



**Carlos Miguel Teixeira Simões**

Licenciado em Engenharia Civil

## **Aplicações de ligas com memória de forma como sensores em Engenharia Civil**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil – Estruturas e Geotecnia

Orientador: Professor Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Ildi Cismasiu

Arguente: Prof. Doutor Eduardo Soares Ribeiro Cavaco

Vogal: Prof. Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

[Setembro de 2015]



Copyright © [Carlos Miguel Teixeira Simões], FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador de mestrado, Professor Doutor Filipe Santos por toda a colaboração, compreensão e paciência demonstradas e pelos conhecimentos transmitidos, essenciais na realização deste trabalho.

Gostaria de deixar um agradecimento à minha família, aos meus pais e à minha irmã, o apoio, a motivação e o acompanhamento no decorrer do meu percurso académico, partilhando bons momentos mas também momentos difíceis, onde a sua ajuda foi crucial para ultrapassá-los e atingir os meus objetivos.

Aos meus amigos e colegas, presentes durante a elaboração deste trabalho, agradeço a partilha de conhecimentos, a motivação dada e toda a ajuda e colaboração que prestaram para a concretização desta dissertação.

Por fim, agradeço à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pelos equipamentos e materiais disponibilizados, essenciais para a realização desta dissertação.



# Resumo

A presente dissertação procura mostrar o potencial da utilização de ligas com memória de forma, como sensores, nas técnicas de monitorização de estruturas, ao nível da deteção, localização e caracterização de dano.

O motivo de recorrer a este tipo de material, deve-se às suas propriedades particulares. Entre estas, destacam-se a superelasticidade e o efeito de memória de forma, com variadas aplicações em estruturas de Engenharia Civil.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi explorada a superelasticidade do material. Através desta propriedade, o material recupera a sua forma inicial, após o carregamento aplicado findar, permitindo assim recuperar de deformações elásticas até cerca de 8%.

O trabalho desenvolvido passou por criar um modelo à escala reduzida, semelhante a uma viga, composto por quatro elementos sendo que a ligação das mesmas pretende simular o aparecimento de fendas, aquando um carregamento. Ao longo do modelo é colocada uma liga com memória de forma servindo de sensor. Para controlo do modelo foi desenvolvido um programa de controlo recorrendo ao software *Labview*. Para efetuar a caracterização de dano, foi necessário executar ensaios preliminares de carga(tracção)/descarga numa liga com memória de forma de comprimento estabelecido, obtendo a relação entre a resistência elétrica e a extensão. Após a sua instrumentação, foi aplicado um carregamento incremental e distribuído no modelo. Através da análise dos resultados extraídos do modelo experimental foi possível localizar e caracterizar o dano ao longo do modelo desenvolvido.

## Palavras-Chave:

Deteção de dano, liga com memória de forma, sensor, superelasticidade, *virtual interface*, resistência elétrica.



# Abstract

The purpose of this research is to show the potential of using shape memory alloy techniques to monitor structures. Furthermore the type of systems studied in the present work can also be used to locate and characterize any structural damage.

Moreover, the use of this kind of material is especially attractive due to the fact that its mechanical properties, such as memory shape and superelasticity, are particularly useful in civil engineering structures.

In this research has been explored the superelasticity properties of the shape memory alloys. Due to superelasticity the material can return to its original shape after elastic deformations up to 8%. Since almost all materials used in construction cannot reach those values preserving their elastic properties, it would be highly advantageous to apply them to current structures.

The main work of this research was based on an experimental study of a beam with four elements joined by springs. Those sections pretend to simulate fissures in the beam. Along the beam model it was installed a shape memory alloy and, afterwards, an incremental load was applied. The shape memory alloy functions like a sensor to all deformations occurred during the incremental load, and, therefore, it is possible to monitor the structure. The model was controlled by a virtual instrument created on the software labview. It was necessary to make a preliminary experimental evaluation of stress/strain properties. Lastly, and with the knowledge acquired previously, the beam was submitted to the incremental load and it was possible to locate and describe the type of damage present in the model.

## **Key-words:**

Damage detection, shape memory alloy, sensor, superelasticity, virtual interface, electric resistance.



# Índice de Matérias

<b>Copyright</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>v</b>
<b>Resumo</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de abreviaturas, siglas e símbolos</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento geral.....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Organização da dissertação .....	2
<b>2 LMF como transdutores de deslocamento .....</b>	<b>5</b>
2.1 Monitorização e caracterização de dano em estruturas .....	5
2.2 Introdução às LMF .....	5
2.3 Propriedades - Fases.....	6
2.3.1 Transformação Martensítica.....	6
2.3.2 Superelasticidade e efeito de memória de forma.....	8
2.4 Relação resistividade-extensão de LMF.....	9
2.5 Estado de Arte .....	10
<b>3 Caracterização da relação entre extensão e resistividade e ensaio exploratório .....</b>	<b>17</b>
3.1 Objetivos .....	17
3.2 Material e Instrumentação .....	17
3.2.1 Ensaio com extensões crescentes .....	17
3.2.2 Ensaio de provete e betão .....	19
3.3 Procedimento experimental.....	20
3.3.1 Ensaio com extensões crescentes .....	20
3.3.2 Ensaio de provete e betão .....	20
3.4 Resultados .....	21
3.4.1 Ensaio com extensões crescentes .....	21

3.4.2	Ensaio de provete e betão .....	26
<b>4</b>	<b>Desenvolvimento do protótipo experimental .....</b>	<b>29</b>
4.1	Objetivos .....	29
4.2	Material e Instrumentação .....	29
4.2.1	VI em <i>Labview</i> - Elaboração.....	32
4.2.2	Circuito elétrico - Descrição.....	36
4.3	Procedimento experimental .....	39
4.4	Resultados .....	40
<b>5</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>45</b>
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>47</b>
	<b>Anexos .....</b>	<b>49</b>
	Anexo A – Restantes resultados dos ensaios cíclicos .....	49

# Índice de Figuras

Figura 2.1 - Transformações de fase e respetivas estruturas atómicas (Pereira, 2011) .....	7
Figura 2.2 - Ciclo de alternância de fases (adaptado de Santos, 2011) .....	8
Figura 2.3- Variação da resistividade elétrica durante 3 ciclos consecutivos de carga/descarga para uma liga Ni-Ti rica em Ti: (a) sobreposição com curva tensão-extensão, (b) resistividade elétrica e extensão em função do tempo (Fernandes et al., 2010) .....	9
Figura 2.4- Esquema do princípio funcional dos sensores FBG: (a) Fiber Bragg Grating; (b) espectro de luz de entrada; (c) espectro de luz transmitida; (d) espectro de luz refletida (C. Rodrigues et al., 2010) .....	11
Figura 2.5- Transdutor de deformação instalado para ser embebido no betão (C. Rodrigues et al., 2010).....	11
Figura 2.6- Sensor de grande dimensão com suportes para aplicação numa superfície (Schulz et al., 2001) .....	11
Figura 2.7 – Modelo matemático uniforme (Cui et al., 2010).....	12
Figura 2.8- Comparação entre os resultados numéricos e os resultados experimentais (Cui et al., 2010) .....	13
Figura 2.9 – Taxa de variação entre a resistência-tensão-deformação de LMF NiTi, para deformação de 3% e 5% (Li et al., 2005).....	14
Figura 2.10 – Efeito reparador antes de fendilhar (Li et al., 2005) .....	14
Figura 2.11 - Efeito reparador depois de fendilhar (Li et al., 2005).....	15
Figura 3.1 – Máquina de tração universal Zwick/Roell Z050, equipamento de aquisição de dados NI-PXI-1052, laser de controlo de distâncias Baumer e a uma LMF .....	18
Figura 3.2 – Pormenor de instrumentação do equipamento .....	18
Figura 3.3 - Pormenor de instrumentação do equipamento, vista lateral .....	19
Figura 3.4 – Provede de betão com fibras de aço e LMF fixada.....	20
Figura 3.5 – Ensaio de flexão e ligação de multímetro à LMF .....	21
Figura 3.6 – Curva de tensão-deformação esquemática ( Rodrigues, 2014) .....	21
Figura 3.7- Caracterização de resistência elétrica em ensaio de tração/compressão .....	22
Figura 3.8- Gráfico de resistência elétrica-extensão, sob ensaio de tração/compressão .....	22
Figura 3.9- Primeiro ciclo de ensaio tração/compressão, com extensão do material igual a 4% .....	23
Figura 3.10- Segundo ciclo de ensaio tração/compressão, com extensão do material igual a 4% .....	23
Figura 3.11- Terceiro ciclo de ensaio tração/compressão, com extensão do material igual a 4% .....	23
Figura 3.12- Quarto ciclo de ensaio tração/compressão, com extensão do material igual a 4% .....	24
Figura 3.13- Quinto ciclo de ensaio tração/compressão, com extensão do material igual a 4% .....	24
Figura 3.14 – Sétimo ciclo de ensaio tração/compressão, com extensão do material igual a 7% .....	25
Figura 3.15 – Provede fendilhado com LMF .....	26
Figura 4.3 – Vista geral do modelo experimental .....	30
Figura 4.4– Vista frontal do modelo à escala reduzida .....	30
Figura 4.5 – Corte transversal A-A do modelo .....	31
Figura 4.6 – Vista em planta do pormenor de ligação liga-parafuso adaptado-placa de MDF e Vista em corte do pormenor de ligação liga-parafuso adaptado-placa de MDF.....	31
Figura 4.7– Equipamento para ensaio. Aquisição de dados NI-PXI-1052, circuito elétrico e multímetro .....	32
Figura 4.8- Fluxograma do algoritmo de varrimento sequencial .....	34

Figura 4.9- Painel Frontal do algoritmo desenvolvido .....	35
Figura 4.10- Diagrama de Blocos do algoritmo desenvolvido .....	35
Figura 4.11 – Esquema do circuito elétrico.....	37
Figura 4.12 – Placa de Circuitos (breadboard) com ligações aos três canais de leitura, ligação ao multímetro e ligação ao modelo.....	37
Figura 4.13– Perfil longitudinal do Modelo.....	38
Figura 4.14 – Pormenor de mola aplicada com LMF.....	38
Figura 4.15 – Pormenor de parafuso (cerra-cabos) .....	39
Figura 4.16 – Viga pronta para ensaio .....	40
Figura 4.17 – Viga com um quilograma aplicado em cada placa.....	40
Figura 4.18 - Viga com cinco quilogramas aplicados em cada placa.....	40
Figura 4.19 - Sobreposição de resultados de ensaio de carregamento incremental e distribuído para fenda a meio vão do modelo experimental com ensaio de resistividade-extensão .....	41
Figura 4.20 - Sobreposição de resultados de ensaio de carregamento incremental e distribuído para fendas a 1/4 de vão do modelo experimental com ensaio de resistividade-extensão.....	41

# Lista de Tabelas

Tabela 4.1- Leitura de resistividade elétrica e extensão para o troço a meio vão da LMF, através de paquímetro.....	42
Tabela 4.2 - Leitura de resistividade elétrica e extensão para o troço a meio vão da LMF, através de equação que caracteriza a extensão .....	43
Tabela 4.3 - Leitura de resistividade elétrica e extensão para o troço a 1/4 de vão da LMF, através de paquímetro.....	43
Tabela 4.4 - Leitura de resistividade elétrica e extensão para o troço a 1/4 de vão da LMF, através de equação que caracteriza a extensão .....	43
Tabela 4.5 – Erro relativo percentual de extensões para o troço a meio vão da LMF.....	44
Tabela 4.6 – Erro relativo percentual de extensões para o troço a 1/4 de vão da LMF.....	44



# Lista de Abreviaturas, siglas e símbolos

## Abreviaturas e Siglas

**A** - Área;

**A<sub>f</sub>** - Temperatura do final da fase austenítica;

**A<sub>s</sub>** - Temperatura de início da fase austenítica;

**cm** - centímetros;

**L** - Comprimento;

**M<sub>f</sub>** - Temperatura do final da fase martensítica;

**MIE** - Monitorização da integridade estrutural;

**mm** - milímetros;

**MPa** - Mega Pascal;

**M<sub>s</sub>** - Temperatura de início da fase martensítica;

**°C** - grau Celsius;

**R** - Resistência elétrica;

**s** - segundos;

**T** - Temperatura;

**LMF** - Liga com Memória de Forma

**NI** - *National Instruments*

**NiTi** - Níquel e Titânio (Nitinol)

**SMA** - *Shape Memory Alloys*

**VI** - *Virtual Interface*

# Símbolos

$\epsilon$  – Deformação;

$\rho$  – Resistividade elétrica

$\sigma$  – Tensão;

$\Omega$  - Ohm;

# **1 Introdução**

## **1.1 Enquadramento geral**

No decorrer dos tempos, com o objetivo de fazer face a ações naturais e humanas, os engenheiros civis tendem a conceber estruturas que sejam cada vez mais seguras e funcionais.

Os avanços da engenharia nas últimas décadas foram, inevitavelmente, acompanhados pela crescente necessidade de desenvolver sistemas de monitorização de desempenho, que assegurem o bom funcionamento das estruturas durante o seu período de vida útil. Por norma, os sistemas estruturais vigentes são concebidos para lidarem com diversos tipos de solicitações estáticas e dinâmicas, permanentes ou variáveis, que, a seu tempo, podem danificar elementos da estrutura (Guerreiro, 2014).

No desenvolvimento de técnicas para monitorizar estruturas, existe uma crescente tendência para instalar sensores nas mesmas com a finalidade de caracterizar, em tempo real, o estado de integridade estrutural. Estes recursos de deteção de dano automatizados, promovem uma evolução na monitorização de estruturas de engenharia civil, reduzindo o trabalho despendido, minimizando o envolvimento humano, reduzindo o tempo de inatividade e os erros.

Os sistemas de monitorização da integridade estrutural (MIE) são constituídos por sensores montados numa estrutura cujas leituras são comunicadas a repositórios de dados centralizados, onde estes são armazenados e processados. Os requisitos associados aos dispositivos de monitorização devem proporcionar, ao utilizador: alta resolução, elevada gama de leituras, baixo custo, boa fiabilidade e capacidade de operação remota.

Com auxílio de sensores a deteção de dano em estruturas torna-se possível. Um bom método de deteção de dano é o que é capaz de identificar rapidamente a sua ocorrência, localização, estimar a sua gravidade e prever a restante vida útil da estrutura (Guerreiro, 2014).

Neste documento é apresentado um método de deteção de dano, onde são utilizadas ligas com memória de forma fixadas num modelo à escala reduzida. Com este uso, as ligas com memória de forma, tornam-se num sensor, em que a alteração das suas propriedades elétricas permite estabelecer alterações no estado original da estrutura.

O material em estudo tem a capacidade de suportar extensões muito significativas, sem sofrer quaisquer danos, mantendo uma alta resolução. Com base nesta característica, as LMF são aplicáveis na avaliação estrutural associada a eventos muito condicionantes, que possam conduzir a extensões muito significativas nos materiais.

## **1.2 Objetivos**

A presente dissertação tem como principal objetivo o estudo do comportamento de uma liga com memória de forma, sob efeito de um carregamento incremental e distribuído aplicado num modelo experimental, a monitorização do mesmo e quantificá-lo quanto ao dano.

É também efetuado um modelo de elementos finitos recorrendo ao programa de cálculo automático SAP2000 de forma a estudar o comportamento do protótipo experimental.

É criado um protótipo de uma viga com quatro elementos ligados entre si por molas. Ao longo desta viga é fixada uma liga com memória de forma. A resistência elétrica do metal é lida em tempo real e ao longo dos vários troços, de modo consecutivo.

Com estas leituras, a viga é monitorizada, sendo possível estabelecer o valor de resistência elétrica associada a cada fenda. Durante o processo de monitorização, caso exista alteração no valor de resistência elétrica numa fenda, é detetado dano na viga. De modo a facilitar as leituras, é desenvolvido um VI em ambiente *Labview* da *National Instruments*.

Com o desenvolvimento deste documento é pretendido enquadrar as LMF nos requisitos da monitorização da integridade estrutural.

## **1.3 Organização da dissertação**

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos.

Neste primeiro capítulo pretendeu-se fazer uma introdução ao tema desta dissertação, dando a conhecer o enquadramento geral onde está inserida e os objetivos propostos para a mesma.

No segundo capítulo, as LMF são enquadradas na monitorização e caracterização do dano estrutural, são expostos e explicados os aspetos gerais ligados às ligas com memória de

forma, desde a sua descoberta, às suas propriedades particulares. Exemplos de utilização também são referidos neste capítulo.

No terceiro capítulo é abordado o *VI* desenvolvido e é elaborada uma descrição do circuito elétrico utilizado. Todos os componentes necessários às leituras de resistência elétrica e o seu modo de funcionamento foram detalhados.

No quarto capítulo, é descrito um pequeno ensaio de flexão sobre um provete de betão com fibras de aço, onde está acoplada uma LMF. Neste capítulo é testada a superelasticidade de uma LMF, através de ensaios de tração/compressão. A variação da resistência elétrica em função da extensão das LMF é avaliada.

No quinto capítulo, é apresentado o ensaio com um carregamento incremental aplicado no protótipo experimental desenvolvido.

No sexto capítulo, é efetuada a apresentação das principais conclusões resultantes da realização deste estudo, e são apresentadas algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.



## **2 LMF como transdutores de deslocamento**

### **2.1 Monitorização e caracterização de dano em estruturas**

Ligado às temáticas de monitorização de estruturas, deteção de dano e sensores em estruturas de Engenharia Civil, existe já uma vasta investigação conhecida. Estes temas têm vindo a assumir um papel cada vez mais relevante na área de engenharia de estruturas.

O desenvolvimento de técnicas de caracterização e avaliação do desempenho e fiabilidade de estruturas durante o seu ciclo de vida em serviço constitui, do ponto de vista da engenharia, um papel fundamental na manutenção de recursos humanos e económicos. Nos últimos anos foram feitos vários avanços no desenvolvimento de técnicas de ensaio, tanto de carácter destrutivo como não destrutivo, essenciais no diagnóstico estrutural (Guerreiro, 2014).

A avaliação do desempenho estrutural por parte das técnicas não destrutivas requer a satisfação de requisitos como a deteção de defeitos/danos ou variação de propriedades nos elementos estruturais e estabelece uma hierarquia e quantificação dos defeitos ou características analisadas para, à posteriori, serem comparadas com valores limites ou de referência.

A existência de dano estrutural numa estrutura leva à alteração das propriedades das LMF. As LMF funcionam como transdutores de deformação da estrutura, com a finalidade de transmitir o dano estrutural.

### **2.2 Introdução às LMF**

As ligas de memória com forma, fazem parte do grupo dos materiais ditos inteligentes, entre os quais se encontram também os materiais piezocerâmicos, os fluídos magneto-reológicos (MR) e os fluídos electro-reológicos (ER) (Seelecke, 2002 *apud* Semião, 2010).

Estes materiais conseguem alterar a sua forma e propriedades por intermédio de estímulos externos, como por exemplo, variações de temperatura ou aplicação de tensões.

As LMF são uma classe única de metais que apresentam duas propriedades particulares: o efeito de memória de forma e a superelasticidade. O primeiro permite ao material recuperar a sua geometria original através de um ciclo térmico, depois de ter sido sujeito a deformação. A superelasticidade possibilita a LMF resistir a ciclos de carga e

descarga, sem ocorrência de tensões residuais, desenvolvendo uma histerese, que permite ao material dissipar energia. Estas propriedades combinadas com a sua elevada resistência, fazem das LMF uma tecnologia com vasta aplicação para a Engenharia Civil. A maioria destas aplicações estão ligadas a segurança anti-sísmica, devido à sua elevada capacidade de amortecimento e reposicionamento (Santos, 2011).

As primeiras observações do efeito de memória aconteceram em 1932 pelo físico Sueco Arne Ölander quando usou ligas AuCd (Ouro-Cádmio) (Otsuka, K. et al.,1998 *apud* Santos, 2011). Em 1938, Greninger e Mooradian observaram o aparecimento e desaparecimento da estrutura cristalina martensítica com o aumento e diminuição da temperatura de uma liga de CuZn (Cobre-Zinco) (Greninger, A. B. et al.,1938 *apud* Santos, 2011). As propriedades termoelásticas da fase martensítica de uma liga AuCd foram amplamente divulgadas por Kurdjumov e Khandros (1949) (Kurdjumov, G.V. et al. *apud* Santos, 2011), e mais tarde por Chang e Read, em (1951)(Chang, L. C. et al.,1951 *apud* Santos, 2011). Nos anos 60, no “Naval Ordnance Laboratory”, Buehler e Wiley descobriram o efeito de memória de forma numa liga de níquel e titânio, a qual denominaram de Nitinol. O Nitinol apresentava um grande potencial, mas devido à dificuldade no fabrico e processamento deste material, apenas nos anos 90, quando estas questões técnicas foram ultrapassadas, este material passou a ter uma maior divulgação. (Hodgson, D. E. et al. *apud* Santos, 2011).

Estas propriedades únicas das LMF têm proporcionado o seu uso nas mais diversas áreas, desde a indústria aeroespacial até à medicina (Desroches e Smith, 2003 *apud* Pereira, 2011).

## **2.3 Propriedades - Fases**

### **2.3.1 Transformação Martensítica**

A transformação martensítica, em LMF, ocorre no estado sólido. Durante esta transformação, os átomos de níquel e titânio exibem um movimento cooperativo, dando origem à alteração da sua estrutura cristalina. Nas LMF existem duas fases distintas de alternância interna de cristais: a fase austenítica e a fase martensítica. A troca de fase resulta da aplicação de um ciclo térmico ou da aplicação de tensões na LMF. Quanto ao ciclo térmico, é necessário recorrer a dois processos térmicos, um de aquecimento e outro de arrefecimento, como ilustra a

Figura 2.1. O aquecimento na LMF, proporciona a transformação cristalina, formando uma nova estrutura de cristais estável, conferindo às ligas a sua forma inicial.

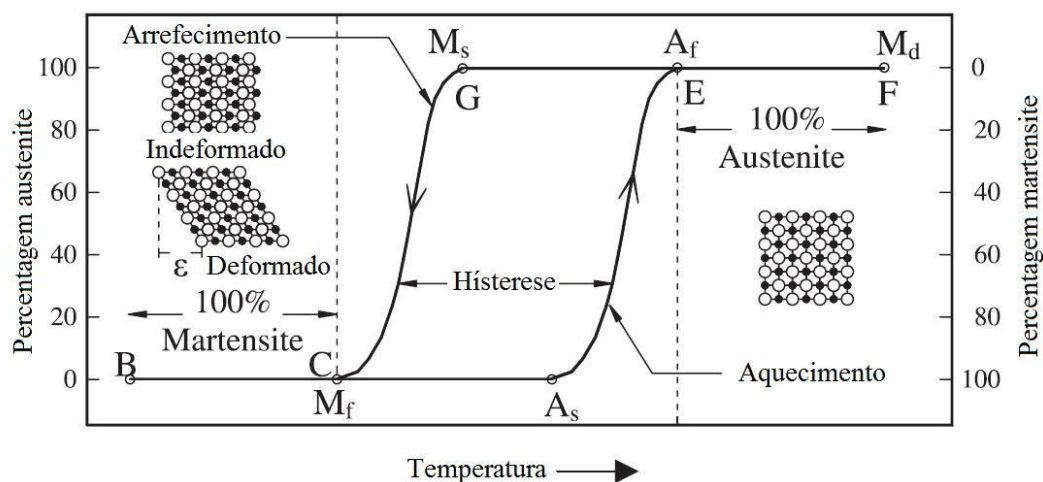


Figura 2.1 - Transformações de fase e respetivas estruturas atômicas (Pereira, 2011)

Ainda na figura 2.1 pode-se observar o gráfico que traduz a evolução da fração martensítica em função da temperatura, sem tensões aplicadas. Durante o aquecimento, o material percorre a curva inferior, onde a fase austenítica é iniciada quando se atinge a temperatura  $A_s$ . A fase austenítica estará completada assim que se atingir a temperatura  $A_f$ .

No arrefecimento, o processo térmico decorre na curva superior. Quando atingida a temperatura  $M_s$ , começa a transformação para a fase martensítica. Esta fase fica concluída quando atingida a temperatura  $M_f$ .

As temperaturas de transformação de fase e a forma das curvas são características de cada liga e variam conforme a sua composição química e tratamento térmico.

A transformação da martensite para austenite ocorre para temperaturas mais elevadas, do que a transformação da austenite para a martensite. A relação de curvas geradas pelos dois processos térmicos origina um fenómeno de histerese, que proporciona absorver energia à LMF, durante a transformação de fase. Com esta propriedade, este material tem grande capacidade de amortecimento, podendo ser utilizado em supressão de cargas dinâmicas.

### 2.3.2 Superelasticidade e efeito de memória de forma

As LMF apresentam propriedades interessantes nomeadamente, uma grande capacidade de deformação, permitindo extensões até 8% sem deformações residuais, excelente resposta a ações repetitivas, ou seja, não apresenta problemas relativos a fadiga, apresenta uma variação do módulo de elasticidade em função da transformação de fase e, as duas características mais importantes: efeito de memória de forma e a superelasticidade.

Quando as LMF, na fase martensítica, são sujeitas a um carregamento sendo depois descarregadas, verifica-se a presença de deformação residual (Figura 2.3). No entanto, quando o material é aquecido acima de  $A_f$ , o cristal sofre uma transformação martensítica inversa retomando a forma correspondente à austenite. Este fenómeno, designado por efeito de memória de forma, permite que o material recupere a sua forma original (Reynolds, 2003 *apud* Amaral, 2014).

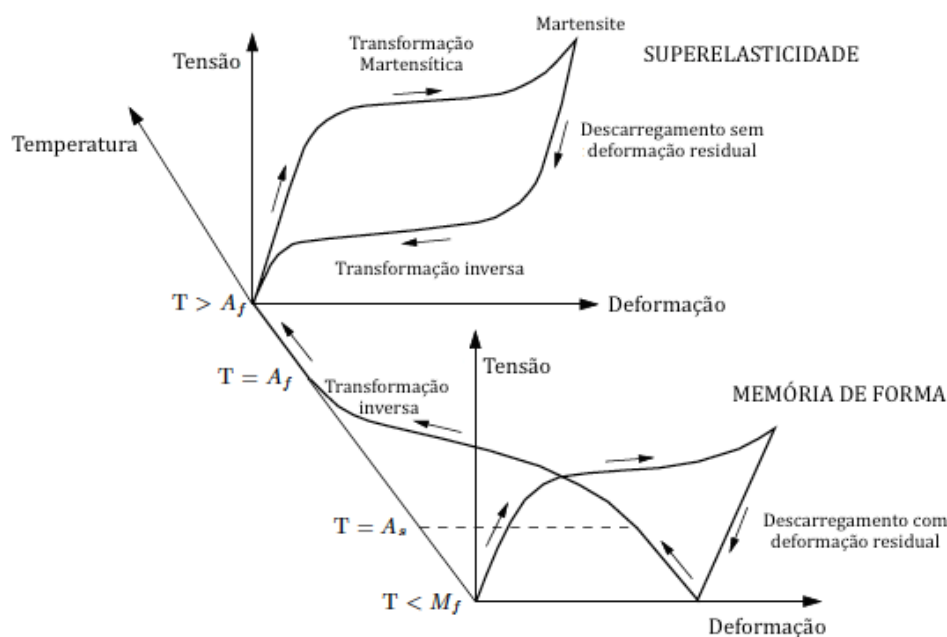


Figura 2.2 - Ciclo de alternância de fases (adaptado de Santos, 2011)

A transformação de fase, também pode ser obtida com aplicação de tensões no material, em oposição à transformação induzida por temperatura. Esta transformação ocorre na fase de alta temperatura, onde a austenite corresponde ao estado estável do material (Figura 2.2). Na fase austenítica, as LMF sofrem uma transformação martensítica quando são sujeitas

a tensões. Ao retirar a carga o material recupera completamente a sua forma inicial, ou seja, sem sofrer deformações residuais. Este efeito é representado através de uma curva diferente daquela que percorreu durante o carregamento (Figura 2.2). Este processo, é caracterizado por uma capacidade de absorção de energia, designado por superelasticidade (Song et al., 2006 *apud* Amaral, 2014).

## 2.4 Relação resistividade-extensão de LMF

A relação resistividade-extensão de LMF é uma propriedade bastante útil na temática de sensores de estruturas, com o objetivo de caracterizar o dano estrutural.

As diferentes transformações de fase, estão associadas a variações de resistividade elétrica. Em transformações termicamente induzidas, no arrefecimento, existe diminuição de resistividade, para a transformação de austenite em martensite. Na transformação em sentido inverso (aquecimento), a variação de resistividade elétrica é inversa à referida. Na transformação induzida por deformação, a resistividade elétrica aumenta aquando da transformação de austenite em martensite e diminui para a transformação inversa. Esta variação da resistividade elétrica em função da extensão é aproximadamente linear (Figura 2.3) o que viabiliza a monitorização de grandes deformações (até cerca de 10% de extensão) (Fernandes, Mahesh, Gaspar, & Moldovan, 2010).

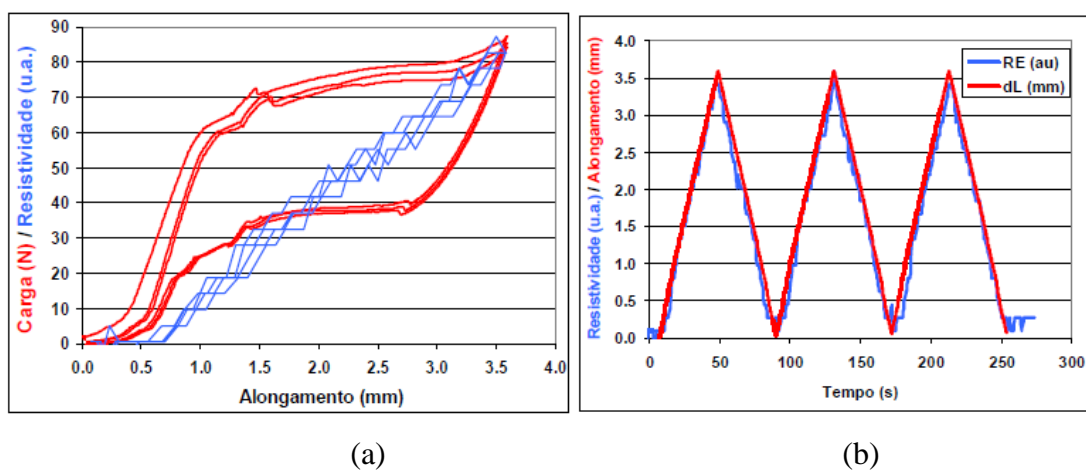


Figura 2.3- Variação da resistividade elétrica durante 3 ciclos consecutivos de carga/descarga para uma liga Ni-Ti rica em Ti: (a) sobreposição com curva tensão-extensão, (b) resistividade elétrica e extensão em função do tempo (Fernandes et al., 2010)

Com esta propriedade é vantajoso utilizar as LMF como transdutores de deslocamento. Em cenários de cargas extremas, a superelasticidade das LMF faz com que atinjam grandes deformações tornando-as com elevada capacidade de monitorização.

## **2.5 Estado de Arte**

Sumariamente é apresentada uma revisão bibliográfica dos métodos de identificação de dano e monitorização estrutural baseados na tecnologia Fiber Bragg Grating, na resistência elétrica de LMF e em alterações das propriedades dinâmicas dos elementos.

Um dos métodos de deteção de dano em estruturas é baseado nas alterações das propriedades dinâmicas dos elementos. A existência de dano estrutural num sistema de engenharia leva à modificação dos seus modos de vibração. Estas modificações são manifestadas através de alterações dos parâmetros modais (frequências naturais, modos de vibração e amortecimento) que podem ser obtidas através de testes dinâmicos de vibração (Guerreiro, 2014).

Na monitorização de estruturas, a fibra ótica tem vindo a ser utilizada como dispositivo de monitorização. Estes dispositivos são baseados na tecnologia Fiber Bragg Grating (FBG). O princípio de funcionamento deste tipo de sensor baseia-se na alteração das propriedades da luz que é guiada pela fibra ótica, devido a variações nos parâmetros externos à estrutura em causa. A alteração das propriedades no pico espectral, deve-se à mudança no comprimento da fibra, por solicitações exteriores (Figura 2.4). Com a modificação no comprimento da fibra, altera o comprimento de onda da luz, que é refletido de volta. A deformação pode ser determinada, pela medição do centro do comprimento de onda do pico espectral refletido. Os parâmetros externos podem incluir deformação, deslocamento, pressão, rotação, aceleração, fendilhação do betão e temperatura. Estes sensores podem ser fixados em estruturas ou embebidos em estruturas de betão e compósitas (Figura 2.5). Existem sensores de deformação de fibra ótica de pequena dimensão, grande dimensão e soluções distribuídas, constituindo assim um conjunto de materiais para as diversas monitorizações pretendidas. A pequena dimensão tem capacidade de medição até 5mm, pequenas deformações. Por vezes este tipo de sensor é curto para deformações em estruturas de engenharia civil. Para chegar a esse fim, os sensores de grande dimensão (Figura 2.6) abrangem uma deformação de 2,5 cm a 100 cm, após um sismo. (C. Rodrigues, Félix, Lage, & Figueiras, 2010; Schulz, Conte, & Udd, 2001).

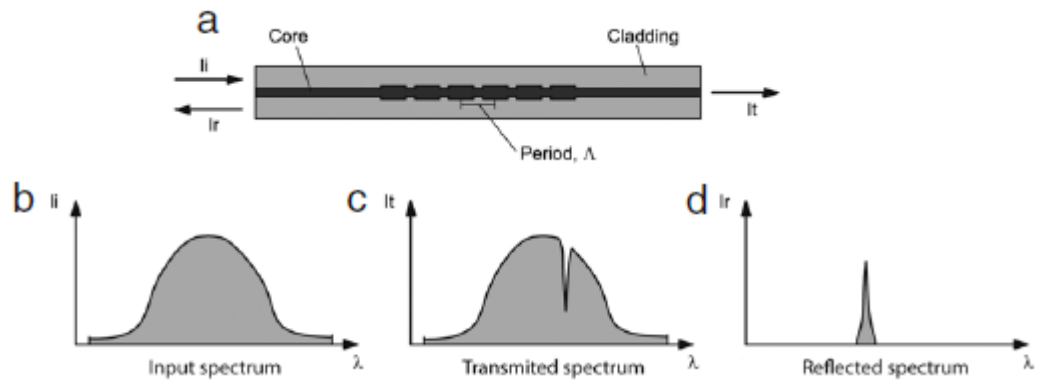


Figura 2.4- Esquema do princípio funcional dos sensores FBG: (a) Fiber Bragg Grating; (b) espectro de luz de entrada; (c) espectro de luz transmitida; (d) espectro de luz refletida (C. Rodrigues et al., 2010)

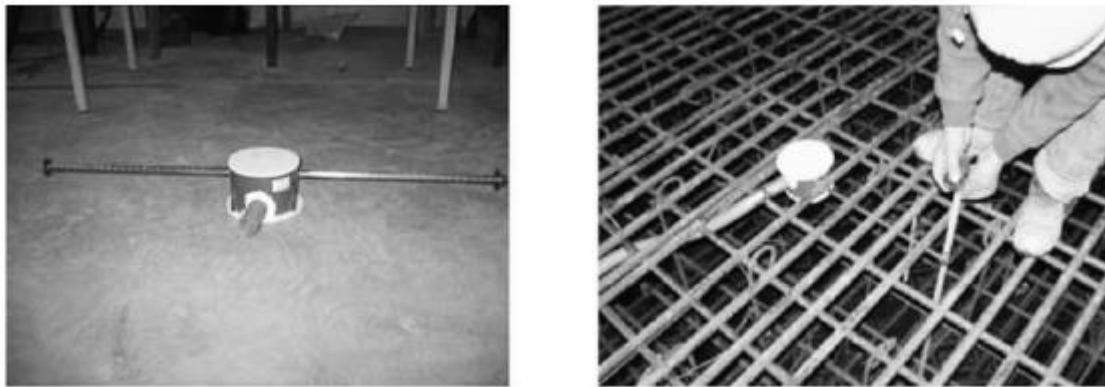


Figura 2.5- Transdutor de deformação instalado para ser embestado no betão (C. Rodrigues et al., 2010)

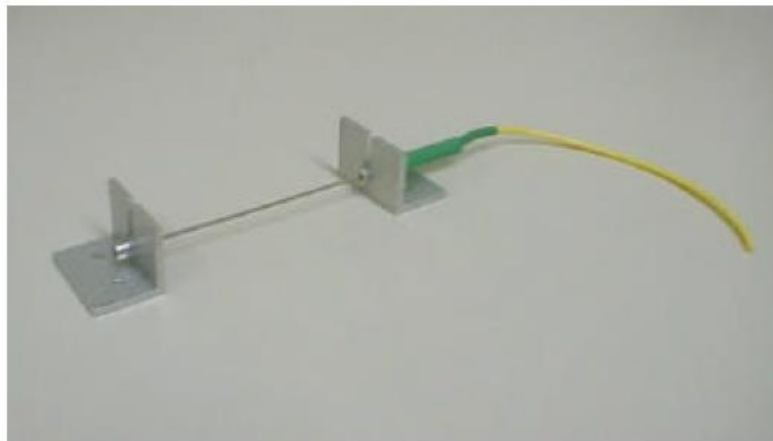


Figura 2.6- Sensor de grande dimensão com suportes para aplicação numa superfície (Schulz et al., 2001)

Paralelamente às ferramentas de monitorização estrutural apresentadas anteriormente foi estudado e apresentado o cabo coaxial Bragg grating (CCBG). O cabo coaxial consiste num cabo condutor usado para transmitir sinais. Este tipo de cabo é constituído por um fio de

cobre condutor revestido por um material isolante e protegido por um revestimento. Este método tem origem no conceito de cristal fônico unidimensional e no mecanismo Fiber Bragg Grating. Devido à grande capacidade de deformação e robustez, o CCBG é indicado para detecção de grandes deformações e melhorar a sensibilidade da medição. Os sensores de fibra ótica têm demonstrado boas aplicações na monitorização da integridade estrutural, devido às suas características únicas, tais como compactidade, alta resolução, imunidade a interferências eletromagnéticas, operação remota e capacidade de multiplexação, que consiste na combinação de dois ou mais canais de informação por apenas um meio de transmissão (Zhou et al., 2012).

Aliado à caracterização de dano em estruturas de Engenharia Civil, mais métodos de monitorização foram estudados e abordados em várias pesquisas. O sensor de dano estrutural, consiste na relação entre a tensão e a extensão aplicada na LMF com a sua resistência elétrica. Com o valor de resistência elétrica, determina-se a extensão a que a LMF está submetida. Existem limitações nos modelos associados a este estudo, ou seja, os modelos só podem ser utilizados sob determinadas condições. Para superar as limitações foi desenvolvido um modelo matemático uniforme que relaciona a variação da resistência elétrica com a deformação a que a LMF está sujeita. O modelo proposto pode ser utilizado a diferentes temperaturas e diferentes condições iniciais (Figura 2.7). Para verificar a validade do modelo proposto, foram desenvolvidos ensaios laboratoriais em diferentes fases e variadas temperaturas. Os resultados numéricos com base no modelo proposto estão em concordância com os resultados experimentais (Figura 2.8), o que indica que o modelo proposto pode ser utilizado como um elemento de detecção (Cui, Song, & Li, 2010).

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\nu)\varepsilon$$

**Figura 2.7 – Modelo matemático uniforme (Cui et al., 2010)**

Onde  $R$  representa a resistência elétrica,  $\rho$  representa a resistividade da LMF,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson e  $\varepsilon$  a deformação do material.

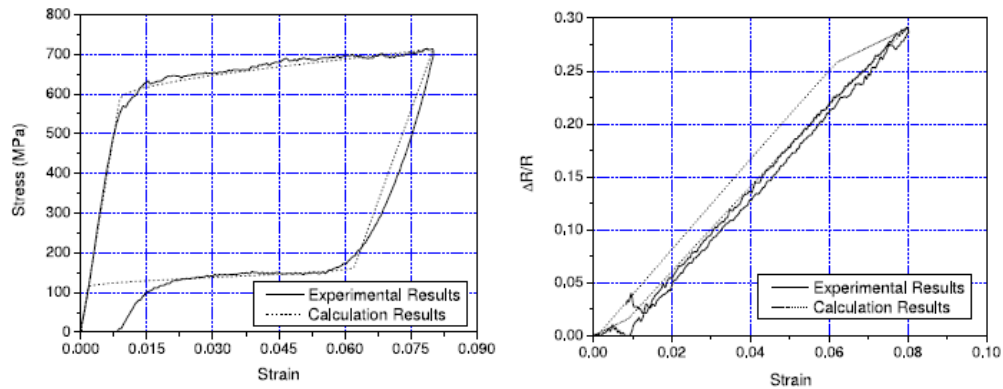


Figura 2.8- Comparação entre os resultados numéricos e os resultados experimentais (Cui et al., 2010)

Numa estrutura compósita de fibra de vidro, é bastante benéfico incorporar LMF, sendo estas utilizadas como atuador e como sensor de deformação. O sensor de deformação aciona o atuador para mitigar os danos utilizando o valor de resistência elétrica. O valor de resistência elétrica depende da tensão induzida e da temperatura. Ensaios controlados de temperatura indicam que é necessário compensar a temperatura, para que o valor de resistência estabilize. (Kirkby, O’Keane, de Oliveira, Michaud, & Månson, 2009; Nagai & Oishi, 2006).

Associadas à função de sensor, as LMF têm sido abordadas por alguns autores. Um sensor é um dispositivo que detecta uma condição física. As LMF podem funcionar como sensores porque a sua resistência eléctrica é dependente da sua deformação e da sua temperatura. Deformações até 8% podem ser detectadas numa estrutura por esta via. É também concebível para detectar certos níveis de temperatura de uma estrutura através da mudança de forma do sensor. Uma força pode ser exercida sobre a estrutura se esta mudança de forma for restringida (Janke, Czaderski, Motavalli, & Ruth, 2005).

Ainda na temática de sensores, foram realizados ensaios exploratórios de LMF. O trabalho proposto incide no ensaio numa máquina MTS-810 (carga/descarga) a que uma LMF foi submetida. A LMF é esticada até certa deformação e posteriormente é descarregada (Figura 2.9). Foram registados os valores de tensão, deformação e variação de tensão dos dois ciclos aplicados na LMF (Li, Mao, Liu, & Ou, 2005).

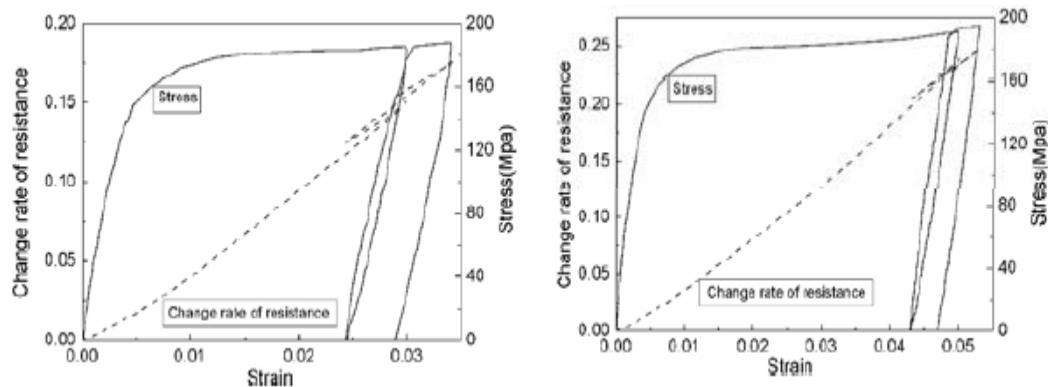


Figura 2.9 – Taxa de variação entre a resistência-tensão-deformação de LMF NiTi, para deformação de 3% e 5% (Li et al., 2005)

A taxa de variação da resistência é expressa como a variação da resistência dividida pela resistência inicial da LMF. De acordo com a Figura 2.9, a taxa de variação da resistência da LMF NiTi na fase martensítica é aproximadamente linear com a tensão aplicada. Esta característica, torna a LMF num sensor de deformação. Posterior esta propriedade é utilizada pelos autores(Li et al., 2005).

As LMF foram ensaiadas numa estrutura de betão armado. As mesmas são pré-esforçadas e incorporadas no betão armado para monitorizar a deformação e reparar fendas através de forças de recuperação. Foi realizado um ensaio numa viga de betão armado reforçada na zona de tração com LMF pré-esforçadas. Apresentam-se os resultados (Figura 2.10 e Figura 2.11).

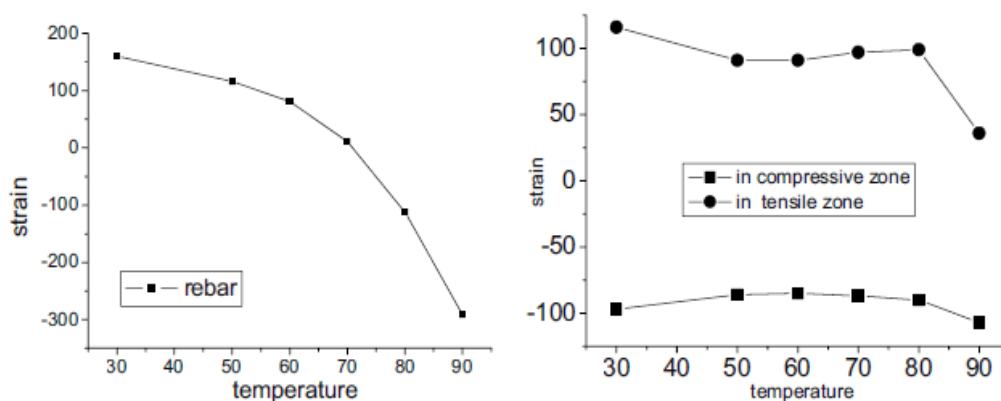


Figura 2.10 – Efeito reparador antes de fendilhar (Li et al., 2005)

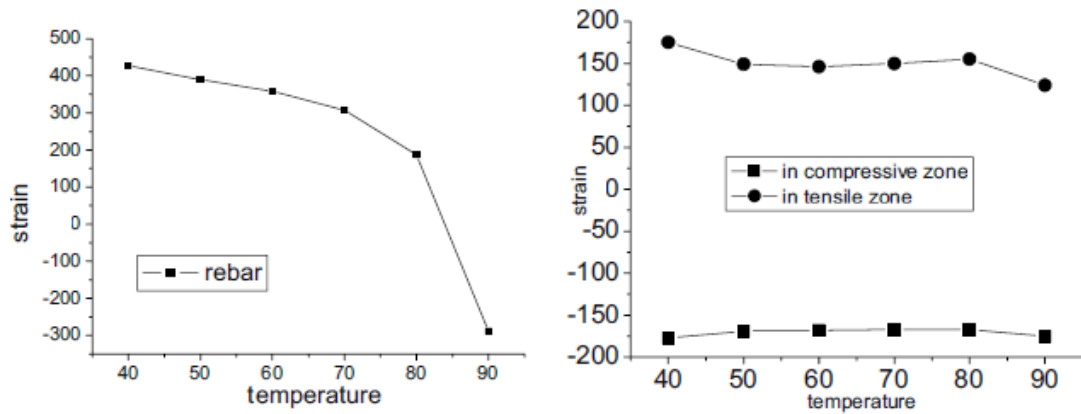


Figura 2.11 - Efeito reparador depois de fendilhar (Li et al., 2005)

Com os resultados acima, é possível referir que a força gerada pela LMF pode diminuir a deformação da viga e diminuir a tensão do aço e do betão armado na zona de tração.

Devido à capacidade superelástica do material, torna as LMF com desempenho de amortecedor e transdutor de deslocamento. A superelasticidade das LMF, faz dissipar energia com capacidade de re-centralização. Deste modo, as LMF tornam-se também transdutores de deslocamento, devido à propriedade de sensor de deformação. Esta característica torna-se útil, quando os amortecedores compostos por LMF, avaliam a segurança estrutural de um edifício ou ponte, após um sismo (Li et al., 2005).

As LMF apresentam outras propriedades relevantes para a sua utilização como a resistência à corrosão, natureza não magnética, baixa densidade, alta resistência a fadiga e variação do módulo de elasticidade em função da transformação de fase(Cui et al., 2010).

Uma das maiores implicações na utilização das LMF instala-se nos custos elevados em comparação com os materiais mais tradicionais. Os preços destes materiais têm vindo a reduzir (a baixo de 150€/Kg), tendo entretanto surgido ligas alternativas baseadas em ferro, com preços mais competitivos. Outra restrição coloca-se na falta de interação entre as ciências dos materiais e a engenharia estrutural, o que contribui para dificultar o uso generalizado das LMF em obras de engenharia(Santos, 2011).



## **3 Caracterização da relação entre extensão e resistividade e ensaio exploratório**

### **3.1 Objetivos**

O objetivo desta ação é observar e registar o comportamento de uma liga com memória de forma, com extensões crescentes de 1% até 8%, sujeita a ciclos de carga(tracção)/descarga.

No decorrer do mesmo ensaio, pretende-se registar e observar a variação da resistência elétrica, em função da extensão da LMF. Tenta-se depois avaliar, através da resistência elétrica, a extensão na LMF.

É também ensaiado um provete de betão com fibras de aço, submetido à flexão, de forma a analisar a abertura de fendas do provete através da deformação da LMF.

### **3.2 Material e Instrumentação**

#### **3.2.1 Ensaio com extensões crescentes**

Para executar este ensaio recorreu-se à máquina de tração universal *Zwick/Roell Z050*, ao equipamento de aquisição de dados *NI-PXI-1052*, a um laser de controlo de distâncias *Baumer* e a uma LMF com 25 centímetros de comprimento e de diâmetro igual a 0,40 milímetros, comercializada pela *Euroflex* (Figura 3.1 e Figura 3.2)(“Euroflex - Nitinol superelastic wire,” 2015). Das propriedades retiradas de catálogo referem-se:

- Composição da LMF:
  - Níquel – 54,5-57 weight -%
  - Titânio – balanço
  - Oxigénio – max. 0,05 weight -%
  - Carbono – max. 0,02 weight -%
- Propriedades físicas:
  - Ponto de fusão – 1310 °C
  - Densidade – 6,5 g/cm<sup>3</sup>
  - Resistividade elétrica – 82 µOhm x cm
  - Coeficiente de expansão térmica – 11 x 10<sup>-6</sup>/° C

- Módulos de elasticidade –  $41-75 \times 10^3$  MPa
- Propriedades mecânicas:
  - Alongamento total – min. 10 %
- Propriedades superelásticas:
  - Temperatura de transformação  $A_f$  – max. 18° C



**Figura 3.1 – Máquina de tração universal Zwick/Roell Z050, equipamento de aquisição de dados NI-PXI-1052, laser de controlo de distâncias Baumer e a uma LMF**



**Figura 3.2 – Pormenor de instrumentação do equipamento**



**Figura 3.3 - Pormenor de instrumentação do equipamento, vista lateral**

A LMF foi colocada na máquina de tração universal, recorrendo a fixadores próprios da mesma (Figura 3.3), com 25 centímetros de distância entre fixadores, para ser realizado o ensaio de carga(tracção)/descarga. Posteriormente a este passo, o equipamento de aquisição de dados NI-PXI-1052 é montado e ligado à LMF, de modo a fazer o registo da resistência elétrica. Torna-se obrigatório, utilizar o laser para medir a deformação da LMF durante o ensaio, visto que existe incompatibilidade de ligação/receção de dados entre os dois equipamentos de aquisição de dados (máquina de tração universal *Zwick/Roell Z050* e NI-PXI-1052). Tendo como objectivo juntar todos os dados adquiridos durante o ensaio, é possível fazê-lo coincidindo os valores de deformação obtidos na máquina de tração universal *Zwick/Roell Z050* com os valores de deformação obtidos através do laser *Baumer*. O laser fica ativo, com auxílio dos dois suportes, sendo que este necessita de uma superfície entre 30 e 100 milímetros para o seu ponto de medição inicial.

### **3.2.2 Ensaio de provete e betão**

Quanto ao segundo ensaio referido, recorre-se à máquina de tração universal *Zwick/Roell Z050*, uma LMF, dois parafusos fixadores, um multímetro *Keithley 2010* e um paquímetro digital *Comecta*.

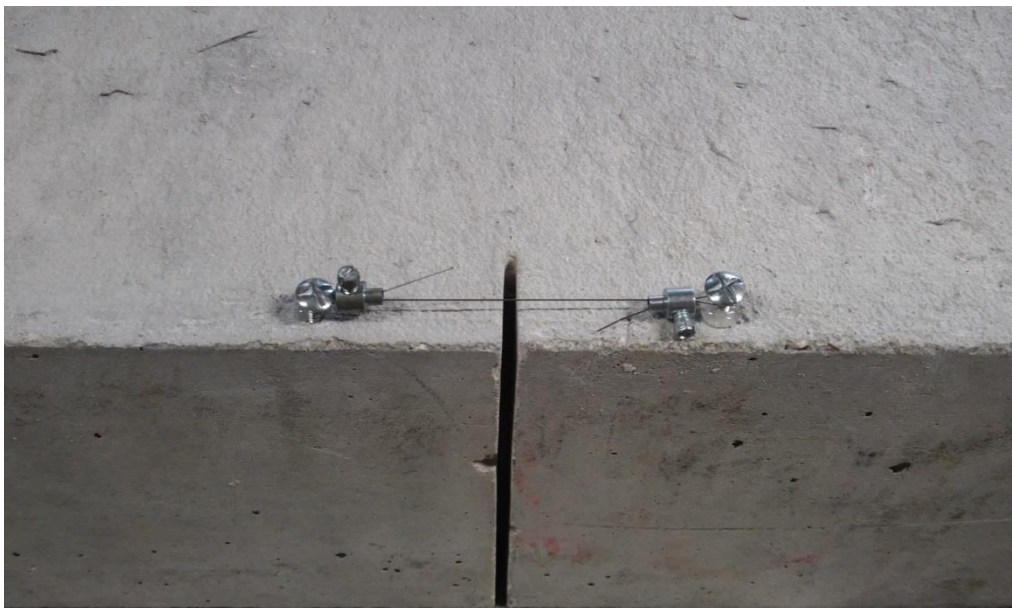
### **3.3 Procedimento experimental**

#### **3.3.1 Ensaio com extensões crescentes**

Inicialmente, já com todos os equipamentos dispostos para o ensaio, foram executados cinco ciclos iguais de carga(tracção)/descarga para uma extensão na LMF de 4%. Os resultados foram registados tanto na máquina de tracção universal (tensão/extensão), como no equipamento de aquisição de dados (resistência eléctrica/extensão). Foram então aplicados, na LMF, ciclos de carga e descarga até uma extensão máxima de 8%, com um aumento de extensão gradual de 1%, tendo sido registado, para os vários aumentos de extensões, o comportamento da resistência eléctrica.

#### **3.3.2 Ensaio de provete e betão**

No ensaio de flexão do provete, os dois parafusos foram fixados lateralmente, tendo sido colocada a LMF a uni-los (Figura 3.4). O comprimento entre serra-cabos foi lido e registado. O provete foi colocado na máquina de tracção universal *Zwick/Roell Z050*. O multímetro foi ligado à LMF por garras crocodilo, para ler a resistência eléctrica (Figura 3.5).



**Figura 3.4 – Provet de betão com fibras de aço e LMF fixada**

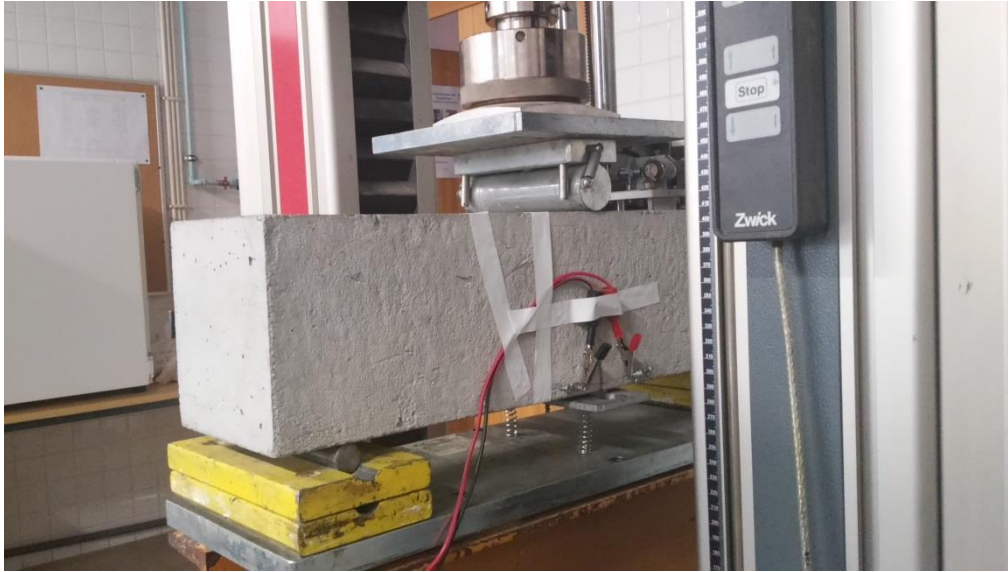


Figura 3.5 – Ensaio de flexão e ligação de multímetro à LMF

## 3.4 Resultados

### 3.4.1 Ensaio com extensões crescentes

Para caracterizar o comportamento da resistividade elétrica em função da deformação a que o material esteve submetido, foi necessário cruzar vários dados adquiridos durante o ensaio. Foram determinadas as tensões correspondentes aos seguintes pontos do ensaio de tensão-extensão:  $M_s$ ,  $M_f$ ,  $A_s$  e  $A_f$  (Figura 3.6). Associados às tensões referidas, são determinados os respectivos tempos. A cada tempo determinado, corresponde uma resistência elétrica. Quando sobrepostos os quatro valores de resistência elétrica com os valores de resistência elétrica lidos durante um ciclo, é possível identificar num gráfico de resistividade elétrica/tempo, as fases da LMF quando submetida a um ensaio de carga(tracção)/descarga (Figura 3.7).

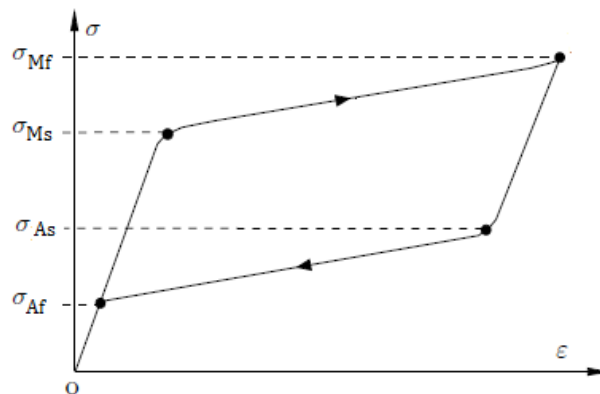


Figura 3.6 – Curva de tensão-deformação esquemática (Rodrigues, 2014)

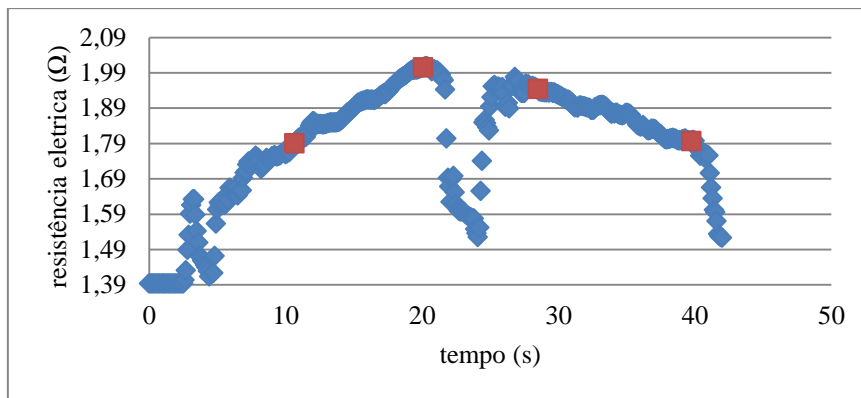


Figura 3.7- Caracterização de resistência elétrica em ensaio de tração/compressão

Tornam-se compreendidos os resultados obtidos da resistência elétrica em função da extensão do material (Figura 3.8). Com um aumento da extensão no material há um aumento de resistência elétrica até o material atingir o ponto  $M_f$ . Posto isto, a resistência elétrica diminui gradualmente em função da diminuição de extensão no material.

Todos os ciclos de carga(tração)/descarga foram analisados. Os restantes resultados apresentam-se em anexo.

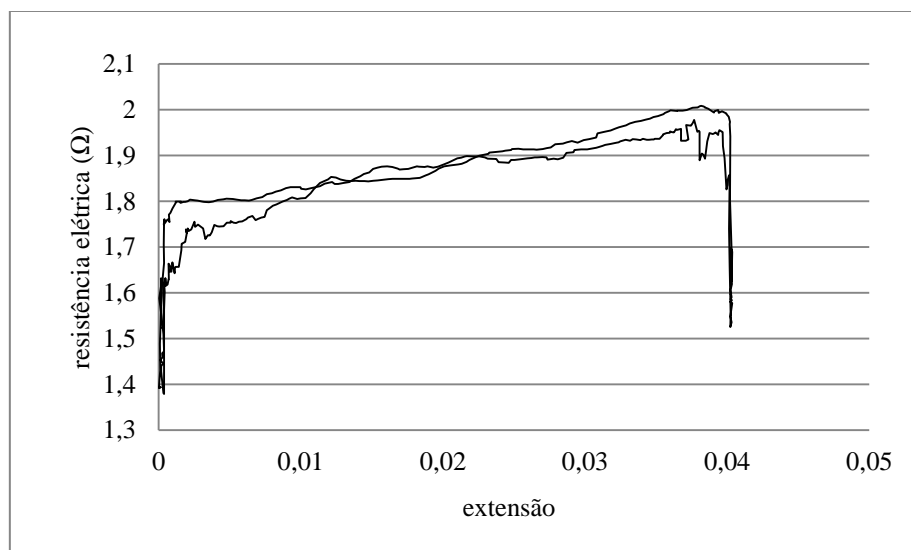


Figura 3.8- Gráfico de resistência elétrica-extensão, sob ensaio de tração/compressão

Apresenta-se os resultados do ensaio de cinco ciclos de carga(tração)/descarga para uma extensão constante na LMF de 4% (Figura 3.9, Figura 3.10, Figura 3.11, Figura 3.12, Figura 3.13). É de notar a estabilidade de resultados na relação tensão-extensão.

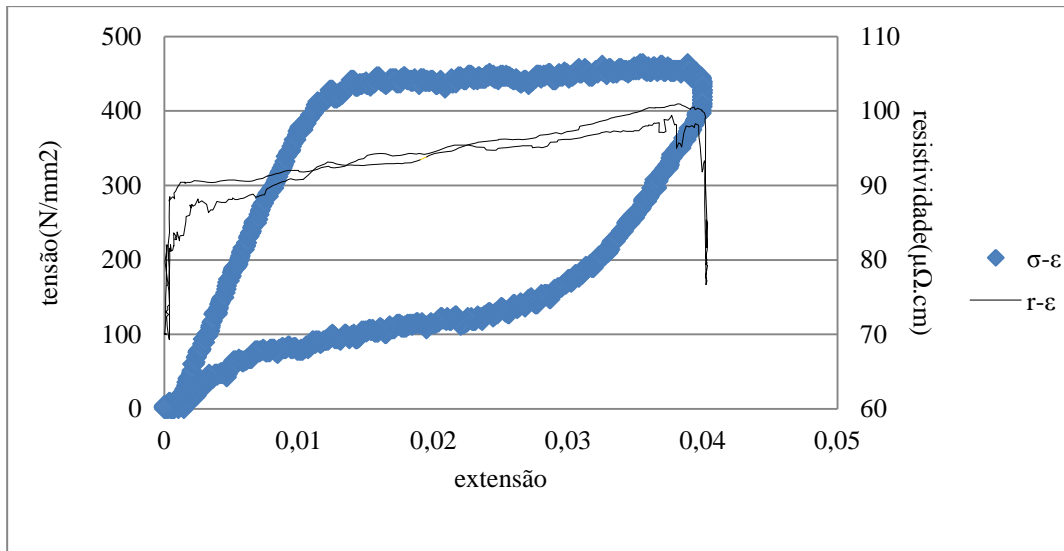


Figura 3.9- Primeiro ciclo de ensaio tração/compressão, com extensão do material igual a 4%

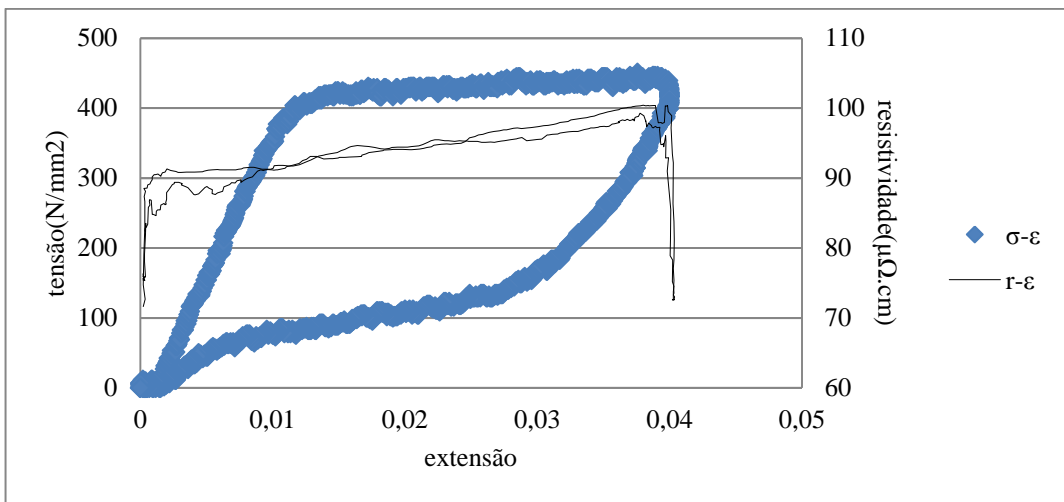


Figura 3.10- Segundo ciclo de ensaio tração/compressão, com extensão do material igual a 4%

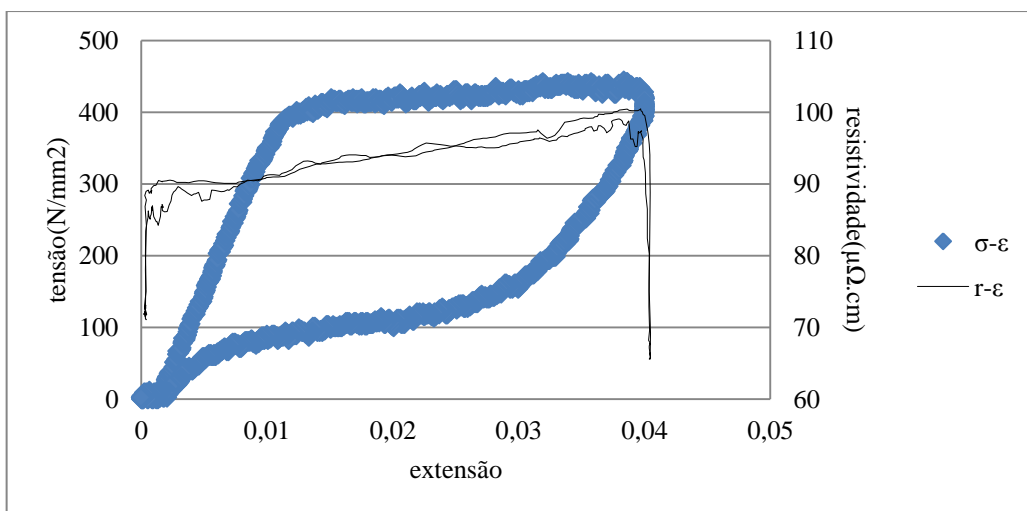


Figura 3.11- Terceiro ciclo de ensaio tração/compressão, com extensão do material igual a 4%

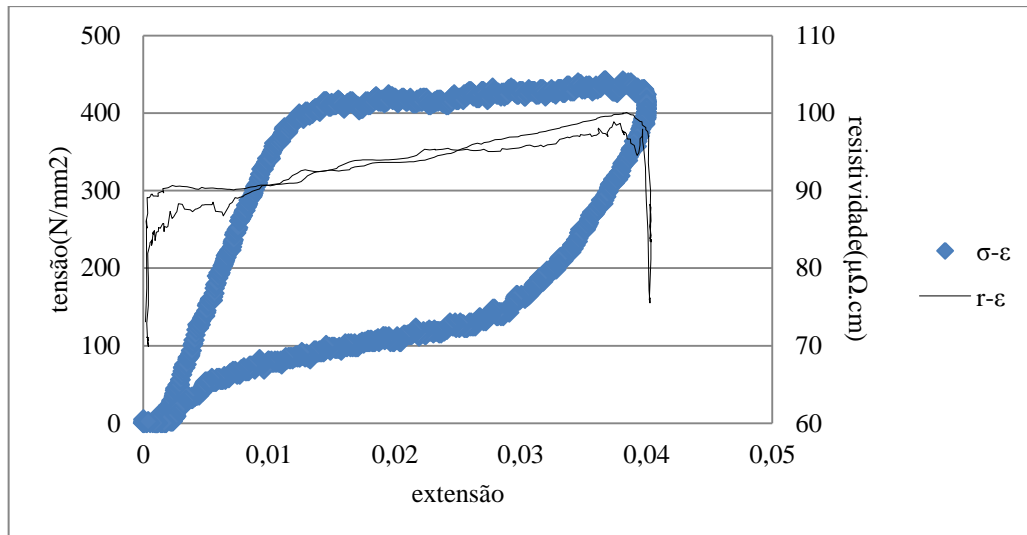


Figura 3.12- Quarto ciclo de ensaio tração/compressão, com extensão do material igual a 4%

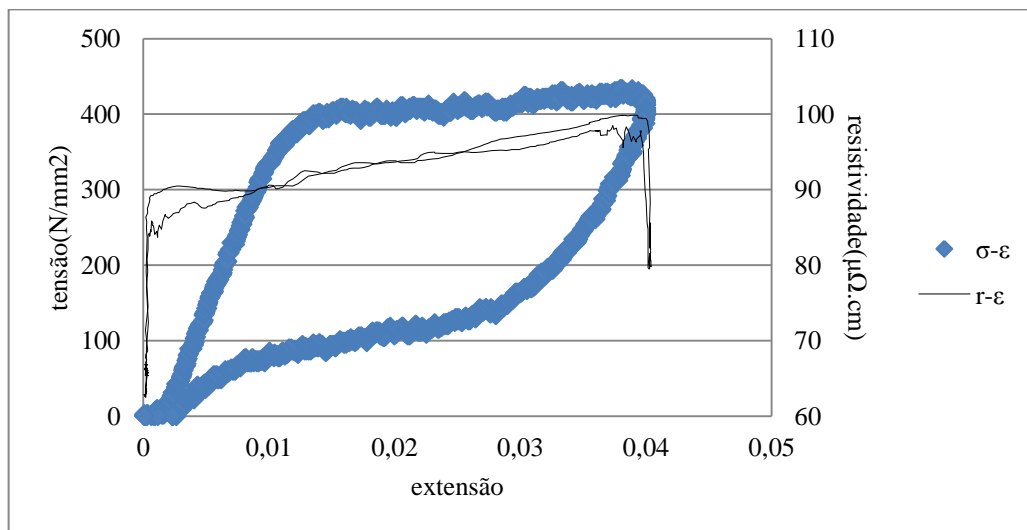


Figura 3.13- Quinto ciclo de ensaio tração/compressão, com extensão do material igual a 4%

Posteriormente à obtenção dos resultados acima ilustrados, foram obtidos os resultados do ensaio de ciclos de carga e descarga até uma extensão máxima de 8%, com um aumento de extensão gradual de 1%.

A resistividade foi calculada através da seguinte expressão:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{L}$$

Onde  $R$  é a resistência elétrica da LMF,  $L$  é o comprimento e  $A$  é a área da secção transversal. (Cui et al., 2010)

Foi utilizada a resistividade na demonstração dos resultados, de modo a ter um valor mais absoluto, sem variáveis envolvidas.

Apresenta-se o gráfico mais ilustrativo deste ensaio (Figura 3.14), ou seja, a LMF é submetida a uma extensão de 7%. Um valor bastante expressivo, na área da extensometria, visto que, é possível medir deformações consideráveis em estruturas. É importante referir que este tipo de extensões geralmente ocorre só para cenários muito condicionantes (extremos) como sismos e explosões. Os restantes resultados são apresentados em anexo.

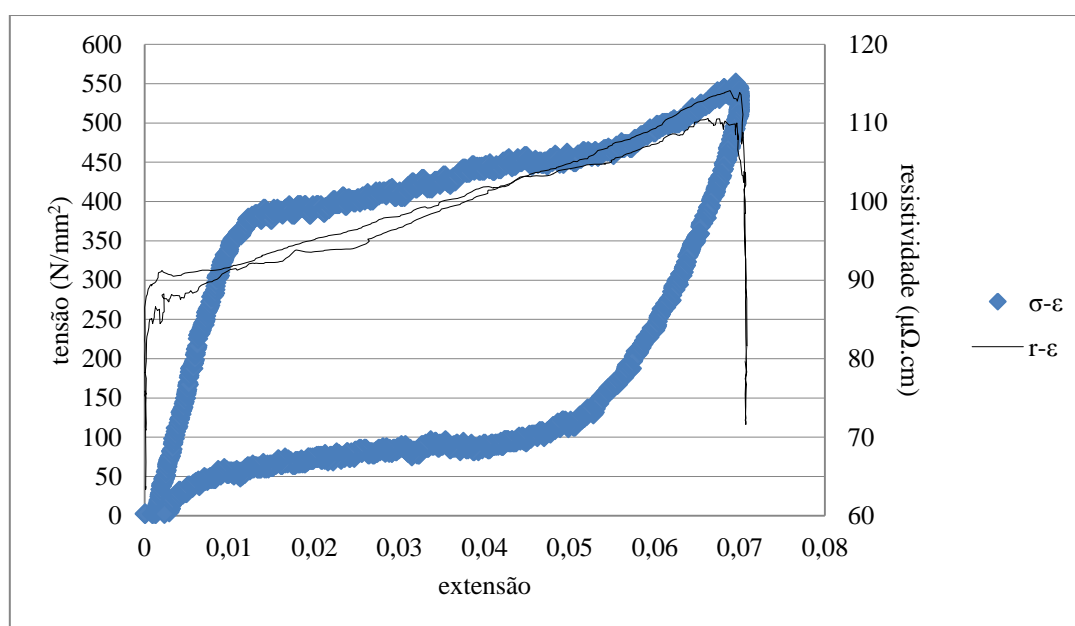


Figura 3.14 – Sétimo ciclo de ensaio tração/compressão, com extensão do material igual a 7%

Relativamente à sobreposição dos dados adquiridos pelos dois equipamentos (Figura 3.14), é de salientar que para extensões bastante reduzidas (quase nulas), há um aumento brusco do valor de resistividade, mas este tende a aumentar gradualmente, assim que começa a transformação martensítica e até atingir totalmente esta fase. Posteriormente, após o início da descarga da tensão aplicada, volta a existir uma variação brusca na resistividade, até a LMF atingir o início da transformação austenítica. Verifica-se novamente, que depois deste instante o valor de resistividade elétrica tende a diminuir progressivamente, até atingir totalmente a fase austenítica. Com estes dois comportamentos mais estáveis é possível relacionar a resistividade com a extensão a que o material está sujeito, através de uma regressão linear do tipo:

$$y = mx + b$$

Desta forma, a extensão é caracterizada a partir da resistividade elétrica.

No gráfico acima (Figura 3.14), a extensão é caracterizada através da equação:

$$y = 281,28x + 87,131$$

Em anexo, encontram-se as restantes equações associadas a cada ciclo, obtidas por regressão linear.

### **3.4.2 Ensaio de provete e betão**

O provete após fendilhar, foi retirado da mesa de ensaio e o comprimento entre cerramentos foi lido. A abertura da fenda de flexão foi igualmente medida antes e depois do ensaio. O provete não cedeu por completo, por ter fibras de aço envolvidas no betão (Figura 3.15).



**Figura 3.15 – Provet fendilhado com LMF**

Valores do ensaio:

- Distância inicial entre fixadores – 10 cm
- Abertura de fenda inicial – 0,4 cm
- Abertura de fenda final – 0,9 cm

- Distância inicial entre cerra-cabos – 6,9 cm
- Distância final entre cerra-cabos – 7,4 cm
- Resistência eléctrica inicial – 0,586  $\Omega$
- Resistência eléctrica final – 0,668  $\Omega$

A diferença entre a abertura de fenda inicial e a abertura de fenda final corresponde à deformação na LMF, logo os resultados são válidos. O andamento de resistência eléctrica ao longo do ensaio também é válido, visto aumentar o seu valor. A LMF atingiu uma deformação de 7%.



## **4 Desenvolvimento do protótipo experimental**

### **4.1 Objetivos**

Com o conhecimento adquirido, relativo ao trabalho feito no capítulo anterior, pretende-se executar este ensaio com um carregamento incremental e distribuído sobre o modelo, paralelamente com observação e registo de medições de resistência elétrica recorrendo a um algoritmo sequencial de medição idealizado e medições de deformação da LMF recorrendo ao paquímetro digital.

De forma a aplicar as LMF na identificação de dano em estruturas de engenharia civil é necessário criar um algoritmo que permita ver, de forma sequencial, os vários sensores instalados numa determinada estrutura. Visto que ao longo do modelo criado existem vários troços para leitura, e recorrendo apenas a um multímetro, não é possível fazer várias leituras seguidas e repetidas de modo automático. Foi então desenvolvida uma “VI” (*virtual interface*) de modo a solucionar o problema. Na VI desenvolvida é possível adicionar mais sensores aos existentes, ou seja, é adaptável para quantas leituras sejam necessárias ao longo da estrutura.

O registo das medições deste ensaio deve ser cruzado com os resultados obtidos no capítulo 4 (ensaio em modo controlado), para aferir as extensões obtidas nos sensores e demonstrar a eficácia dos resultados obtidos no capítulo anterior.

### **4.2 Material e Instrumentação**

O modelo da viga desenvolvido (Figura 4.3) é composto por três fendas simuladas, sendo que o material deste é MDF. De modo a retomar a posição original do modelo, foram colocadas duas molas iguais em cada fenda, uma de cada lado da placa de MDF respetiva. As placas fixadas, na face superior do modelo, têm como função suportar o carregamento incremental aplicado nos ensaios.

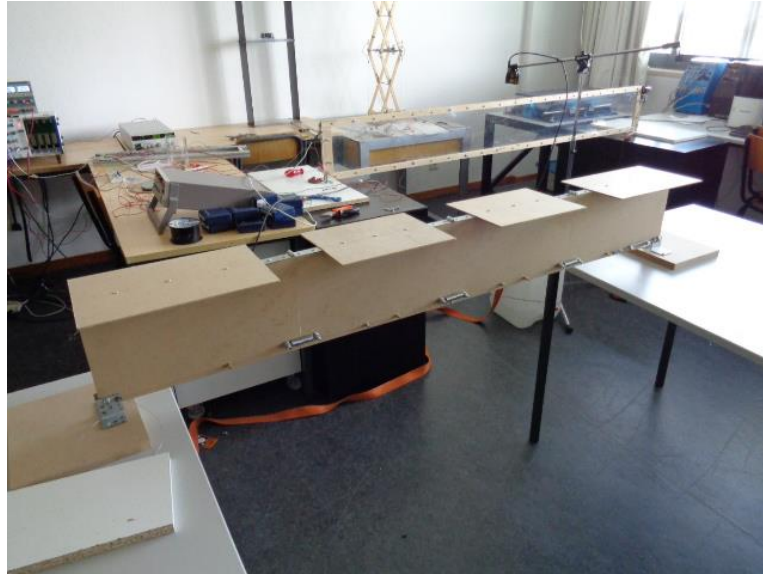


Figura 4.1 – Vista geral do modelo experimental

De seguida apresenta-se os desenhos técnicos do modelo construído (Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6). Todas as medidas encontram-se em milímetros. Cada troço de medição tem 300 mm (sensores), com intenção da LMF atingir uma extensão até 5%, para uma abertura de fenda máxima de 1,5cm.

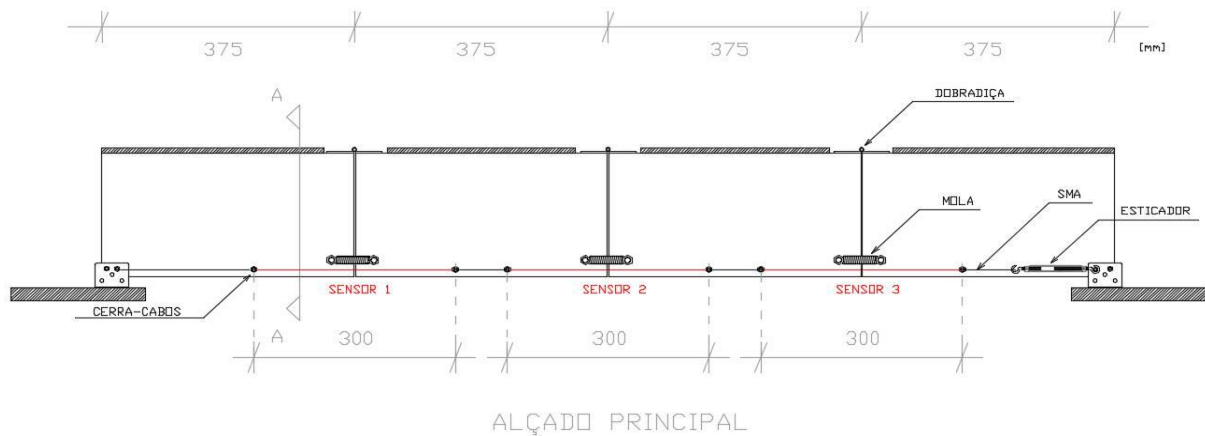


Figura 4.2– Vista frontal do modelo à escala reduzida

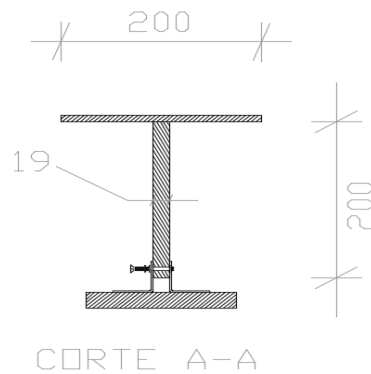


Figura 4.3 – Corte transversal A-A do modelo

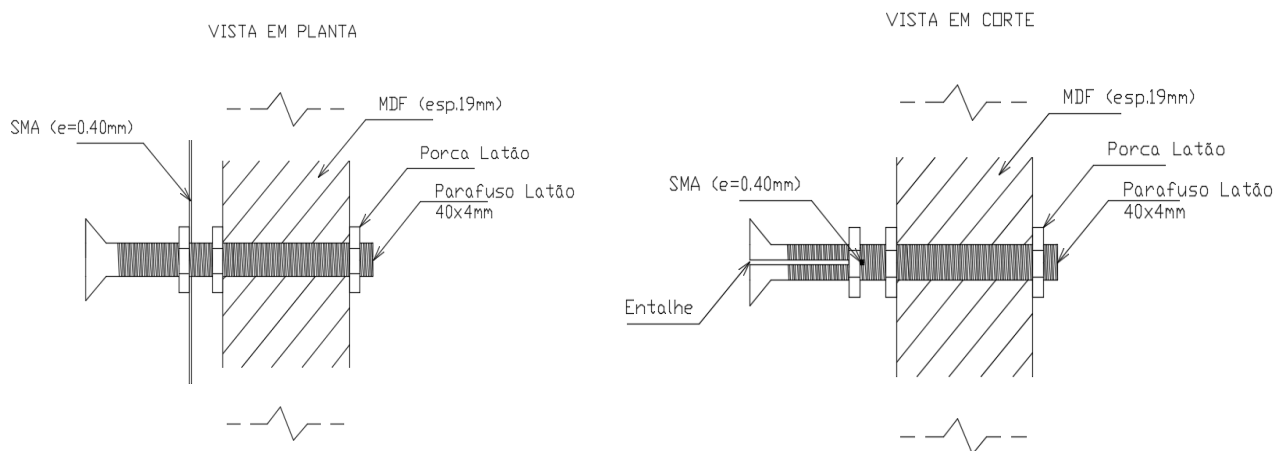
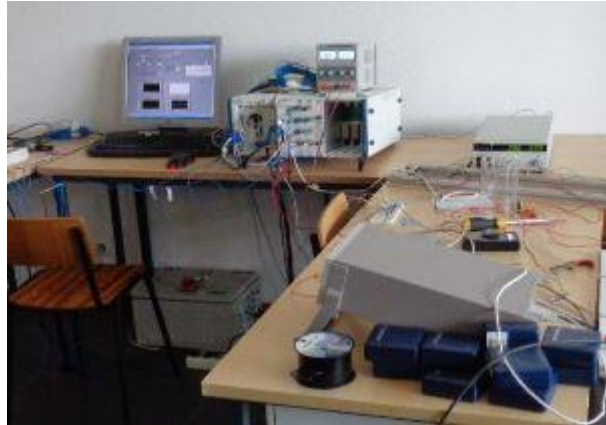


Figura 4.4 – Vista em planta do pormenor de ligação liga-parafuso adaptado-placa de MDF e Vista em corte do pormenor de ligação liga-parafuso adaptado-placa de MDF

Para a aquisição de dados, foi desenvolvido um algoritmo de varrimento sequencial (VI) e um circuito eléctrico (Figura 4.7).

O desenvolvimento de um código em ambiente *Labview* segue uma lógica que tem algumas semelhanças com o desenho simbólico de circuitos eléctricos. A linguagem de programação assume um aspeto gráfico e caracteriza-se por ser uma programação orientada por fluxo de dados. (*LabVIEW Basics I: Introduction Course Manual*, 2007)

Para o desenvolvimento e utilização da VI desenvolvida foi utilizado a plataforma de controlo: NI-PXI-1052 da *National Instrument*.



**Figura 4.5– Equipamento para ensaio. Aquisição de dados NI-PXI-1052, circuito elétrico e multímetro**

#### **4.2.1 VI em Labview - Elaboração**

De forma a monitorizar o modelo experimental, foi desenvolvida em ambiente *Labview* uma *virtual interface* para que o utilizador possa controlar o modelo. Com isto, o utilizador tem uma janela de comandos, em que é possível observar e controlar a estrutura como pretender.

O ambiente *Labview*, é composto por duas janelas de programação interligadas, dispostas para o utilizador, o Painel Frontal e o Diagrama de Blocos. O Painel Frontal (Figura 4.9) apresenta os terminais de controlo do *virtual interface*. Posteriormente à criação do Painel Frontal, o restante código é desenvolvido no Diagrama de Blocos (Figura 4.10) (*LabVIEW Basics I: Introduction Course Manual*, 2007).

No desenvolvimento da instrumentação, foi criado um comando de duração de leitura por troço de LMF, ou seja, o utilizador determina o tempo de leitura de resistência elétrica em cada fenda. Ao findar o tempo de leitura de uma fenda, a leitura muda automaticamente para a fenda seguinte, fazendo o varrimento sequencial da estrutura.

O fluxograma (Figura 4.8) ilustra a construção do algoritmo de varrimento sequencial.

Para orientação do utilizador, durante a leitura do valor de resistência elétrica de cada fenda, está associado um comando led, em que este fica ativo quando a leitura da fenda a que está associada, está a ser executada. Ainda para cada fenda, o valor de resistência elétrica nelas lido, é ilustrado no correspondente gráfico. De troço para troço de LMF, o valor de resistência elétrica lido têm alguma discrepância, devendo-se esta diferença às condições em

que se encontra a LMF. Para colmatar esta disparidade, o valor lido em cada fenda é traduzido para o medidor correspondente, (Meter, Meter2, Meter3) fazendo a caracterização da leitura lida e tornando os valores de leitura comparáveis (Figura 4.9).

Esta programação é adaptável a quantas leituras sejam necessárias fazer ao longo de uma estrutura.

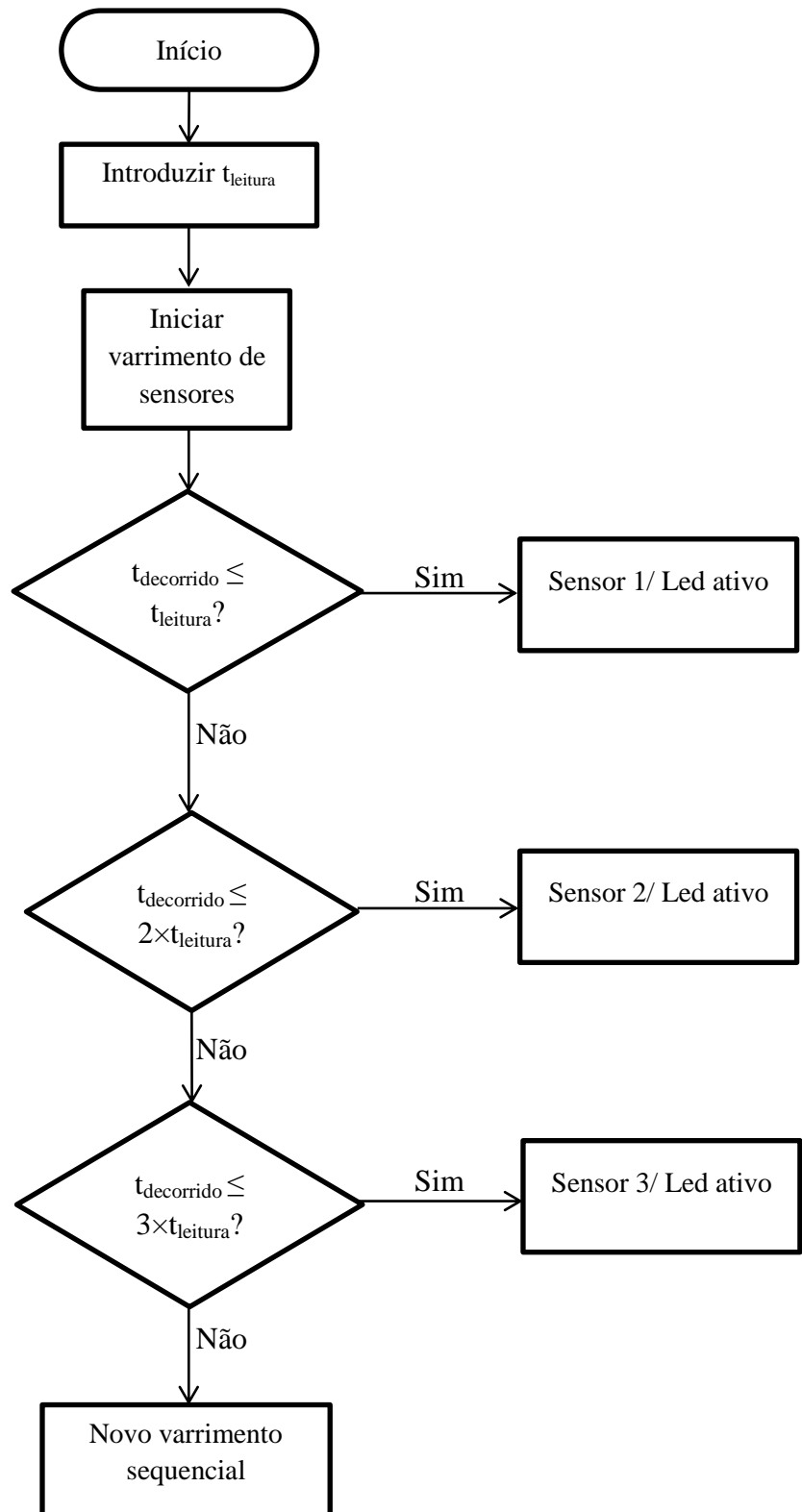


Figura 4.6- Fluxograma do algoritmo de varrimento sequencial



Figura 4.7- Painel Frontal do algoritmo desenvolvido

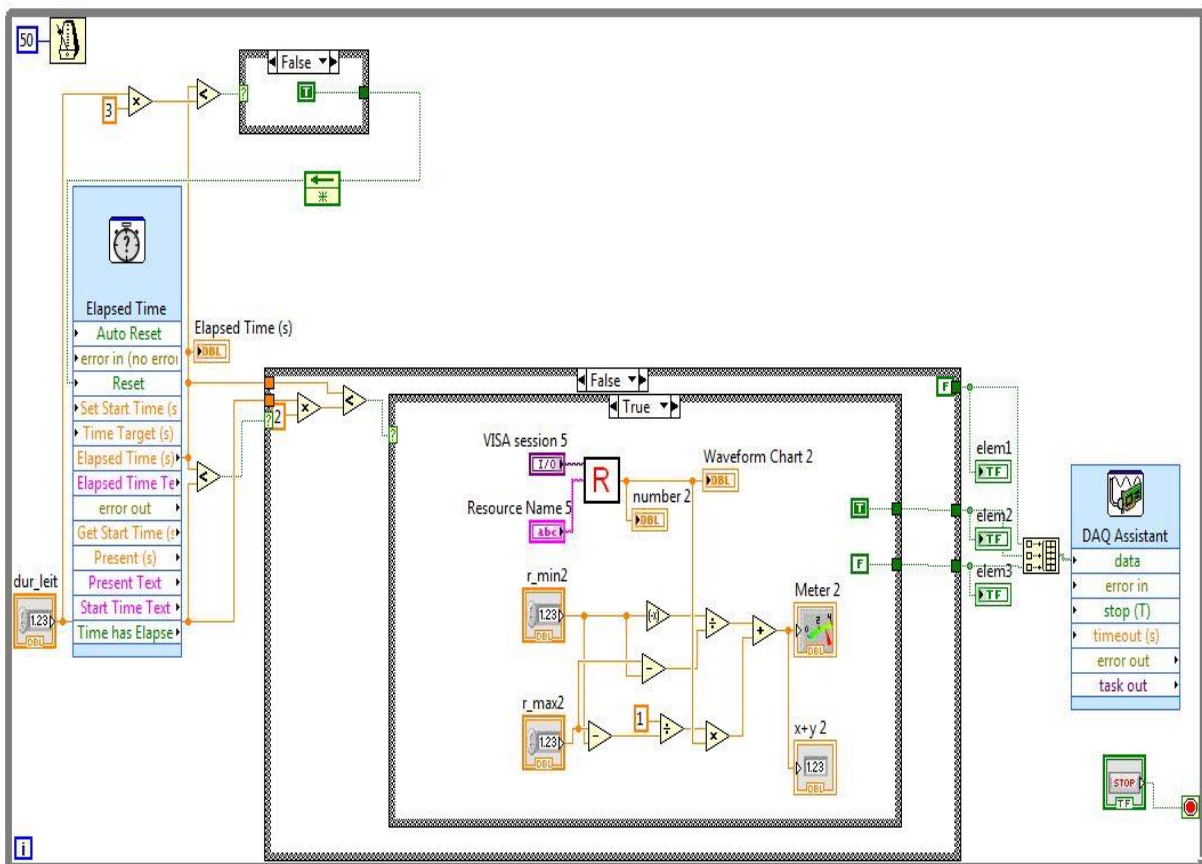


Figura 4.8- Diagrama de Blocos do algoritmo desenvolvido

#### **4.2.2 Circuito elétrico - Descrição**

Foi necessário construir um circuito elétrico, para completar a instrumentação.

O referido circuito foi concebido em paralelo, de modo que cada leitura seja feita individualmente e que estas sejam independentes. Ou seja, caso haja alguma falha de leitura, por algum eventual lapso num dos locais a ler, as restantes leituras não fossem afetadas. Deste modo, torna-se mais fácil adicionar mais troços de leitura ao circuito, não afetando as que já se encontram em funcionamento.

Para que os dados sejam lidos na aplicação foi utilizada uma placa de aquisição de dados NI SCB-68 e uma placa de circuitos (breadboard) (Figura 4.12). Na referida placa de aquisição de dados, são usados três dos canais disponíveis, em que por cada um destes é feita a leitura da resistência elétrica em cada troço de LMF. Quanto mais troços para leitura existirem na estrutura, mais canais são utilizados. Os canais em uso, são ligados à placa de circuitos. Nesta placa, existem três transístores IRF540N, que têm como função reagir ao sinal digital associado a cada troço de LMF. O sinal digital fornecido pelo controlador (VI) serve para ativar/desativar cada leitura individualmente. Quando passa corrente elétrica num transístor, o sinal digital é lido e enviado para a VI. Paralelamente ao envio de sinal, existe um multímetro ligado à placa de circuitos que faz a leitura do valor de resistência elétrica em cada troço de LMF. Este processo repete-se para os seguintes troços de LMF. Na Figura 4.11, os vários troços de leitura ao longo de LMF, estão indicados como SENSOR1, SENSOR2 e SENSOR3. Os sinais digitais enviados para o VI através dos transístores, são descritos como DIG1, DIG2 e DIG3.

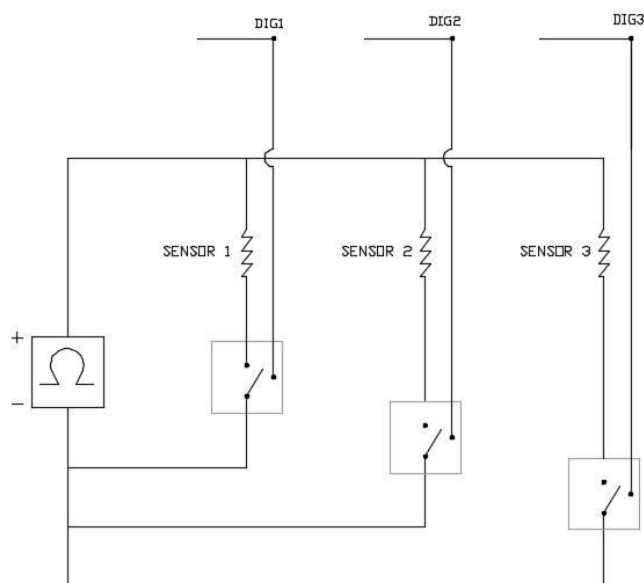


Figura 4.9 – Esquema do circuito elétrico

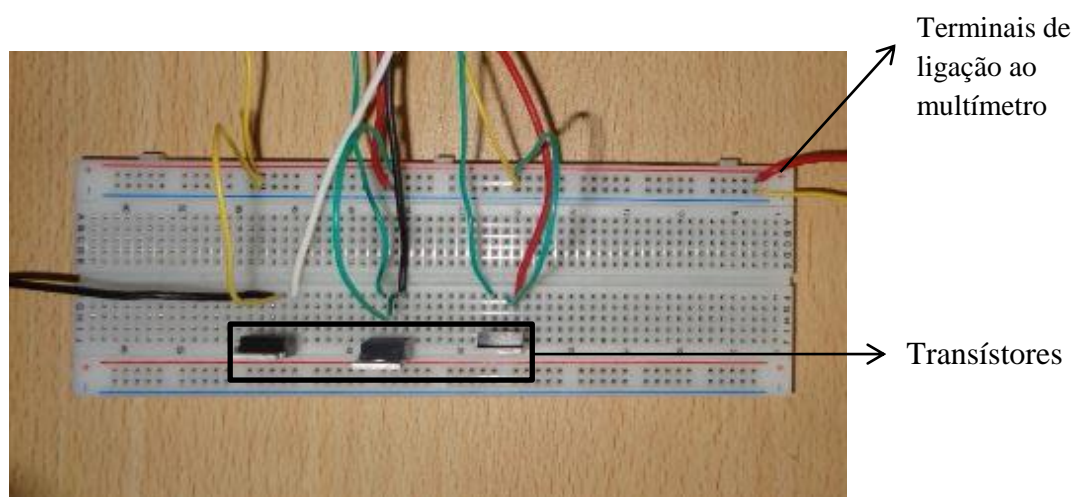


Figura 4.10 – Placa de Circuitos (breadboard) com ligações aos três canais de leitura, ligação ao multímetro e ligação ao modelo

A figura 4.13 pormenoriza o método para esticar a LMF no perfil longitudinal do modelo. Na extremidade oposta à ilustrada (figura 4.13) a LMF é amarrada através de um cerra-cabos ao parafuso que faz a ligação entre o corpo longitudinal e os apoios. Nesta extremidade (Figura 4.13) a LMF é amarrada com cerra-cabos a um esticador de rosca, e este amarrado ao parafuso que conecta o apoio ao corpo longitudinal do modelo. O esticador de rosca tem como função pré-esforçar a LMF, visto que, aquando solicitada, a mesma deve estar na fase elástica, ou seja, no ponto  $A_s$  do diagrama tensão-extensão.



**Figura 4.11– Perfil longitudinal do Modelo**

Na Figura 4.14, é ilustrada uma das fendas, que após carregamento no modelo, exhibe uma abertura, que tem largura variável consoante o grau de carga. A abertura é colmatada com o descarregar do modelo e com o apoio das duas molas, uma em cada face do perfil longitudinal. A LMF durante o ensaio de carregamento não contacta com a mola.



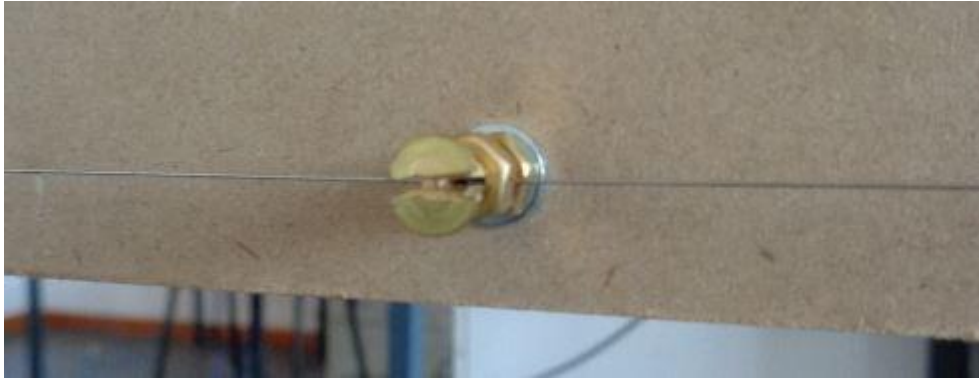
**Figura 4.12 – Pormenor de mola aplicada com LMF**

Seguidamente descreve-se a solução para fixar as ligas ao modelo.

Aos parafusos necessários para fixar a LMF, foi executado um entalhe com aproximadamente 1cm na secção transversal dos parafusos (Figura 4.15). O material dos parafusos é latão, visto ser macio, quando comparado com os parafusos de aço galvanizado.

No corpo longitudinal do modelo, foram feitas as perfurações necessárias ao número de parafusos de latão. Estes foram fixados com anilhas e porcas em cada face do modelo. A LMF é amarrada a cada parafuso, recorrendo a uma porca enroscada até o entalhe terminar, de modo que a liga, em cada troço de medição, fique fixa.

A leitura de resistência elétrica de cada troço de LMF foi obtida pela ligação de fios elétricos entre a placa de circuitos e estes parafusos (Figura 4.15).



**Figura 4.13 – Pormenor de parafuso (cerra-cabos)**

O paquímetro digital *Comecta* e vários pesos metálicos de variados quilogramas cada, completam o material e a instrumentação feita.

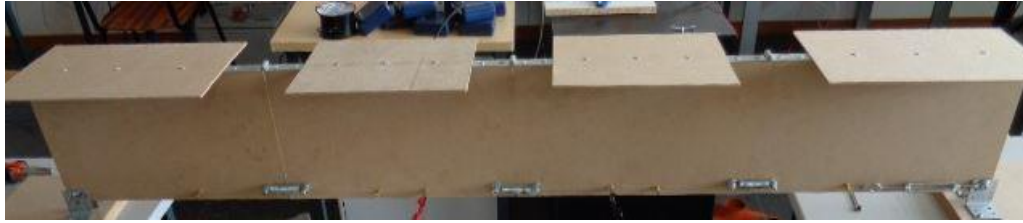
### **4.3 Procedimento experimental**

Com toda a instrumentação montada, iniciou-se o ensaio. Com auxílio do algoritmo sequencial de medição, os valores de resistência elétrica foram observados e registados com o modelo em repouso, associada à introdução da força de pré-esforço inicial na LMF.

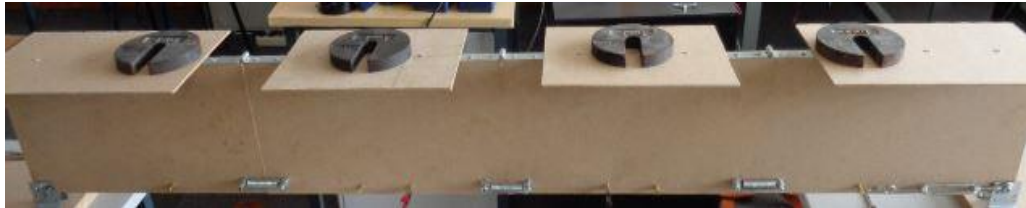
Em seguida foi executado um carregamento incremental de um quilograma até cinco quilogramas em cada placa (colocadas no topo do modelo). Com o algoritmo de medição, foi executado o varrimento do modelo experimental, para cada incremento de carga. No registo de dados, também foi efetuada a leitura da dimensão de cada fenda, através de um paquímetro digital.

Terminado o primeiro carregamento incremental, foi repetido o mesmo ensaio, duas vezes mais, registando-se a mesma tendência de valores nos três ensaios.

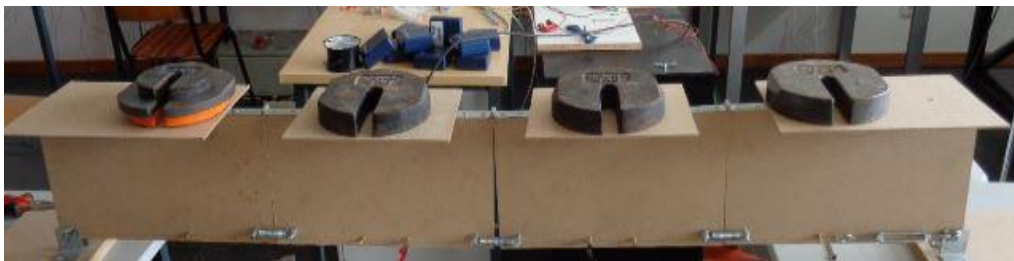
A Figuras 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.18 ilustram a evolução do ensaio de carga.



**Figura 4.14 – Viga pronta para ensaio**



**Figura 4.15 – Viga com um quilograma aplicado em cada placa**



**Figura 4.16 - Viga com cinco quilogramas aplicados em cada placa**

## **4.4 Resultados**

Com o cruzar dos resultados vindos do capítulo 3 pelo equipamento de aquisição de dados NI-PXI-1052, com os resultados dos vários carregamentos incrementais no modelo, foi possível chegar a algumas conclusões interessantes.

Os dois gráficos abaixo (Figura 4.19 e Figura 4.20), ilustram as três leituras de resistividade e extensão, de dois troços diferentes da LMF, registadas durante os três ensaios efetuados. Os restantes dados ilustrados em cada gráfico, resultam do ensaio do capítulo anterior.

No método de detecção e caracterização de dano estrutural, foram calculadas as extensões, recorrendo à regressão linear descrita no capítulo 3. A resistividade eléctrica obtida em cada troço, caracteriza a extensão do mesmo troço. Este processo decorreu durante os três ensaios de carregamento incremental.

Durante os referidos ensaios, a extensão nos diferentes troços da LMF. Foi também calculada através do valor da abertura de fenda em cada troço. Este valor foi determinado com o paquímetro digital.

Assim é possível comparar os valores de extensão da LMF obtidos de diferentes modos e verificar a eficácia do método de deteção e caracterização de dano.

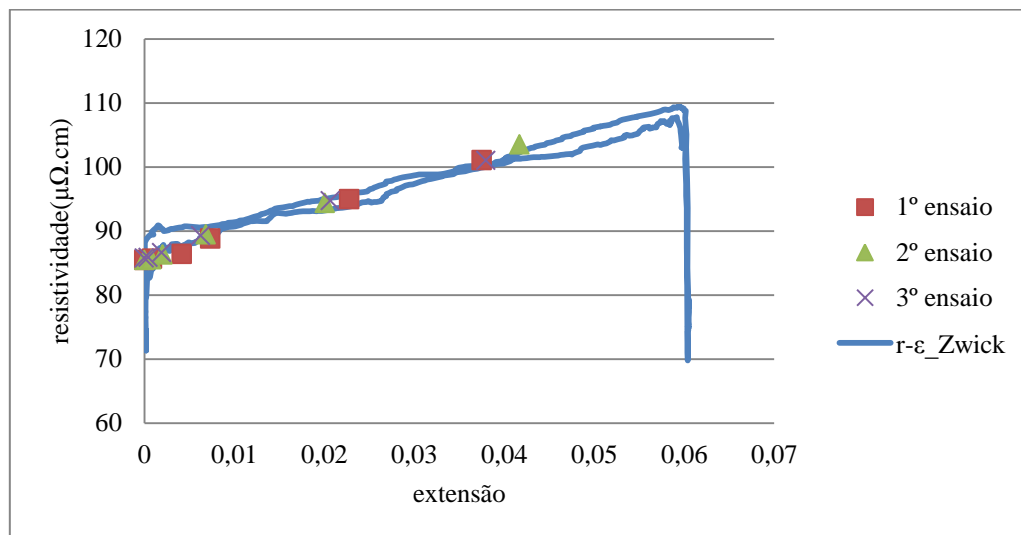


Figura 4.17 - Sobreposição de resultados de ensaio de carregamento incremental e distribuído para fenda a meio vão do modelo experimental com ensaio de resistividade-extensão

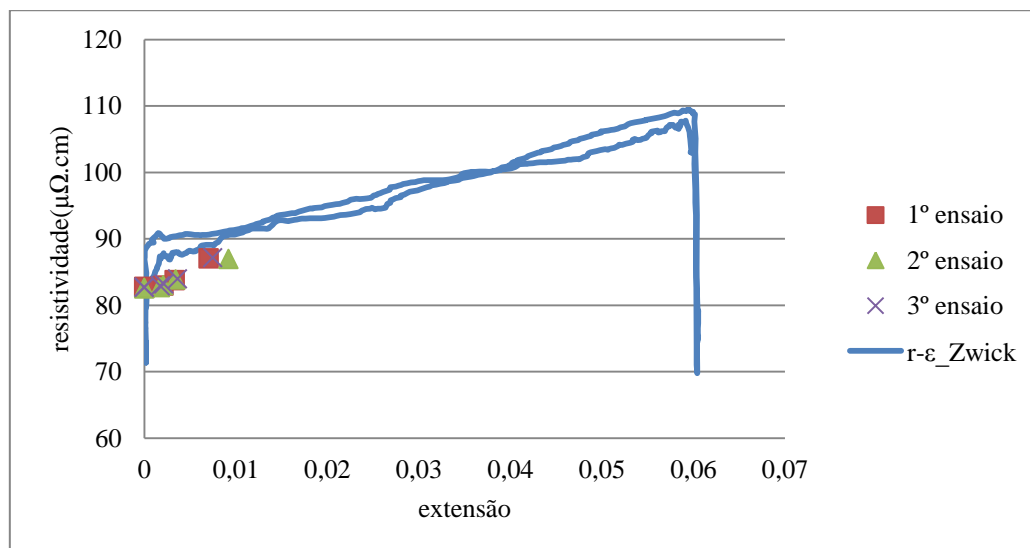


Figura 4.18 - Sobreposição de resultados de ensaio de carregamento incremental e distribuído para fendas a 1/4 de vão do modelo experimental com ensaio de resistividade-extensão

É de notar que as fendas a 1/4 de vão são menos solicitadas do que a meio vão. Os valores obtidos nos três ensaios de carga, relativos à resistividade elétrica, são inferiores e as extensões assumem a mesma tendência.

Para os dois casos, na fase inicial de cada carregamento incremental, ou seja, quando o modelo suporta um quilograma e dois quilogramas em cada placa, nos três ensaios executados é de notar que para esta fase inicial, o valor de resistividade elétrica é inferior à curva inicial do gráfico  $r-\varepsilon$  Zwick, obtido no ensaio do capítulo 3. Esta discrepância deve-se à quantidade de pré-esforço inicial imposto na LMF, diferir do ensaio do capítulo anterior para o ensaio referido neste capítulo. No modelo experimental, a tração na LMF é inferior à tração que a *Zwick/Roell Z050* provoca na LMF. Com isto, os resultados dos três ensaios de carga estão inferiores ao espectável. Verifica-se em ambos os gráficos.

Apresenta-se a origem dos gráficos acima representados (Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3 e Tabela 4.4).

	1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio	
	Kgr (meio vão)( $\Omega$ .mm)	$\varepsilon$ - meio vão	r (meio vão)( $\Omega$ .mm)	$\varepsilon$ - meio vão	r (meio vão)( $\Omega$ .mm)	$\varepsilon$ - meio vão
0	85,4513	0,0000	85,4513	0,0000	85,7445	0,00000
1	85,6608	0,0008	85,5351	0,0008	85,8702	0,00040
2	86,4147	0,0041	86,2891	0,0020	86,5823	0,00190
3	88,8024	0,0073	89,4307	0,0068	89,2631	0,00623
4	94,9599	0,0228	94,3734	0,0201	94,7085	0,02067
5	101,0755	0,0375	103,5050	0,0417	100,9917	0,03793

**Tabela 4.1- Leitura de resistividade elétrica e extensão para o troço a meio vão da LMF, através de paquímetro**

Kgr	1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio	
	(meio vão)( $\Omega$ .mm)	$\epsilon$ - meio vão	(meio vão)( $\Omega$ .mm)	$\epsilon$ - meio vão	(meio vão)( $\Omega$ .mm)	$\epsilon$ - meio vão
0	85,4513	-0,0068	85,4513	-0,0068	85,7445	-0,0057
1	85,6608	-0,0060	85,5351	-0,0065	85,8702	-0,0052
2	86,4147	-0,0032	86,2891	-0,0037	86,5823	-0,0026
3	88,8024	0,0056	89,4307	0,0080	89,2631	0,0073
4	94,9599	0,0285	94,3734	0,0263	94,7085	0,0275
5	101,0755	0,0511	103,5050	0,0601	100,9917	0,0508

Tabela 4.2 - Leitura de resistividade elétrica e extensão para o troço a meio vão da LMF, através de equação que caracteriza a extensão

Kgr	1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio	
	(1/4 vão)( $\Omega$ .mm)	$\epsilon$ - 1/4 vão	(1/4 vão)( $\Omega$ .mm)	$\epsilon$ - 1/4 vão	(1/4 vão)( $\Omega$ .mm)	$\epsilon$ - 1/4 vão
0	82,6029	0,0000	82,5192	0,0000	82,6448	0,0000
1	82,6448	0,0000	82,6029	0,0000	82,7286	0,0000
2	82,7705	0,0000	82,7286	0,0017	82,8962	0,0017
3	82,9799	0,0021	83,0218	0,0021	83,1894	0,0021
4	83,7758	0,0033	83,8596	0,0034	83,9852	0,0036
5	87,0431	0,0070	86,9593	0,0092	87,1687	0,0075

Tabela 4.3 - Leitura de resistividade elétrica e extensão para o troço a 1/4 de vão da LMF, através de paquímetro

Kgr	1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio	
	(1/4 vão)( $\Omega$ .mm)	$\epsilon$ - 1/4 vão	(1/4 vão)( $\Omega$ .mm)	$\epsilon$ - 1/4 vão	(1/4 vão)( $\Omega$ .mm)	$\epsilon$ - 1/4 vão
0	82,6029	-0,0082	82,5192	-0,0085	82,6448	-0,0080
1	82,6448	-0,0080	82,6029	-0,0082	82,7286	-0,0078
2	82,7705	-0,0076	82,7286	-0,0078	82,8962	-0,0072
3	82,9799	-0,0069	83,0218	-0,0068	83,1894	-0,0062
4	83,7758	-0,0042	83,8596	-0,0040	83,9852	-0,0035
5	87,0431	0,0068	86,9593	0,0065	87,1687	0,0072

Tabela 4.4 - Leitura de resistividade elétrica e extensão para o troço a 1/4 de vão da LMF, através de equação que caracteriza a extensão

Quando caracterizadas extensões bastante reduzidas (abaixo de 0,5%) o método caracteriza a extensão como negativa. Estas extensões não são representativas (Tabela 4.4).

Demonstra-se o erro relativo percentual de extensões para cada troço da LMF.

	1° Ensaio	2° Ensaio	3° Ensaio
Kg	Erro relativo (%)	Erro relativo (%)	Erro relativo (%)
0	-	-	-
1	850	912,5	1400
2	178,04	285	236,84
3	23,28	17,64	17,17
4	25	30,84	33,04
5	36,26	44,12	33,93

**Tabela 4.5 – Erro relativo percentual de extensões para o troço a meio vão da LMF**

	1° Ensaio	2° Ensaio	3° Ensaio
Kg	Erro relativo (%)	Erro relativo (%)	Erro relativo (%)
0	-	-	-
1	-	-	-
2	-	558,82	523,52
3	428,57	423,80	395,23
4	227,27	217,64	197,22
5	2,85	29,34	4

**Tabela 4.6 – Erro relativo percentual de extensões para o troço a 1/4 de vão da LMF**

Ao comparar os dois modos de determinar a extensão na LMF, para o mesmo vão, é demonstrado que as extensões são aproximadas. O erro relativo percentual observado tende a diminuir com o aumento das extensões, argumento este, que viabiliza o método de caracterização da extensão na LMF através da resistividade eléctrica, para extensões consideráveis no material (Tabela 4.5 e Tabela 4.6). Assim, torna-se válido caracterizar a extensão a partir da resistividade eléctrica, conforme referido no capítulo anterior.

## **5 Conclusões**

As aplicações de ligas com memória de forma em estruturas de engenharia civil, dividem-se em áreas, com temáticas variadas e com diversos objetivos.

Na detecção de dano, para uma análise sequencial ao longo do modelo, foi necessário desenvolver alguma instrumentação. Daqui, surge o algoritmo de varrimento de sensores, que facilita as leituras ao utilizador de modo a monitorizar o modelo experimental.

Nos ensaios controlados, é estudada a sensibilidade do comportamento da resistência elétrica sob efeito de ensaios cíclicos. A resistência elétrica é transformada em resistividade, ficando o utilizador com um valor absoluto. Com recurso a uma equação, a resistividade e a extensão da LMF são relacionadas. Com este dado, a quantificação de dano é alcançada.

No modelo experimental, são implementadas as tarefas desenvolvidas anteriormente. Quando aplicadas cargas, há alteração no estado do modelo, ou seja, há um aumento de resistividade e extensão na LMF. Os resultados adquiridos neste ensaio, quando sobrepostos com os dados obtidos no ensaio de caracterização da relação entre extensão e resistividade, demonstram uma discrepância entre eles. Esta discrepância deve-se às diferentes condições de pré-esforço inicialmente imposto na LMF, em cada ensaio. Portanto, é necessário pré-esforçar inicialmente a LMF, com a finalidade de obter validade na caracterização da extensão.

As LMF em níquel-titânio são um excelente material para aplicar como sensor de alta-deformação devido à sua capacidade de alcançarem 8% de extensão sem quaisquer extensões residuais.

O seu comportamento à deformação é bastante estável, ou seja, o material resiste permanentemente a deformações e à fadiga. Estas propriedades são apropriadas para um sensor que é suficientemente sensível para detetar pequenas deformações, mas também robusto para suportar deformações maiores, apresentando assim um vasto campo de aplicabilidade, quando enquadrado num sistema de monitorização da integridade estrutural.

Para futuros desenvolvimentos, utilizar este sistema num ensaio mais representativo de uma estrutura real e utilizar as LMF também como atuadores para mitigar a abertura da fenda de forma automática.



## Bibliografia

- Airoidi, G., Lodi, D. a., & Pozzi, M. (1997). The Electric Resistance of Shape Memory Alloys in the Pseudoelastic Regime. *Le Journal de Physique IV*, 07(C5), C5–507–C5–512.
- Amaral, B. (2014). “Vigas de GFRP reforçadas com ligas de memória de forma.” FCT/UNL, Almada.
- Brownjohn, J. M. W. (2007). Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 589–622.
- Cui, D., Song, G., & Li, H. (2010). Modeling of the electrical resistance of shape memory alloy wires. *Smart Materials and Structures*, 19(5), 055019.
- Euroflex - Nitinol superelastic wire. (2015).
- Fernandes, F., Mahesh, K., Gaspar, C., & Moldovan, I. (2010). *Caracterização estrutural, térmica e mecânica de ligas Ni-Ti com memória de forma para aplicação em engenharia civil. Reabilitar 2010*.
- Figueiredo, E., Moldovan, I., & Barata Marques, M. (2013). *Condition Assessment of Bridges : Past , Present and Future A Complementary Approach*. Universidade Católica Editora, Lisboa, Portugal.
- Guerreiro, M. (2014). “Identificação de Dano Estrutural com Base em Análise Modal.” Tese de Mestrado, FCT/UNL, Almada.
- Janke, L., Czaderski, C., Motavalli, M., & Ruth, J. (2005). Applications of shape memory alloys in civil engineering structures - Overview, limits and new ideas. *Materials and Structures*, 38(279), 578–592.
- Kim, H., Han, Y., young Lee, D., Ha, J.-I., & Cho, K.-J. (2013). Sensorless displacement estimation of a shape memory alloy coil spring actuator using inductance. *Smart Materials and Structures*, 22(2).
- Kirkby, E. L., O’Keane, J., de Oliveira, R., Michaud, V. J., & Manson, J. E. (2009). Tailored processing of epoxy with embedded shape memory alloy wires. *Smart Materials and Structures*, 18(9).
- Ko, J. M., & Ni, Y. Q. (2005). Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering Structures*, 27(12 SPEC. ISS.), 1715–1725.
- LabVIEW Basics I: Introduction Course Manual*. (2007). International Business.
- Li, H., Mao, C., Liu, Z., & Ou, J. (2005). SHAPE MEMORY ALLOY-BASED SMART CIVIL STRUCTURES WITH SELF-SENSING. *Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring*, 259–268.

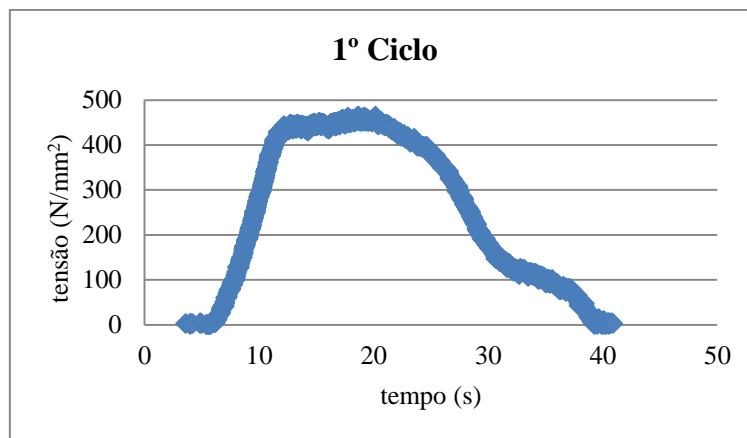
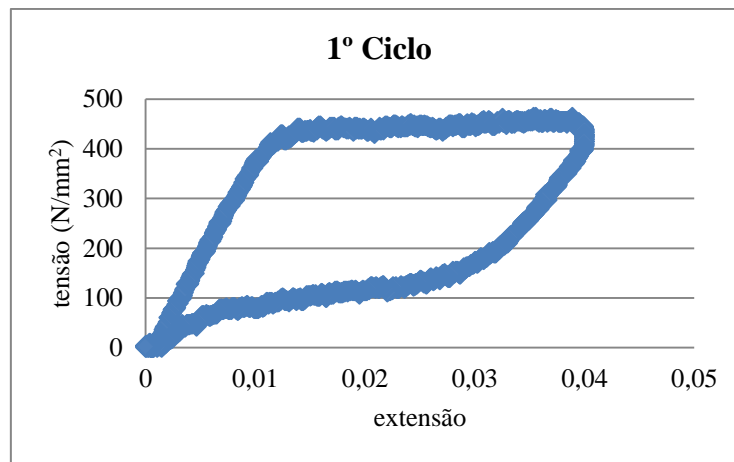
- Mieloszyk, M., Skarbek, L., Krawczuk, M., Ostachowicz, W., & Zak, A. (2011). Application of fibre Bragg grating sensors for structural health monitoring of an adaptive wing. *Smart Materials and Structures*, 20(12).
- Nagai, H., & Oishi, R. (2006). Shape memory alloys as strain sensors in composites. *Smart Materials and Structures*, 15(2), 493–498.
- Paula, a. S., Mahesh, K. K., dos Santos, C. M. L., Braz Fernandes, F. M., & da Costa Viana, C. S. (2008). Thermomechanical behavior of Ti-rich NiTi shape memory alloys. *Materials Science and Engineering A*, 481-482(1-2 C), 146–150.
- Pereira, L. (2011). “*Ligas com memória de forma características e aplicações em engenharia civil.*” Tese de Mestrado, FCT/UNL, Almada.
- Rodrigues, A. (2014). “*Estudo de uma estrutura adaptativa baseada no conceito de tensegridade.*”
- Rodrigues, C., Félix, C., Lage, A., & Figueiras, J. (2010). Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges. *Engineering Structures*, 32(8), 1993–2002.
- Russo, A. (2008). *Variation of Electrical Resistance in Superelastic NiTi for Sensor Applications*. Massachusetts Institute of Technology.
- Santos, F. (2011). “*Vibration control with shape-memory alloys.*” Tese de Doutoramento, FCT/UNL, Almada.
- Schrooten, J., Michaud, V., & Parthenios, J. (2002). Progress on composites with embedded shape memory alloy wires. *Materials Transactions*, 43(5), 961–973.
- Schulz, W., Conte, J., & Udd, E. (2001). Long Gage Fiber Optic Bragg Grating Strain Sensors to Monitor Civil Structures. *Blue Road Research*, pp. 56–65.
- Wang, T. M., Shi, Z. Y., Liu, D., Ma, C., & Zhang, Z. H. (2012). An accurately controlled antagonistic shape memory alloy actuator with self-sensing. *Sensors (Switzerland)*, 12(6), 7682–7700.
- Zhang, J. J., Yin, Y. H., & Zhu, J. Y. (2013). Electrical resistivity-based study of self-sensing properties for shape memory alloy-actuated artificial muscle. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 13(10), 12958–12974.
- Zhou, Z., Li, P., Li, Y., Zhao, P., Xiao, H., & Ou, J. (2012). Novel Coaxial Cable Sensors for Large Strain Measurement in SHM. In *Civil structural monitoring workshop (cshm-4) - Poster 20*.

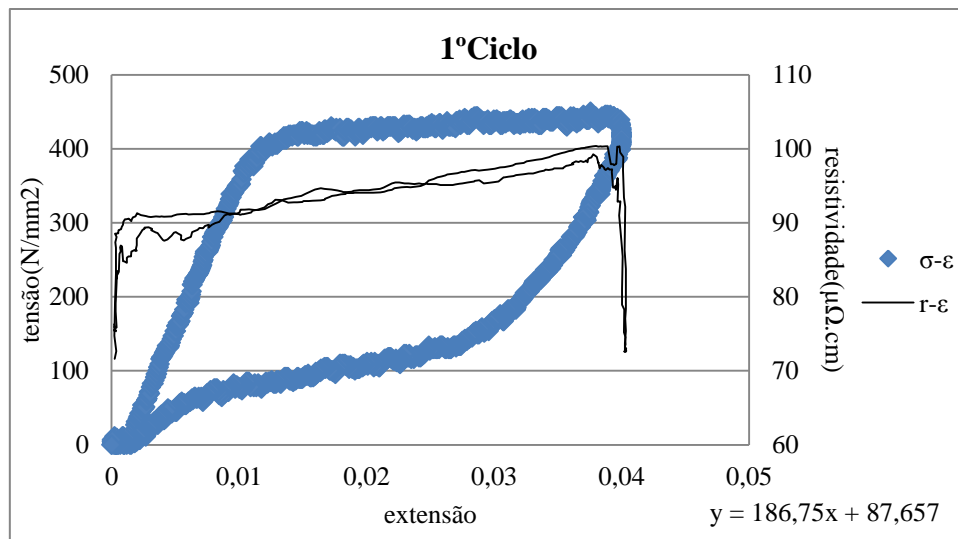
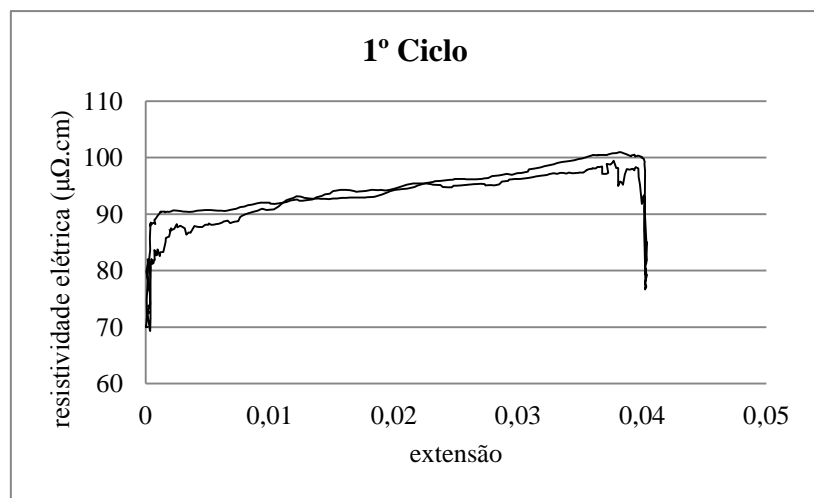
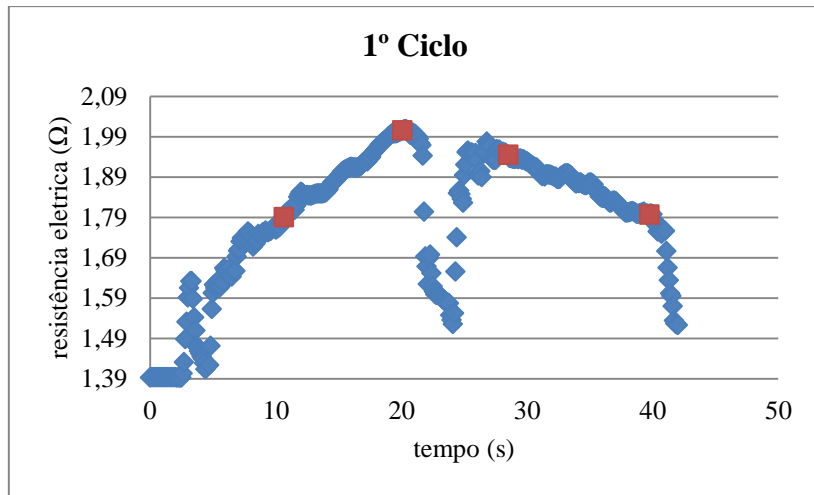
## Anexos

### Anexo A – Restantes resultados dos ensaios cíclicos

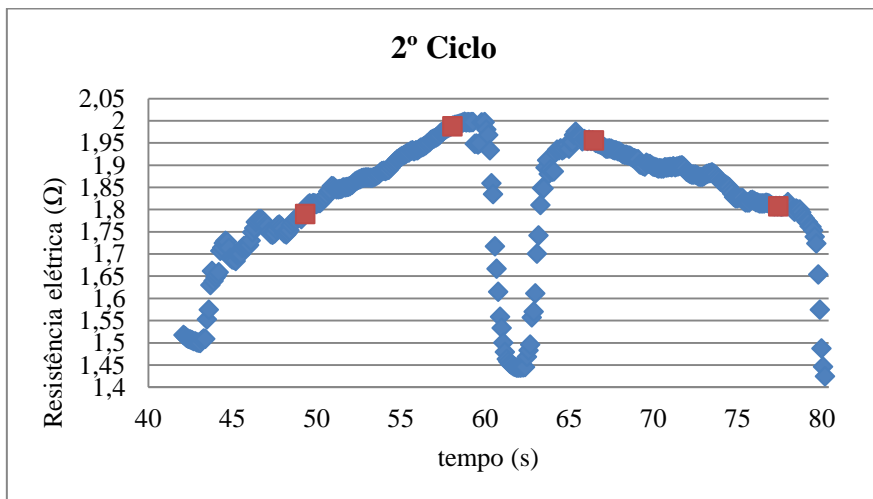
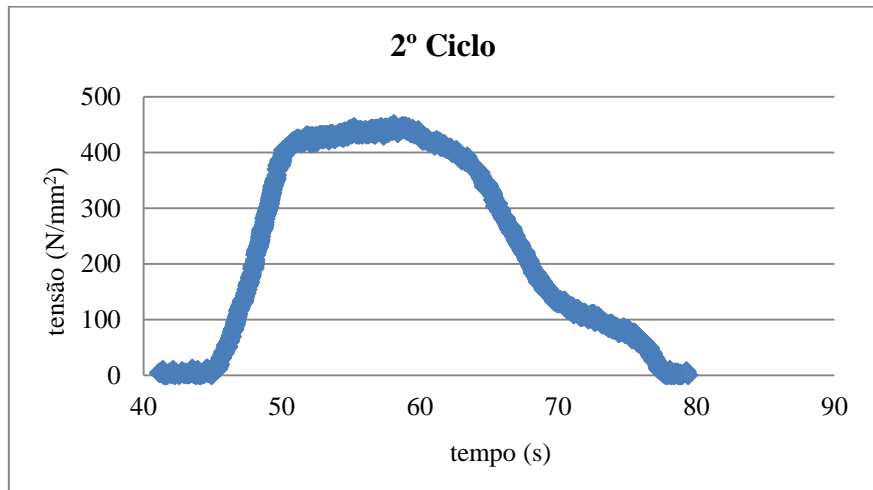
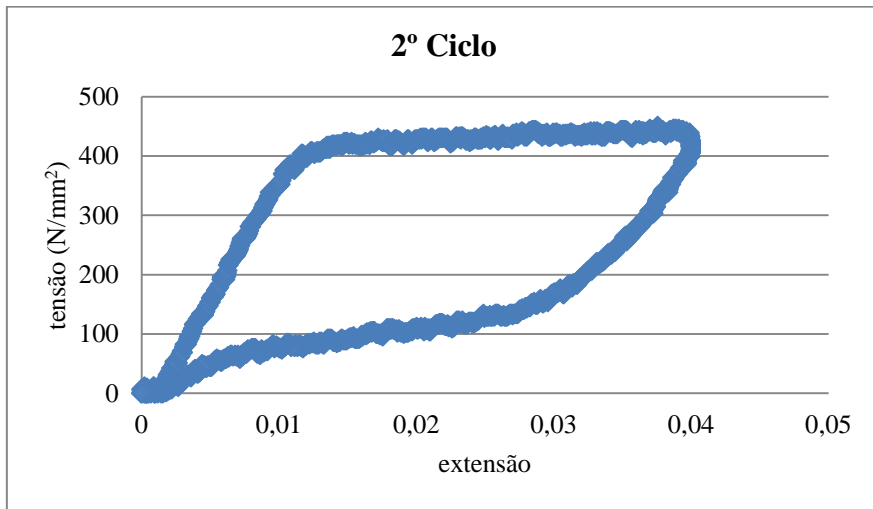
Os resultados da primeira fase do ensaio (extensão até 4%) são apresentados em seguida, por ciclo. Para cada fase de ensaios foi necessário determinar os gráficos ilustrados para validar todos os resultados obtidos.

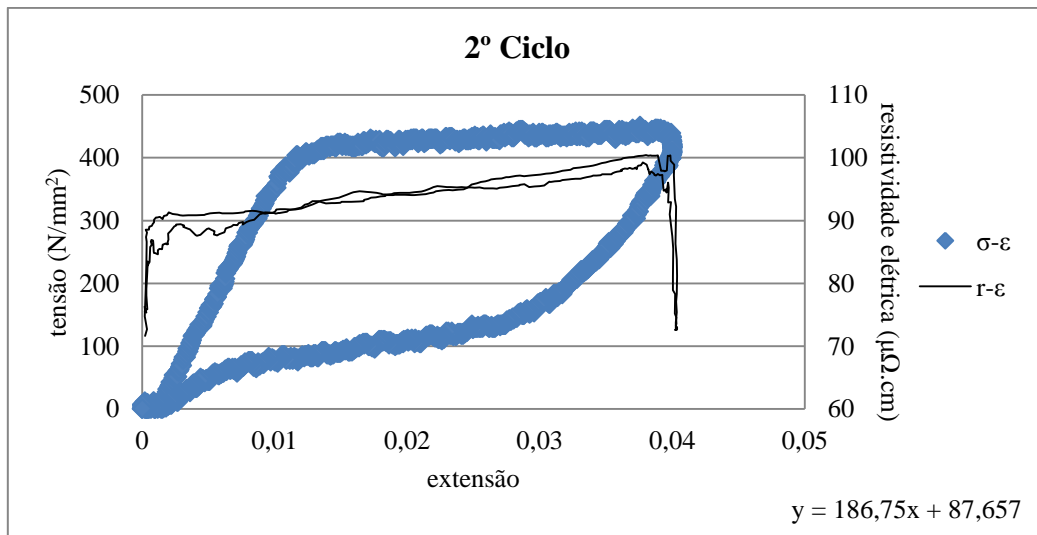
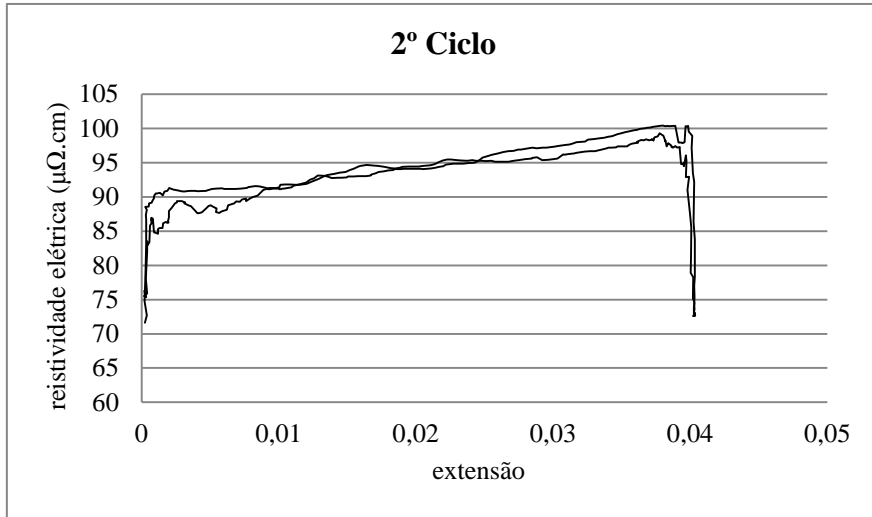
Para a primeira fase de ensaio:



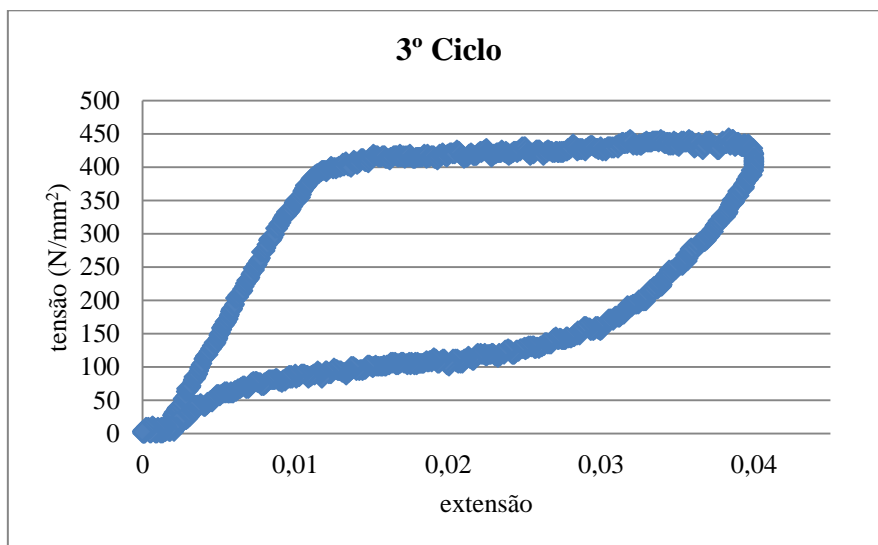


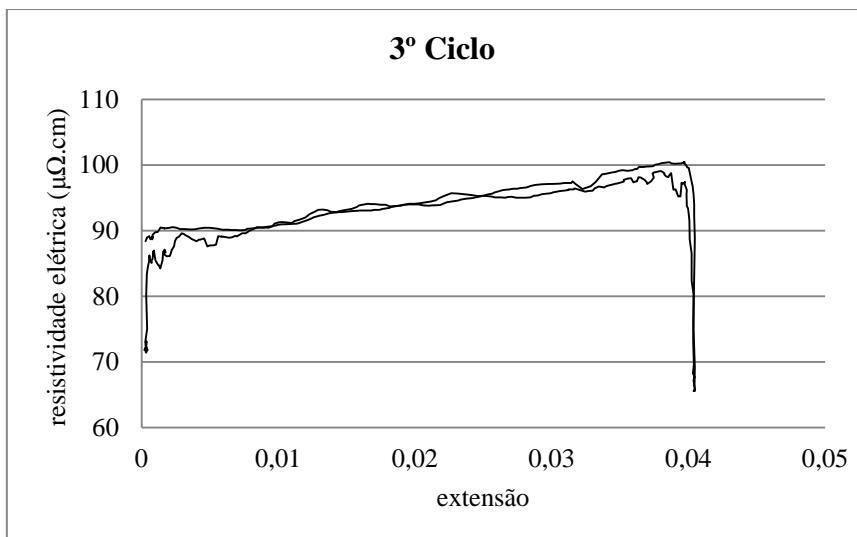
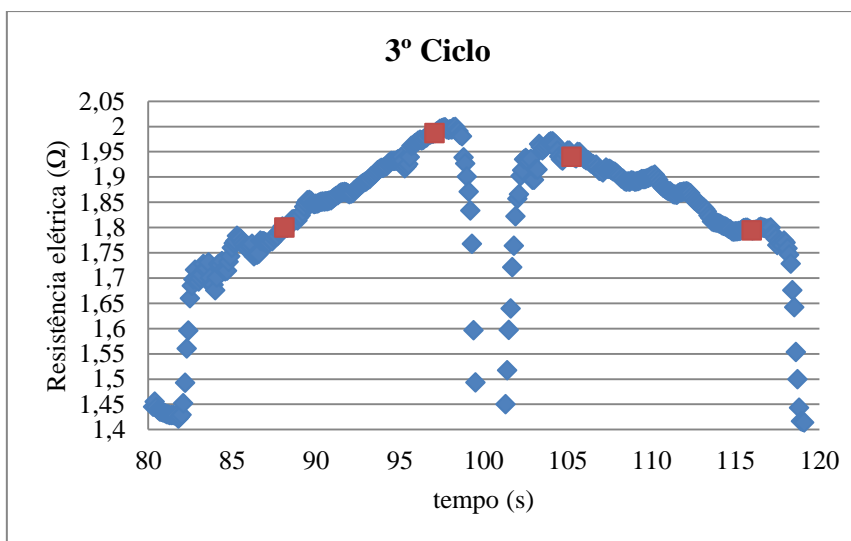
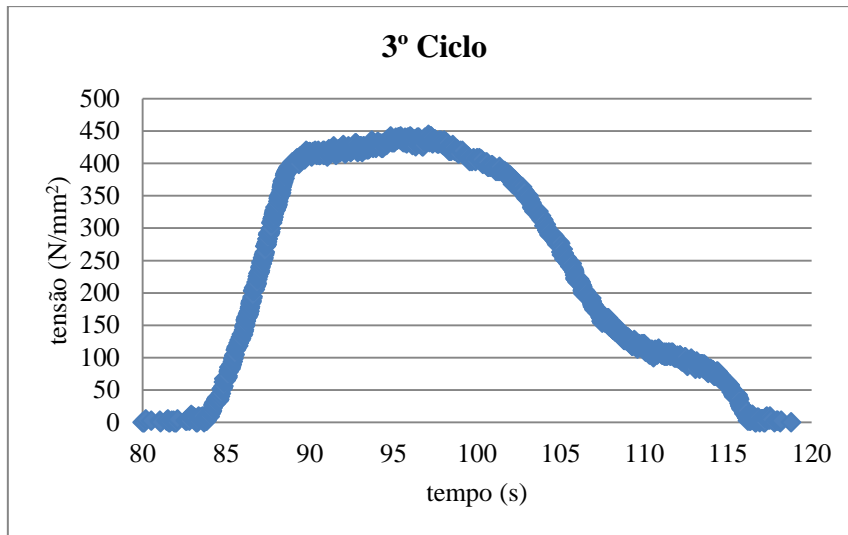
- 2º Ciclo:

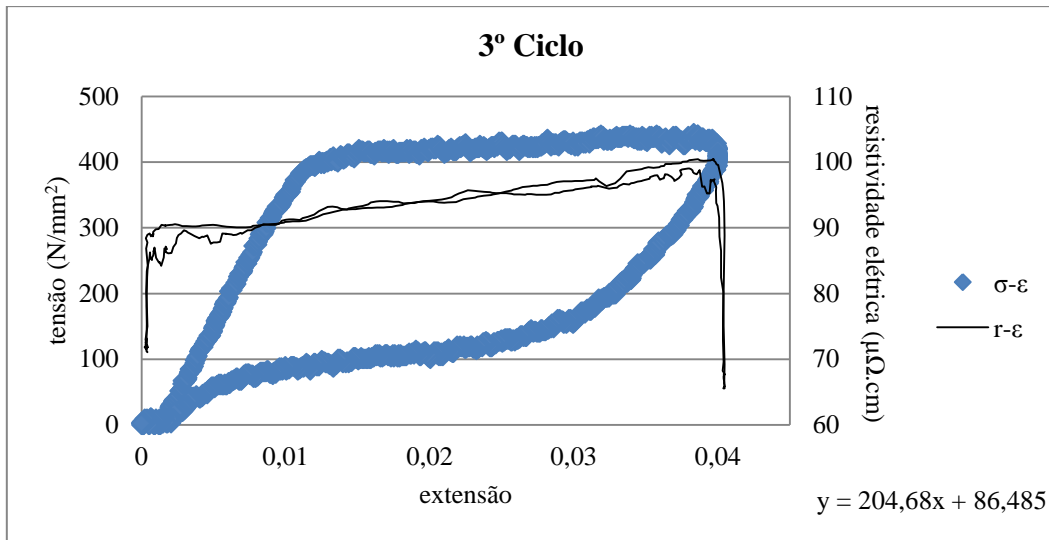




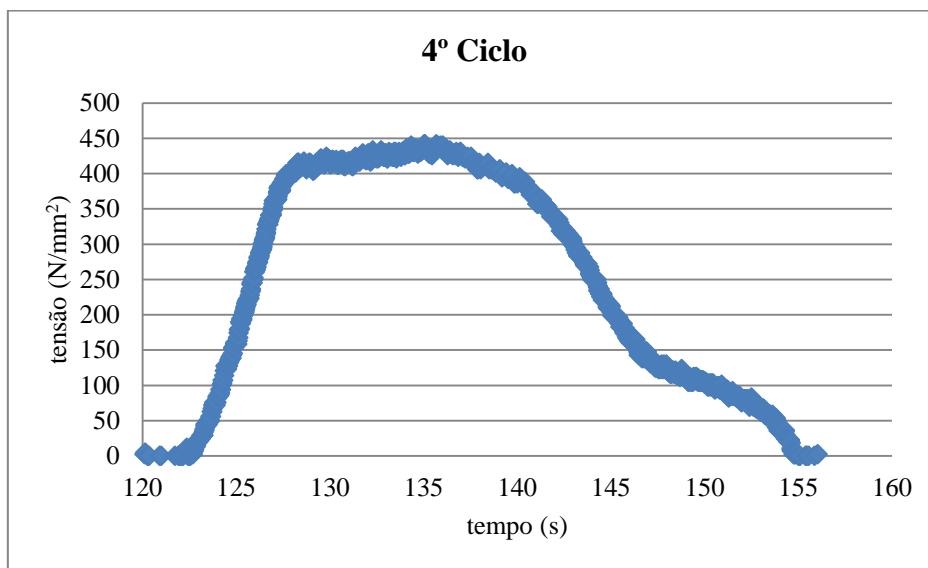
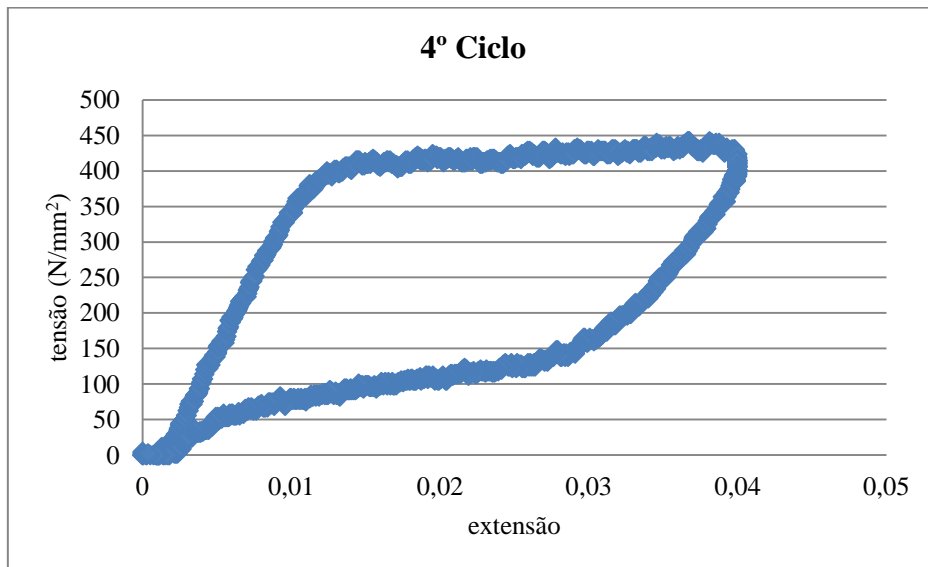
- 3º Ciclo:

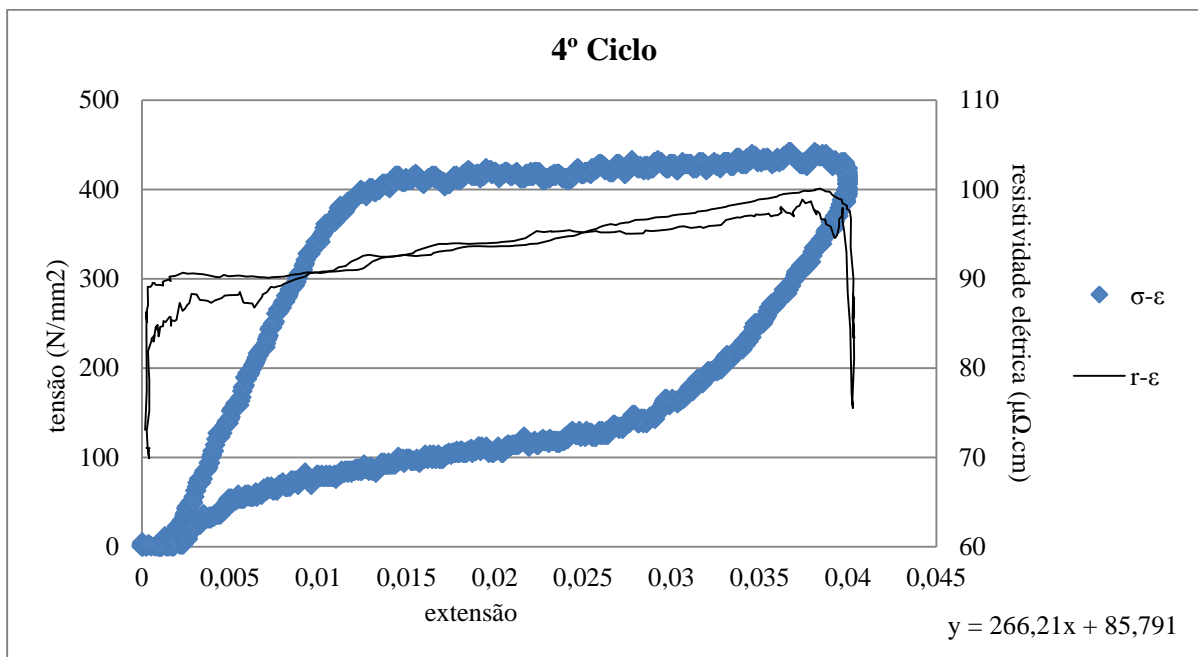
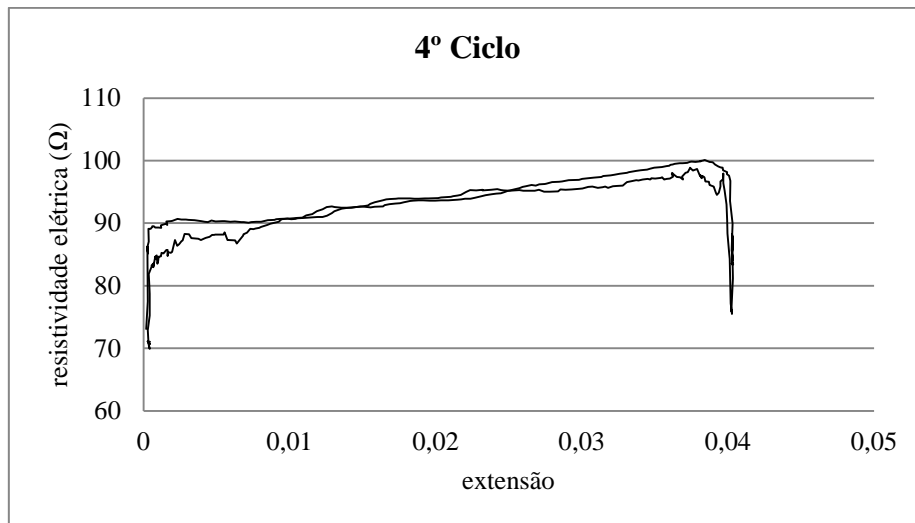
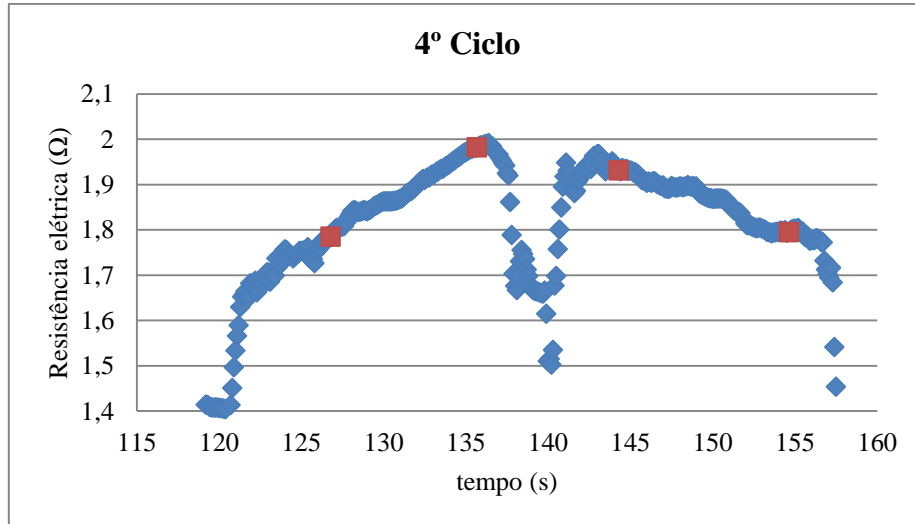




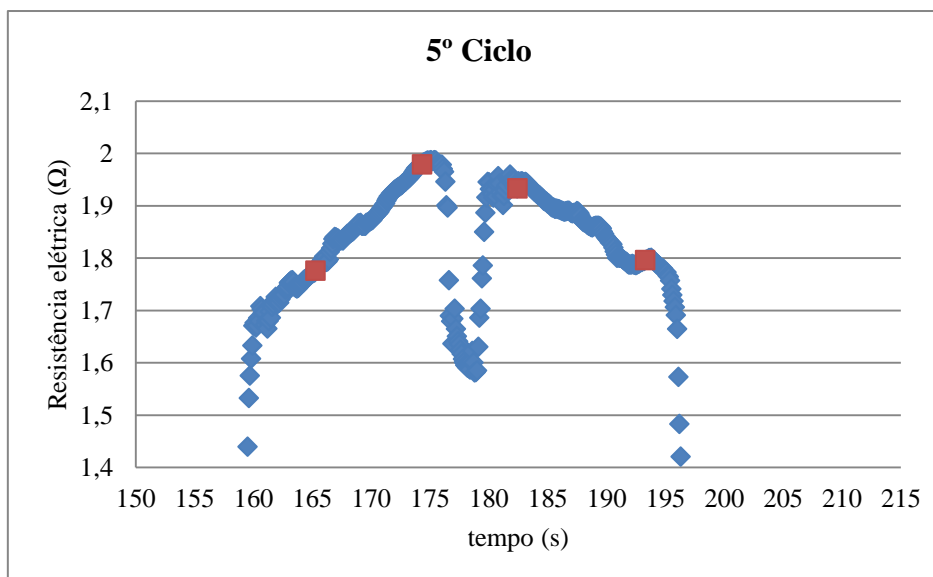
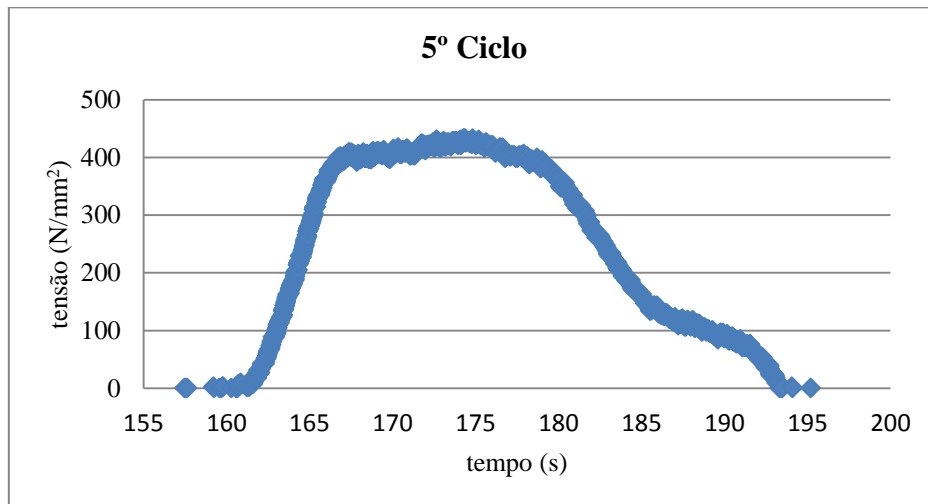
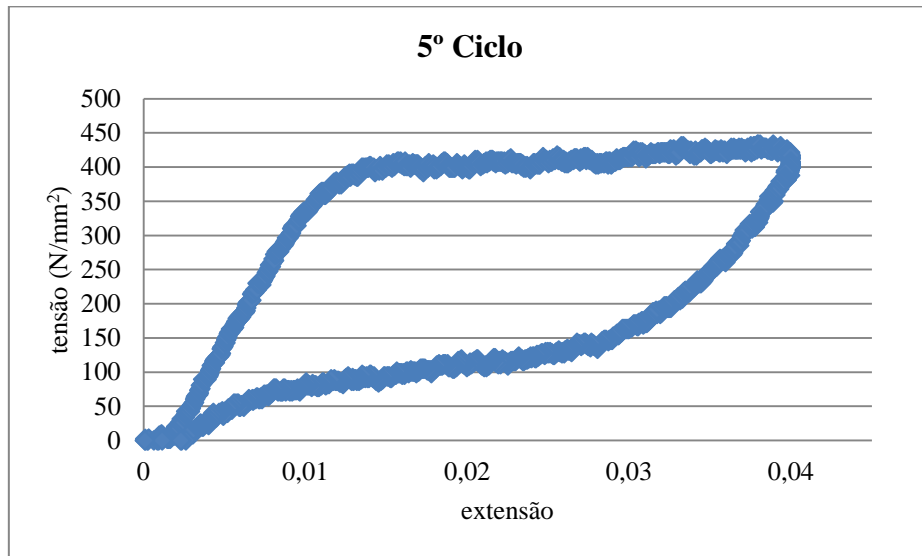


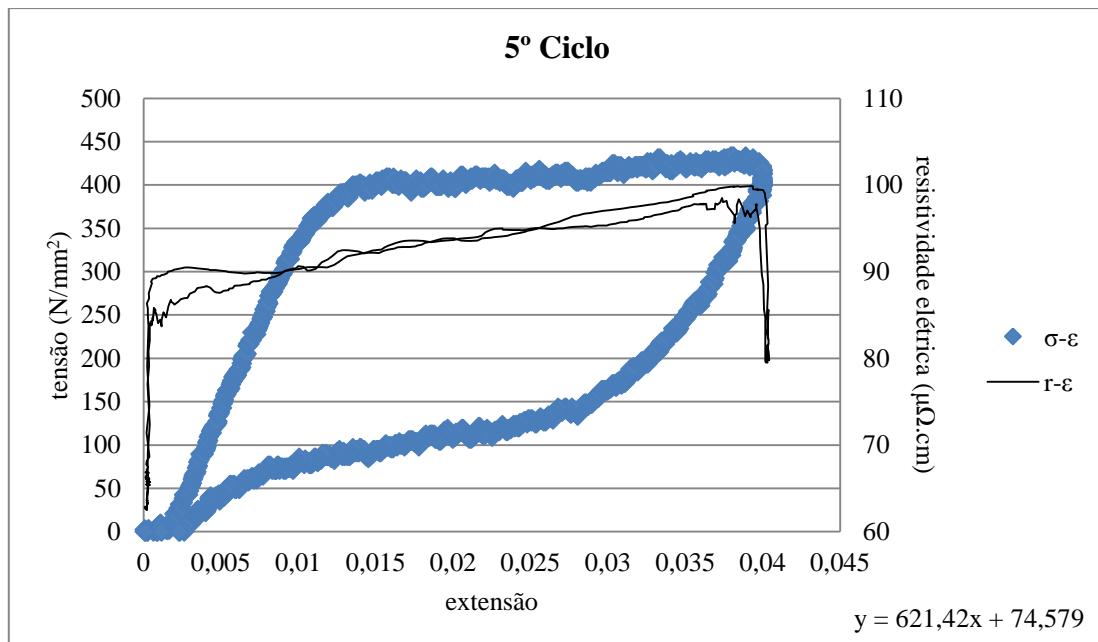
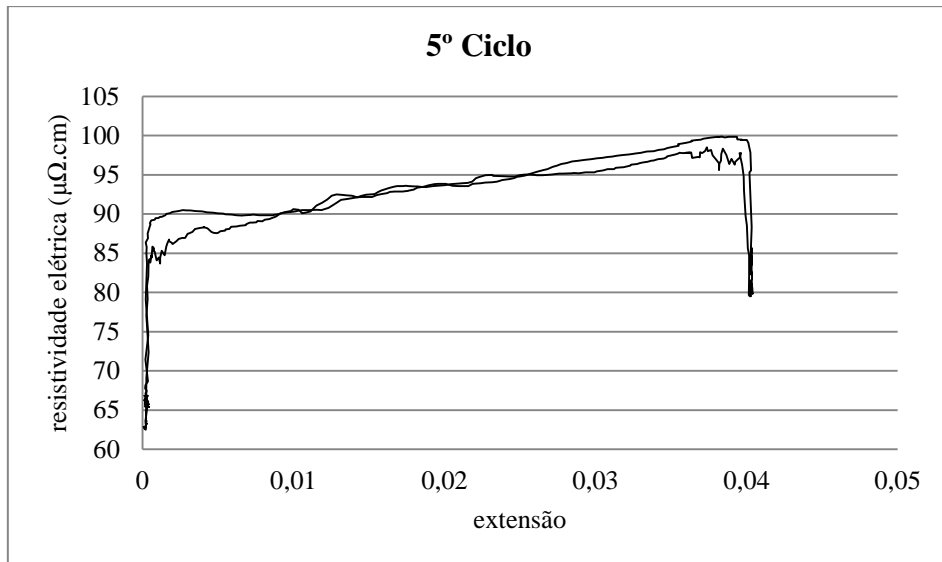
- 4º Ciclo:





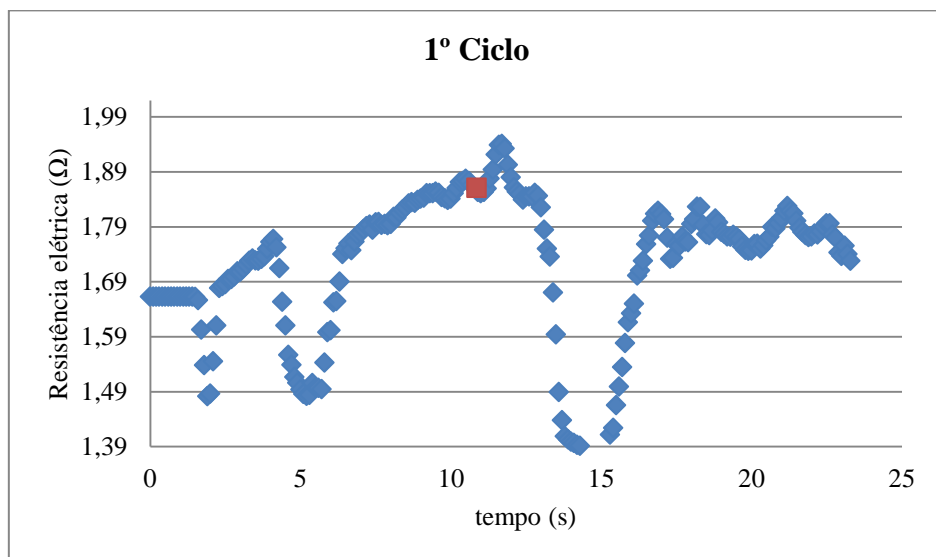
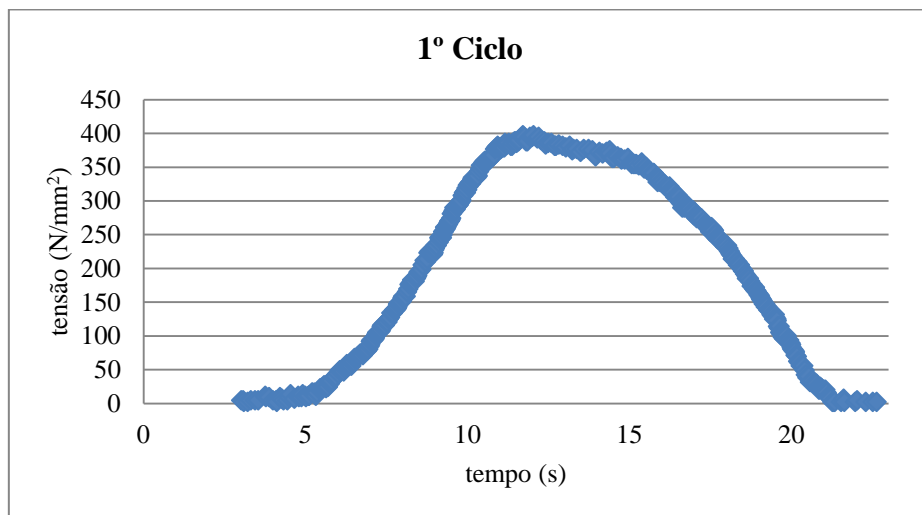
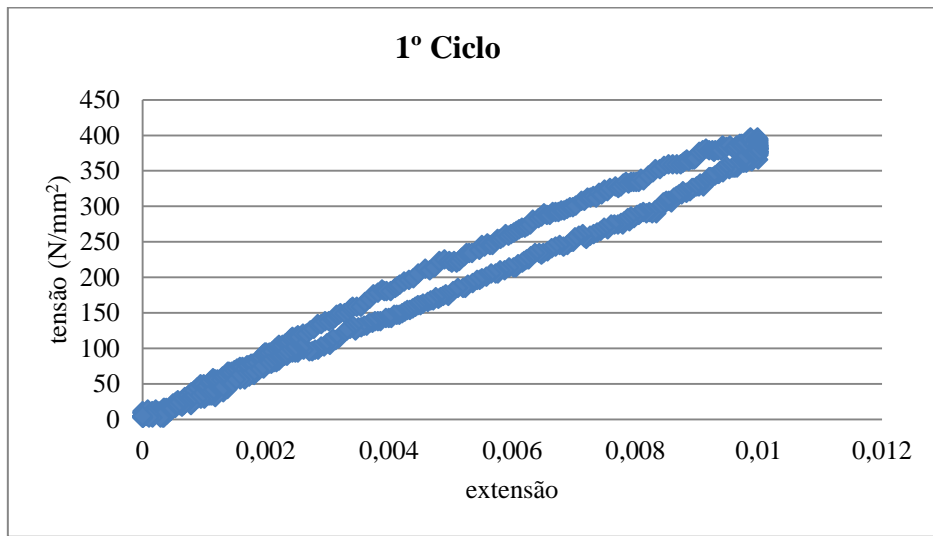
- 5º Ciclo:

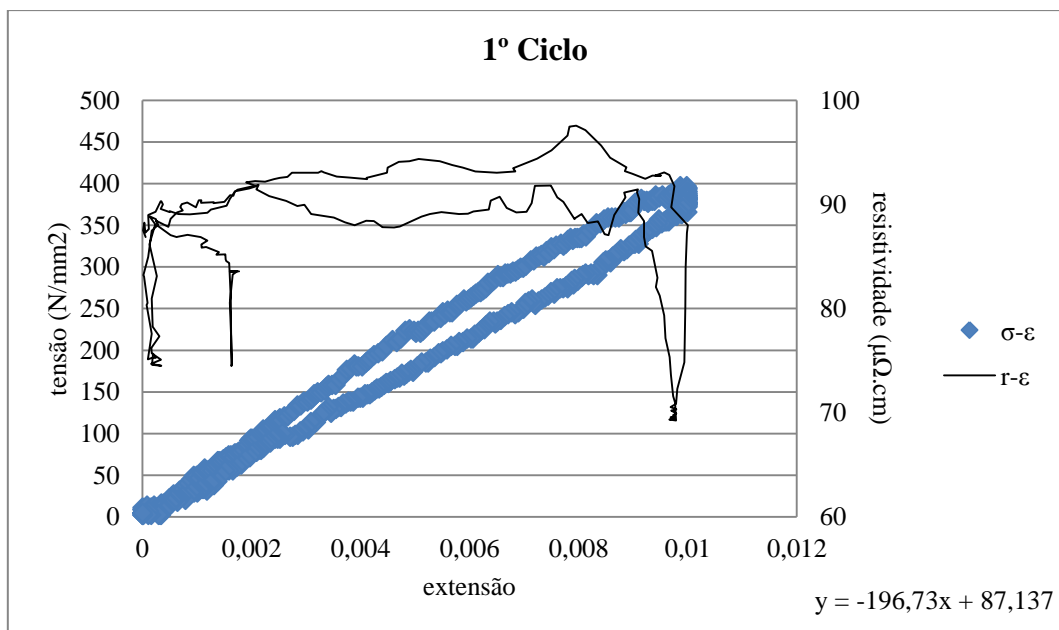
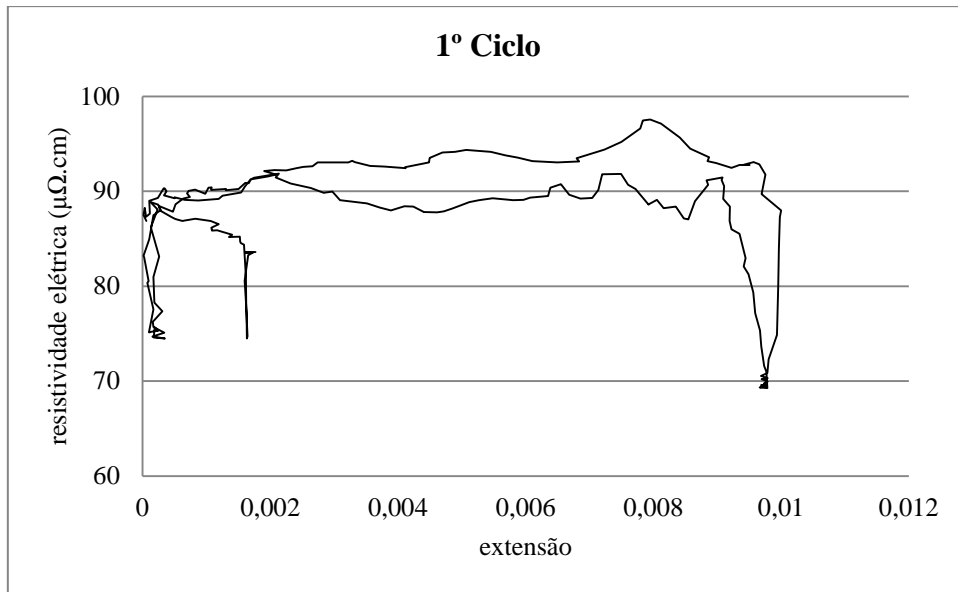




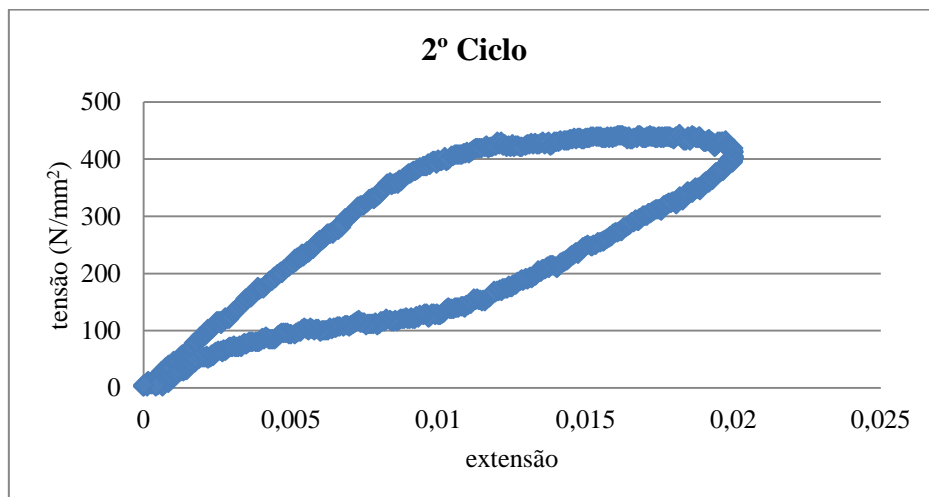
Os resultados da segunda fase do ensaio são apresentados em seguida, por ciclo.

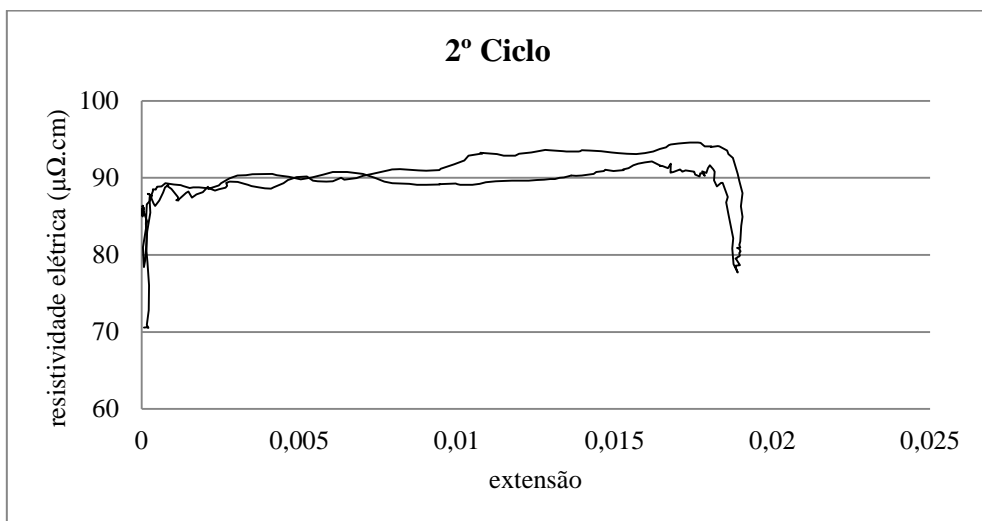
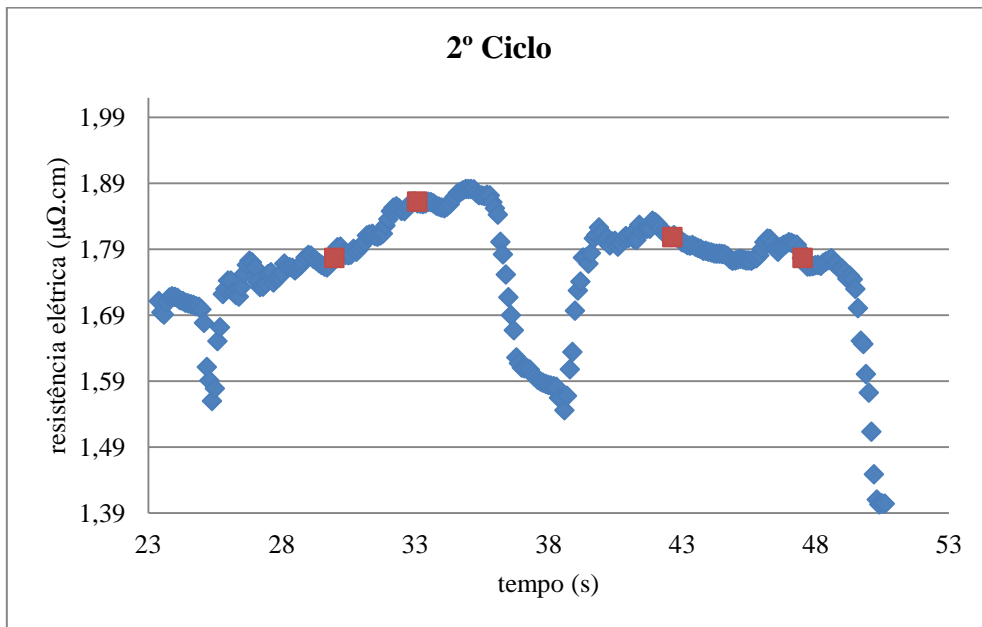
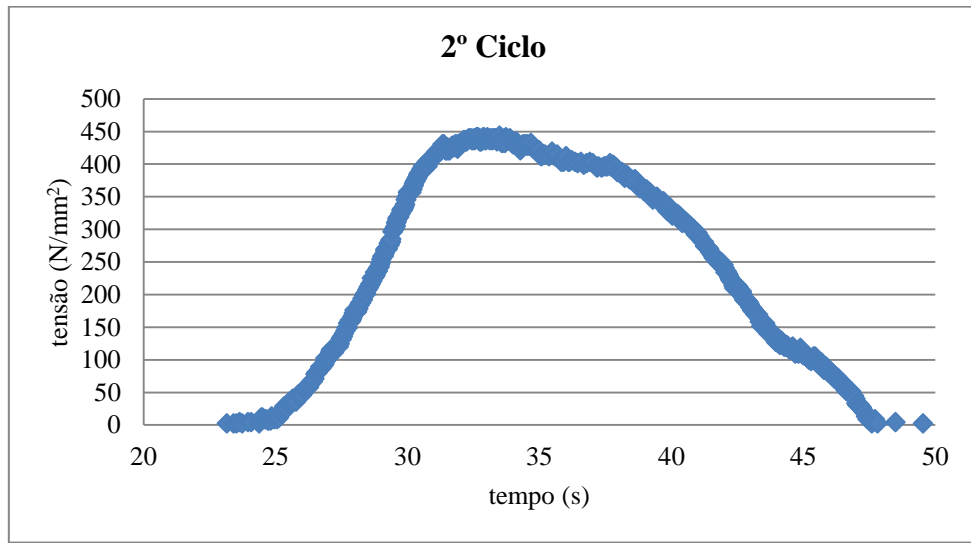
- 1ºCiclo:

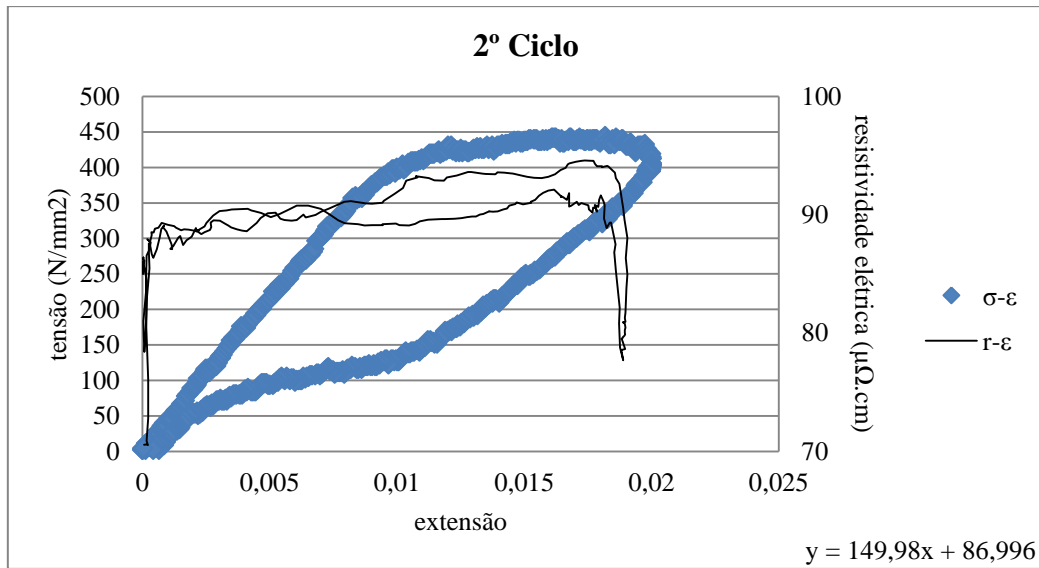




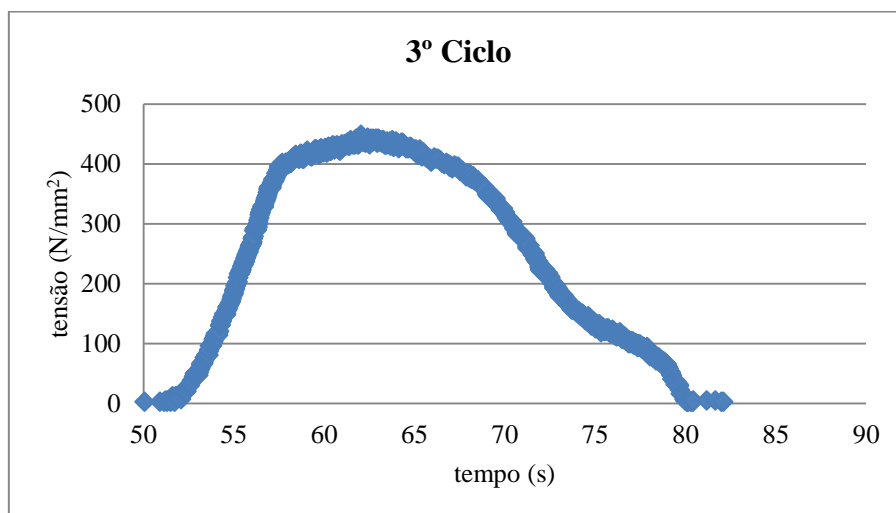
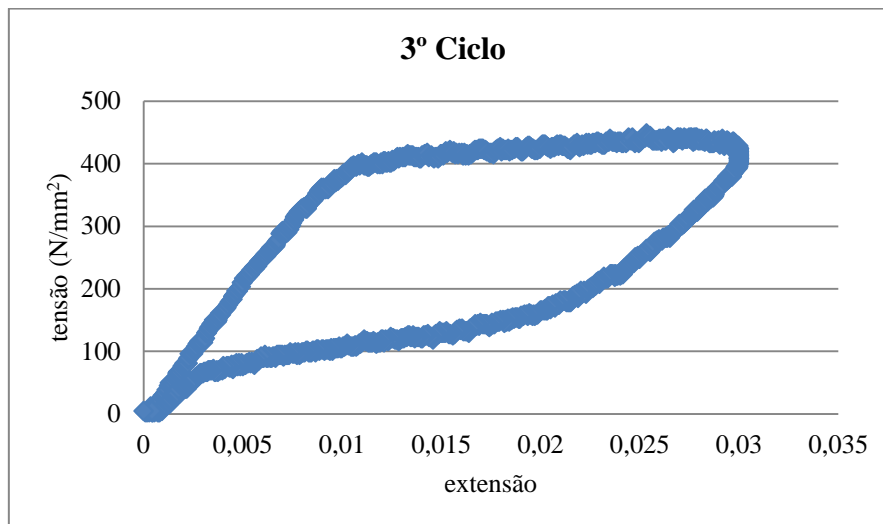
- 2º Ciclo:

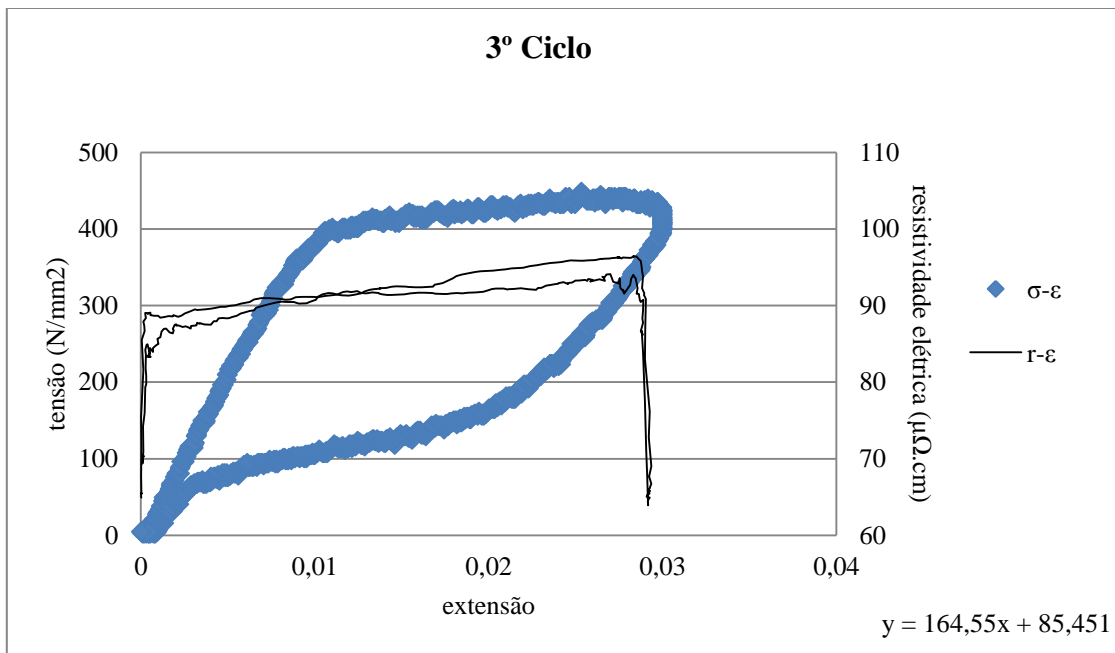
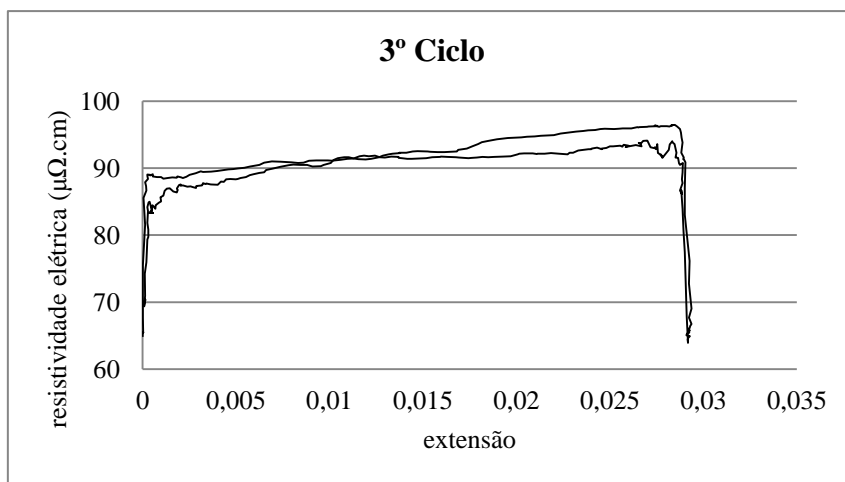
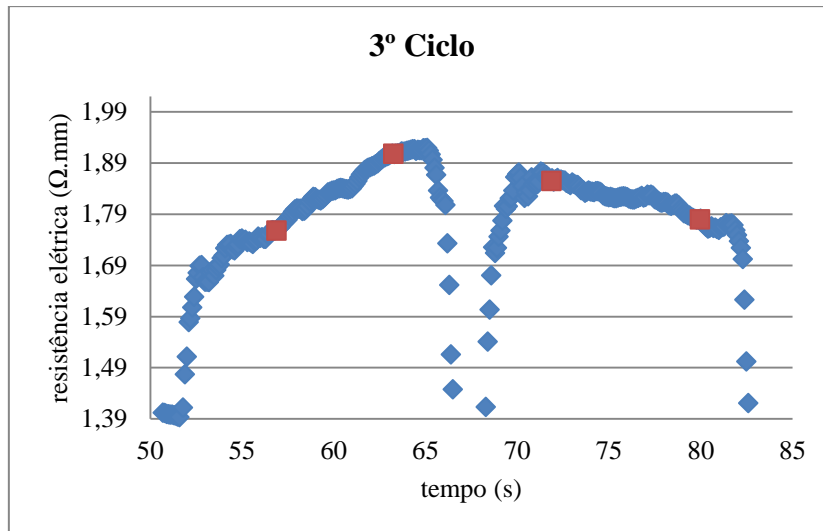




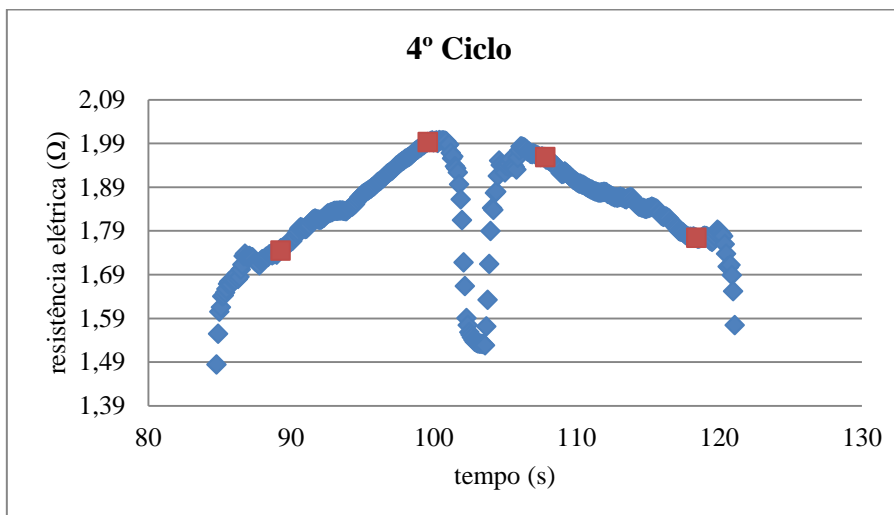
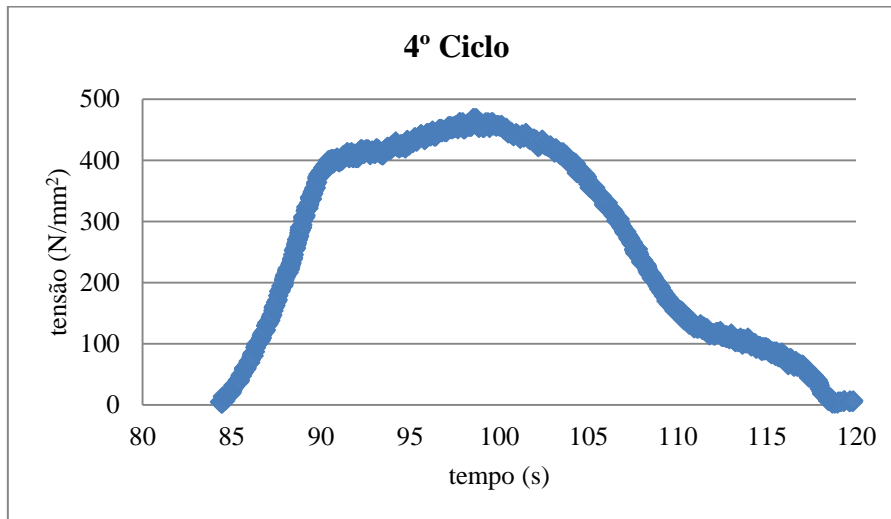
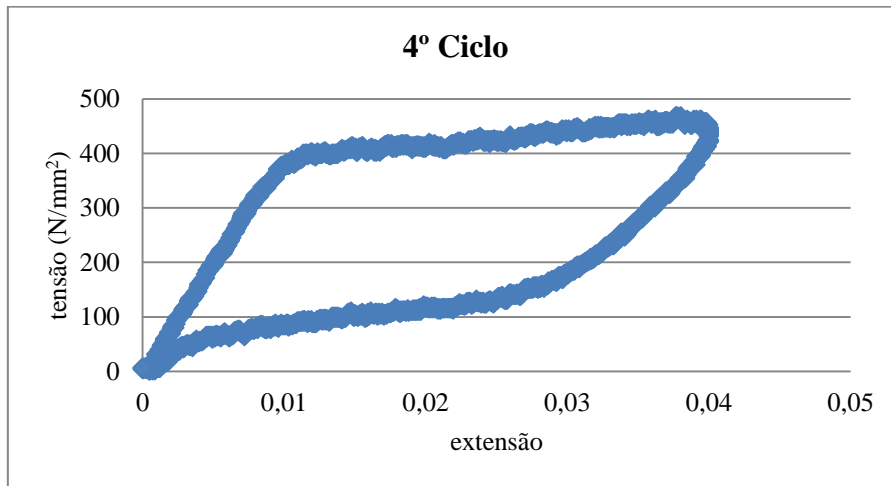


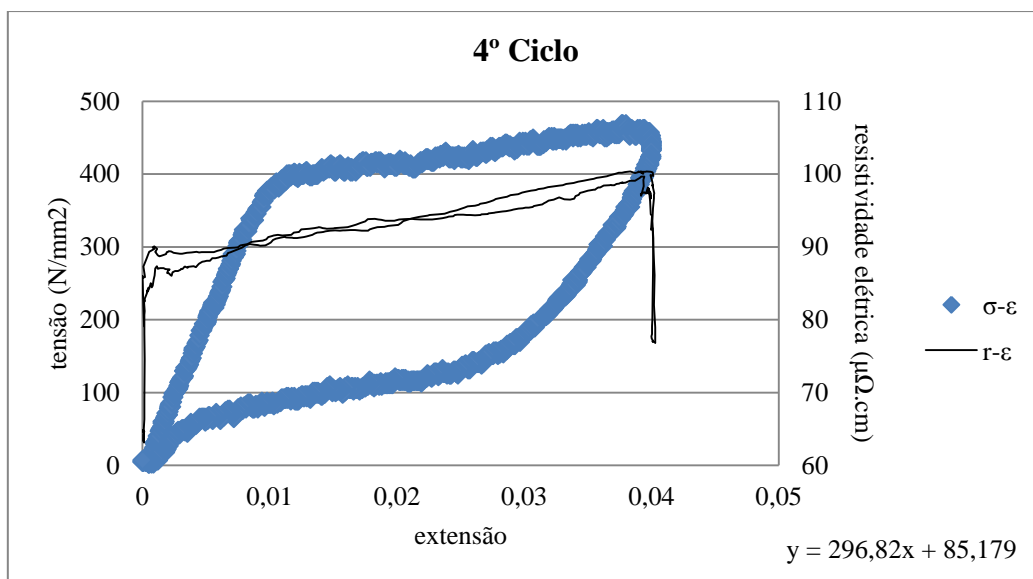
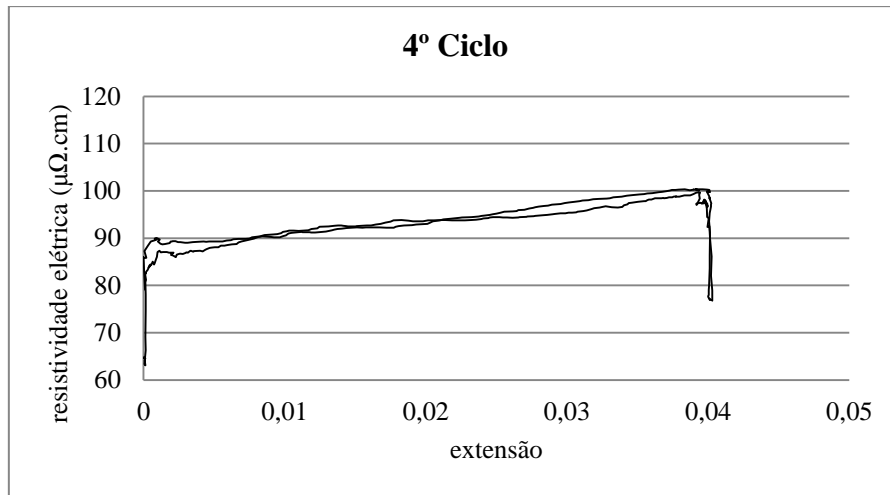
- 3ºCiclo:



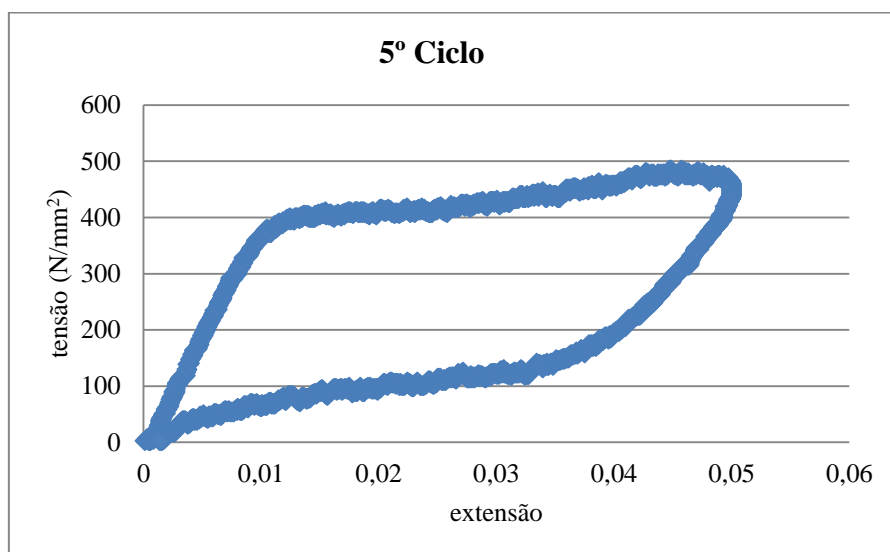


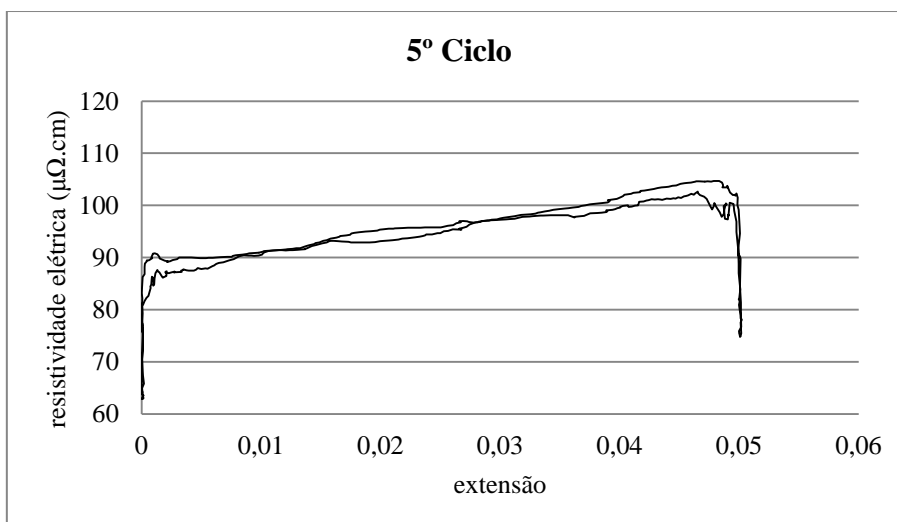
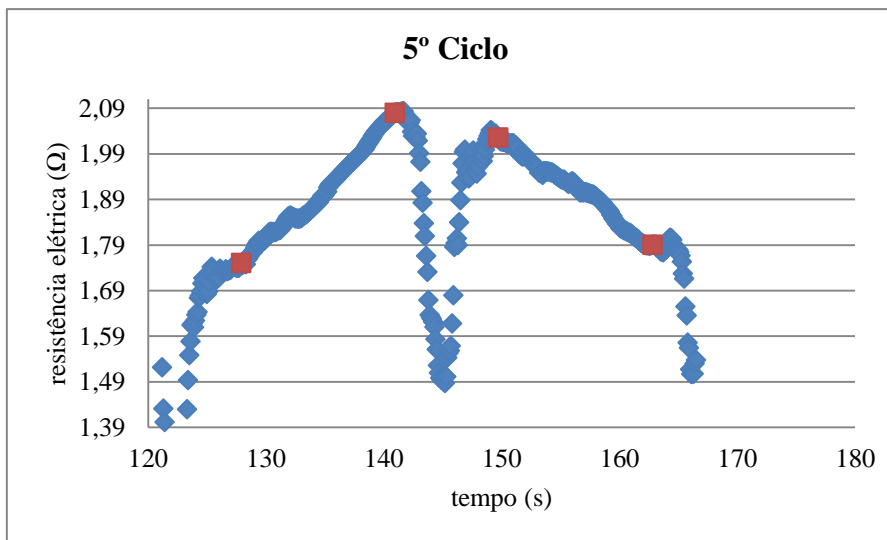
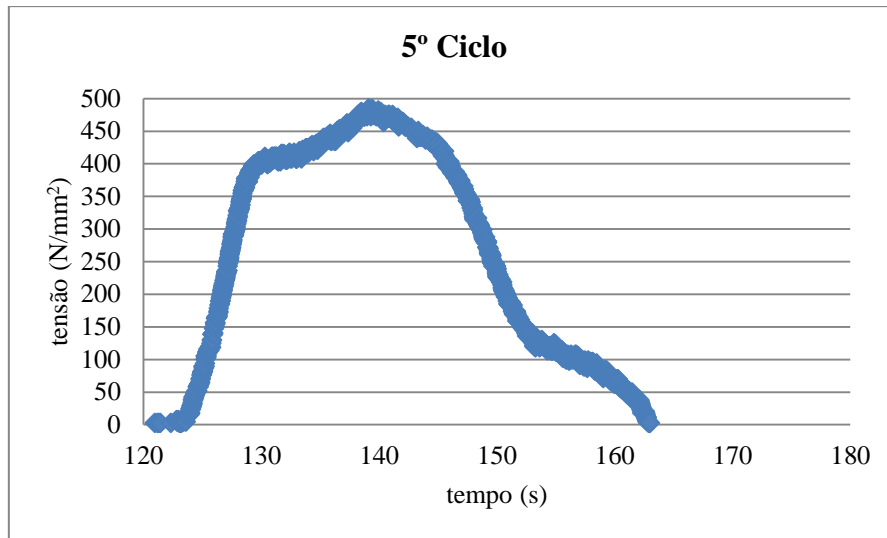
- 4º Ciclo:

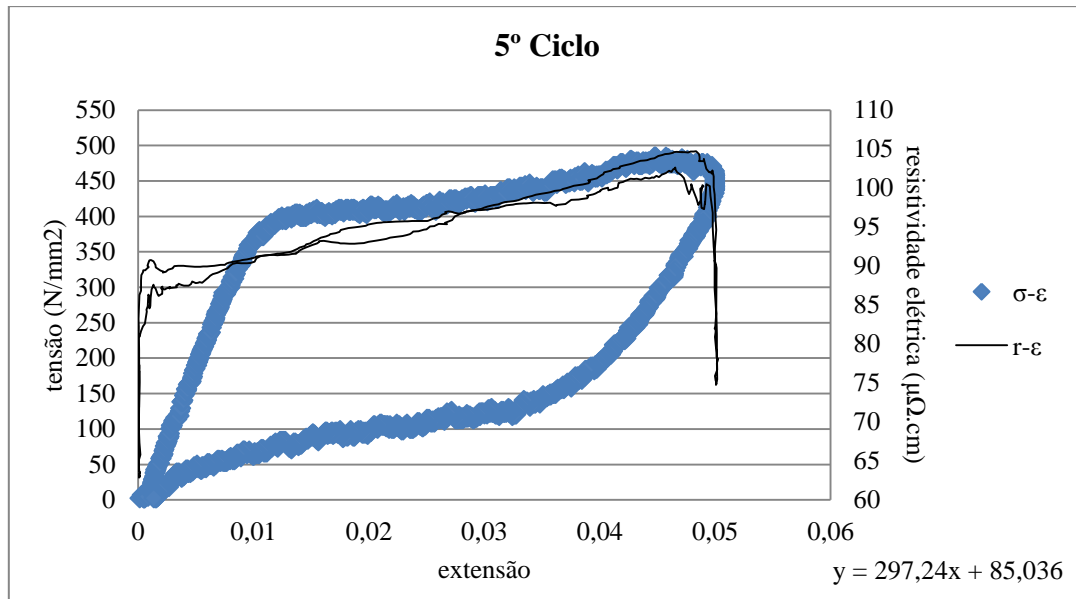




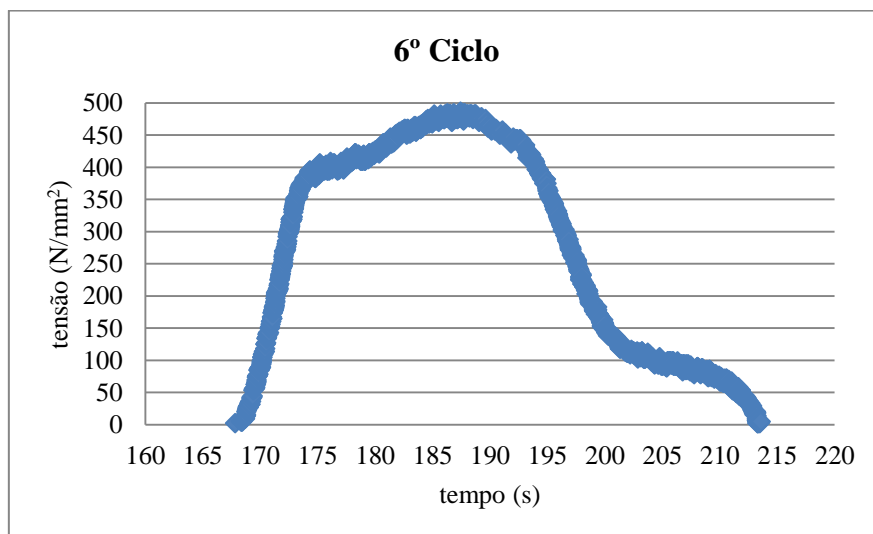
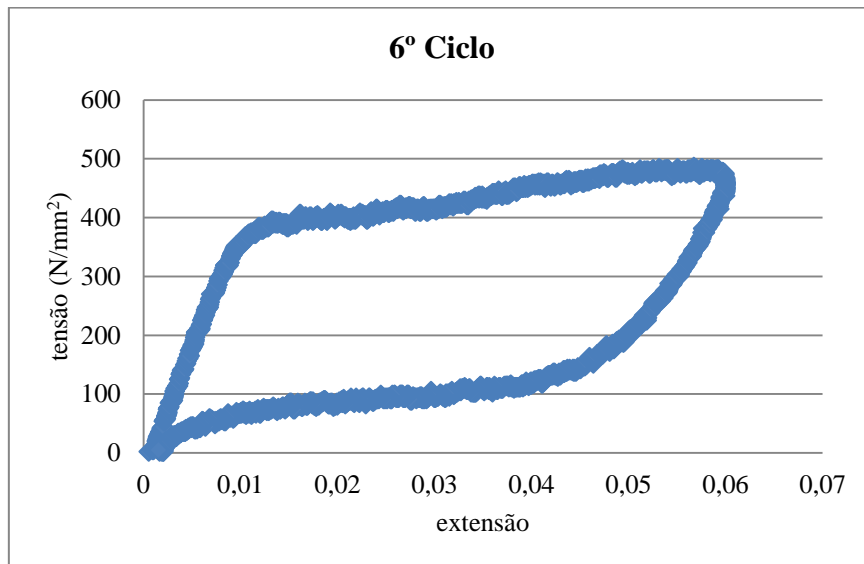
- 5º Ciclo:

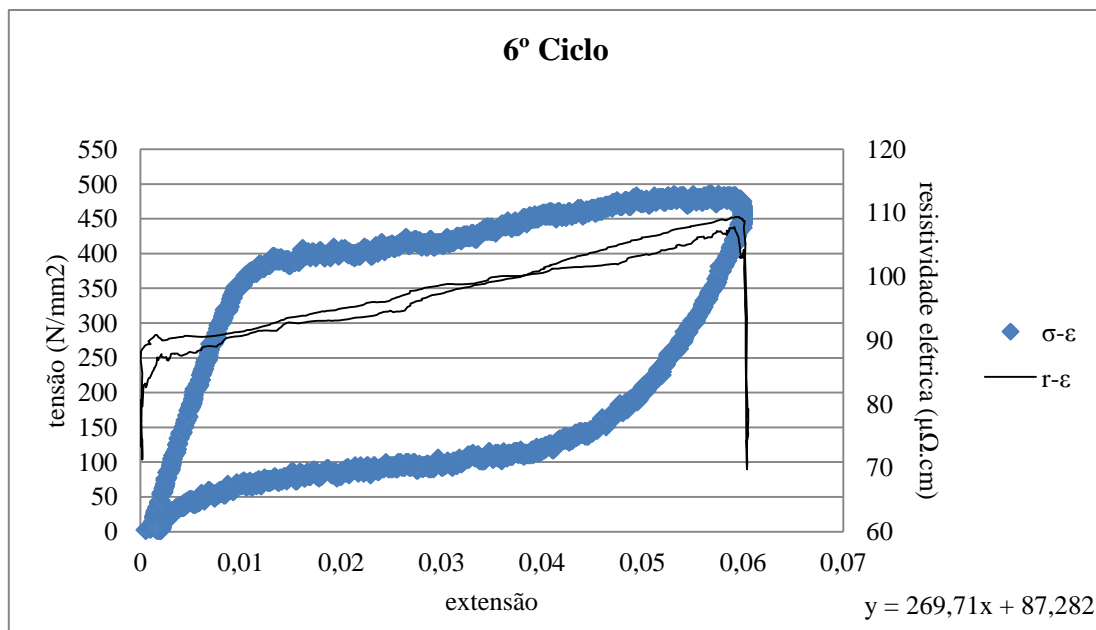
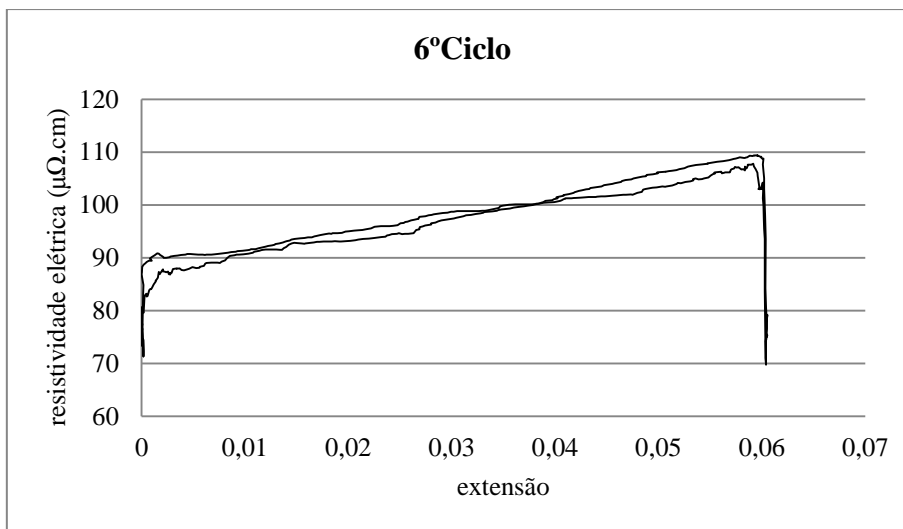
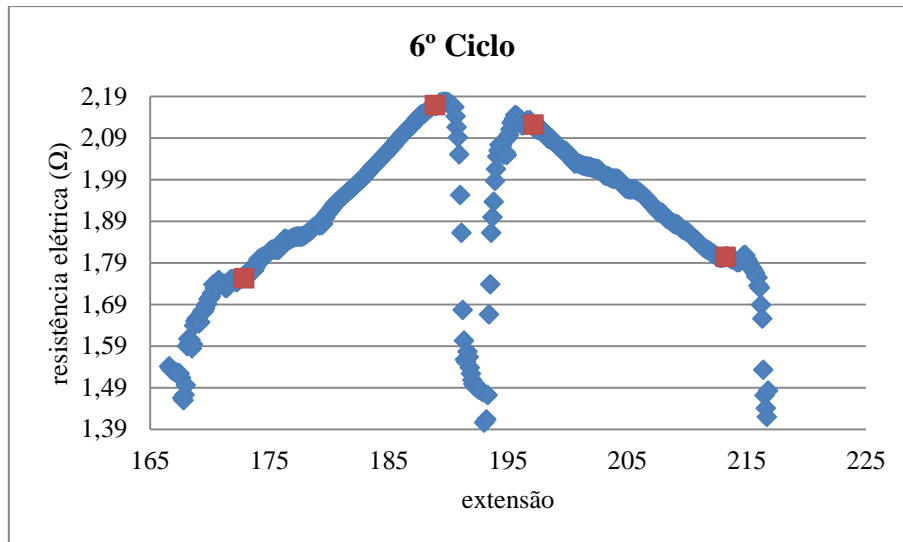




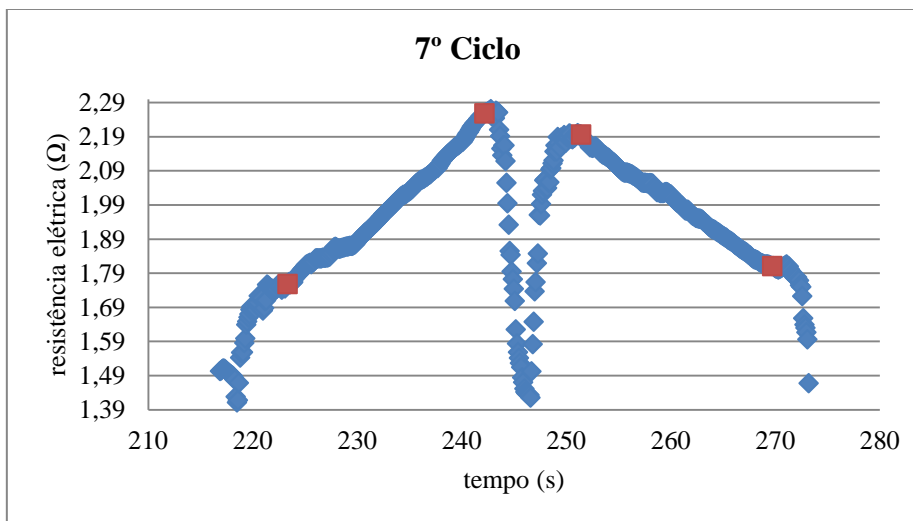
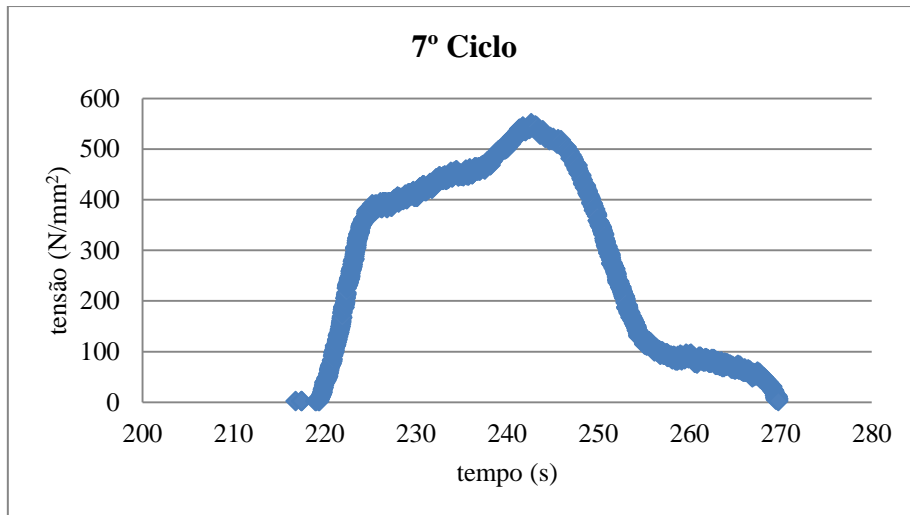
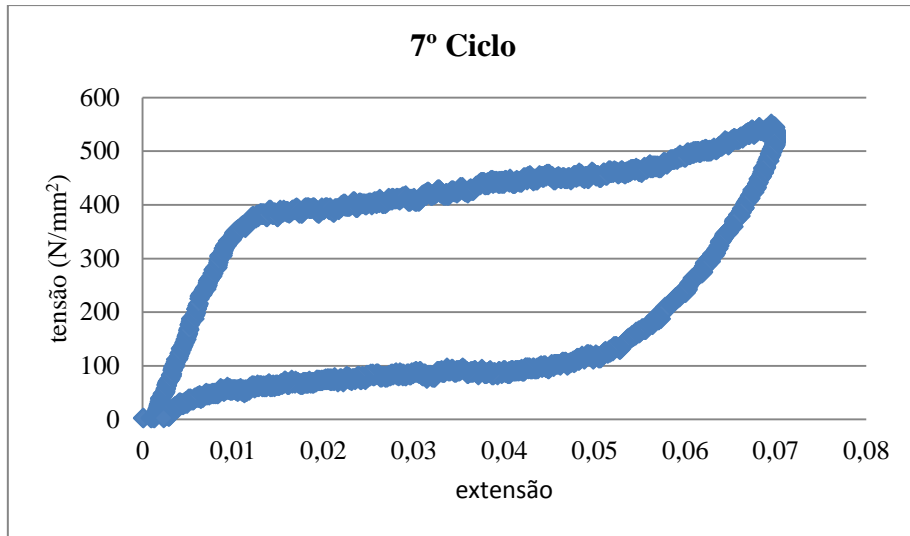


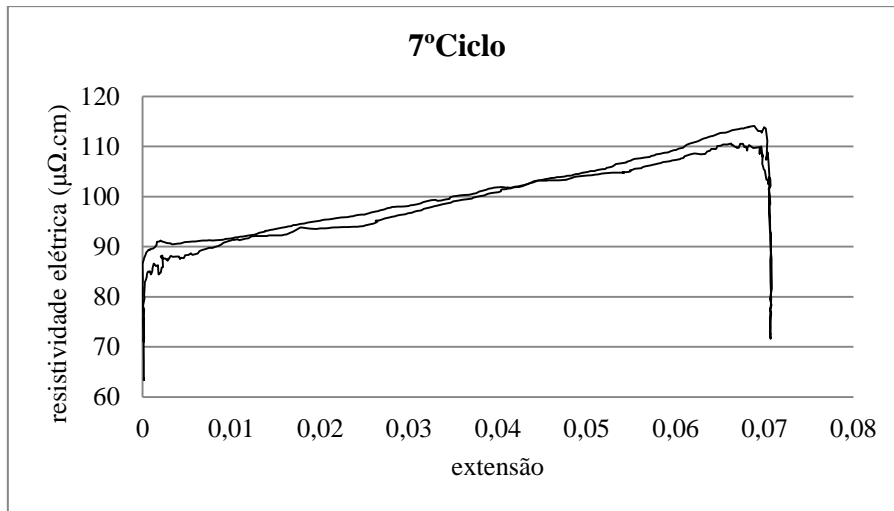
- 6º Ciclo:





- 7º Ciclo:





**- 8º Ciclo:**

