between Shape Memory Alloy (SMA) wires and Epoxy matrices in order to devise a material intended to become a smart composite. Tensile and DSC tests were done to characterize SMA wires and Pullout tests were performed to verify the adhesion of SMA wires in Epoxy matrix. Two Epoxy resins were analyzed and the influence of sanding the wire surface on the matrix adhesion. The results show that wires without sanding presented a slightly better performance in spite of the fact that the difference was within the margin of tolerance for the Araldite™ LY5052 resin.

Keywords: Shape memory alloys, composite, embedded length.

SUMÁRIO

Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivo geral	2
1.4 Objetivos específicos	3
1.5 Metodologia e trabalho realizado.....	3
1.6 Organização do trabalho	4
Capítulo 2	5
Revisão bibliográfica.....	5
2.1 Ligas com memória de forma	6
2.2.1 O efeito de memória de forma.....	7
2.2.2 Pseudoelasticidade.....	9
2.2 Resinas epóxi	10
2.3 Compósitos	11
2.4 Aplicações de compósito com liga com memória de forma embutida	14
2.5 O problema da aderência	16
Capítulo 3	18
Metodologia Experimental	18
3.1 Caracterização do fio de SMA.....	18
3.2 Resinas utilizadas.....	20

3.3	Fio de SMA utilizado.....	21
3.4	Ensaio de Pullout	21
3.5	A preparação do fio para o corpo de prova e para o ensaio	24
3.6	Medição pós-ensaio	25
Capítulo 4		27
Resultados e Discussão.....		27
Capítulo 5		41
Conclusão e trabalhos futuros.....		41
Capítulo 6		42
Referências bibliográficas		42
ANEXO A: Ficha técnica da resina AR-260.....		47
ANEXO B: Ficha técnica de resina Araldite LY 5052		48

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: USO DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA COMO ATUADOR PARA MUDAR A CONFIGURAÇÃO DE UM AILERON (KOREANSCHI <i>ET AL.</i> , 2017).....	6
FIGURA 2.2: STENT CARDÍACO FEITO COM NITINOL (MORGAN, 2003).	7
FIGURA 2.3: GRÁFICO TENSÃO X DEFORMAÇÃO X TEMPERATURA QUE MOSTRA O EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA TÍPICO PARA UMA SMA DE NÍQUEL E TITÂNIO (KUMAR, 2008).	8
FIGURA 2.4: CICLO DE CARREGAMENTO PSEUDOELÁSTICO. (KUMAR, 2008)	9
FIGURA 2.5: BOLHAS EM RESINA EPÓXI.....	10
TABELA 2.1: TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA DE ACORDO COM A CURA DA RESINA ARALDITE LY 5052.(HUNTSMAN)	11
FIGURA 2.6: CORPO DE PROVA NO FORMATO OSSO DE CÃO FEITO DE MATERIAL COMPÓSITO APÓS ENSAIO DE TRAÇÃO.	12
FIGURA 2.7: CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS. O TERMO “SEMI-ISOTRÓPICO” SE REFERE AO FATO DE QUE EM TODAS AS DIREÇÕES O COMPÓSITO ASSUME OS MESMOS VALORES DE RIGIDEZ E RESISTÊNCIA. (DANIEL <i>ET AL.</i> , 1994).	13
FIGURA 2.8: FUSELAGEM DE UM BOEING 787. (HALE, 2006).....	14
FIGURA 2.9: ESTRUTURA DE PONTE COM ATUADORES DE SMA (LESTER <i>ET AL.</i> , 2015).	15
FIGURA 2.10: CONFIGURAÇÃO EM ESPIRAL. (UMEZAKI, 2000)	16
FIGURA 2.11: ANCORAMENTO DE FIOS DE SMA POR NÓS PRA IMPEDIR O CRESCIMENTO DE TRINCA (JIN E CHEN, 2002).	17
FIGURA 3.1: TERMOGRAMA PARA UMA LIGA NITINOL (SHAW & KYRIAKIDES, 1995).	19
FIGURA 3.2: EXEMPLO TEÓRICO DE ENSAIO DE TRAÇÃO EM FIO DE SMA ATÉ A RUPTURA.....	20
FIGURA 3.3: CORPO DE PROVA PARA O ENSAIO DE PULLOUT. (MONTEIRO <i>ET AL.</i> , 2006)	21
FIGURA 3.4: MOLDE MONTADO PARA OS CORPOS DE PROVA USADOS NO ENSAIO DE PULLOUT.	22
FIGURA 3.5: DETALHE DA REGIÃO ONDE É REALIZADA A VEDAÇÃO COM FITA DE ALTA TEMPERATURA....	22
FIGURA 3.6: CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE PULLOUT.....	22
FIGURA 3.7: GRÁFICO TÍPICO PARA UM ENSAIO DE PULLOUT (ADAPTADO DE AQUINO <i>ET AL.</i> , 2015).....	23
FIGURA 3.8: À ESQUERDA (A) O FIO COM LIXAMENTO; AS SETAS INDICAM AS RANHURAS PROVOCADAS PELO PROCESSO. À DIREITA (B), O FIO SEM LIXAMENTO.	24
FIGURA 3.9: CORPOS DE PROVA FABRICADOS PARA O ENSAIO DE PULLOUT.	25
FIGURA 3.10: MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO EMBUTIDO REAL. LENGHT SIGNIFICA DISTÂNCIA.	26
FIGURA 4.1: ENSAIO DE TRAÇÃO ATÉ A RUPTURA DO FIO DE SMA	27
FIGURA 4.2: AMPLIAÇÃO DO TRECHO ENTRE 0 MM E 3,5 MM. OBSERVE O PATAMAR QUE INDICA A TRANSFORMAÇÃO DA ESTRUTURA CRISTALOGRÁFICA DE MARTENSITA DEMACLADA PARA MARTENSITA MACLADA.	28
FIGURA 4.3: ENSAIO DSC DO FIO DE SMA.....	29
FIGURA 4.4: PULLOUT EM FIOS EMBUTIDOS A 1,4 MM.	31

FIGURA 4.5: FOTO DA MÁQUINA DE ENSAIO DE PULLOUT (A)EM QUE A GARRA, SITUADA NA PARTE INFERIOR CONTÉM O SUPORTE ADAPTADOR, VISTO COM MAIS DETALHE EM (B).....	32
FIGURA 4.6: FIO 5 MARCADO PELA GARRA DA MÁQUINA DE ENSAIO	33
FIGURA 4.5: ESFORÇOS EM PULLOUT PARA FIOS SEM LIXAMENTO EM MATRIZ EPÓXI COM A RESINA DA ARALDITE.....	36
FIGURA 4.6: TENSÃO EM PULLOUT PARA FIOS SEM LIXAMENTO EM MATRIZ EPÓXI PARA A ARALDITE LY5052.....	37
FIGURA 4.7: ESFORÇOS EM PULLOUT PARA FIOS LIXADOS.	37
FIGURA 4.8: TENSÃO EM PULLOUT PARA FIOS LIXADOS.	38
FIGURA 4.9: COMPARAÇÃO DOS EFEITOS DO LIXAMENTO COM AS TENSÕES DESENVOLVIDAS NO FIO DE SMA.....	39

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA DE ACORDO COM A CURA DA RESINA ARALDITE LY 5052. (MAX EPOX)	11
TABELA 4. 1: RESULTADOS ALCANÇADOS PARA O PRIMEIRO ENSAIO COM A RESINA AR-260.....	30
TABELA 4. 2: RESULTADOS ALCANÇADOS PARA O SEGUNDO ENSAIO COM A RESINA AR-260.....	30
TABELA 4. 3: RESULTADOS ALCANÇADOS PARA O ENSAIO 3, O PRIMEIRO COM A RESINA ARALDITE LY 5052.....	32
TABELA 4. 4: RESULTADOS ALCANÇADOS PARA O ENSAIO 4, O SEGUNDO COM A RESINA ARALDITE LY 5052.	34
TABELA 4. 5: RESULTADOS ALCANÇADOS PARA O ENSAIO 5, O TERCEIRO COM A RESINA ARALDITE LY 5052.	34
TABELA 4. 6: RESULTADOS ALCANÇADOS PARA O ENSAIO 6, O QUARTO COM A RESINA ARALDITE LY 5052.	35
TABELA 4. 7: ENSAIO COMPLEMENTAR 7, O QUINTO USANDO A RESINA ARALDITE LY 5052.....	35
TABELA 4. 8: TENSÃO DE CISLHAMENTO POR COMPRIMENTO EMBUTIDO.....	39
TABELA 4. 9: TENSÃO DE CISLHAMENTO POR COMPRIMENTO EMBUTIDO PARA A RESINA AR-260.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

m -	Metro
mm -	Milímetro
mm ² -	Milímetro quadrado
r -	Raio
A -	Área
A_f -	Temperatura de fim de transformação austenítica
A_s -	Temperatura de início de transformação austenítica
°C -	Graus Celsius
DSC -	Differential Scanning Calorimetry – Escaneamento de Calorimetria Diferencial
E -	Módulo de Young
F -	Força
F_{\max} -	Força máxima
L -	Comprimento embutido
L_c -	Comprimento embutido
M_f -	Temperatura de fim de transformação martensítica
MPa -	Mega Pascal
M_s -	Temperatura de início de transformação martensítica
N -	Newton
SMA -	Shape memory alloy – Liga com memória de forma
SME -	Shape memory effect – Efeito de memória de forma
T -	Temperatura
ε -	Deformação
σ -	Tensão
τ_{\max} -	Tensão de cisalhamento

Capítulo 1

Introdução

Ao longo das gerações, os estudos na engenharia foram voltados para a criação e a disponibilização de meios eficientes para realizar processos e desenvolver produtos, sejam estes uma máquina, uma ferramenta, uma estrutura, etc. Para tal, um dos ramos de estudo no âmbito da engenharia é o de controle geométrico e estrutural de materiais.

O presente trabalho vem tratar sobre um material inteligente. Os materiais inteligentes, de acordo com ROGERS *et al.*(1988) são capazes de alterar suas propriedades físicas e mecânicas ao receberem estímulos externos. Estes são um objeto de estudo recente e podem ser embutidos em sistemas compósitos. Esta união visa, em função da aplicação desejada, reunir propriedades distintas em um mesmo material. No presente trabalho, será analisada a adesão de fios de liga com memória de forma, SMA do inglês “Shape memory alloy” com matrizes poliméricas do tipo epóxi que formam um material com capacidade para ser um compósito inteligente.

O desempenho de um compósito composto por fibras é afetado pela resistência da adesão entre essas fibras e a matriz (ABBOUDI, 1997) e essa resistência sofre influência de fatores como o deslocamento relativo entre a fibra e a matriz provocado por deformações diferentes quando submetidos a uma tensão; a diferença entre os coeficientes de dilatação térmica e a incompatibilidade entre os adesivos e as superfícies dos materiais. Devido a isto, torna-se importante investigar a interface da adesão do compósito com os fios de SMA.

1.1 Motivação

Os materiais compósitos com matriz polimérica estão adquirindo visibilidade no mercado da engenharia por apresentarem algumas vantagens em relação aos metais. A

utilização destes materiais tem se mostrado promissora nas áreas de Aeronáutica, Automobilística e Médica, entre outras, pela leveza e resistência mecânica apresentada.

Devido ao potencial do uso dos materiais compósitos na engenharia mecânica, torna-se necessário verificar modos de embutimento entre as ligas com memória de forma e os adesivos. As ligas podem ser anexadas a matrizes poliméricas tornando-as reforçadas e podem prevenir a propagação de trincas ao provocar o retorno da matriz à configuração original.

1.2 Justificativa

O uso crescente dos materiais inteligentes requer que os modos de adesão entre as ligas com memória de forma e matrizes poliméricas sejam estudados para prevenir falha na interface entre ambos. Esta adesão se torna importante porque ao compor um material com fibras de fios de memória de forma este se torna inteligente, e pode ser projetado para adquirir adaptabilidade às mudanças de regime de trabalho. Também é possível fazer o material se tornar autorregenerativo, pois além de funcionar como ancoramento da matriz, é possível anular temporariamente o efeito de uma trinca na estrutura e retardar o seu reparo, graças à força de retorno que o fio de SMA exerce durante a sua mudança de fase. As ligas podem ser anexadas a matrizes poliméricas tornando-as reforçadas e podem prevenir a propagação de trincas ao provocar a retomada da matriz à configuração original.

1.3 Objetivo geral

Verificar a resistência da adesão de fios de SMA em fase martensítica a resinas do tipo epóxi testando diferentes configurações de embutimento destes materiais através de ensaios de Pullout.

1.4 Objetivos específicos

- Observar o comportamento do fio quando solicitado;
- Levantar dados de caracterização do fio através de ensaios de tração e de DSC;
- Caracterizar a adesão do fio (com e sem lixamento) na matriz epóxi, verificando para as condições impostas a força necessária para o arrancamento.

1.5 Metodologia e trabalho realizado

O trabalho foi iniciado com levantamento bibliográfico sobre as ligas com memória de forma, de modo a entender as suas propriedades físicas e mecânicas, sobre compósitos de matriz polimérica com ligas com memória de forma e suas principais aplicações.

A primeira etapa da investigação consistiu de construir corpos de prova em formato de paralelepípedo com matriz polimérica formada pela resina AR 260 e seu endurecedor AH 260, os dois fornecidos pela Barracuda. Ao colocar a mistura da resina com o endurecedor no molde, os fios de SMA foram anexados com diferentes profundidades. Os fios são de níquel e titânio, com nome comercial Flexinol[®] e marca Dynalloy. Assim os corpos de prova foram curados e depois testados em ensaios de Pullout. Foram gerados dados relativos à força de adesão na interface fio/resina.

Em uma segunda etapa, foi executado o mesmo procedimento usando uma parte dos fios com a interface lixada no sentido circunferencial para verificar a influência deste processo mecânico na adesão do fio à matriz polimérica. Após isso, novos corpos de prova foram feitos, semelhantes à segunda parte, porém com outra resina do tipo epóxi chamada Araldite[®] LY 5052 com o endurecedor Aradur[™] 5052.

Assim, os resultados das três partes foram analisados e comparados para se verificar a força de adesão e a tensão de cisalhamento para o arrancamento em cada situação na qual o fio foi submetido.

1.6 Organização do trabalho

No capítulo 1, é feita uma introdução sobre o assunto foco desta pesquisa, onde são abordados de maneira breve os conceitos que a englobam.

No capítulo 2 são abordadas as definições necessárias para o trabalho, as características de cada um dos entes que formam o material compósito em estudo e o que é proposto na literatura para melhorar o embutimento entre eles.

No capítulo 3 estão descritos a metodologia adotada durante este estudo, os materiais que foram utilizados e suas características.

No capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios. Consta também neste, uma análise preliminar destes resultados.

Por fim, no capítulo 5 estão as conclusões obtidas com o trabalho de pesquisa e experimentação, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

A pesquisa sobre materiais compósitos apresentou crescimento desde o avanço das tecnologias bélicas apresentado na Primeira Guerra Mundial, no início do século XX. Entretanto, tem seu uso reportado desde a antiguidade e um exemplo disso é a construção de tijolos com argila e palha (CALLISTER *et al.*, 2012). Neste capítulo são abordadas as definições necessárias para o trabalho e as características de cada um dos entes que formam o material compósito em estudo.

As ligas com memória de forma (SMA) são materiais que tem propriedades de retornar ao formato original através da modificação dos parâmetros de temperatura e tensão, e são caracterizados pelo comportamento pseudoelástico e pelo efeito de memória de forma. Os materiais compósitos poliméricos com reforço de SMA têm como principais características o baixo peso específico, além de também serem capazes de formar um material inteligente que proporciona controle geométrico, vibracional e reforço estrutural.

A presença de SMA muda o comportamento da matriz em relação à resistência mecânica, mesmo quando a fração volumétrica entre a liga e a matriz é pequena. BAZ *et al.*(2000), por exemplo, usaram fios de Níquel-titânio para controlar a frequência natural de vigas e de modo semelhante, OSTACHOWICZ (2000) propôs o uso desta mesma liga para alterar a frequência natural de placas de compósito. POULIN *et al.*(2016), expuseram em seu trabalho um modelo de asa de avião que adapta seu formato geométrico para aumentar a eficiência aerodinâmica por ser feita com uma camada de tecido que alia estes dois materiais. Também foi demonstrado por JIN *et al.* (2002), que o emprego das ligas com memória de forma proporciona o retardamento da propagação de trinca de modo I, em matrizes poliméricas com fios pré tensionados e embutidos enquanto estão na fase martensítica. KOREANSCHI *et al.*(2017) testaram um algoritmo com o propósito de otimizar a performance de uma asa com a superfície coberta por um tecido feito com SMA e que se adaptava a um aileron mostrado na Figura 2.1.

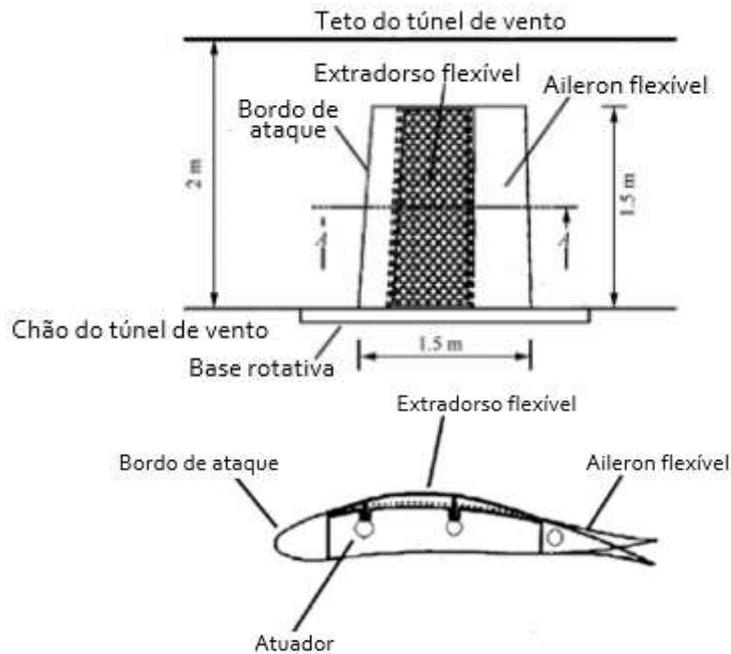


Figura 2.1: Uso de liga com memória de forma como atuador para mudar a configuração de um aileron (KOREANSCHI *et al.*, 2017).

2.1 Ligas com memória de forma

As ligas com memória de forma, do inglês *Shape Memory Alloy* (SMA), possuem a capacidade de retornar à forma inicial através de combinações adequadas de cargas térmicas e mecânicas. Ao fazerem isso exercem uma força chamada de restauração que é útil em estruturas compósitas para evitar a propagação de trincas, dar suporte estrutural, gerar adaptabilidade do material ao regime de trabalho e às mudanças ambientais às quais está submetido. Os materiais com memória de forma também podem ser usados como atuadores e amortecedores.

Para a compreensão de suas propriedades, é preciso definir as temperaturas características de mudança de fase do material. Ficam assim definidas A_s e A_f como as temperaturas de início e fim de transformação austenítica respectivamente. Ou seja, o intervalo de temperatura após o qual, o fio constituído por martensita, tem a microestrutura alterada completamente para a austenita. De maneira similar, M_s e M_f são definidas como as temperaturas de início e fim de transformação martensítica, respectivamente. Deste modo este é o intervalo de temperatura antes do qual o fio

originalmente constituído por austenita tem microestrutura mudada para martensita após sofrer resfriamento. (KUMAR *et al.*, 2008)

Existem SMAs com várias composições químicas (como ligas de cobre, zinco e alumínio); este trabalho é voltado para fios de SMA de níquel e titânio, conhecidos comercialmente como Nitinol e que devido à biocompatibilidade apresentada podem ser usados em próteses ortopédicas, ortodônticas e stents cardíacos . Um exemplar destes stents é apresentado na Figura 2.2.

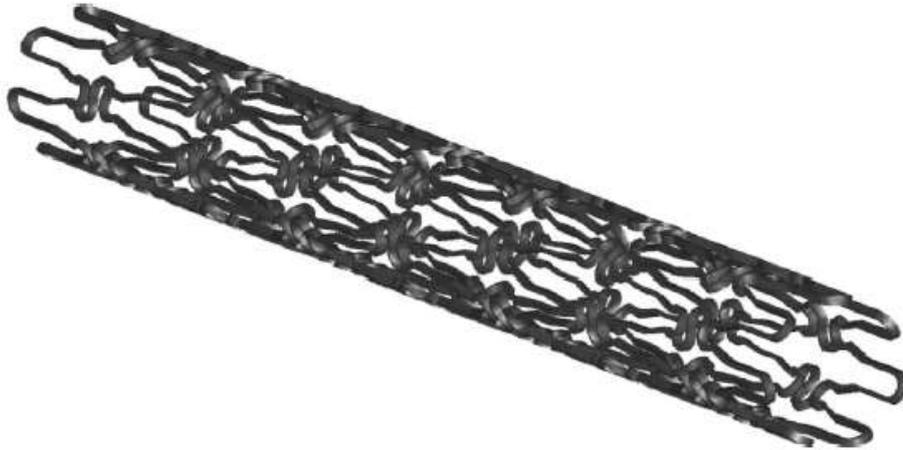


Figura 2.2: Stent cardíaco feito com Nitinol (MORGAN, 2003).

Duas qualidades importantes para projetos que envolvem estas ligas são a pseudoelasticidade e o efeito de memória de forma que estão relacionados às mudanças microestruturais apresentadas na liga. Ambas serão apresentadas nas próximas seções.

2.2.1 O efeito de memória de forma

KUMAR *et al.* (2008), definiram as ligas com memória de forma como “uma classe única de materiais com a habilidade para recuperar seu formato quando a temperatura aumenta”. Em outras palavras, uma SMA consegue, por causa do arranjo atômico de suas fases, retornar ao estado original depois de um carregamento termomecânico através do aumento da temperatura e do alívio de carga. Em temperaturas menores, a fase estável é a martensita denominada fase produto e em maiores a austenita, chamada também de fase matriz. A transformação martensítica

inicia-se com o resfriamento até M_s e com a continuidade do resfriamento após M_f é garantido que em toda a liga está a fase martensítica de variante maclada. Quando ocorre o aquecimento até A_s , a liga de memória de forma começa a ter frações de austenita, fase que se torna homogênea a partir de A_f e é garantido que há homogeneidade da fase matriz na liga. As temperaturas de início e fim da transformação são dependentes de carregamentos externos e, deste modo, a transformação martensítica é induzida pelo carregamento, conforme mostra a Figura 2.3.

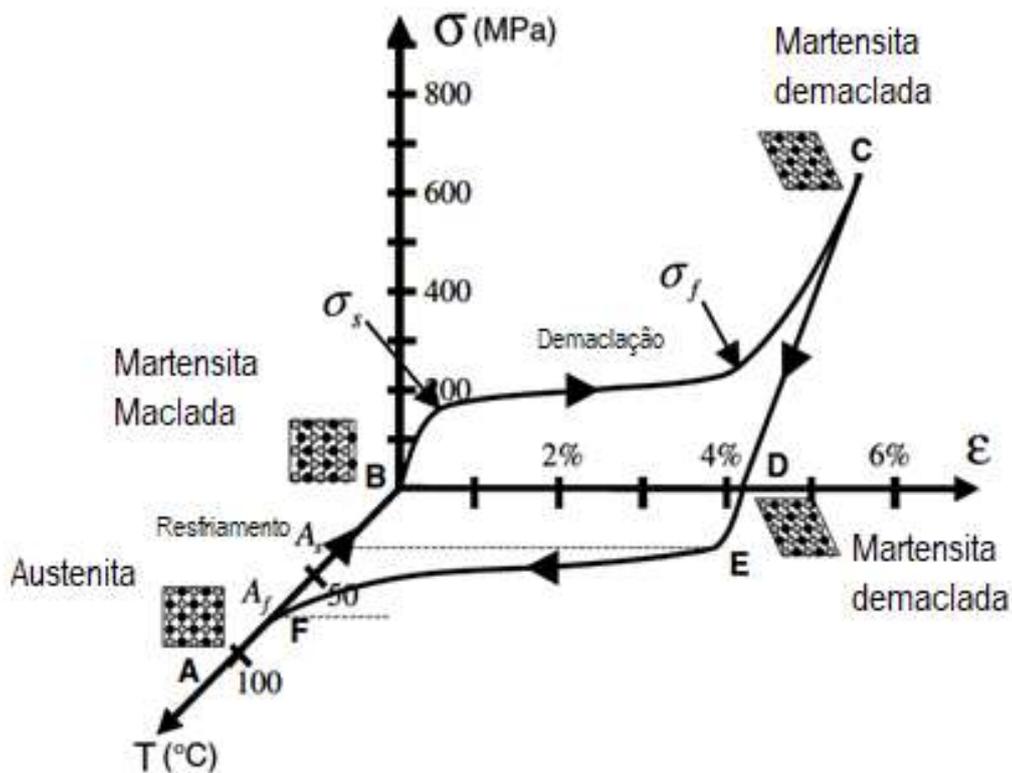


Figura 2.3: Gráfico tensão x deformação x temperatura que mostra o efeito de memória de forma típico para uma SMA de níquel e titânio (KUMAR, 2008).

É importante apontar que, quando não há carregamento externo, a partir de qualquer temperatura maior que A_f , ao diminuir a temperatura, a martensita formada é maclada. A aplicação da tensão vai posteriormente demaciando a martensita. Outro ponto relevante é a possibilidade da existência da fase R, uma estrutura cristalina causada pela tensão provocada por precipitados na liga quando ela não apresenta composição percentual igual de níquel e titânio. Geralmente esta fase é eliminada com o aumento da temperatura.

2.2.2 Pseudoelasticidade

O fenômeno da pseudoelasticidade é manifestado quando a liga de memória de forma, apesar de estar com condições de estabilidade da fase matriz (acima de A_f) é submetida a carregamento externo e apresenta mudança de fase para martensita demaada. Conforme o carregamento é retirado, a liga de memória de forma retorna à fase austenítica e ao formato que tinha nesta fase. A Figura 2.4 representa o comportamento pseudoelástico da liga.

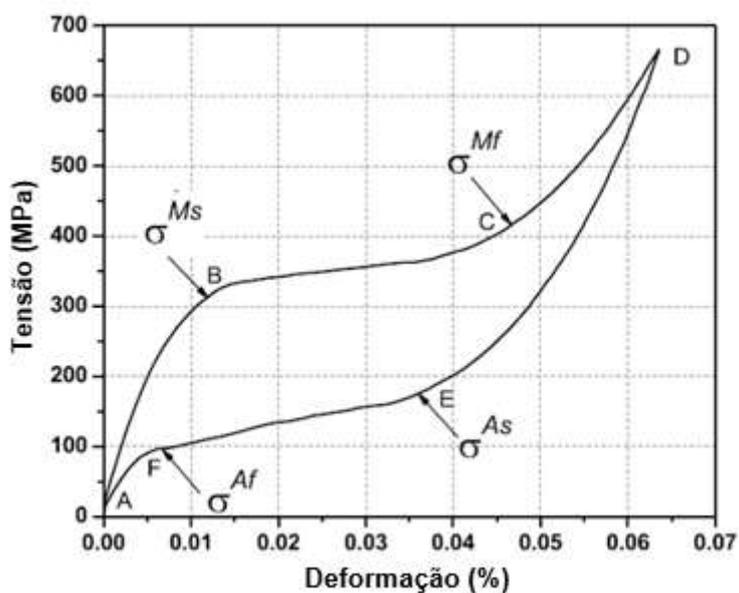


Figura 2.4: Ciclo de carregamento pseudoelástico. (KUMAR, 2008)

Um fator importante neste fenômeno é a histerese que o fio de memória de forma apresenta. A histerese é uma representação gráfica da energia que o fio absorve ao longo da transformação de fase e está representada no gráfico da Figura 2.4 pelo espaço existente entre as linhas de transformação. É lembrado aqui, que para aplicações onde o efeito de memória de forma é requerido, se a fabricação do compósito for feita a uma temperatura onde há estabilidade da martensita, o fio deve ser pré-tensionado para evitar que o tensionamento provocado pela mudança de fase acarrete a falha do material compósito, já que a austenita e a martensita têm diferentes módulos de elasticidade (MIRAMINI, 2016).

2.2 Resinas epóxi

As resinas epóxi são cadeias poliméricas capazes de se entrelaçar para formar materiais de elevada adesividade. Um exemplo comercial deste polímero é o Durepoxi[®], da empresa Loctite[®]. Essas resinas são geralmente utilizadas como adesivos ou como matrizes poliméricas para compósitos, em conjunto com um componente químico denominado endurecedor, por isso se trata de um adesivo de duas partes. São necessários tempo e temperatura específicos para que as ligações químicas de endurecimento ocorram. O conjunto tempo e temperatura de cura influenciam as propriedades mecânicas finais da resina e, como consequência, as do compósito também, sendo isto verificado pela própria ficha técnica da resina. Além disso, ao misturar a resina ao endurecedor, dois fatores devem ser observados: a proporção mássica, geralmente apontada pelo fabricante, e a formação de bolhas de ar (observadas na Figura 2.5), que se formam pelo início da transformação química. Estas bolhas são defeitos e podem causar o aparecimento de trincas devido à combinação da pressão do ar que fica aprisionado com o esforço ao qual o compósito é submetido.

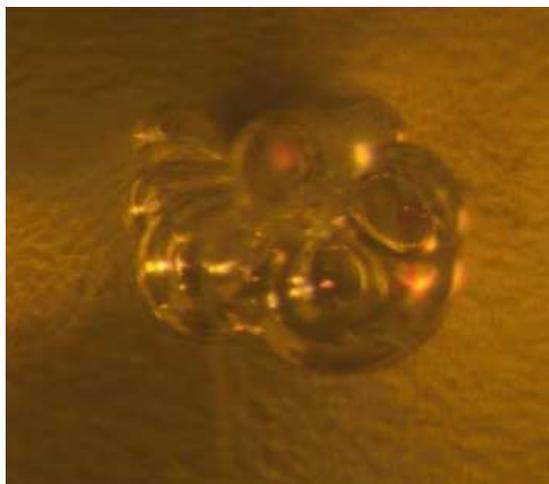


Figura 2.5: Bolhas em resina epóxi.

As resinas epóxis se caracterizam por serem termorrígidas, ou seja, uma vez curadas não é possível fundir e reverter a transformação química para obter os produtos do início do processo. Isto acontece por ser constituída de cadeias cruzadas irreversíveis, o que impede a reciclabilidade do compósito. Apesar disso, a matriz de

epóxi não é recomendada para o trabalho com temperaturas acima da chamada temperatura de transição vítrea, na qual passa a se degradar e perde as características mecânicas e a capacidade de adesão. Na tabela 2.1 encontra-se parte da ficha técnica da resina Araldite LY 5052 na qual fica em evidência que o método de cura influencia na temperatura de transição vítrea.

Tabela 2.1: Temperatura de transição vítrea de acordo com a cura da resina Araldite LY 5052.(HUNTSMAN)

Cura	TV
7 dias a 25 °C	62 – 66 °C
1 dia a 25 °C + 20 horas a 40 °C	74 – 80 °C
1 dia a 25 °C + 15 horas a 60 °C	96 – 106 °C
1 dia a 25 °C + 4 horas a 100 °C	124 – 136 °C

2.3 Compósitos

De acordo com DANIEL *et al.*(1994), um compósito estrutural é um sistema de materiais que consiste de duas ou mais fases, em nível macroscópico, que juntos têm propriedades mecânicas e desempenho melhor do que se analisados separadamente. A Figura 2.6 demonstra um exemplo de material compósito.

As fases consideradas são:

- a) Matriz- fase contínua que tem como funções distribuir os esforços atuantes na estrutura para o reforço, proteger e dar suporte ao reforço;
- b) Reforço- geralmente com propriedades mecânicas melhores que a matriz, impõe rigidez à estrutura do compósito.



Figura 2.6: Corpo de prova no formato osso de cão feito de material compósito após ensaio de tração.

As propriedades mecânicas do compósito dependem da fração volumétrica dos seus constituintes, das propriedades mecânicas de cada constituinte, do processo de fabricação e da adesão entre a fibra e a matriz. A cada novo compósito criado, ensaios para a caracterização são necessários. Observa-se, por exemplo, que materiais com diferentes módulos de elasticidade quando submetidos ao mesmo esforço têm deformações diferentes e isto interfere na aderência entre os candidatos a formar uma estrutura feita de compósito, uma vez que há tendência dos materiais se descolarem a partir da formação de uma trinca na interface entre a matriz e o reforço.

As matrizes dos materiais compósitos podem ser classificadas em poliméricas, metálicas e cerâmicas enquanto os reforços podem ser em formato de fibras (fios contínuos), particulados (partículas de vários formatos e tamanhos) e *whiskers* (que são fibras descontínuas), de acordo com DANIEL *et al.* (1994). A Figura 2.7 mostra uma esquematização da classificação dos materiais compósitos.

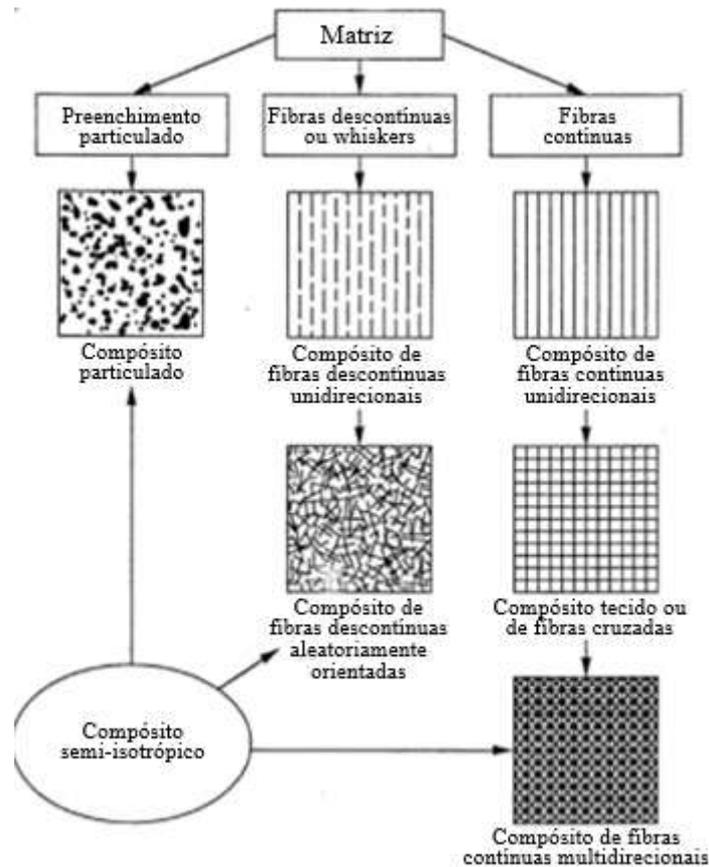


Figura 2.7: Classificação dos materiais compósitos. O termo “semi-isotrópico” se refere ao fato de que em todas as direções o compósito assume os mesmos valores de rigidez e resistência. (DANIEL *et al.*, 1994).

Os materiais compósitos com matriz polimérica apresentam certas vantagens em relação a outros materiais. Em geral, suas aplicações tornam-se viáveis por apresentarem uma boa relação entre resistência mecânica e peso, além de menor susceptibilidade a corrosão que materiais metálicos. Deste modo fica evidente o potencial uso para a indústria de transporte, principalmente a aeronáutica e a automobilística, onde o peso influencia o custo da operação. Na Figura 2.8 é visto o exemplo do Boeing 787 que, devido ao uso de materiais compósitos em sua composição, conseguiu ter o peso reduzido em 20% se comparado a um projeto feito em alumínio. Além disso, é esperado haver redução da quantidade das manutenções na aeronave pela maior resistência à fadiga, também comparada à do alumínio.

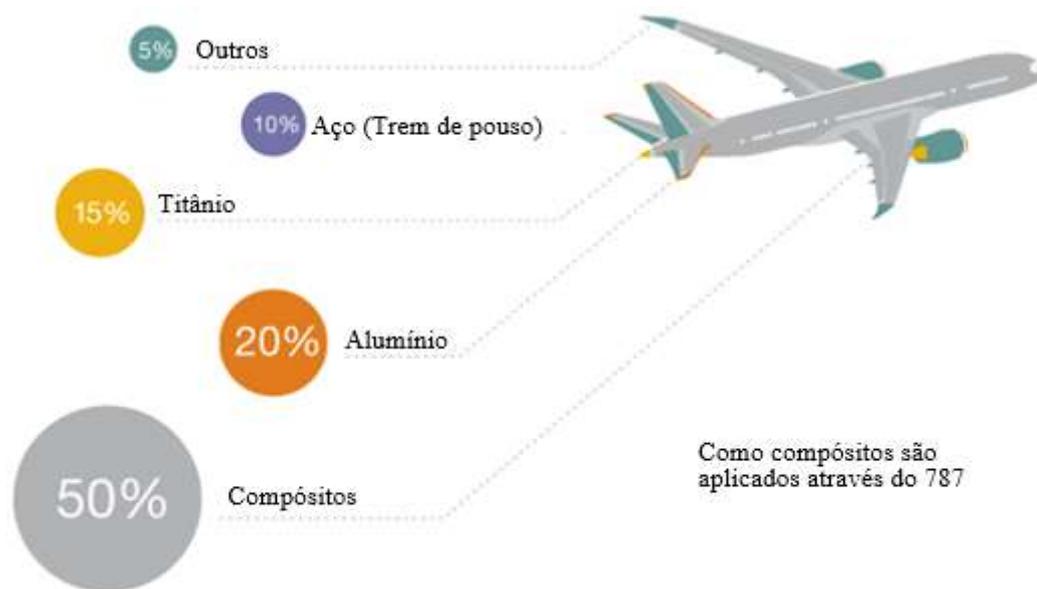


Figura 2.8: Fuselagem de um Boeing 787. (HALE, 2006)

2.4 Aplicações de compósito com liga com memória de forma embutida

Compósitos com efeito de memória de forma apresentam aplicabilidade diversa no ramo da engenharia de materiais. A área médica foi uma das pioneiras no uso destas, devido à biocompatibilidade que tal liga apresenta. Deste modo, as ligas com memória de forma foram inicialmente destinadas a dar suporte a órgãos e estruturas danificadas do corpo humano. Fios para aparelhos ortodônticos são um exemplo de ligas de memória de forma de uso comum na atualidade.

Grande parte dos estudos desta tecnologia tem se voltado para o ramo aeroespacial e automobilístico. Devido a suas propriedades de atuação por aquecimento gradual e por ser um material capaz de absorver vibrações, diversas patentes já foram submetidas visando explorar essas características, conforme destacado por MOHD *et al.* (2014). Com o passar dos anos, a tendência é que esse material seja mais comum na indústria e comercialmente.

Em estruturas, os objetivos de embutir fios de SMA geralmente são ou a absorção de vibrações, ou o controle de forma. Para controlar a forma de uma estrutura, basta que o material adotado apresente o efeito de memória de forma, o que pode ser atingido com outros tipos de materiais como polímeros. Assim, o que torna as ligas metálicas aplicáveis nestes casos é o fato de que estas apresentam maior força de restauração. Isso porque, comparativamente, sua deformação e “absorção de energia” não são elevadas quando comparada a outros materiais.

Para a absorção de vibrações busca-se alterar a rigidez do material, aumentando o amortecimento da estrutura. Um exemplo disto pode ser observado na Figura 2.9 onde uma ponte exposta a ventos e outras fontes vibracionais pode manter a circulação de pessoas e veículos segura alterando sua rigidez ativamente.

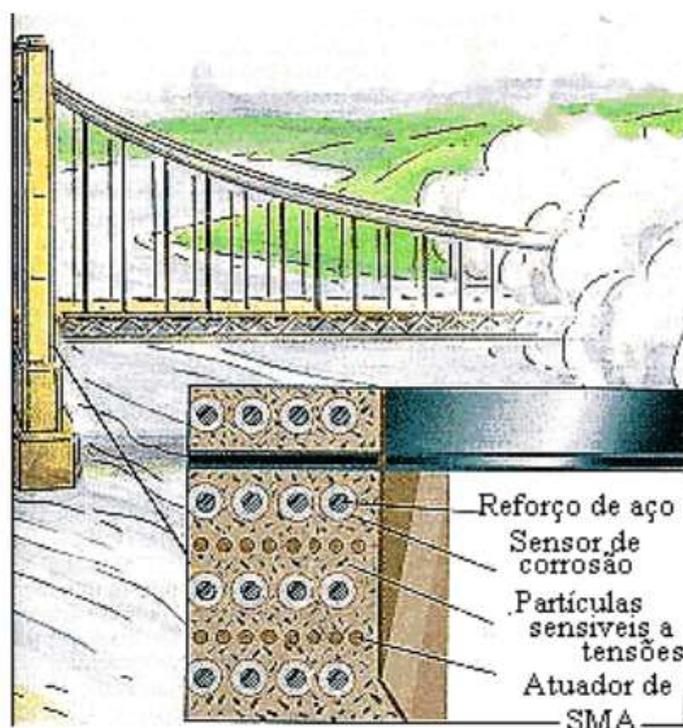


Figura 2.9: Estrutura de ponte com atuadores de SMA (LESTER *et al.*, 2015).

As SMA podem ser aplicadas não apenas para absorver vibrações, mas como reforço em estruturas de concreto, pois eleva a tensão de escoamento devido ao seu pré-tensionamento.

Como observado por JIN *et al.* (2016), as propriedades elétricas da liga de memória de forma variam conforme suas propriedades mecânicas. Deste modo, uma SMA poderia ser utilizada como atuador e sensor ao mesmo tempo.

2.5 O problema da aderência

O sucesso de um material compósito depende da adesão entre o reforço e a matriz pelo fato de haver deslocamento relativo entre os dois quando submetidos a cargas termomecânicas (ABBOUDI,1997). De acordo com MIRAMINI *et al.* (2016), uma das falhas mais comuns em compósitos reforçados por SMA é o descolamento interfacial entre a fibra e a matriz. A interface é um local crítico devido à propensão do aparecimento de trincas nesta região, à compatibilidade entre a matriz e o reforço e ao preparo ineficiente da superfície do reforço. Para resolver este problema com o fio de SMA e a matriz de epóxi, foi proposto por YANG *et al.* (2016) o uso de nanopartículas de sílica antes ou depois de um banho ácido na SMA de níquel e titânio, antes de embuti-la em matriz polimérica híbrida de fibra de vidro e epóxi. Assim conseguiram um aumento de 6,48% da força de rompimento da interface, com o uso somente das nanopartículas e de 52,21% com a combinação de banho ácido e uso de nanopartículas. A fim de evitar a propagação de trinca, UMEZAKI (2000) propôs uma configuração de espiral para os fios de SMA dentro de estruturas inteligentes (Figura 2.10). Em seus estudos ele verificou que esta configuração é ligeiramente inferior a do fio reto em termos de resposta mecânica, mas se tratando da adesão, na comparação entre os casos, o fio em espiral foi melhor pois para todos os comprimentos de fio linear embutido na matriz, a força de arrancamento foi próxima a 30 N enquanto para o fio em espiral a força alcançou até 191,1 N.

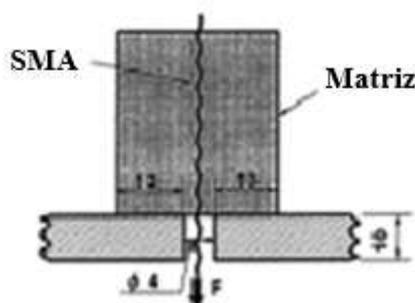


Figura 2.10: Configuração em espiral. (UMEZAKI, 2000)

Outros métodos para melhorar a adesão foram testados como a implantação iônica por imersão em plasma (POON *et al.*, 2005), o fresamento químico (MERLIN *et*

al., 2005), o ancoramento dos fios na matriz através de nós (Figura 2.10 - JIN & CHEN, 2002) e o polimento mecânico do fio (NEUKING *et al.*, 2008).

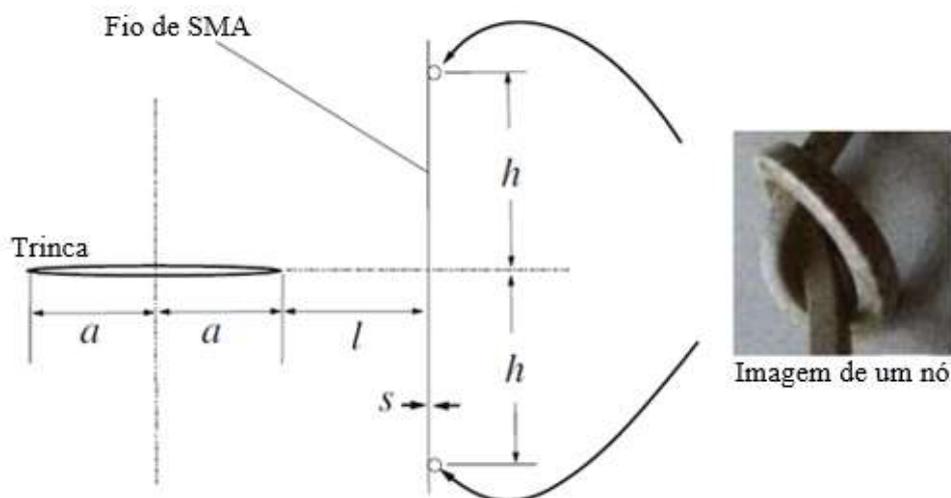


Figura 2.11: Ancoramento de fios de SMA por nós pra impedir o crescimento de trinca (JIN e CHEN, 2002).

MERLIN *et al.*(2015) compararam fios anexados em Poliéster e em Viniléster por adesivos de silano submetidos a tratamentos superficiais ou não para verificar a influência destes na força de adesão. A saber, foi utilizada fresagem química. Foi visto que através de ensaios de Pullout que a melhor situação foi a do fio com o tratamento anexado a matriz de Poliéster. Além disso, foram sugeridos outros tratamentos como a imersão em plasma, a metalização e o polimento do fio para tornar a adesão mais eficiente.

Com o propósito de aumentar a superfície de contato do fio de SMA com a matriz de epóxi, a proposta deste trabalho é comparar as forças de adesão quando o fio recebe o tratamento mecânico do lixamento.

Capítulo 3

Metodologia Experimental

A ascensão dos materiais compósitos na engenharia vem atrelada a novos desafios. Isso porque, durante o seu desenvolvimento, suas características mecânicas não são previamente conhecidas e estão relacionadas à adesão entre fibras e matrizes. Verificar sob quais condições esta adesão vai falhar é importante para a empregabilidade deste material. Assim, neste capítulo, serão apresentados os procedimentos experimentais utilizados para avaliar a adesão dos fios de SMA à matriz polimérica.

3.1 Caracterização do fio de SMA

Conforme citado no capítulo anterior, o efeito de memória de forma possui temperatura e tensão característicos. Para compreensão dos efeitos da adesão do fio, é preciso caracterizá-lo. Os dados que nos interessam são as temperaturas de início e fim de transformação, bem como as tensões de demaclação e ruptura do fio. Estes podem ser obtidos através de ensaios de Calorimetria Diferencial (DSC) e de Tração respectivamente.

As temperaturas de início e fim de transformação de fase do fio foram obtidas experimentalmente utilizando-se um calorímetro DSC (do inglês, *Differential Scanning Calorimeter*). O experimento utiliza um calorímetro Netzsch DSC-200 F3. O experimento usando o calorímetro considera a comparação de uma amostra da liga em relação a uma referência. O procedimento do teste monitora a quantidade de energia e a temperatura em um processo de variação de temperatura. Quando ocorre a transformação de fase, o calorímetro controla a quantidade de calor fornecida para compensar a energia que é cedida ou absorvida pelo sistema. Os resultados desta compensação podem ser observados na Figura 3.1, que mostra o calor latente da

transformação de fase, sendo possível identificar as temperaturas de início e fim de transformação de fase para o material do fio de SMA. A Figura 3.1 apresenta o termograma de uma liga de Nitinol. Os intervalos de variação mais brusca de calor representam as transformações austenítica e martensítica nos ciclos de aquecimento (em azul) e resfriamento (em vermelho) respectivamente.

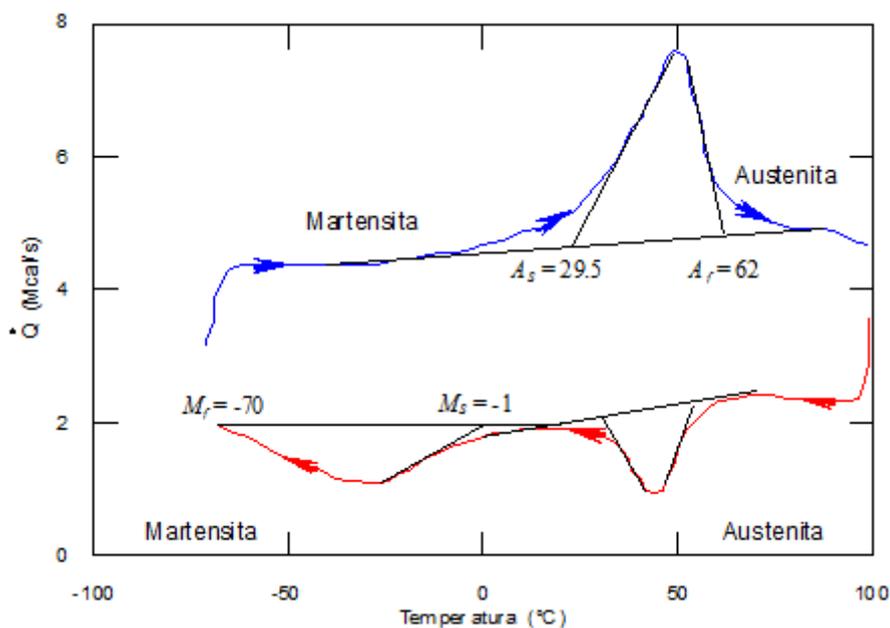


Figura 3.1: Termograma para uma liga Nitinol (SHAW & KYRIAKIDES, 1995).

Ao se analisar o ensaio de tração de um fio de SMA nunca antes utilizado, pode-se observar a existência de dois mecanismos que atuam de maneira paralela. O primeiro é o simples incremento na força até a ruptura do fio. O segundo é a demacção do fio, visto que este se encontra sob a forma de martensita maclada antes do ensaio. Isso se traduz em um patamar de força durante o ensaio, sendo que antes e depois deste patamar podem ser observadas inclinações no gráfico do experimento, que se traduzem na rigidez de cada uma das duas fases. Estes efeitos podem ser observados no gráfico apresentado na Figura 3.2.

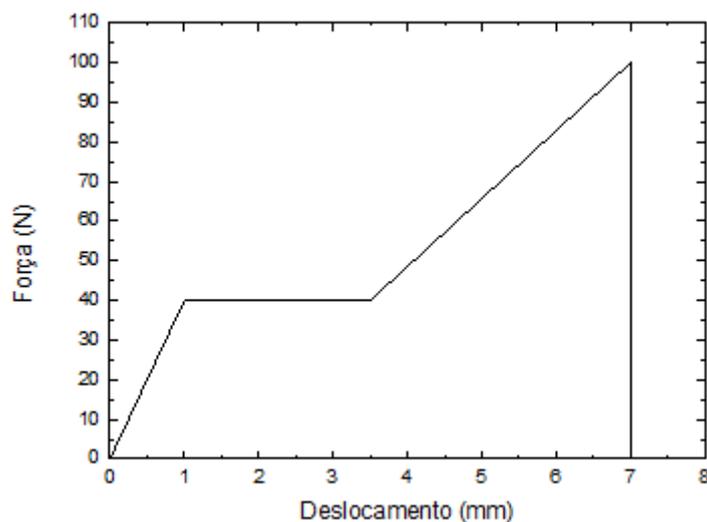


Figura 3.2:Exemplo teórico de ensaio de tração em fio de SMA até a ruptura.

Com o fio de SMA caracterizado, têm-se então as informações necessárias para a realização do ensaio de Pullout, estando garantida a fase martensítica do material durante o ensaio e também se a máquina é capaz de produzir os esforços requeridos para a obtenção dos resultados.

3.2 Resinas utilizadas

Inicialmente para a fabricação dos corpos de prova foi utilizada a resina AR-260 em conjunto com o endurecedor AH-260, ambos fornecidos pela Barracuda Composites (Figura 3.3). A razão entre os dois recomendada pelo fabricante é de 100 partes mássicas de resina para 26 partes mássicas de endurecedor. Para o processo de cura, deve-se manter a temperatura de 80 °C durante 6 horas em estufa. Pelo fato da empresa ter substituído o produto no mercado, os outros ensaios foram refeitos com uma nova resina, denominada Araldite LY 5052 e com endurecedor Aradur 5052 que devem ser misturados de acordo com a razão mássica de 100 para 38. Essa resina demanda tempo de cura de duas horas a 60°C e tempo de pós cura de dez horas para que a resina adquirisse a totalidade da resistência mecânica informada pelo fabricante.

3.3 Fio de SMA utilizado

O fio utilizado para o presente trabalho foi fabricado pela DynalloyTM, sendo este composto de níquel e titânio com diâmetro de 0,015”, ou 0,381mm, e em estado martensítico. Vale ressaltar que apesar da temperatura A_s estar descrita pelo fabricante como 90°C, o ensaio DSC no fio mostrou que este valor é um pouco menor.

3.4 Ensaio de Pullout

O objetivo deste ensaio consiste em observar a adesão na interface entre dois materiais, estando um em forma de fio ou fibra alongado, e o outro o fixando como matriz. Ele consiste na tentativa de extrair o fio de dentro de uma cápsula de resina no qual este é embutido até certo comprimento. Assim, pode-se observar o comportamento da interface Fio-Resina para diferentes comprimentos de fio embutido. Para a realização deste ensaio são fabricados corpos de prova como o ilustrado na Figura 3.5.



Figura 3.3: Corpo de prova para o ensaio de Pullout. (MONTEIRO *et al.*,2006)

Para a confecção deste corpo de prova, foi utilizado um molde de alumínio com vedação de silicone (Figuras 3.4a 3.6). Esse molde permite gerar uma matriz de dimensões 10x10x15mm. Como já mencionado, o diâmetro do fio utilizado é de 0,381mm. Este foi posicionado de maneira centralizada, em um gabarito de silicone, onde constam furos guia para a fixação no molde pela parte inferior. As superfícies laterais e inferior onde a resina entra em contato são revestidas com fita de silicone resistente à temperatura. Deste modo, com a superfície inferior vedada pelo silicone e as

superfícies laterais protegidas pela fita, a resina pode então ser vazada pela parte superior, estando os fios já posicionados conforme o comprimento embutido desejado.



Figura 3.4: Molde montado para os corpos de prova usados no ensaio de Pullout.

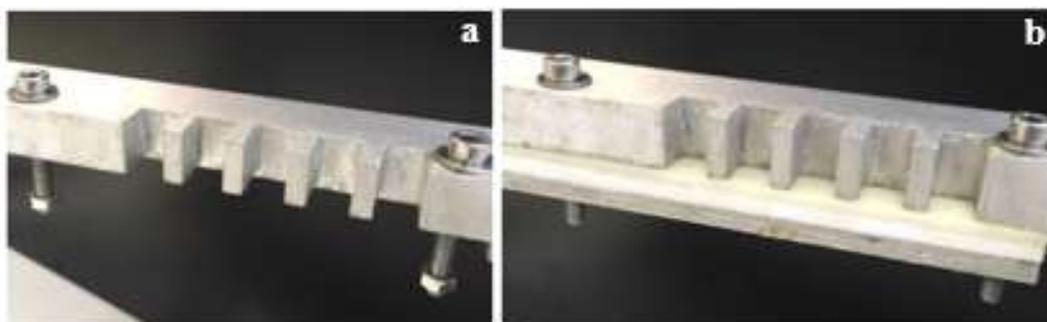


Figura 3.5: Detalhe da região onde é realizada a vedação com fita de alta temperatura, evidenciando à esquerda (a) a região do molde e à direita (b) a fixação da superfície de vedação na parte inferior.

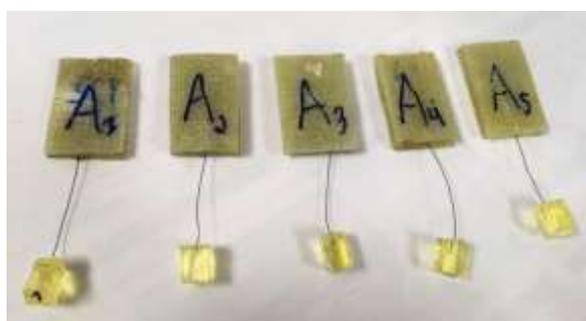


Figura 3.6: Corpos de prova utilizados nos ensaios de Pullout.

O molde com capacidade para até dez corpos de prova é levado para a estufa, onde permanece até a finalização da cura. Após este processo, que pode também ser seguido por uma pós cura, com cuidado os fios são retirados do molde, cada qual embutido no seu cubo de resina. A extremidade livre deste fio, apenas por uma questão de adequação à máquina de ensaio, foi colada a placas conforme na figura 3.6. Entretanto, este procedimento foi abandonado pois após alguns ensaios foi constatado que a adesão obtida entre o fio e a resina era superior à obtida neste processo, o que causava a falha do ensaio na região colada e não na região de interesse que é a interface entre o fio e a resina.

Cada ensaio gera um gráfico similar ao da Figura 3.7, onde, de maneira similar ao ensaio de tração, podem ser percebidos alguns fenômenos simultâneos ou não: a demacção do fio e a ruptura da interface.

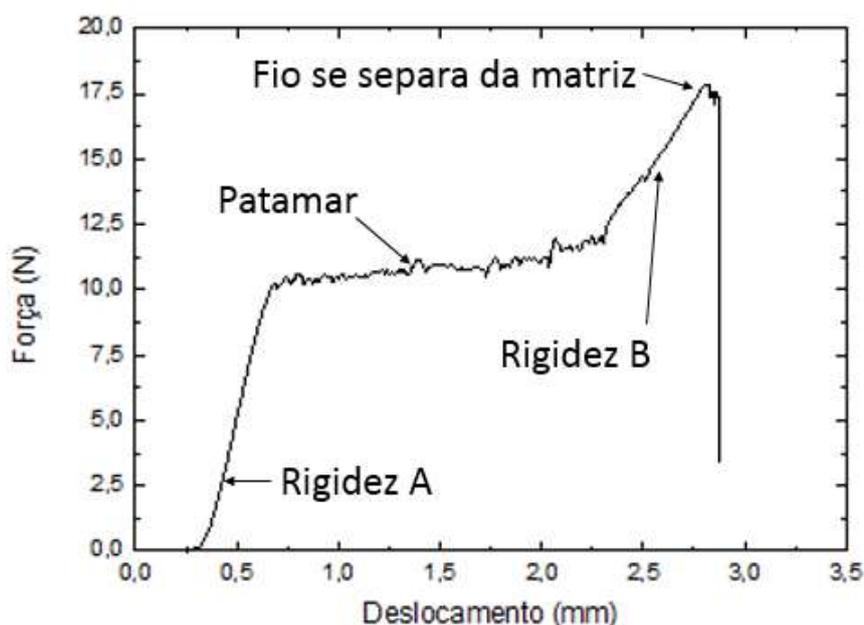


Figura 3.7: Gráfico típico para um ensaio de Pullout (adaptado de AQUINO *et al.*,2015).

O esforço máximo F_{max} é função da tensão cisalhante de fratura τ_{max} e do comprimento embutido L_c , conforme na equação (3.1) proposta por KELLY (1965) e indicada abaixo:

$$\frac{F_{\max}}{A} = \sigma = 2 * L_c * \frac{\tau_{\max}}{r} \quad (3.1)$$

Onde r (mm) e A (mm²) são raio e área da seção do fio respectivamente. Esta equação advém da simples análise de tensões atuando na superfície da interface, de modo que é possível escrever:

$$\tau_{\max} = \frac{F_{\max}}{2 * \pi * r * L_c} \quad (3.2)$$

Assim encontra-se o valor de tensão na qual ocorre a falha do corpo de prova. Os ensaios foram realizados com velocidade de 0,5 mm/s.

3.5 A preparação do fio para o corpo de prova e para o ensaio

Para a experimentação, antes de serem embutidos, os fios passaram por limpeza com acetona e parte das amostras foi lixada com lixa d'água com granulometria 400. A direção do lixamento foi perpendicular ao comprimento do fio, a fim de se alterar a topografia de sua superfície, aumentando a região de contato com a resina e criando vales que provocassem resistência ao arrancamento. Na Figura 3.8 é possível verificar a diferença na região de embutimento entre o fio que passou pelo tratamento mecânico e o fio que não sofreu lixamento.

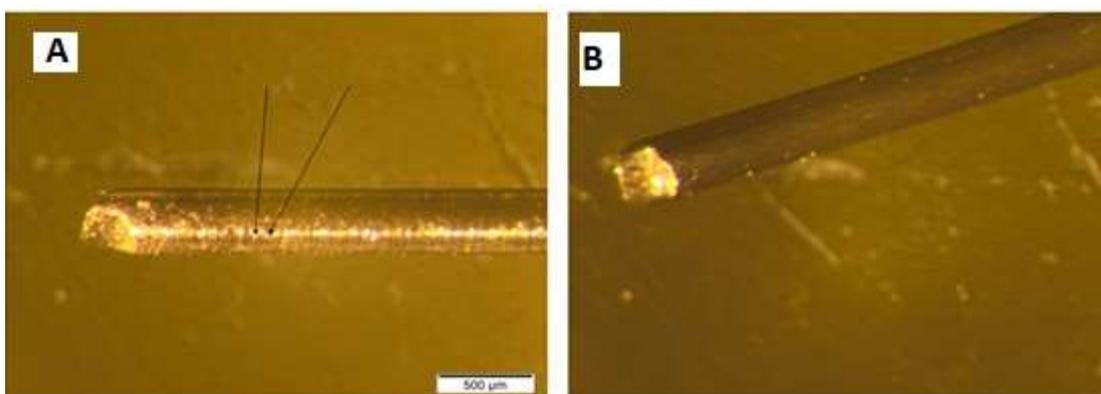


Figura 3.8: À esquerda (A) o fio com lixamento; as setas indicam as ranhuras provocadas pelo processo. À direita (B), o fio sem lixamento.

Nos dois primeiros ensaios foi usada a resina AR-260 em conjunto com o endurecedor AH-260. A partir do terceiro foi usada a resina Araldite LY 5052 com o

endurecedor Aradur LY 5052. Para eliminar qualquer efeito provocado por deformação prévia nos fios, os mesmos foram submetidos à aplicação de corrente de 1,5 A para retornar à fase austenítica e após foram colocados em água com gelo para garantir que estivesse homogeneamente com martensita, ou seja submetido à temperatura menor que M_f . Os fios são tracionados pela extremidade livre. A máquina usada para o ensaio de Pullout foi a INSTRON 5966. Na Figura 3.9, são exibidos corpos de prova prontos.

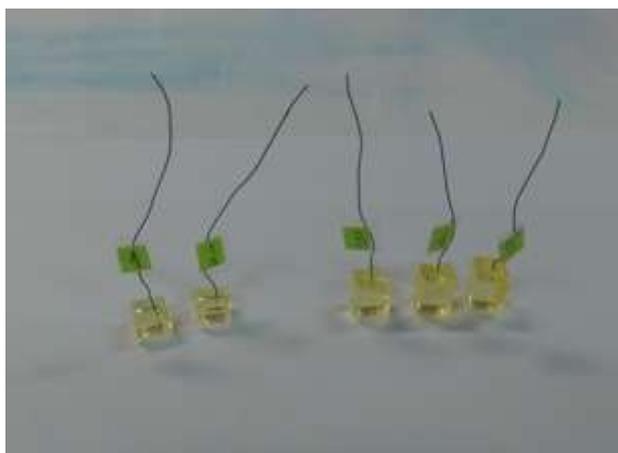


Figura 3.9: Corpos de prova fabricados para o ensaio de Pullout.

3.6 Medição pós-ensaio

Após o ensaio de Pullout, para garantir a confiabilidade dos dados obtidos, foi realizada a medição do comprimento embutido real do fio em um microscópio digital. Este procedimento apresenta uma vantagem em termos de precisão pois, ao se obter os dados de força e tensão correspondentes, a influência do comprimento embutido na adesão do material pode ser avaliada com maior exatidão. Um exemplo deste procedimento está demonstrado na Figura 3.12.

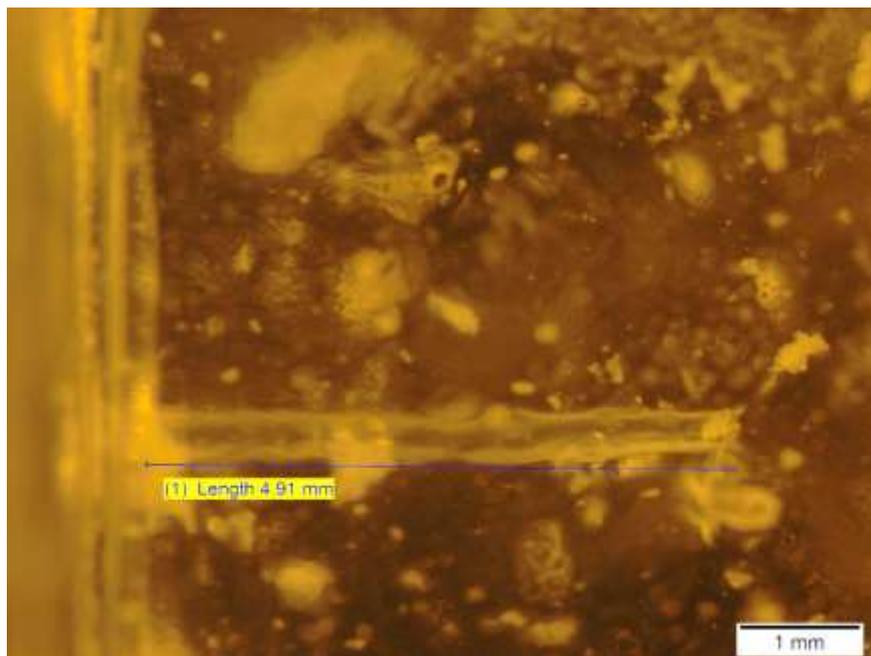


Figura 3.10:Medição do comprimento embutido real. Length significa distância.

As medidas foram tomadas cinco vezes em diferentes posições do bloco de resina por causa do posicionamento espacial do fio. Para o valor final de cada medida foram considerados o cálculo da média para cada amostra e o desvio padrão, considerando que os valores das medições estiveram distribuídos de acordo com uma distribuição normal.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de Pullout e discutidas suas possíveis implicações.

4.1 Caracterização dos fios de SMA

O resultado dos ensaios de tração realizados nos fios de SMA de diâmetro 0,381 mm são apresentados na Figura 4.1. A partir destes, calculamos uma tensão de ruptura média de 1261,23 MPa. O ensaio foi realizado em duas etapas, tendo a carga sido removida pouco após o patamar de demacção antes de levar o fio à ruptura. Pode-se observar uma variação na rigidez do fio após o patamar de demacção, situado até próximo a 3 mm de deslocamento. Este patamar pode ser melhor observado na Figura 4.2.

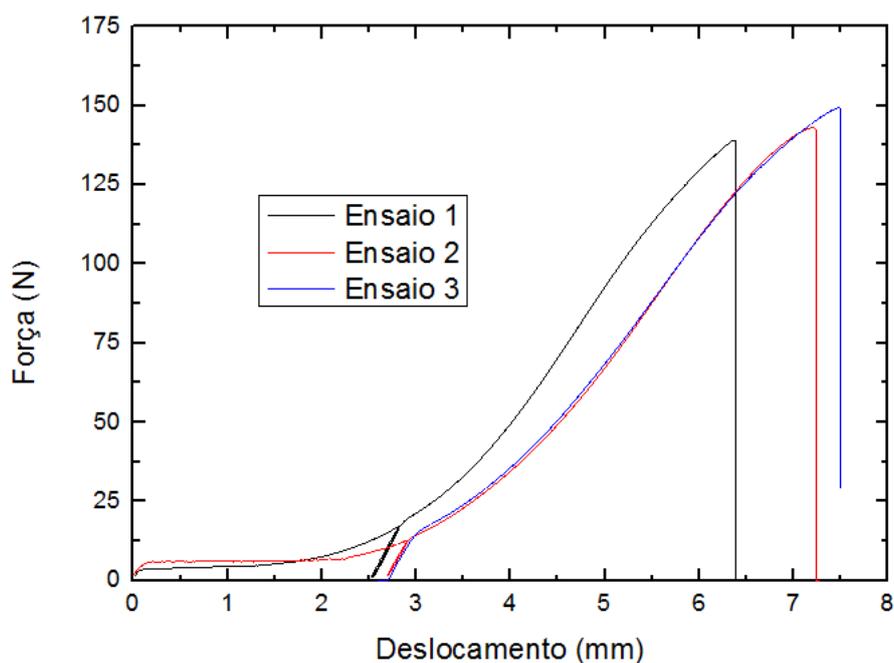


Figura 4.1: Ensaio de tração até a ruptura do fio de SMA

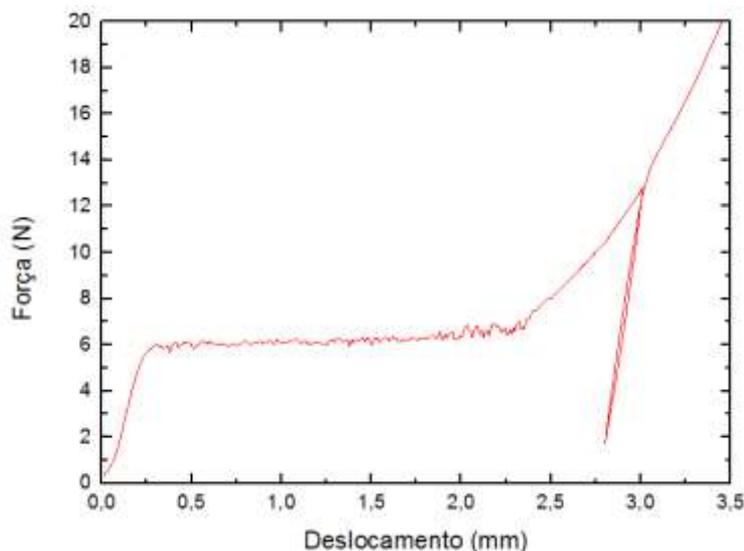


Figura 4.2: Ampliação do trecho entre 0 mm e 3,5 mm. Observe o patamar que indica a transformação da estrutura cristalográfica de martensita demaçada para martensita maçada.

As temperaturas de início e fim de transformação de fase do fio foram obtidas experimentalmente utilizando-se um calorímetro DSC, sendo possível identificar na Figura 4.3 as temperaturas de início e fim de transformação de fase para o material do fio. Para temperaturas superiores a A_f ($85,6^\circ\text{C}$), sem a presença de carga, o fio é completamente austenítico. Já para temperaturas abaixo de M_f ($17,5^\circ\text{C}$) é completamente martensítico. Neste experimento foi utilizada uma taxa de aquecimento/resfriamento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ e uma faixa de temperatura de -110°C a 120°C .

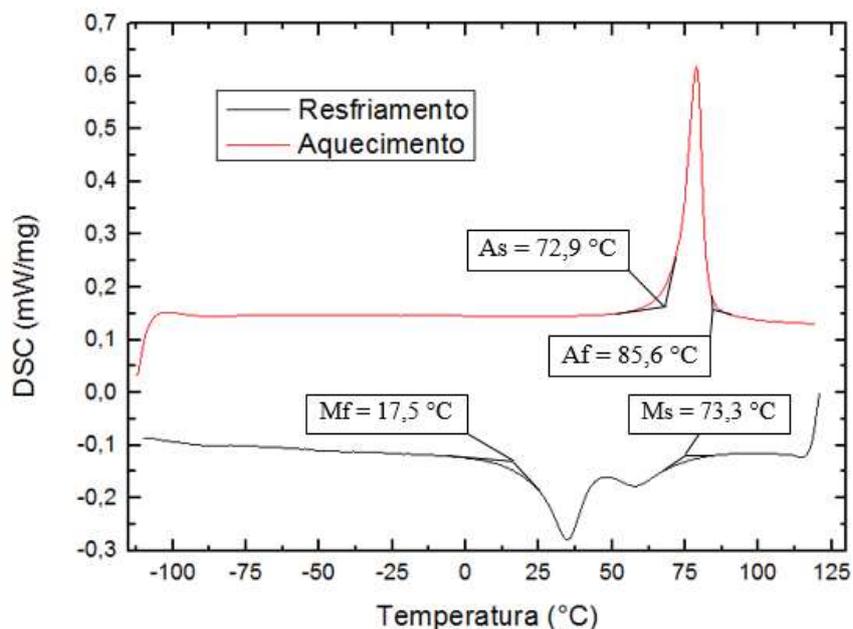


Figura 4.3: Ensaio DSC do fio de SMA

A partir destes dados foi possível concluir que, após a austenitização, o fio necessita ser resfriado abaixo da temperatura ambiente, até a temperatura $M_f = 17,5\text{ °C}$, para garantir a uniformidade da fase martensítica requerida. Além disso, foi possível observar que o valor de A_f obtido pelo ensaio ($85,6\text{ °C}$) foi diferente do apresentado pelo fabricante (90 °C), o que demonstra a importância da busca pela caracterização do material.

4.2 Ensaio de Pullout

Os comprimentos embutidos dos fios inicialmente foram de 1,0 mm até 5,0 mm com a diferença sendo incrementada de 1 em 1 mm com um total de cinco fios não lixados e não utilizados anteriormente. Com a intenção de levantar dados sobre a influência do lixamento na região do fio que fica aderida à resina, três fios foram lixados e tiveram embutimento iniciando de 1,0 mm, com incremento de 0,5 mm até 2,0 mm e os dois fios não lixados tiveram embutimento teórico de 1,5 mm e 2,0 mm. Por ser um processo manual e se tratar de valores muito pequenos de medida, estes valores são teóricos, ou seja, foram a melhor aproximação possível dados os recursos.

Por isso, após cada ensaio os blocos de resina precisaram ser observados através de uma lupa estereoscópica para que, fazendo uso do Software Stream Essentials, fossem associados os comprimentos reais de embutimento. Nas Tabelas 4.1 e 4.2 é possível comparar as profundidades real e teórica de embutimento. Também seguem os valores de força para o arrancamento.

Tabela 4.1: Resultados alcançados para o primeiro ensaio com a resina AR-260.

Amostra	Embutimento real (mm)	Força (N)	τ (MPa)
1 mm	1,40 \pm 0.40	11,39 \pm 0,03	6,80 \pm 0,02
2 mm	2,20 \pm 0.70	11,41 \pm 0,03	4,33 \pm 0,01
3 mm	4,00 \pm 0.40	12,75 \pm 0,03	2,663 \pm 0,006
4 mm	5,60 \pm 0.50	14,54 \pm 0,04	2,170 \pm 0,006
5 mm	7,20 \pm 0.50	13,83 \pm 0,03	1,605 \pm 0,004

Tabela 4. 2: Resultados alcançados para o segundo ensaio com a resina AR-260.

Amostra	Observação	Embutimento (mm)	Força (N)	τ (MPa)
1 mm	Lixado	1,90 \pm 0.60	7,80 \pm 0,02	3,430 \pm 0,009
1,5 mm	Lixado	1,40 \pm 0.30	6,73 \pm 0,02	4,02 \pm 0,01
2 mm	Lixado	2,40 \pm 0.70	14,74 \pm 0,04	5,13 \pm 0,01
1,5 mm	Não lixado	1,40 \pm 0.20	9,07 \pm 0,02	5,41 \pm 0,01
2 mm	Não lixado	1,90 \pm 0.30	12,03 \pm 0,03	5,29 \pm 0,01

É observado que a tensão necessária para haver o arrancamento dos fios não lixados acabou se mostrando superior a dos fios lixados para um mesmo comprimento embutido real. De fato, quando se comparam outros resultados mais à frente neste trabalho, o que ocorre é um melhor desempenho para fios não lixados em comprimentos embutidos abaixo de 2mm, o que pode ser explicado por ainda não haver superfície adesiva suficiente para o lixamento se mostrar eficaz.

Até o segundo ensaio a resina utilizada foi a fornecida pela Barracuda. Não foi possível o prosseguimento com o uso desta resina porque a própria empresa parou de

fornecê-la. Com isso, os experimentos prosseguiram com outra resina, da Araldite, que tem características mecânicas diferentes da AR-260 - no Anexo A encontra-se a ficha técnica da resina AR-260 e no Anexo B os dados da Araldite LY 5052. Na Figura 4.4 são apresentados os resultados que foram obtidos para as matrizes fornecidas pela Araldite e pela Barracuda, ambas com fios sem lixamento embutidos a 1,4mm.

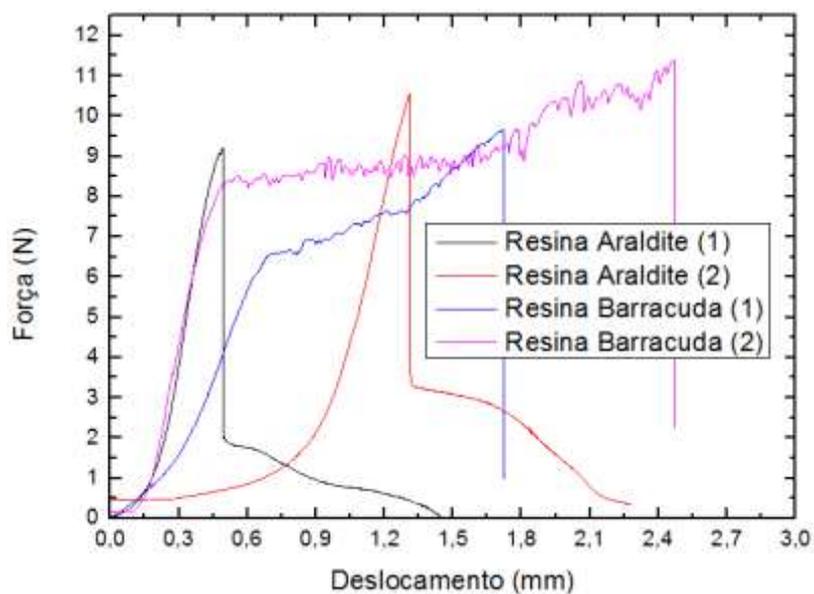


Figura 4.4: Pullout em fios embutidos a 1,4 mm.

Aqui, pode ser visto que para este comprimento embutido a força necessária para o arrancamento do fio está entre 9,2 e 11,4 N. Nota-se ainda com clareza a diferença entre as resinas utilizadas, estando o distanciamento entre os gráficos (1) e (2) da resina Araldite justificado pelo ajuste do cubo de resina ao suporte do ensaio, fixado na garra inferior do equipamento conforme mostrado na Figura 4.5.

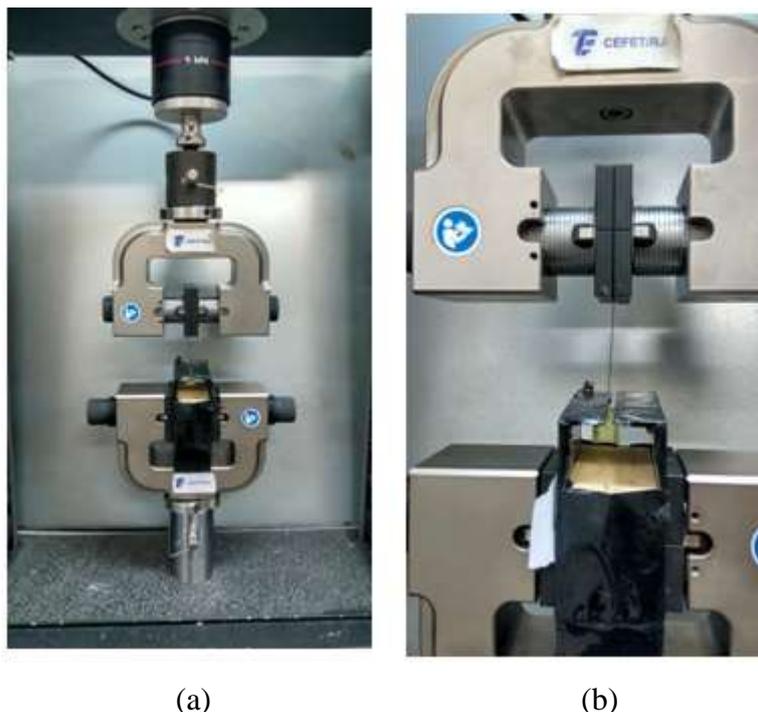


Figura 4.5:Foto da máquina de ensaio de Pullout (a)em que a garra, situada na parte inferior contém o suporte adaptador, visto com mais detalhe em (b).

A partir do terceiro ensaio, foram iniciados os ensaios com a resina Araldite LY 5052. Essa resina apresentou, na comparação global dos resultados conforme foram sendo obtidos, desempenho superior à resina anterior, de modo que foi decidido continuar utilizando-a para o restante dos experimentos.

Tabela 4. 3:Resultados alcançados para o ensaio 3, o primeiro com a resina Araldite LY 5052.

Fio	Amostra	Observação	Embutimento (mm)	Força (N)	τ (MPa)
1	1 mm	Lixado	1,2±0,5	4,69±0,01	3,27±0,01
2	1,5 mm	Lixado	2,0±0,3	10,28±0,03	4,29±0,01
3	2,0 mm	Não lixado	2,8±0,7	11,33±0,03	3,38±0,01
4	3,0 mm	Não lixado	3,0±0,7	16,72±0,04	4,66±0,01
5	4,0 mm	Não lixado	4,5±0,1	11,96±0,03	2,22±0,01

O fio 5 observado na tabela 4.3 apesar de estar lixado não teve esta parte embutida na resina e sim a parte que antes ficava presa na garra superior. Foi visto posteriormente em microscópio que este ajuste provocava o surgimento de imperfeições

no fio, o que pode explicar que mesmo não estando lixado e esta amostra mostrou desempenho inferior ao esperado.

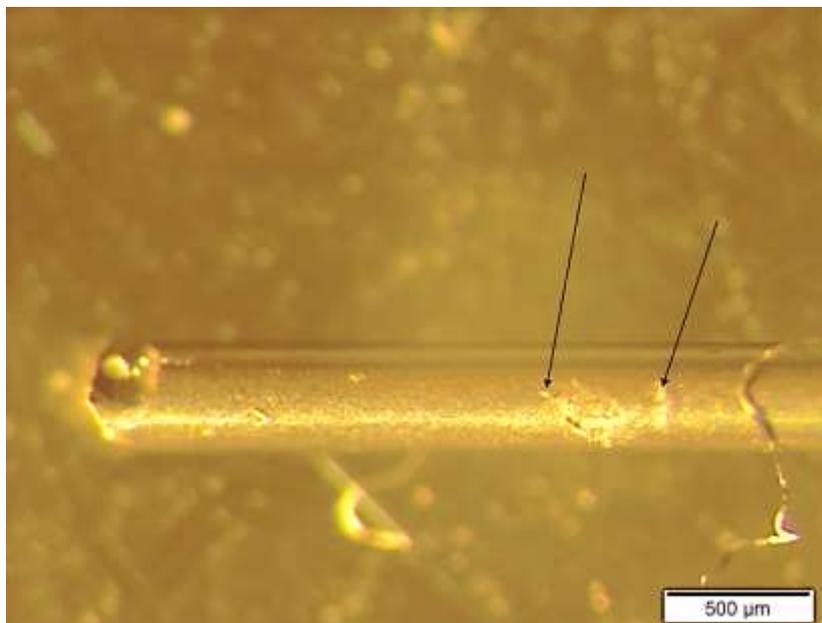


Figura 4.6: Fio 5 marcado pela garra da máquina de ensaio

A partir do ensaio 4, foram adquiridos cinco novos fios e os anteriores passaram a ser todos lixados. Neste ensaio, o que obteve maior tensão de cisalhamento foi o fio lixado da amostra de 1,0 mm e os fios com menor tensão de cisalhamento foram os com maior profundidade, como visto na Tabela 4.4. Este fato pode ser explicado pela área embutida do fio ser maior. A força apresentou crescimento conforme o aumento do comprimento embutido de acordo com a maioria das amostras.

Tabela 4.4: Resultados alcançados para o ensaio 4, o segundo com a resina Araldite LY 5052.

Fio	Amostra	Observação	Embutimento (mm)	Força (N)	τ (MPa)
1	4 mm	Lixado	4,20±0,20	14,85±0,04	2,95±0,01
2	3 mm	Lixado	3,50±0,30	11,66±0,03	2,78±0,01
3	2 mm	Lixado	2,50±0,50	10,83±0,03	3,62±0,01
4	1,5 mm	Lixado	2,60±0,60	9,63±0,02	3,09±0,01
5	1 mm	Lixado	1,70±0,6	15,48±0,04	7,61±0,02
6	1 mm	Não lixado	1,70±0,80	13,40±0,03	6,59±0,01
7	1,5 mm	Não lixado	2,60 ± 0,80	15,07±0,04	4,84±0,01
8	2 mm	Não lixado	3,30 ± 0,30	17,55±0,04	4,44±0,01
9	3 mm	Não lixado	3,90±0,40	17,70±0,04	3,79±0,01
10	4 mm	Não lixado	4,40 ± 0,40	16,39±0,04	3,11±0,01

O fio 5 no ensaio 4 apresentou um resultado aparentemente adverso ao compará-lo aos outros fios lixados, porém plausível ao compará-lo ao fio não lixado de mesmo comprimento embutido. Isso demonstra a característica do ensaio de Pullout em gerar uma dispersão de dados elevada.

Tabela 4. 5: Resultados alcançados para o ensaio 5, o terceiro com a resina Araldite LY 5052.

Fio	Amostra	Observação	Embutimento (mm)	Força (N)	τ (MPa)
1	4 mm	Lixado	3,6±0,7	18,17±0,05	4,22±0,01
2	3 mm	Lixado	3,3±0,9	16,87±0,04	4,27±0,01
3	2 mm	Lixado	2,2±0,8	15,83±0,04	6,01±0,02
4	1,5 mm	Lixado	2,0±0,5	18,38±0,05	7,68±0,02
5	1 mm	Lixado	1,3±0,3	16,47±0,04	10,58±0,03
6	4 mm	Não lixado	3,4±0,3	17,61±0,04	4,33±0,01
7	3 mm	Não lixado	2,7±0,3	17,30±0,04	5,35±0,01
8	2 mm	Não lixado	2,3±0,9	15,09±0,04	5,48±0,01
9	1,5 mm	Não lixado	1,9±0,3	23,30±0,06	10,25±0,03
10	1 mm	Não lixado	1,4±0,7	10,56±0,03	6,30±0,02

O ensaio 6 apontou que o fio que obteve a maior força de arrancamento foi o de 3 mm não lixado (Tabela 4.6). Houve necessidade de fazer um sétimo ensaio porque os fios de 1 mm apresentaram problemas na retirada do molde e no ensaio de tração por causa de falha no processo de fabricação. Os valores para estes corpos de prova estão situados na Tabela 4.7.

Tabela 4.6- Resultados alcançados para o ensaio 6, o quarto com a resina Araldite LY 5052.

Fio	Amostra	Observação	Embutimento (mm)	Força (N)	τ (MPa)
2	1,5mm	Lixado	1,3±0,4	11,78±0,03	7,57±0,02
3	2mm	Lixado	1,9±0,6	12,31±0,03	5,41±0,01
4	3mm	Lixado	2,2±0,6	18,39±0,05	6,99±0,02
5	4mm	Lixado	5,1±0,7	12,88±0,03	2,11±0
7	1,5mm	Não lixado	1,3±0,4	10,06±0,03	6,46±0,02
8	2mm	Não lixado	1,2±0,3	14,25±0,04	9,92±0,03
9	3mm	Não lixado	2,5±0,2	21,41±0,05	7,16±0,02
10	4mm	Não lixado	3,2±0,6	17,82±0,04	4,65±0,01

Tabela 4.7-Ensaio complementar 7, o quinto usando a resina Araldite LY 5052,

Fio	Amostra	Observação	Embutimento (mm)	Força (N)	τ (MPa)
2	1 mm	Lixado	1,23±0,04	8,1±0,02	5,50±0,01
3	1 mm	Lixado	1,5±0,2	9,92±0,02	5,52±0,01
8	1 mm	Não lixado	1,4±0,3	9,20±0,02	5,49±0,01
10	1 mm	Não lixado	1,8±0,3	15,99±0,04	7,42±0,02

As análises e comparações realizadas no presente estudo são limitadas em virtude do processo impreciso de fabricação dos corpos de prova, pois a adesão pode se manifestar de maneiras diferentes para comprimentos embutidos muito distintos. Objetivando visualizar a influência do comprimento embutido na força necessária para separar o fio da matriz, a informação mais relevante neste sentido seria a tensão de cisalhamento na superfície do fio. Essa tensão, calculável a partir de (3.1) ou (3.2), demonstra a parcela do comprimento embutido que contribui para a força de separação. Os gráficos foram tomados para um intervalo máximo de 0,5mm, conforme observado a

seguir. Isso porque, como mencionado no capítulo 3, foi realizada a medição do embutimento real, porém valores próximos foram tomados dentro de uma mesma faixa, de 0,5 mm para efeito comparativo. A análise das forças e tensões alcançadas estão nas Figuras 4.5 e 4.6, respectivamente. Nota-se que para a força há aumento até 3,5 mm e queda para comprimentos maiores, o mesmo ocorre para a tensão que aumenta até 2,0 mm e diminui após este embutimento. Os gráficos das Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam a média da força de arrancamento no ponto central das linhas e nas extremidades os valores mínimo e máximo alcançados durante os ensaios para o grupo de amostras.

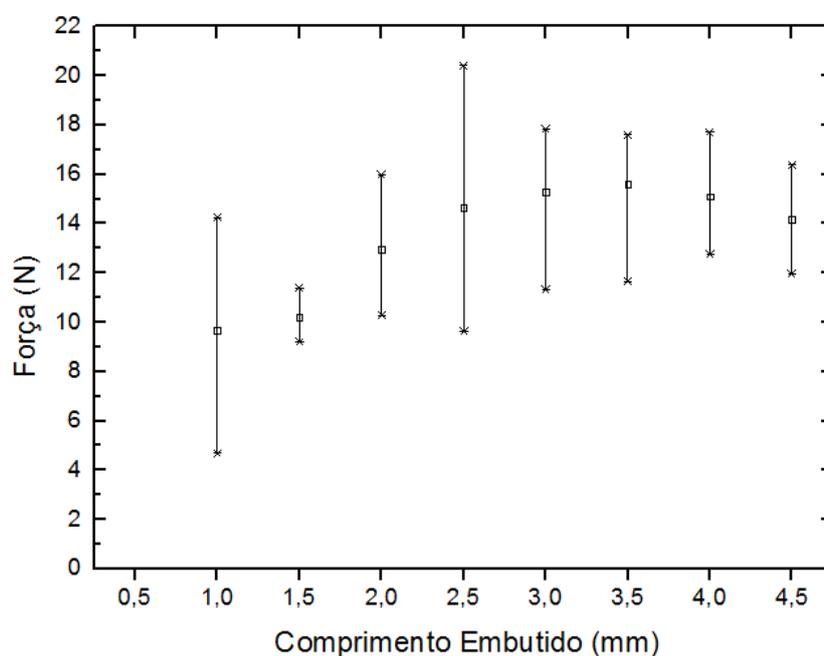


Figura 4.5: Esforços em Pullout para fios sem lixamento em matriz epóxi com a resina da Araldite.

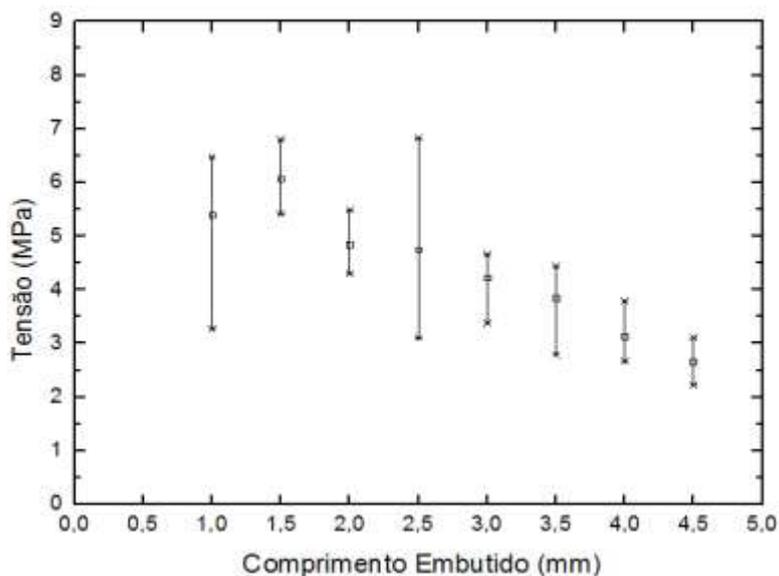


Figura 4.6: Tensão em Pullout para fios sem lixamento em matriz epóxi para a Araldite LY5052.

Com estes resultados podemos observar que a partir de 2 mm, a média das forças manteve-se em torno de 15 N e o aumento de área de superfície lateral passa a não ser mais um fator tão impactante para a adesão deste material.

Os fios lixados embutidos na resina Araldite apresentaram os resultados exibidos nas Figuras 4.7 e 4.8. É possível observar crescimento da força para o embutimento até 3,5 mm, enquanto a tensão alcançada para fios com comprimentos embutidos menores foi maior.

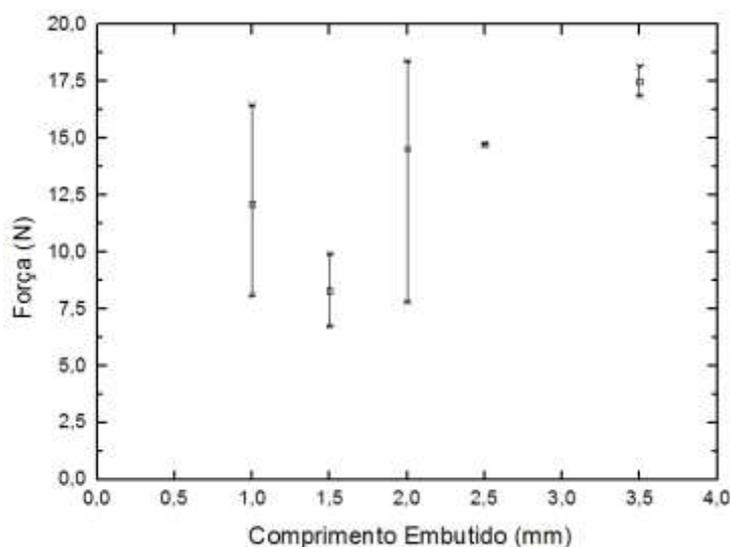


Figura 4.7: Esforços em Pullout para fios lixados.

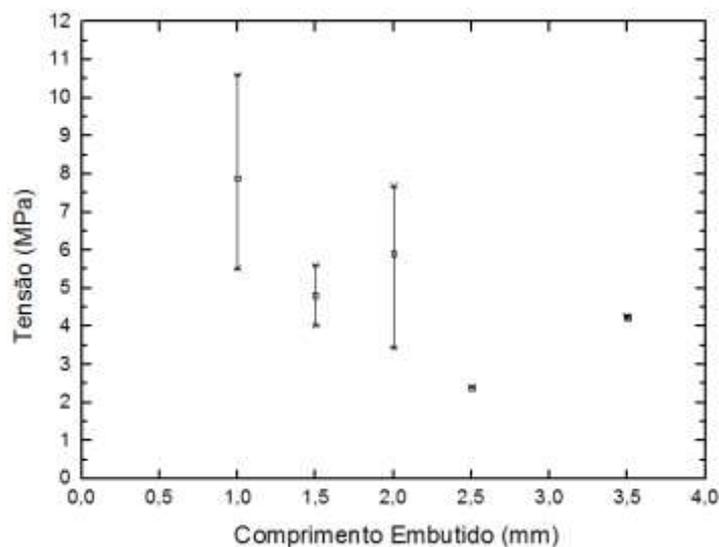


Figura 4.8: Tensão em Pullout para fios lixados.

É importante notar que, ao longo dos ensaios, foi notado que o silicone na parte inferior realizava a vedação da resina adequadamente, impedindo seu vazamento por gravidade, mas não impedia adequadamente a entrada de ar na direção contrária. Este fenômeno explica a diferença entre os grupos classificados como 1 mm que, possivelmente por permitirem uma passagem menor de ar na região do molde que segura o fio junto à resina, apresentaram esforço maior quando lixados. Na Figura 4.9 pode ser observada a tendência entre fios lixados e não lixados para os comprimentos embutidos reais. É notado que até aproximadamente 2,0 mm os fios lixados foram mais resistentes ao arrancamento e a partir daí os fios não lixados apresentaram um desempenho melhor.

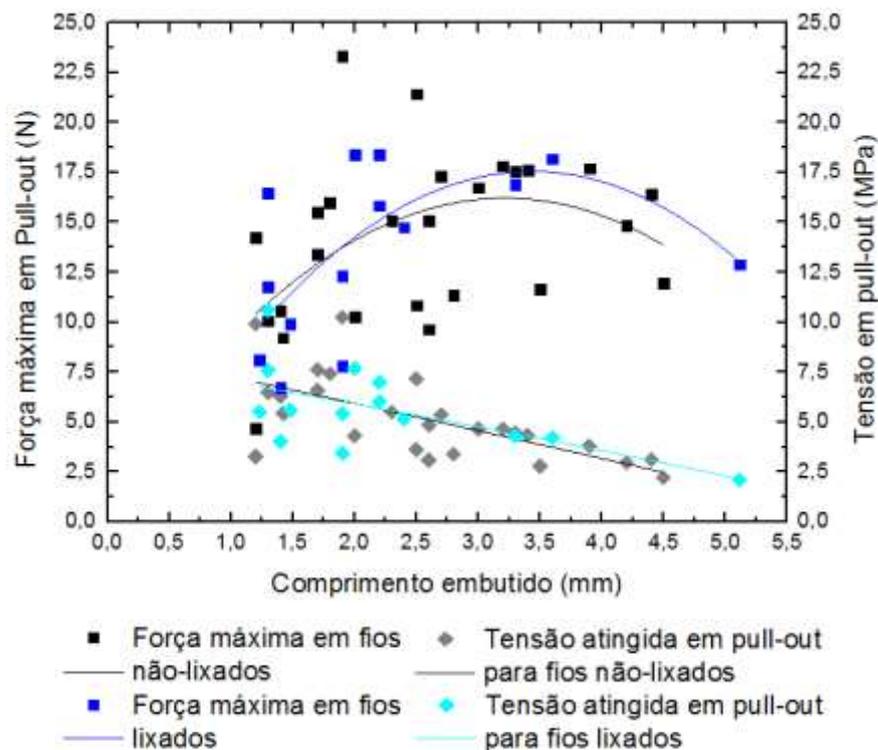


Figura 4.9: Comparação dos efeitos do lixamento com as tensões desenvolvidas no fio de SMA.

Para executar a comparação entre as duas resinas, as tensões de cisalhamento obtidas para o arrancamento foram divididas pelo comprimento embutido real de cada fio. Deste modo a tensão de cisalhamento por comprimento em cada um dos casos é descrita respectivamente nas Tabelas 4.8 e 4.9 a seguir:

Tabela 4. 8: Tensão de cisalhamento por comprimento embutido.

Tensão de cisalhamento para a resina Araldite™ LY 5052		
Fios	MPa/mm	Desvio Padrão
Lixados	3,00	0,4
Não lixados	3,50	0,5

Tabela 4. 9: Tensão de cisalhamento por comprimento embutido para a resina AR-260

Tensão de cisalhamento para a resina AR 260	
Fios	MPa/mm
Não lixados	2,19
Lixados	2,27

A Tabela 4.8 reforça que na comparação global a adesão entre os fios não-lixados e a matriz epóxi foi mais resistente, apesar da tolerância apresentada englobar o intervalo para os fios lixados, o que aponta que o lixamento executado em fios de SMA como os abordados neste estudo com uma lixa de granulometria 400 não mudou significativamente o desempenho da interface.

Capítulo 5

Conclusão e trabalhos futuros

Observando o comportamento entre os fios para ambas as resinas a resistência da adesão entre os não lixados e as resinas foi um pouco superior à adesão em comparação com os fios lixados. Ainda que a área de contato na interface tenha sido aumentada por causa do tratamento mecânico, o fato dos fios lixados terem sido utilizados por mais vezes que os não lixados levanta a hipótese de acúmulo de tensões já que de acordo com MIRAMINI (2016) uma SMA retém tensões residuais desde o primeiro ciclo de transformação ao qual é submetida. Também é possível que o próprio procedimento de lixamento provoque o acúmulo destas tensões na superfície do fio, o que aponta que após o processo possa ser necessário algum tratamento para aliviá-las. Por isso, cabe aqui um estudo sobre a relação entre o acúmulo destas tensões e o tempo de vida de um material compósito fabricado com a matriz e o fio aqui apresentados. Outro estudo que pode ser executado é o levantamento da composição química na superfície do fio para identificar os elementos necessários para a compatibilidade com o polímero que forma a matriz do compósito. Relacionar a topografia da superfície do fio com a resistência alcançada para o arrancamento também é interessante para estudar o efeito da alteração da granulometria da lixa na adesão utilizando lixas diferentes.

Observando a Figura 4.9, as curvas de tendência para as forças apresentaram um ponto de máximo, o que pode indicar a existência de um comprimento ótimo para o embutimento. CALLISTER, (2012) aponta que este comprimento está situado entre 20 e 150 vezes o diâmetro da fibra e que para fibras de vidro e de carbono este comprimento é aproximadamente 1 mm. Experimentos com valores de profundidade próximos de 2 mm podem confirmar esta hipótese.

Entre as resinas epóxi apresentadas a que apresentou melhor desempenho na adesão independentemente do lixamento foi a Araldite LY 5052 por causa da maior relação alcançada entre a tensão de cisalhamento para o arrancamento e o comprimento embutido real dos fios. Como sugestão para trabalhos futuros mostra-se interessante o levantamento da força de adesão do fio de SMA com outras matrizes poliméricas.

Capítulo 6

Referências bibliográficas

ABBOUDI, Jacob; "The response of shape memory alloy composites", **Smart Materials and Structures**, v. 6, n. 1, pp. 1-9, Oct. 1997.

AGUIAR, Ricardo Alexandre Amar de; **Análise da redução de vibrações em sistemas mecânicos utilizando ligas com memória de forma**, Tese para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

ANTICO, F. C.; ZAVATTIERI, P. D. ; HECTOR JR., L. G.; MANCE, A; RODGER, W. R. ; OKANSKI, D. A.; "Adhesion of nickel-titanium shape alloy wires to thermoplastic materials: theory and experiments", **Smart Materials and Structures**, v. 21, n. 3, pp. 35-22, Feb. 2012.

AQUINO, Alberdan Santiago de; BORGES, Jader Morais; IRMÃO, Marcos Antônio da Silva; SILVA, Antônio Almeida; "Controle de vibrações mecânica utilizando propriedades das ligas com memória de forma", In: **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Campina Grande, PB, Ago. 2015.

BANEA, M. D.; DA SILVA, L. F. M.; "Adhesively bonded joints in composite materials: An overview", **SAGE Journals**, v. 223, n. 1, pp. 1-18, Jan. 2009.

BANEA, M.D.; DA SILVA, L. F. M.; CAMPILHO, R. D. S. G.; "Mode I fracture toughness of adhesively bonded joints as a function of temperature: Experimental and numerical study", **International Journal of Adhesion and Adhesives**, n. 31, pp. 273-279, Feb. 2015.

BUTERA, Francesco; **SMA's for Industrial applications from first NITINOL to a big success**: SAES Group, 18 de novembro de 2013. Disponível em:<<https://www.saesgetters.com/sites/default/files/Presentation%20by%20F.%20Butera%20SAES%20Group.pdf>>. Acesso em: 23 de julho de 2017.

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8ª Ed. John Wiley & Sons, Inc., 2012.

CASTILHO, Weimar S.; **Caracterização termomecânica de Compósitos Híbridos com memória de forma**, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

DANIEL, Isaac M.; **Engineering Mechanics of Composite Materials**, 1st. New York, Oxford, 1994.

HALE, Justin; "Boeing 787 from the Ground Up", **Boeing Aero Magazine**, v. 24, n. Quarter- 4, pp. 17-23, . 2006.

HARTL, D.J.; LAGOUDAS, D.C.; "Introduction to Shape Memory Alloys". In: Dimitris C, LAGOUDAS, **Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications, 1, Thermomechanical Characterization of Shape**, Texas, USA, Springer, 2008.

HUNTSMAN. **Araldite® LY 5052, Aradur™ 5052- Sistema de epóxi de cura a frio para laminação.** Disponível em <http://www.maxepoxi.com.br/pdf/araldite_ly5052_aradur_5052_portugues_2010.pdf>. Acesso em 18 de agosto 2017.

JIA, Y.Y.; YAN, W.; H. Y., Liu; "Numerical Study on Carbon Fibre PullOut using a Cohesive Zone Model", In: **18TH International Conference on Composite Materials**, pp. 1-6, Korea, Aug. 2011.

JIN, H.; DONG, E.; XU, M.; LIU, C.; ALICI, G.; JIE, Y.; "Soft and smart modular structures actuated by shape memory alloy (SMA) wires as tentacles of soft robots." **Smart Materials and Structures**, v. 25, 10pp, Jul. 2016.

JIN M., CHENS.H. "Mode-I Crack Control by SMA Fiber with a Special ConFiguration." In: Tamin M. (eds) **Damage and Fracture of Composite Materials and Structures**. Advanced Structured Materials, vol 17. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002.

JUNG, Beom-Seok; KIM, Min- Saeng; KIM, Ji- Soo; KIM, Yun-Mi; LEE, Woo-Yong; AHN, Sung- Hoon; "Fabrication of a smart air intake structure using shape memory alloy wire embedded", **Physica Scripta**, v. 2010, n. T139, pp. 14-42, May. 2010.

KELLY, A; TYSON, W.R. "Fiber Strengthened Materials." In: Zackay, V.F., Ed., **High Strength Materials**, John Wiley & Sons Inc., New York, 578-583, 1965.

KOREANSCHI, Andreea; GABOR, Oliviu S.; ACOTTO, Joran; BRIANCHON, Guillaume; PORTIER, Gregoire; BOTEZ, Ruxandra; M MAMOU, Mahmoud; MEBARKI, Youssef; "Optimization and design of an aircraft's morphing wing-tip demonstrator for drag reduction at low speeds, Part II - Experimental validation using Infra-Red transition measurement from Wind Tunnel tests", **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 30, n. 1, pp. 164-174, Feb. 2017.

KUMAR, P.K.; LAGOUDAS, D.C.; "Introduction to Shape Memory Alloys". In: Dimitris C, LAGOUDAS, **Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications**, 1, Introduction to Shape Memory Alloys, Texas, USA, Springer, 2008.

LA CAVA, Carlos Americo P. L.; SILVA, Eduardo P.; MACHADO, Luciano G.; **Modelagem de dispositivos mecânicos fabricados de ligas com memória de forma**, Trabalho de Conclusão de Curso para o título de Bacharel em Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, RJ, 1999.

LESTER, Brian T.; BAXEVANIS, Theocharis; CHEMISKY, Yves; LAGOUDAS, Dimitris C.; "Review and perspectives: shape memory alloy composite systems", **Acta Mechanica**, v. 226, n. 12, pp. 3907-3960, Dec. 2015.

LIMA, Rosemere de Araújo Alves; **Monitoramento estrutural de pás de rotores de helicópteros através da utilização de materiais inteligentes**, Trabalho de Conclusão de Curso para o título de Bacharel em Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

MARINE COMPOSITES. *Sistema de resina AR 260 e AH 260 Datasheet*. Disponível em <http://www.marinecomposites.com.br/wp-content/uploads/datasheets/resina_epoxy_ar260.pdf>. Acesso em 14 de abril de 2017.

MERLIN, Marttia; SCOPONI, Martina; SOFFRITTI, Chiara; FORTINI, Annalisa; RIZZONI, Raffaella; GARAGNANI, Gian Luca; "On the improved adhesion of NiTi wires embedded in polyester and vinylester resins", **FratturaedIntegritàStrutturale**, n.

31, pp. 127-137 Cassino (FR) Italia, Jan. 2015.

MIRAMINI, A.; KADKHODAEI, M.; ALIPOUR, A.; MASHAYEKHI, M.; "Analysis of interfacial debonding in shape memory alloy wire-reinforced composites", **Smart Materials and Structures**, v. 25, n. 1, pp. 15-36, Jan. 2016.

MOHD, Jaronie J.; LEARY, M.; SUBIC, A.; GIBSON, Mark A.; "A review of shape memory alloy research, applications and opportunities." **Materials and Design**, v. 56, pp. 1078-1113. 2014

MONTEIRO, Sergio N.; D'ALMEIDA, José Roberto M.; "Ensaio de Pullout em Fibras Lignocelulósicas- Uma Metodologia de Análise", **Revista Matéria**, v. 11, n. 3, pp. 189-196. 2006.

MORGAN, N. B.; "Medical shape memory alloy applications - the market and its products", **Material Science & Engineering A**, n. 378, pp. 16-23, Oct. 2004.

NAGHASHIAN, S; FOX, B. L.; BARNETT, M. R. ; "Actuation curvature limits for a composite beam embedded shape memory alloy wires", **Smart Materials and Structures**, v. 23, n. 6, pp. 65-72, Apr. 2014.

PESSANHA, Everton M. R. ; **Análise de estrutura e propriedades da liga TiNi com o efeito de memória de forma sujeita a tratamentos térmicos e deformação**, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, 2012.

POON, Chi-kin; LAU, Kin-tak; ZHOU, Li-min; "Design of Pullout stresses for prestrained SMA wire/polymer hybrid composites", **Science Direct**, v. Composites: Part B, n. 36, pp. 25-31, Apr. 2005.

REIS, Widson P.; **Caracterização de Ligas de Níquel – Titânio para Ortodontia**, Tese de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2001.

RODRIGUE, Hugo; WANG, Wei; BHANDARI, Binayak; HAN, Min-Woo; AHN, Sung-Hoon; "Cross-Shaped Twisting Structure Using SMA-Based Smart Soft Composite", **INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-GREEN TECHNOLOGY**, v. 1, n. 2, pp. 153-156, apr.

2014.

SHAW, J.A., KYRIADES, S., "Thermomechanical Aspects of Ni-Ti", **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 43, n. 8, pp. 1243-1281, 1995.

SANUSI, Kazeem O.; AYODELE, Olukayode L.; KHAN, Mohamed T. E.; "A concise review of the applications of NiTi shape-memory alloys in composite materials", **South Africa Journal of Science**, v. 110, n. 7/8, pp. 1-5, Jul-Aug. 2014.

SICHINA, W. J.; **DSC Characterization of Shape Memory Metal Alloys**. In: Thermal Analysis application note. Norwalk, USA: PerkinElmerTM instruments, 2000. Disponível em: < <http://r19club.com/mecanica/problemas-no-sensor-de-rotacao/>>. Acesso em: 05 de agosto de 2017.

SCHROOTEN, Jan; MICHAUD, Véronique; PARTHENIOS, John; PSARRAS, Georgios C.; GALIOTIS, Costas; GOTTHARDT, Rolf; MANSON, Jan-Anders; VAN HUMBEECK, Jan; "Progress on composites with embedded shape memory alloy wires", **Materials Transactions**, v. 43, n. 5, pp. 961-973, Feb. 2002.

SILVA, Karla C. A. da; **Caracterização de compósitos de matriz polimérica com ligas com memória de forma para aplicação em microatuadores**, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2013.

SPILLER, ANDRÉ LUÍS; **Modelamento da propagação de trinca: aplicado a compósito particulado de matriz termofixa empregado como guarnição de freio**, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2012.

VAN HUMBEECK, J.; CHANDRASEKARAN, M.; DELAEY, L.; "Shape memory alloys: materials in action", **Endeavour**, v. 15, n. 4, pp. 148-154, 1991.

ZAK, A. J.; CARTMELL, M. P.; OSTACHOWICZ, W. M.; WIERCIGROCH, M.; "One-dimensional shape memory alloy models for use with reinforced composite structures", **Smart Materials and Structures**, v. 12, n. 3, pp. 338-346, Apr. 2003.

ANEXO A: Ficha técnica da resina AR-260

Propriedades Mecânicas

Propriedade	Teste	Unidade	Valor
Cor	Visual	-	Âmbar claro
Dureza Shore D	ASTM D-2240	-	87
Resistência à tração	ASTM D-638	MPa	73,77
Módulo de tração	ASTM D-638	MPa	3157,80
Resistência ao alongamento	ASTM D-638	%	8,8
Resistência à compressão	ASTM D-695	MPa	88,94
Resistência à flexão	ASTM D-790	MPa	199,28
Módulo de flexão	ASTM D-790	MPa	2737,22
HDT - Cura a temperatura ambiente	ASTM D-648	°C	58
HDT - Temperatura de pós-cura	ASTM D-648	°C	98
Impacto Izod, com entalhe	ASTM D-256	kJ/m ²	2,67
Contração	ASTM D-2566	mm/mm	<0,002

Propriedades de Manuseio

Propriedade	Teste	Unidade	Valor
Densidade da Resina	ASTM E-201	Kg/m ³	1150,33
Densidade do endurecedor	ASTM E-201	Kg/m ³	946,63
Viscosidade da Resina a 25°C	ASTM D-2393	cps	1200
Viscosidade do Endurecedor a 25°C	ASTM D-2393	cps	30
Viscosidade Mista a 25°C	ASTM D-2393	cps	300
Viscosidade Mista a 49°C	ASTM D-2393	cps	140
Taxa de mistura por peso (100 A)	Calculado	-	100A : 26B
Gel time a 25°C (150g massa)	ASTM D-2471	minutos	290
Pot life a 25°C (150g massa)	ASTM D-2471	minutos	120

ANEXO B: Ficha técnica de resina Araldite LY 5052

Advanced Materials



Araldite® LY 5052 Aradur™ 5052

Sistema epóxi de cura a frio para laminação

Aplicações O sistema epóxi Araldite LY 5052 / ARADUR 5052 foi especialmente desenvolvido para atender as seguintes aplicações na construção de:

- aviões (aprovado pela LBA - Deutschen Luftfahrt-Bundesamt)
- veículos
- barcos
- equipamentos esportivos
- componentes industriais

Propriedades Seu fácil manuseio e sua versatilidade atendem aos diversos tipos de processo de fabricação como:

- Laminação manual
- RTM (Resin transfer moulding)
- Moldagem por pressão
- Injeção a vácuo
- Spray-up
- Filament Winding

O produto tem perfeita compatibilidade com diversos tipos de cargas e fibras como vidro, carbono, kevlar e fibras naturais.

Características Por ser um conjunto de trabalho especialmente desenvolvido para laminação, não necessita acertos de viscosidade e tixotropia, permitindo assim laminação horizontal e vertical apresentando excelente molhabilidade e impregnação, obtendo peças acabadas com alta resistência química e mecânica tão exigida na indústria náutica e aeronáutica, podendo ser tanto curado a frio como em estufas.

Dados Típicos **Araldite LY 5052 - Resina epóxi modificada**

Aspecto	líquido claro
Cor (Gardner)	≤ 2
Densidade a 25°C	1,16 - 1,18 g/cm ³
Viscosidade a 25°C	1000 - 1500 mPas
Teor Epóxi	6,65 - 6,85 Eq/kg

Aradur 5052

Aspecto	líquido claro
Cor (Gardner)	≤ 4
Densidade a 25°C	0,93 - 0,95
Viscosidade a 25°C	40 - 60 mPas
Teor de Amina	9,60 - 9,80 Eq/kg

Proporção de Mistura

Componentes	Partes em peso (g)	Partes em volume (ml)
Araldite LY 5052	100	100
Aradur 5052	38	47

Recomendamos que as proporções acima sejam rigorosamente respeitadas . A não observância da mesma terá como prejuízo a não obtenção das propriedades almejadas.

Viscosidade Inicial (mPas)

a 18 °C	1150 - 1350
a 25 °C	600 - 700
a 40 °C	200 - 250

Tempo de uso da mistura em 100 gramas

a 18 °C	280 - 320 min
a 25 °C	220 - 260 min
a 40 °C	45 - 55 min

Os valores acima representam misturas dos produtos puros. A inclusão de cargas ou fibras poderá modificar significativamente o tempo de uso.

Ciclo de Cura

Cura	Pós-Cura
8 - 16 horas a 25 °C	7 dias a 25 °C
4 - 8 horas a 40 °C	15 horas a 50 °C
1 - 2 horas a 60 °C	2 - 10 horas a 80 °C

O processo de pós cura é fundamental para atingir a totalidade das resistências bem como estabilidade dimensional, contração, etc, da peça confeccionada.

Transição Vitrea (TMA)

Cura	TG
7 dias a 25 °C	62 - 66 °C
1 dia a 25 °C + 20 horas a 40 °C	74 - 80 °C
1 dia a 25 °C + 15 horas a 60 °C	96 - 106 °C
1 dia a 25 °C + 4 horas a 100 °C	124 - 136 °C

**Resistências
Mecânicas**

Testes	7 dias ambiente	15 horas à 50 °C	8 horas à 80°C
Resistência a Tração (N/mm ²)	49 - 71	82 - 86	84 - 86
Resistência a Tração até a ruptura (N/mm ²)	49 - 71	80 - 83	80 - 84
Resistência a Flexão (N/mm ²)		126 - 128	118 - 121
Alongamento até a quebra (%)		9,4 - 11,1	8,5 - 13,4
Absorção de água (%)	0,70 - 0,80		0,65 - 0,70
Resistência a Flexão (N/mm ²) - corpo de prova de 16 camadas (4mm) de tecido de vidro (280 - 300 g/m ²) conteúdo de 45% de fibra.			440 - 490
Resistência a Tração (N/mm ²) - corpo de prova de 16 camadas (4mm) de tecido de vidro (280 - 300 g/m ²) conteúdo de 45% de fibra.			360 - 390
Idem o acima após 30 dias em H ₂ O a 23 °C			380 - 400