



**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E  
INDÚSTRIAL**

**Técnicas avançadas de controlo não destrutivo para  
ligações de ligas com memória de forma a aços de  
construção civil**

Gonçalo da Silva Rosa Lopes Bernardo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Doutora Rosa Maria Mendes Miranda

Co-Orientador: Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos



Março 2012



---

Técnicas avançadas de controlo não destrutivo para ligações de ligas com memória de forma a aços de construção civil.

Copyright © 2012 Gonçalo da Silva Rosa Lopes Bernardo

Faculdade Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

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 objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



---

## AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, o meu profundo agradecimento. Em especial:

À minha Orientadora, a Professora Rosa Miranda, agradeço a enorme disponibilidade e o entusiasmo sempre demonstrados ao longo deste trabalho. Agradeço também a partilha de conhecimentos e a constante ajuda.

Ao meu co-Orientador, o Professor Telmo Santos, pela disponibilidade e ajuda decisiva na discussão dos resultados e a ajuda prestada na revisão deste trabalho.

Ao Sr. António Campos e ao Sr. Paulo Magalhães pela ajuda dada e companhia durante a realização do trabalho experimental.

Ao Professor Brás Fernandes, pela disponibilização de conhecimentos enriquecedores para o trabalho e pela facilidade em aceder a equipamentos fundamentais para os ensaios realizados.

À minha família, especialmente aos meus pais, por todo o apoio e preocupação diária que demonstraram e pela força que me deram, durante toda a minha formação universitária.

Aos meus amigos, pela ajuda, companhia e apoio que me deram, durante todos os momentos de trabalho e de lazer em que eu estive a realizar a tese de mestrado.

À Cátia por todo o apoio, força, motivação e companhia durante a dissertação e pela grande ajuda que me deu na sua revisão.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) e ao CENIMAT, bem como à empresa Codimetal pelo fornecimento do aço.



---

## RESUMO

Os ensaios não destrutivos (END) têm um papel cada vez mais preponderante na indústria. Essa importância deve-se ao maior controlo de qualidade quer por parte de organismo ou particulares, quer pelo maior controlo de custos a que hoje em dia a indústria é obrigada. O desenvolvimento e a melhoria contínua da informática, robótica, automação e da programação tiveram um papel importante na expansão dos END a diversos ramos da sociedade. A construção civil pode ser um dos ramos beneficiados. A possibilidade de investigar o que não está acessível ao olho humano é um dos factores e um dos benefícios, entre outros. As correntes induzidas (CI) são uma das técnicas que têm tido um grande desenvolvimento nos END. A escolha desta técnica deveu-se ao facto de os materiais em estudo serem magnéticos e/ou condutores.

Este trabalho teve como objectivo estudar, com técnicas avançadas não destrutivas, ligações brasadas de ligas com memória de forma a aços de construção civil. Para os ensaios com correntes induzidas construiu-se uma sonda em forma de bobina, modelaram-se e fabricaram-se moldes para produzir as bobinas e os suportes. Construíram-se diversas bobinas com diferentes características e identificou-se a bobina mais adequada a estes ensaios. Estudou-se a influência de cada parâmetro de inspecção e definiu-se o intervalo de frequências ideal. Optimizou-se ainda uma mesa X-Y dedicada a estes ensaios. Para a soldadura dos provetes projectou-se e construiu-se um suporte em aço como o objectivo de posicionar os provetes minimizando a folga entre materiais e aumentando a reprodutibilidade do processo, uma vez que se trata de um processo manual. Foram ainda feitos ensaios de ciclagem em tracção das juntas.

Concluiu-se que as CI permitem distinguir diferentes condições de soldadura com configurações de material distintas, localizar a zona brasada, a sua extensão ao longo do varão e a sua morfologia, bem como as propriedades electromagnéticas dos materiais. A medição da impedância eléctrica permite ainda localizar as juntas mesmo quando embebidas em matrizes opacas.

Do ponto de vista mecânico, as juntas brasadas de varão de aço a fita de NiTi suportaram até 60 ciclos de carga/descarga em regime super elástico sem ruptura,

---

mesmo quando a carga máxima do patamar super elástico era próxima da carga de desencapsulamento da junta brasada.

## **Palavras-Chave**

Ligas com memória de forma

Brasagem

Ensaio não Destrutivo (END)

Correntes Induzidas (CI)

Sondas com formato de bobina

---

## ABSTRACT

Non-destructive testing (NDT) has an increasingly important role in industry. This importance is due to a better quality control either by authorized bodies and individuals, or the more demanding cost control that industry is requested nowadays. The development and continuous improvement of computer science, robotics, automation and programming played an important role in the expansion of NDT to various branches of society. Induced currents (IC) are one of the techniques that had a significant development in NDT. The choice of this technique was due to the fact that materials under inspection are magnetic and/or conductors.

The main objective of the present work was to study with advanced non-destructive techniques, brazed joints of shape memory alloys to carbon steel for civil construction engineering applications. For NDT with induced currents it was necessary to build coil-shaped probes. Modeling and manufacturing of both the coils and their supports was performed. Several coils with different characteristics were produced and the best coil was identified for this particular application. Different inspection parameters were tested and the best interval of frequencies was defined. A dedicated XY table was optimized. To perform the joints, a fixing system was designed and manufactured aiming at positioning the samples minimizing the gap between parts and increase joining repeatability, since this is a manual process. Mechanical cycling tests under tensile conditions were performed to test the brazed joints.

From this study it could be concluded that measurement of electrical impedance along the material rod proved the technique is a feasible, reliable and expedite, inexpensive to characterize the morphology of brazed joints with a very good resolution allowing a physical documentation of the joining morphology and its location. Brazed joints of steel rod to NiTi ribbon have undergone up to 60 cycles of load / unload in the superelastic regime without rupture, even when the maximum load of the superelastic plateau was very close to the pull-out strength of the brazed joint.

---

## **Key-Words**

Shape Memory Alloys (SMA)

Brazing

Non-Destructive Testing (NDT)

Eddy Current (ED)

Probes-shaped coil

---

**ÍNDICE**

<b>AGRADECIMENTOS</b>	v
<b>RESUMO</b>	vii
<b>Palavras-chave</b>	vii
<b>ABSTRACT</b>	x
<b>Key-Words</b>	ix
<b>ÍNDICE</b>	xi
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	xv
<b>LISTA DE TABELAS</b>	xxi
<b>NOMENCLATURA</b>	xxiii
<b>Nomenclatura Romana</b>	xxiii
<b>Nomenclatura Grega</b>	xxiii
<b>Siglas</b>	xxv
1. Introdução	1
1.1. Estado da Arte e Motivação	1
1.2. Objectivos	2
1.3. Estrutura da Dissertação	3
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Introdução	5
2.2. Ligas com Memória de Forma	5
2.3. Processos de ligação do NiTi	10
2.4. Ensaio Não Destrutivos	12
2.4.1. As principais técnicas dos Ensaio não Destrutivos	12

2.4.2. Ensaaios não Destrutivos por Correntes Induzidas	14
2.4.3. Variáveis com influência nas Correntes Induzidas	16
2.5. Síntese do capítulo	19
3. Procedimento Experimental	23
3.1. Introdução	23
3.2. Caracterização dos materiais de base	23
3.3. Soldadura	25
3.4. Selecção da liga de brasagem	28
3.5. Ensaaios não Destrutivos	31
3.5.1. Produção das Sondas: Bobinas Helicoidais	31
3.5.2. Construção dos moldes das bobinas	32
3.5.3. Fabricação e validação das bobinas	33
3.5.4. Equipamento utilizado nos ensaios não destrutivos	34
3.6. Análise metalográfica	41
3.7. Síntese do capítulo	42
4. Resultados e discussão	45
4.1. Introdução	45
4.2. Caracterização das sondas de inspecção	46
4.3. Influência dos parâmetros de inspecção	48
4.4. Ensaaios não destrutivos	51
4.4.1. Materiais de base com e sem liga de brasagem	51
4.4.2. Provetes brasados	59
4.5. Fotomicrografias com liga de brasagem	64

---

4.6. Síntese do capítulo	66
5. Conclusões dos resultados e desenvolvimentos futuros	67
5.1. Conclusões	67
5.2. Desenvolvimentos futuros	68
Referências bibliográficas	71
Anexos	I



---

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1 - Estruturas presentes no sistema de NiTi, a) Estrutura B2 (austenite), b) Estrutura B19' (martensite) [2]	6
Figura 2.2 - Diagrama de equilíbrio NiTi (adaptado a partir de [2])	7
Figura 2.3 - Diagrama de estado ( $\sigma$ , T) para a transformação reversível Austenite $\leftrightarrow$ Martensite. Representação esquemática dos limites dos domínios de manifestação dos fenómenos de memória de forma e de super elasticidade num diagrama Tensão Vs. Temperatura (adaptado de [2])	7
Figura 2.4 - Diagrama de transformação de fase, a) a tensão constante (efeito de memória de forma), b) a temperatura constante (efeito super elástico) (adaptado de [7])	8
Figura 2.5 – Esquema do efeito de memória de forma [30]	8
Figura 2.6 – Esquema do comportamento super elástico [30]	9
Figura 2.7 - Diagrama $\varepsilon(\sigma)$ (adaptado de [6])	9
Figura 2.8 - Grandezas eléctricas envolvidas no END por CI, a) Representação esquemática do vector impedância, b) Plano de resposta da impedância das CI [33]	15
Figura 2.9 - Campo Magnético $H_p$ , campo Secundário $H_s$ bem como a corrente induzida. a) Chapa plana; b) Fio. (Adaptado [15,16])	15
Figura 2.10 – Representação das correntes induzidas, num bloco com defeitos perpendiculares e paralelos á superfície	16

Figura 2.11 – Representação qualitativa da intensidade e localização das CI produzidas por uma bobina helicoidal cilíndrica com 4 espiras (vista de corte) [33]	17
Figura 2.12 – Curvas de profundidade de penetração das CI para diferentes ligas de alumínio [33]	18
Figura 3.1 – Curva Força/Deformação do aço	24
Figura 3.2 - Curvas tensão - extensão das ligas de NiTi - N, a) arame de $\phi = 3$ mm, b) fita com uma área de secção 0.93 X 3.07 mm	25
Figura 3.3 – Suporte construído para a soldadura. a) Vista de topo ilustrando os 2 graus de liberdade, em XX e em YY, b) Vista lateral onde está representado o grau de liberdade adicional em ZZ	26
Figura 3.4 - Vista geral do suporte da soldadura com os materiais posicionados	26
Figura 3.5 – Vista dos dois tipos de varões de aço, a) Varão com chanfro (P.11), b) Varão facejado (P.12)	27
Figura 3.6 – Provetes de aço/NiTi brasados com liga de 20 % Ag (P.6, P.7, P.4, P.5)	28
Figura 3.7 – Curva tensão - extensão para um provete varão de aço facejado/fita de NiTi, brasado com uma liga contendo 20 % Ag	29
Figura 3.8 – Aspecto final das bobinas, i) B5, ii) B2, iii) B3	32
Figura 3.9 - Moldes das bobinas, a) Molde da bobina que irá dar origem a uma bobina com diâmetro interno 15 mm, b) Molde da bobina que irá dar origem a uma bobina com diâmetro interno de 11 mm, c) Molde da bobina com 11mm de diâmetro e com o fio de esmalte	32

- 
- Figura 3.10 - Representação esquemática global do sistema de END por CI [33] 35
- Figura 3.11 - Visão global de todos os equipamentos utilizados para o END, a) Placa de aquisição de dados; b) gerador de sinais; c) Resistência eléctrica calibrada em série com a excitação para a medição de corrente; d) Mesa X-Y; e) Caixa de excitação do motor passo-a-passo; f) Computador com o Software instalado 35
- Figura 3.12 – Vista geral da Mesa X-Y modelada em SolidWorks, a) Vista de perfil; b) vista de perspectiva 36
- Figura 3.13 – Vista pormenorizada dos constituintes da Mesa X-Y modelados em SolidWorks, a) Suporte das bobinas em acrílico, com os graus de liberdade representados, b) Provette varão de aço com chanfro/arame NiTi, c) Suporte dos provetes em acrílico 37
- Figura 3.14 - Circuito electrónico de geração e condicionamento de sinal, a) Detectores de amplitude, b) Detectores de diferença de fase, c) Circuito de excitação de onda, d) Variação da fase e da amplitude dos sinais de excitação da Bobina, e) Fonte de potência de 12 V, f) Placa de aquisição de dados e gerador de excitação de sinal para motor passo-a-passo, g) Dispositivo de excitação do motor passo-a-passo [31] 38
- Figura 3.15 - Interface de locomoção da mesa X-Y; Zona verde A: definição de posição da bobina; Zona Vermelha B: definições de deslocamento e aquisição de dados; Zona Laranja C: opções de gravações, dados e notas; Zona Preta D: Posição da bobina; Zona Castanha E: representação gráfica da parte Real e Imaginária da impedância eléctrica da bobina 39
-

- Figura 3.16 - Código desenvolvido em Labview para a criação do programa de movimentação da mesa e aquisição de dados 40
- Figura 3.17 – Parte ficheiro.txt criado pelo Software de END, com toda a informação sobre o ensaio 40
- Figura 3.18 - Imagens do provete PVV\_Longitudinal\_20 %, a) Fotomicrografia com ampliação 5X, escala 50 $\mu$ m e luz 5, b) Fotomicrografia com ampliação 5X, escala a 50  $\mu$ m e luz 5.5 41
- Figura 3.19 - Imagens do provete PVV\_Longitudinal\_50 %, a) Fotomicrografia com ampliação 5X, escala 50 $\mu$ m e luz 5, b) Fotomicrografia com ampliação 5X, escala a 50  $\mu$ m e luz 5 42
- Figura 4.1 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para duas bobinas. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária 47
- Figura 4.2 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, variando o tipo de onda. a) Parte Real entre #A e #D, b) Parte Imaginária entre #A e #D, c) Parte Real entre #B e #E, d) Parte Imaginária entre #B e #E, e) Parte Real entre #C e #F, f) Parte Real entre #C e #F 49
- Figura 4.3 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para vários ganhos. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária 50
- Figura 4.4 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para várias frequências. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária 51

- 
- Figura 4.5 – Variação da impedância eléctrica com a distancia inspeccionada, para os provetes de varão de aço com rasgo e facejados. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária 53
- Figura 4.6 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para os provetes de varão de aço com e sem liga. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária 54
- Figura 4.7 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para os provetes de arame de NiTi com e sem liga. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária 56
- Figura 4.8 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para os provetes de fita de NiTi com e sem liga. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária 57
- Figura 4.9 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para os provetes de varão de aço, arame de NiTi e fita de NiTi, todos com liga de brasagem. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária 59
- Figura 4.10 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para os provetes P.6, P.7 e P.14. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária 60
- Figura 4.11 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para os provetes P.4, P.5 e P.13. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária 61

Figura 4.12 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para os provetes P.4 e P.6. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária, a) Macrografia dos P.11 e P.12

63

---

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Algumas variantes dos principais métodos de END	13
Tabela 3.1 – Composição química do aço	24
Tabela 3.2 – Características mecânicas do aço	24
Tabela 3.3 - Composição total das ligas de brasagem	28
Tabela 3.4 - Resumo das condições de brasagem com liga a 20 % Ag	30
Tabela 3.5 - Resumo das condições sem soldadura	30
Tabela 3.6 – Características das bobinas construídas	33
Tabela 3.7 – Medições estáticas das bobinas	34
Tabela 3.8 – Características técnicas da Mesa X-Y	36
Tabela 3.9 – Resumo das condições de brasagem com liga de 50 % Ag	42
Tabela 4.1 - Esquema da primeira etapa utilizando o provete P.4	48
Tabela 4.2 - Fotomacrografias dos provetes com liga de brasagem a 20 % Ag	64
Tabela 4.3 - Fotomicrografias dos provetes com liga de brasagem a 50 % Ag	66



---

## NOMENCLATURA

### Nomenclatura Romana

$\bar{z}$	Vector impedância eléctrica [ $\Omega$ ]
$Abs(\bar{z})$	Valor absoluto do vector impedância eléctrica [ $\Omega$ ]
$Arg(\bar{z})$	Argumento do vector impedância eléctrica [ $\Omega$ ]
$f$	Frequência [Hz]
$Im(\bar{z})$	Parte imaginária do vector impedância eléctrica [ $\Omega$ ]
$Re(\bar{z})$	Parte real do vector impedância eléctrica [ $\Omega$ ]
$e$	Número de Neper; ( $e = 2.71828$ )

### Nomenclatura Grega

$\emptyset$	Diâmetro [m]
$\delta$	Profundidade de penetração das correntes induzidas [m]
$\sigma$	Condutividade eléctrica [ $S \cdot m^{-1}$ ] ou [% IACS]
$\pi$	Pi (quociente entre o perímetro e o diâmetro de uma circunferência: $\pi = 3.1415\dots$ ) [ $m \cdot m^{-1}$ ]
$\sigma_{Rot}$	Tensão de rotura [Pa]
$\sigma_{Max}$	Tensão máxima [Pa]
$\sigma_{Ced}$	Tensão de cedência [Pa]
$\sigma_{AS}$	Tensão de início da austenite [Pa]
$\sigma_{AF}$	Tensão do fim da austenite [Pa]
$\sigma_{MS}$	Tensão de início da martensite [Pa]
$\sigma_{MF}$	Tensão do fim da martensite [Pa]
$\sigma(T)$	Tensão em função da temperatura [Pa]
$\sigma - T$	Tensão – Temperatura
$^{\circ}C$	Graus Celsius



---

**Siglas**

ACFM	<i>Alternating Current Field Measurement</i>
A.C.	Antes de Cristo
At.	Atômica
A <sub>f</sub>	<i>Austenitic finish</i>
Hp	Campo magnético
Hs	Campo secundário
CI	Correntes Induzidas
DAQ	<i>Data acquisition</i>
DC	<i>Direct Current</i>
EMF	Efeito de memória de forma
EM	<i>Electro Magnetic</i>
EMAT	<i>Electromagnetic Acoustic Transducers</i>
END	Ensaio Não Destrutivo
GMR	<i>Giant Magnetoresistance</i>
I&D	Investigação e Desenvolvimento
IACS	<i>International Annealed Copper</i>
H	Largura
LMF	Liga com memória de forma
MFL	<i>Magnetic Flux Leakage</i>
MA	Material de adição
MB	Material Base
M <sub>f</sub>	<i>Martensitic finish</i>
NiTi	Nitinol
Nº, nº	Número
RFT	<i>Remote Field Testing</i>
SE	Super elástico
SQUID	<i>Superconducting Quantum Interference Devices</i>
R <sub>e4</sub>	Tensão de cedência inferior
R <sub>eh</sub>	Tensão de cedência superior
R <sub>m</sub>	Tensão de rotura
ToFD	<i>Time of Flight Diffraction</i>

Siglas

---

Agt            *Total elongation*

US            Ultra-sons

## **1. Introdução**

### ***1.1. Estado da Arte e Motivação***

Esta dissertação de Mestrado, visou o estudo por técnicas avançadas de controlo não destrutivas, de uniões brasadas em ligas com memória de forma (LMF) a aços de construção civil.

Actualmente, as normas Europeias e Internacionais estão mais exigentes com a qualidade de construção. A capacidade de um edifício de se manter intacto quando sujeito a forças externas (como movimento das placas tectónicas) ou mesmo de aguentar as vibrações naturais que uma cidade moderna “provoca” a um edifício (por exemplo as vibrações provocadas pelo metro), são factores muito importantes para o bem estar da população. A engenharia civil tem evoluído muito rapidamente, utilizando mecanismos de contrabalanço ou amortecedores nos edifícios. Contudo, mesmo as técnicas referidas anteriormente não são suficientes para evitar o colapso das estruturas.

A utilização das ligas com memória de forma, em particular, ligas com comportamento superelástico, pode constituir parte da solução para os problemas que se colocam à engenharia civil. Uma das ligas mais utilizada é o NiTi que consegue deformações recuperáveis de 8%, enquanto os aços têm deformações elásticas de 0.2%.

As ligas superelásticas, do tipo NiTi, foram descobertas quase por acidente em 1962. Desde então tem-se investigado as suas potencialidades em aplicações na indústria, na saúde, na aviação, entre outras.

Assim torna-se interessante unir ligas com memória de forma a aço de construção, com uma técnica de soldadura simples de realizar no local. Os END neste estudo foram investigados com o objectivo de identificar a junta mesmo quando embebida, isto é, sem acesso visível.

Os ensaios não destrutivos têm tido grandes desenvolvimentos, devido às cada vez mais apertadas normas de segurança e ao desenvolvimento de novas tecnologias como na micro-fabricação. Os defeitos são cada vez mais pequenos e em menor número, e as técnicas não destrutivas têm de ter capacidade de os detectar.

## **1.2. Objectivos**

O objectivo geral desta dissertação foi ligar varões de aço carbono a varões ou fitas de NiTi usando um processo de soldadura de fácil utilização, transporte e manuseamento no local (estaleiro de construção civil) e utilizar ensaios não destrutivos, para verificar a integridade da soldadura. Existem inúmeros ensaios não destrutivos, mas tendo em conta que os materiais são magnéticos e/ou condutores consideraram-se as correntes induzidas. Foi necessário avaliar a capacidade deste ensaio não destrutivo neste processo, nomeadamente: i) exequibilidade desta técnica neste processo com estes materiais de base, ii) rapidez e fiabilidade, iii) identificação dos parâmetros de inspecção.

Para isso modelou-se e construiu-se um suporte em aço para a soldadura. O varão de aço e o NiTi, na forma de fita e arame, foram cortados em amostras de 35 mm de comprimento. Ambos os materiais de base foram decapados quimicamente. O aço em Nital e o NiTi numa solução com ácido fluorídrico, ácido nítrico, ácido acético e água

A brasagem foi a técnica de soldadura utilizada. Soldaram-se provetes com ligas de brasagem que continham 20, 40 e 50 % Ag. Foram realizados testes de ciclagem e de tracção para analisar o comportamento mecânico das ligações.

Para os ensaios não destrutivos, modelaram-se e construíram-se dois moldes de bobina em aço com diâmetros internos diferentes. Conceberam-se diferentes bobinas com características diferentes. Uma vez que nas correntes induzidas é crucial manter a

distância constante entre a peça a ensaiar e a bobina, projectaram-se e fabricaram-se dois suportes em acrílico.

### **1.3. Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos.

No capítulo 1 de carácter introdutório, explicam-se os objectivos da dissertação e faz-se uma breve introdução à motivação subjacente a este trabalho.

No capítulo 2 faz-se uma descrição dos materiais, métodos de ligação e ensaios não destrutivos por correntes induzidas. Expõem-se os fundamentos do método e as suas limitações.

No capítulo 3, descreve-se o trabalho desenvolvido, incluindo a modelação do suporte de soldadura, preparação das amostras e selecção da liga de brasagem que melhor se adequa a esta aplicação. Descreve-se a modelação efectuada para a construção das bobinas e a adaptação da mesa X-Y para os ensaios

No capítulo 4 apresentam-se e discutem-se os resultados e a validação dos parâmetros da técnica de correntes induzidas.

No capítulo 5, apresentam-se as conclusões e as sugestões para desenvolvimentos futuros.



## **2. Revisão Bibliográfica**

### ***2.1. Introdução***

Neste capítulo apresenta-se uma resenha da pesquisa bibliográfica efectuada. Aborda-se o estado da arte das ligas com memória de forma (LMF), do processo de ligação por brasagem e dos ensaios não destrutivos (END).

Considerando que os END são um ponto central desta dissertação, deu-se particular atenção a este tema, em especial às correntes induzidas (CI).

### ***2.2. Liga com memória de forma***

No início dos anos 30 foram dados os primeiros passos no desenvolvimento de ligas com memória de forma, mas, foi em 1949, que Kurdjumov e Khandros conseguiram explicar o comportamento termo-elástico associado ao efeito de memória de forma, reforçado por Chang e Read em 1951 [1].

As ligas com memória de forma ou SMA (Shape Memory Alloys) são ligas metálicas que possuem a capacidade de depois de sujeitos a um processo termo-mecânico (temperatura e/ou mecânico), recuperar a sua forma original. As ligas mais comuns no mercado são o NiTi, o CuAlNi e o CuAlZn. Estas ligas têm efeito de memória de forma (EMF) ou comportamento superelástico e devem essas propriedades a uma transformação reversível austenite-martensite-austenite.

As ligas de NiTi são as que despertam mais interesse industrial devido à sua boa capacidade de deformação (8 a 10% de recuperação), boa resistência à corrosão, uma gama variada de temperaturas de transformação, bem como ao fenómeno que está associada a elas, isto é, a super-elasticidade.

A fase-mãe das ligas NiTi com memória de forma apresenta uma estrutura ordenada (cúbica do corpo centrada), tal como se verifica na figura (Figura 2.1). O efeito de memória de forma e a super-elasticidade estão associados às transformações reversíveis de fase martensite - austenite, ou seja, da estrutura B2 para B19' [2,3].

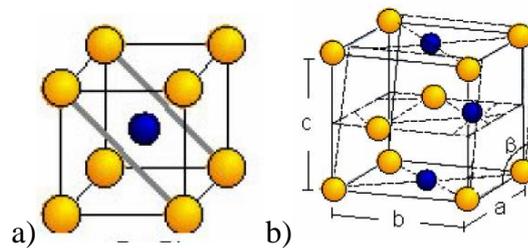


Figura 2.1 - Estruturas presentes no sistema de NiTi, a) Estrutura B2 (austenite), b) Estrutura B19' (martensite) [2]

Verificou-se, que em certos casos (função do tratamento térmico e/ou termo-mecânico) esta transformação não é directa, mas existe uma transformação intermédia de fase R, que possui uma estrutura romboédrica. Esta fase o resultado de uma distorção, inversamente proporcional à temperatura da rede cúbica segundo uma das diagonais principais da célula unitária cúbica da austenite, surgindo a transformação martensítica à temperatura  $M_s$ , no arrefecimento [4,5,6].

O diagrama de equilíbrio NiTi (Figura 2.2) permite verificar que para as ligas mais ricas em Ti, a variação de solubilidade com a temperatura é muito mais reduzida para a fase B2 (ver linha amarela Figura 2.2). Por outro lado, observa-se a presença de um domínio de estabilidade da fase austenítica (B2) que se caracteriza, para ligas mais ricas em Ni, relativamente à composição equiatómica, por uma forte variação do limite máximo de solubilidade do Ni com a temperatura (linha verde Figura 2.2).

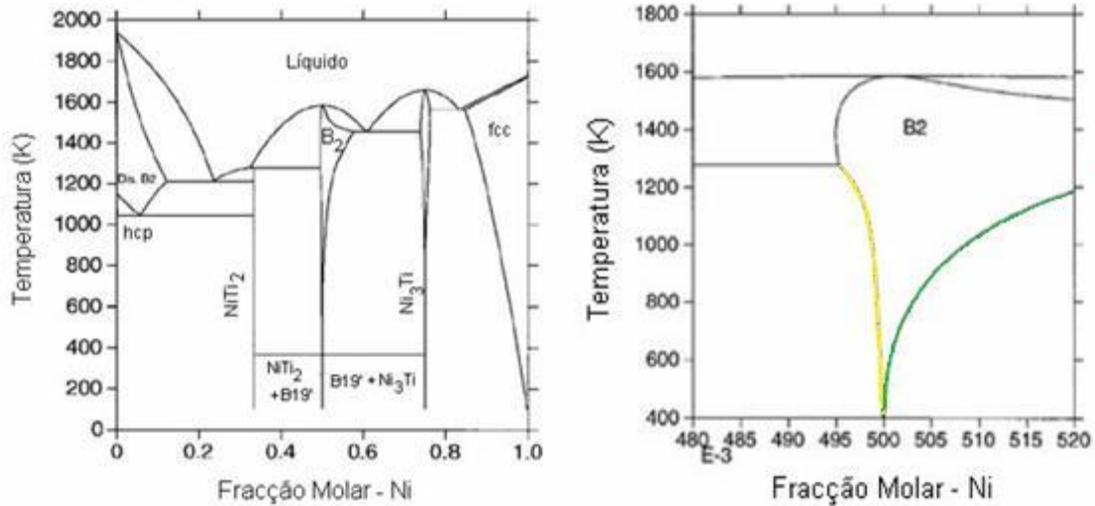


Figura 2.2 - Diagrama de equilíbrio NiTi (adaptado de [2])

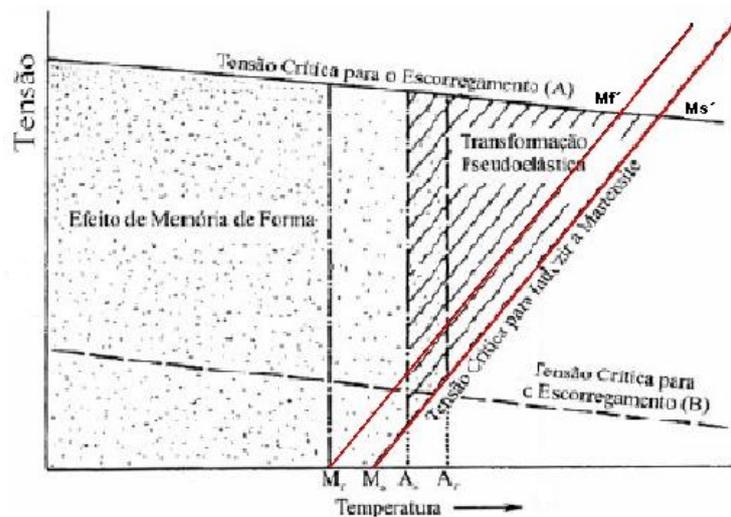


Figura 2.3 - Diagrama de estado ( $\sigma$ , T) para a transformação reversível Austenite  $\leftrightarrow$  Martensite. Representação esquemática dos limites dos domínios de manifestação dos fenômenos de memória de forma e de superelasticidade num diagrama Tensão Vs. Temperatura (adaptado de [2])

Analisando o diagrama conclui-se que o efeito de memória de forma ocorre na sequência de uma deformação abaixo de  $M_f$ , seguida de aquecimento acima de  $A_f$ . Por sua vez, a superelasticidade ocorre para uma temperatura constante, acima de  $A_f$ . A superelasticidade manifesta-se para valores da tensão crítica de escorregamento de deslocamentos entre “A” e “B”. Fora deste limite, isto é, para valores acima de “A”, as

deformações decorrentes do escorregamento nunca são recuperadas por efeitos térmicos ou mecânicos, pois tem lugar uma deformação plástica irreversível.

Conclui-se que uma liga de NiTi pode ser caracterizada por um dos gráficos  $\sigma$ -T (dependendo se esta tem a tensão ou a temperatura constante), representados nos diagramas da Figura 2.4.

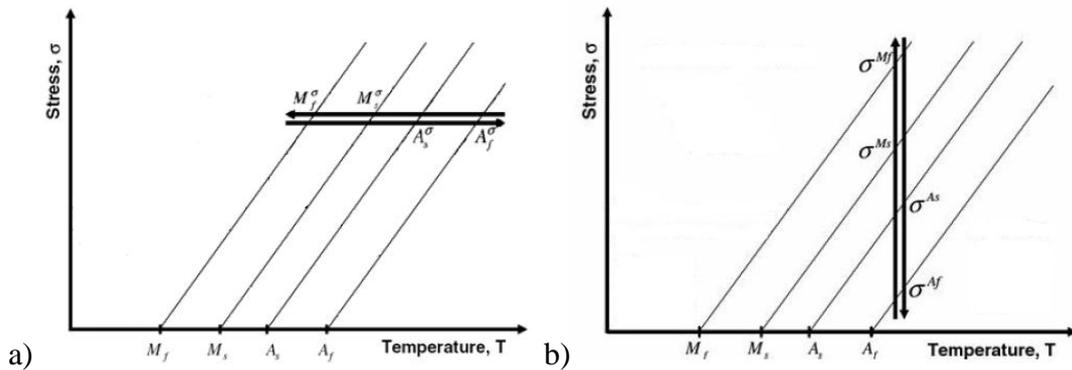


Figura 2.4 - Diagrama de transformação de fase, a) a tensão constante (efeito de memória de forma), b) a temperatura constante (efeito superelástico) (adaptado de [7])

Recorrendo a dois esquemas exemplificativos, demonstra-se este efeito na Figura 2.4. Na Figura 2.5 ilustra-se o efeito de memória de forma, em que é necessário fornecer energia sob a forma de calor, após deformação ( $P(t)$ ), para que a liga volte à sua posição inicial. Por sua vez, na Figura 2.6, verifica-se que basta remover a força  $P(t)$  para que a liga regresse à posição inicial.

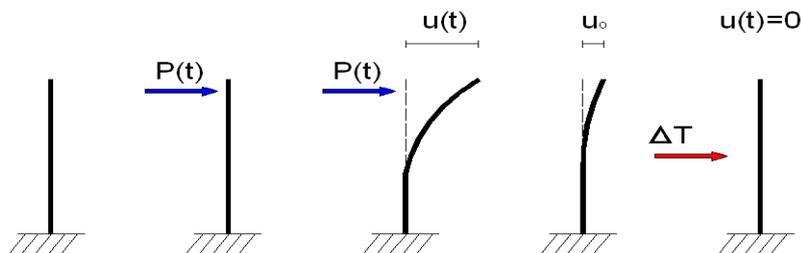


Figura 2.5 – Esquema do efeito de memória de forma [30]

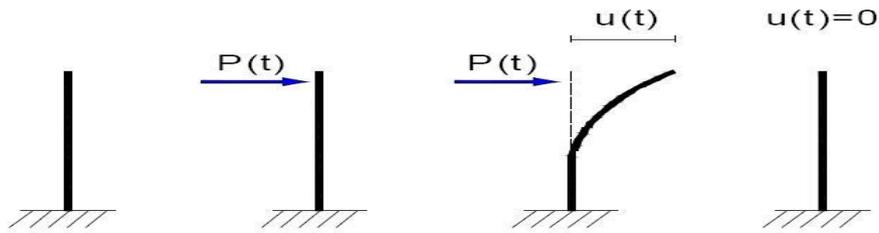


Figura 2.6 – Esquema do comportamento superelástico [30]

O comportamento superelástico exibido por estas ligas, define-se pela capacidade que a liga tem de recuperar na totalidade, ou em grande parte, as deformações sofridas através da aplicação de uma tensão. Este fenómeno ocorre quando o trajecto de carregamento  $\sigma(T)$  atravessa o domínio bifásico e quando a temperatura é superior a  $A_f$  (Figura 2.7).

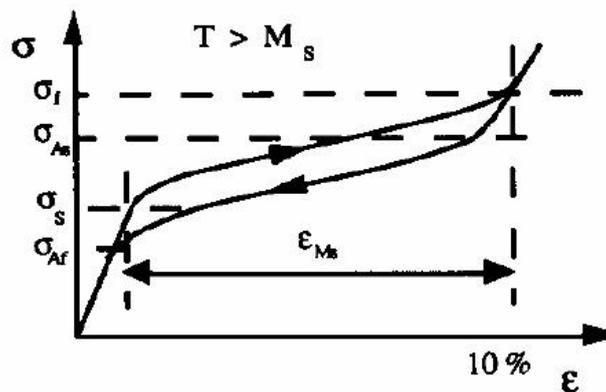


Figura 2.7 - Diagrama  $\epsilon(\sigma)$  (adaptado de [1])

Ao incrementar a tensão num pedaço de NiTi com efeito de super elasticidade existe uma mudança de fase de austenite ( $\sigma_{Af}$ ) para martensite ( $\sigma_s$ ). Esta fase permanece enquanto o carregamento estiver a ser feito. No momento da descarga da tensão associada, a martensite ( $\sigma_f$ ) transforma-se em austenite ( $\sigma_{As}$ ) até retornar à sua forma inicial. De notar que a tensão fica praticamente constante durante as duas fases, bem como a trajectória de carga e descarga são praticamente iguais, variando apenas a tensão. Este é feito, não com base no aquecimento (como nas ligas de efeito de memória), mas sim por descarga da sollicitação inicialmente imposta.

Assim, o fenómeno de super elasticidade é um fenómeno não-linear e difícil de definir.

Da curva de carregamento e descarregamento podem ser extraídas as seguintes características:

- A deformação reversível máxima que se pode obter por transformação de fase ( $\epsilon_{Ms}$ )
- $\sigma_s$  - tensão de inicio da transformação austenite - martensite
- $\sigma_f$  - tensão final da transformação austenite - martensite
- $\sigma_{As}$  - tensão de inicio da transformação martensite - austenite
- $\sigma_{Af}$  - tensão final da transformação martensite - austenite
- Histerese mecânica (em tensão)

A histerese de transformação deve-se à energia dissipada irreversivelmente sob a forma de atrito interno durante a transformação. Varia de sistema para sistema, dependendo da composição da liga e do processo de fabrico. Neste caso concreto é histerese mecânica, mas existe também histerese térmica (nas ligas com efeito de memória de forma).

### **2.3. Processos de Ligação**

As ligas do tipo NiTi são de difícil soldabilidade existindo diversos estudos sobre a aplicação de diferentes tipos de soldadura. Na aplicação visada pretende-se um processo de fácil manuseamento que possa ser efectuado em campo.

A brasagem é um processo de ligação em que o material de base não funde. O termo brasagem engloba um conjunto de processos em que a união dos materiais é atingida pelo aquecimento, a uma temperatura abaixo da temperatura “solidus” do material base, mas acima da temperatura de fusão do material de adição [13].

---

Pode-se classificar a brasagem em:

- Brasagem fraca – em que a temperatura de fusão do material de adição é inferior a 450°C;
- Brasagem forte – em que a temperatura de fusão do material de adição é superior a 450°C;
- Soldobrasagem – consiste em depositar uma liga de brasagem forte numa junta utilizando uma técnica semelhante à soldadura por fusão.

Existem diferentes formas de aquecimento na brasagem ou soldobrasagem, tais como: Ferro de soldar; Maçarico; Forno; Indução; Resistência eléctrica; Por imersão; Arco eléctrico; Bombardeamento electrónico; Radiação infravermelha; Laser.

O equipamento utilizado em brasagem e soldobrasagem varia pois em função do tipo de aquecimento utilizado.

A selecção do metal de adição para uma determinada operação de brasagem é fundamental para se obter uma junta com as características adequadas a uma dada aplicação. Esta escolha é feita em função do metal de base, do tipo de aquecimento utilizado, do desenho da junta e da sua protecção. Assim, é necessária uma selecção metódica do material de adição tendo particular atenção a compatibilidade com o metal base.

Uma característica importante das ligas de brasagem é o seu intervalo de fusão. Metais puros e ligas eutéicas possuem temperaturas de fusão bem definidas, enquanto que, as demais ligas apresentam intervalos de fusão, isto é, as fases líquida e sólida, coexistem numa determinada gama de temperaturas, entre a temperatura “liquidus” e “solidus”. De um modo geral utilizam-se ligas com reduzido intervalo de fusão para juntas de pequeno comprimento e ligas de grande intervalo de fusão para juntas maiores.

Neste processo o material de adição preenche a junta a ser soldada por acção de capilaridade. Assim, para se realizar uma junta soldada de boa qualidade é necessário que haja uma molhagem perfeita. Sendo também imprescindível uma limpeza química nas faces a serem brasadas.

Em relação ao tipo de junta, existem dois aspectos muito importantes: a sua forma e o espaçamento entre as peças a brasar. Em brasagem são utilizados apenas dois tipos de juntas: juntas sobrepostas e juntas topo a topo. As juntas sobrepostas são usadas preferencialmente quando se pretende melhorar a resistência de uma determinada união, o que é o caso em análise.

As aplicações da brasagem fraca, brasagem forte e soldobrasagem, são hoje em dia muito variadas, tendo uma grande aplicabilidade na soldadura de metais dissimilares, como o caso em estudo neste trabalho.

## **2.4.      *Ensaaios não destrutivos***

Os END consistem na aplicação de metodologias e técnicas de ensaio que visam analisar materiais, peças ou mesmo equipamentos, de modo a detectar defeitos existentes, sem que daí resulte alguma alteração nas propriedades do material ou mesmo no desempenho deste em funcionamento.

Os END são não invasivos e indispensáveis nos dias que correm, uma vez que permitem controlar o estado dos materiais e equipamentos, traduzindo-se este controle num aumento da fiabilidade da inspecção, numa minimização dos riscos e maior segurança, numa melhoria e optimização do funcionamento, bem como numa redução de custos, representando um factor de competitividade para as empresas. De uma forma sucinta pode-se dizer que a correcta aplicação dos ensaios não destrutivos por parte da indústria, pode prevenir acidentes, salvar vidas, proteger o ambiente e evitar prejuízos económicos.

### **2.4.1. *As principais técnicas de ensaios não destrutivos***

Existem diversas técnicas de END. Isto acontece, como foi referido anteriormente, pelo constante desenvolvimento da informática e da electrónica, particularmente pela automação, que é a mola propulsora para o desenvolvimento de equipamentos de ensaio para a produção em linha de equipamentos relativamente

simples e fiáveis. A evolução dos sensores possibilitou detectar os defeitos, as descontinuidades e quantificar a sua dimensão.

Devido às inúmeras tecnologias de END, estes podem ser classificados em função dos princípios físicos associados, nomeadamente: a) por ondas electromagnéticas, b) por ondas acústicas, c) por emissão de radiação ou mesmo por absorção ou capilaridade. Podem ser classificadas em função da sua capacidade de detecção, mais concretamente, os ensaios podem ser: a) volumétricos se permitem avaliar todo o volume da peça, b) sub-superficiais que permitem avaliar parte da peça ou c) superficiais em que avaliam apenas a superfície. Por ultimo, os END também podem ser classificados em função da sua capacidade de detecção de defeitos ou de caracterização de materiais e metrologia. Os END podem ser divididos em quatro principais métodos fundamentais, como se esquematiza na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Algumas variantes dos principais métodos de END

Principais métodos de END	Variantes dos principais métodos de END
Correntes induzidas (CI)	CI convencionais, CI pulsadas, GMR, SQUID, RTF, MFL, ACFM
Inspeção visual	Líquidos penetrantes, Partículas magnéticas, Endoscopia, interferometria holográfica, US por laser, <i>Thermosonics</i> Termografia
Radiológicos	Raios-X, Raios- $\gamma$ , Radiografia digital, Tomografia computadorizada
Ultra-Sons (US)	US convencionais de eco pulsado, Creeping, <i>PhasedArray</i> , EMAT TOFD, US com acoplante de ar

A selecção da técnica mais adequada recai na resposta a três perguntas que devem ser feitas antes de escolher a técnica, que são: i) o tipo de material a inspeccionar (condutor, isolante, homogéneo ou poroso); ii) as características do defeito (morfologia, dimensão, localização); iii) a acessibilidade e as condições de inspecção

(nomeadamente possibilidade de acoplamento de uma sonda, qual a temperatura de funcionamento do material, qual a acessibilidade à zona a inspeccionar). [32]

Por último, o procedimento genérico nos END está sempre sujeito a quatro passos, i) aplicação de um meio de teste ao material; ii) modificação do meio do teste pelos defeitos ou propriedades do material, iii) detecção desta alteração através de um detector adequado (sonda), iv) interpretação da informação obtida. [33]

#### ***2.4.2. Ensaios não destrutivos por correntes induzidas***

O princípio de funcionamento das correntes induzidas (CI) baseia-se na variação da impedância eléctrica ( $\bar{Z}$ ) de uma bobina sujeita a uma corrente eléctrica alternada (I). É um método que tem como fundamento físico a indução electromagnética, isto é, a inspecção tem de ser efectuada a materiais magnéticos e/ou condutores de corrente.

A impedância é a resistência que um circuito eléctrico provoca à passagem de corrente, só existindo em circuitos percorridos por corrente alterna e sendo representada através de um número complexo com uma componente real e uma componente imaginária (Equação 2.1).

$$Z = a + bi \quad (2.1)$$

A parte real representa a resistência e a parte imaginária a reactância, podendo-se fazer, assim, a representação da impedância no plano complexo, como se mostra na Figura 2.8.

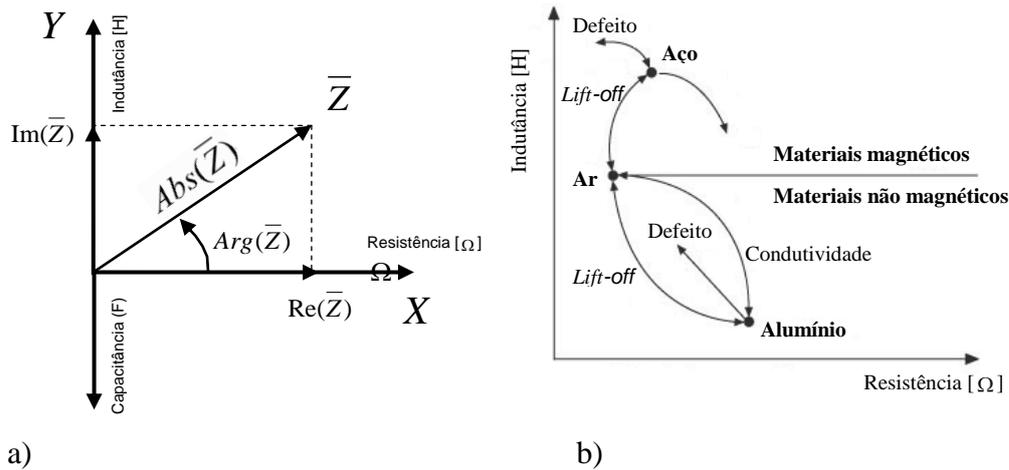


Figura 2.8 - Grandezas eléctricas envolvidas no END por CI, a) Representação esquemática do vector impedância, b) Plano de resposta da impedância das CI. [32,33]

A técnica consiste em criar um campo magnético  $H_p$  (Figura 2.9), através de uma sonda constituída por uma bobina espiral helicoidal percorrida por uma corrente eléctrica alternada. A corrente eléctrica induzida na peça cria um campo magnético secundário  $H_s$  que contraria o campo  $H_p$ .

No caso de existir um defeito, a corrente induzida tem mais dificuldade em circular e o campo magnético  $H_s$  terá menor intensidade. Esta alteração pode ser medida, permitindo detectar os defeitos. Esta alteração vai reflectir-se na impedância eléctrica da bobina, através da diminuição da resistência eléctrica e no aumento da reactância. [33,41]

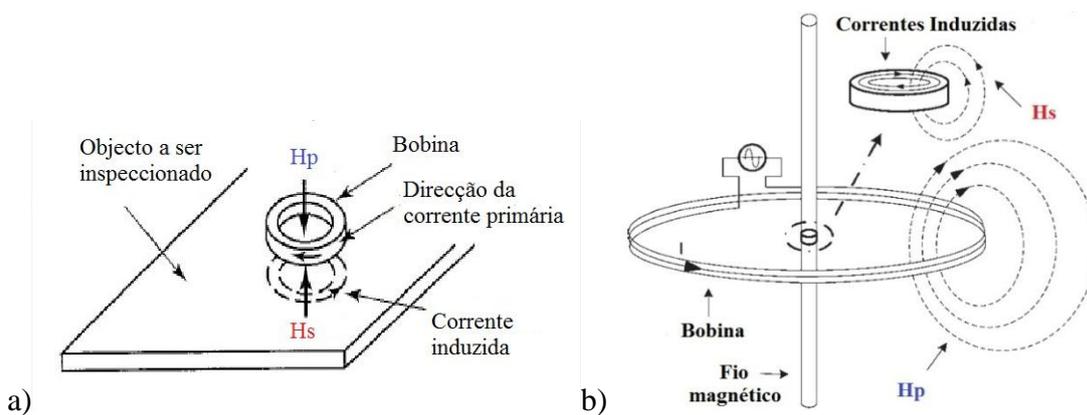


Figura 2.9 - Campo Magnético  $H_p$ , campo Secundário  $H_s$  bem como a corrente induzida. a) Chapa plana; b) Fio. (Adaptado [15,16])

Este método só é aplicável a materiais condutores de electricidade (ferromagnéticos ou não ferromagnéticos). Por outro lado, as CI circulam

maioritariamente em planos paralelos à superfície (no caso da bobina circular perpendicular à superfície). Assim é possível detectar defeitos à superfície ou sub-superficiais, devido ao efeito de pele (correntes induzidas circulam só à superfície da peça). Então os defeitos que estão perpendiculares à superfície serão mais fáceis de detectar, do que os paralelos (Figura 2.10).

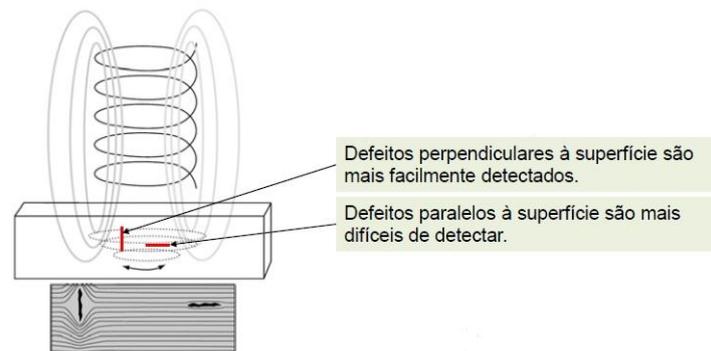


Figura 2.10 – Representação das correntes induzidas, num bloco com defeitos perpendiculares e paralelos á superfície

### 2.4.3. Variáveis com influência nas correntes induzidas

Os resultados dos métodos das CI são influenciados por factores como: distância ao condutor (*lift-off*), efeito pele, condutividade eléctrica, permeabilidade magnética e efeito do bordo [17,33].

As limitações desta técnica são: i) aplicável a elementos ferromagnéticos e/ou condutores; ii) efeito *lift-off*. O efeito *lift-off* define-se pelas alterações da posição da sonda em relação à peça a ensaiar. Essas alterações de posição alteram a impedância eléctrica, e a variação da impedância eléctrica deste efeito pode ser superior à variação provocada pela existência de defeitos. Quando isto acontece, a detecção torna-se impossível uma vez que as alterações provocadas pelo defeito são absorvidas pelo ruído do *Lift-off* [31,33].

Para contornar esta limitação é possível alterar os parâmetros de inspecção de modo a haver uma separação entre a curva *lift-off* e a condutividade eléctrica. Para se

atingir este objectivo específico, a frequência de funcionamento tem de ser criteriosamente escolhida.

Contudo é necessário ter cuidado com a frequência de funcionamento, pois como está representado na Figura 2.11, as correntes induzidas não se distribuem uniformemente ao longo da secção da peça, estando o efeito de pele muito presente neste método. A maior intensidade das correntes acontece na superfície e decresce à medida que a profundidade aumenta (Figura 2.11 e Figura 2.12).



Figura 2.11 – Representação qualitativa da intensidade e localização das CI produzidas por uma bobina helicoidal cilíndrica com 4 espiras (vista de corte) [33]

A densidade de corrente  $J$  ( $\text{Am}^{-2}$ ) depende da profundidade  $X$  (m) de acordo com a Equação 2.2. A profundidade de penetração  $\delta$  (m) é a profundidade a que se pode controlar uma peça, sendo esta correspondente à profundidade em que a densidade de corrente toma um valor 37% ( $e^{-1}$ ) inferior ao da densidade de corrente à superfície de acordo com a Equação 2.3.

$$J = J_0 e^{X(\pi/\mu\sigma)} \quad (2.2)$$

$$\delta = \frac{1}{e} \quad (2.3)$$

Das Equações 2.2 e 2.3 conclui-se que a profundidade de penetração se pode calcular pela Equação 2.4.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.4)$$

Como se pode verificar, a profundidade de penetração depende da frequência da corrente eléctrica  $f$  (Hz), da condutividade eléctrica  $\sigma$  (%IACS) e da permeabilidade magnética do material  $\mu$  (H/m). Assim, se se pretende analisar duas peças com diferentes condutividades eléctricas, têm de se usar frequências diferentes para a mesma profundidade de penetração. Esta frequência será tanto menor quanto maiores forem as condutividades.

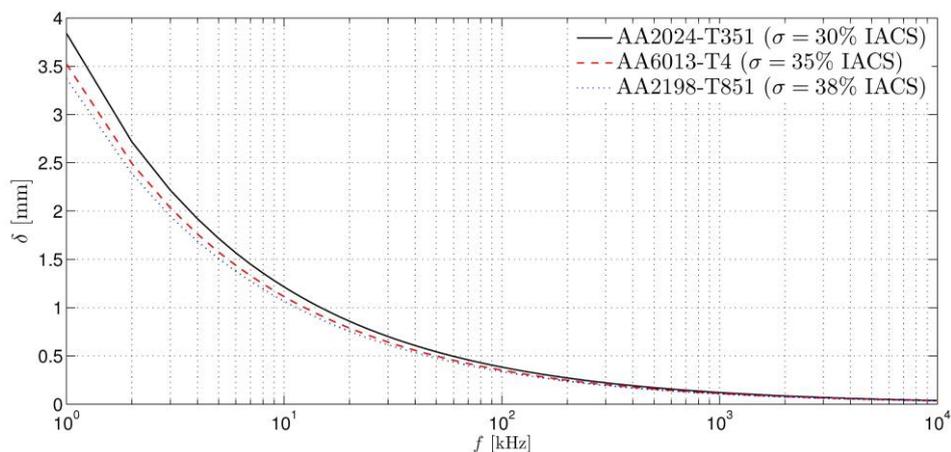


Figura 2.12 – Curvas de profundidade de penetração das CI para diferentes ligas de alumínio [33]

O efeito de bordo é outra das condicionantes dos ensaios por CI. Quando a sonda se aproxima das extremidades da peça a ensaiar ocorre uma distorção das correntes induzidas, semelhante à observada quando existe um defeito. Este fenómeno pode dissimular defeitos existentes nas extremidades ou perto destas, uma vez que estas distorções produzem sinais de grande amplitude. Devido a este efeito, e por norma, não se controla a menos de 3,5 mm das extremidades da peça.

Por último, a permeabilidade magnética consiste na capacidade de se criar um campo magnético num material, ou seja, quanto maior for a permeabilidade magnética, maior é a facilidade de induzir um campo magnético. Nos materiais ferrosos a permeabilidade magnética é maior que um ( $\mu > 1$ ) e nos não ferrosos é aproximadamente igual a este valor ( $\mu \approx 1$ ), o que leva a que a curva de variação de impedância com os defeitos assumam trajetórias diferentes [17].

## **2.5. Síntese do capítulo**

Neste capítulo, descreveu-se o estado da arte das ligas com memória de forma com interesse para esta dissertação. Definiu-se o efeito com memória de forma, focando os aspectos teóricos e as propriedades da liga NiTi como o comportamento super elástico.

Descreveu-se o processo de brasagem utilizado na ligação NiTi/aço.

Abordaram-se os ensaios não destrutivos e descreveu-se em detalhe o modo de funcionamento das correntes induzidas estudadas nesta dissertação.



### **3. Procedimento experimental**

#### ***3.1. Introdução***

O trabalho realizado teve por objectivo desenvolver e testar um sistema de END por CI para a detecção de defeitos em ligações de ligas com memória de forma a aço de construção civil.

#### ***3.2. Caracterização dos materiais de base***

Os materiais usados neste estudo foram: um aço de construção civil fornecido pela empresa Codimetal sob a forma de varão com 6 mm de diâmetro e uma liga de NiTi super elástica com uma composição equiatômica de 50.8 %Ti (% at.), encruada com uma temperatura Af de cerca de 0°C fornecida sob a forma de arame com 3 mm de diâmetro e em fita com 1 x 3 mm.

O varão de aço foi testado por espectrometria de emissão para avaliar a composição química e foram também efectuados ensaios mecânicos no varão decapado.

Nas Tabelas 3.1 e 3.2, apresentam-se a composição química e os parâmetros de resistência medidos para o aço.

Tabela 3.1 – Composição química do aço

Composição química	C	P	S
(% em peso)	0,24	0,055	0,005

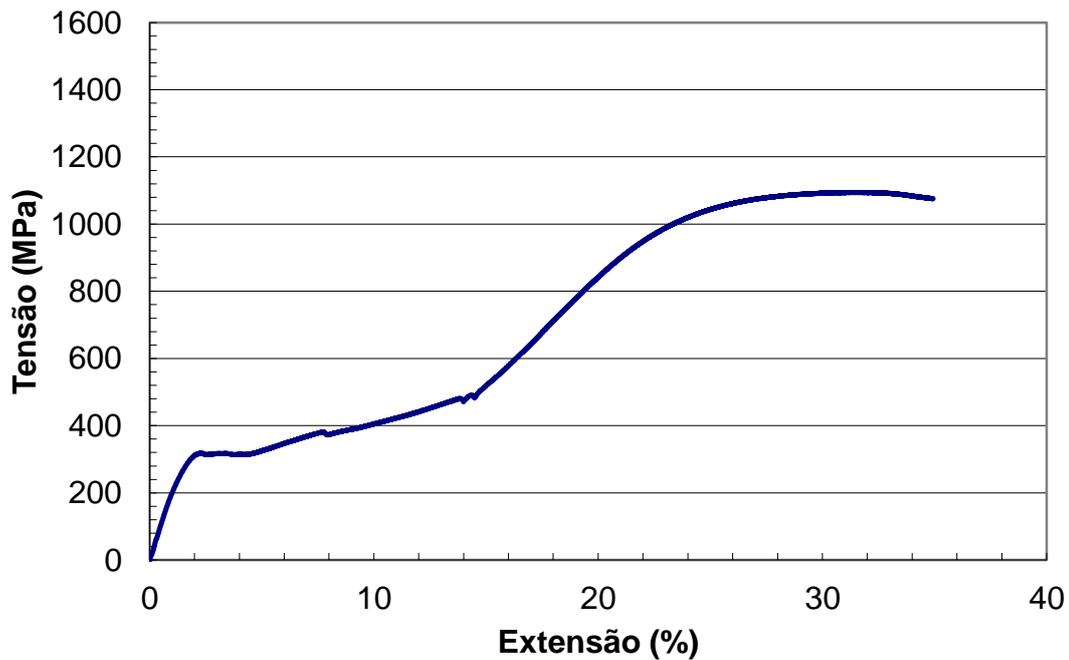
Tabela 3.2 – Características mecânicas do aço

$R_e$ (MPa)	$R_m/R_{eH}$	$R_m/R_{eL}$	$R_{eH}/500$	$A_{gt}$ (%)
500	1,15	1,35	1,20	8

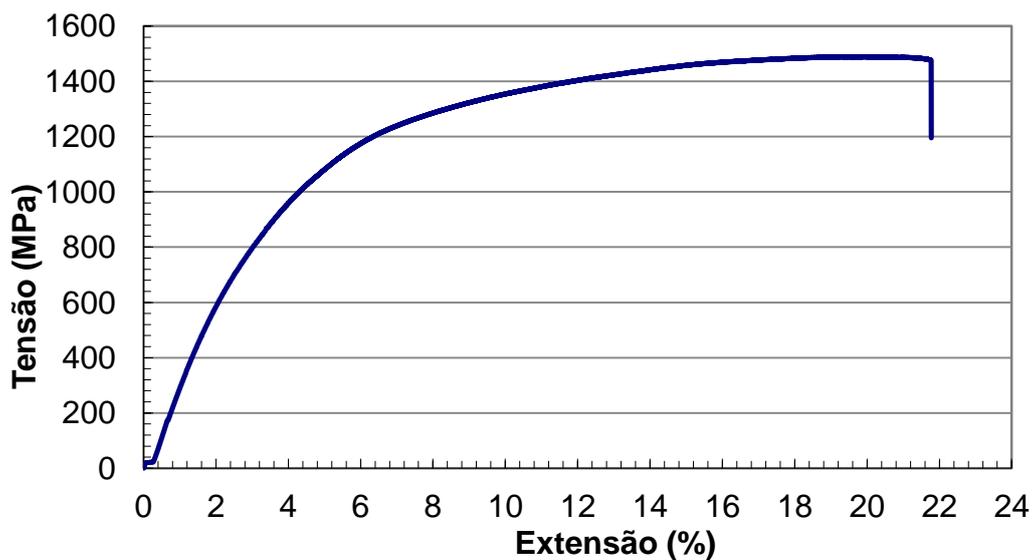


Figura 3.1 - Curva Força/Deformação do aço

As ligas com memória de forma foram igualmente ensaiadas mecanicamente e a Figura 3.2 mostra a curva força-deformação dos materiais.



a)



b)

Figura 3.2 - Curvas tensão-extensão das ligas de NiTi - N, a) arame de  $\phi = 3$  mm, b) fita com uma área de secção  $0,93 \times 3,07$  mm

### 3.3. Soldadura

De modo a aumentar a reprodutibilidade do processo de brasagem assistido por chama oxiacetilénica e diminuir a folga entre os materiais a soldar, projectou-se e

construiu-se um sistema de posicionamento dos provetes em aço de construção ilustrado na Figura 3.2. Em anexos apresentam-se os desenhos de construção deste sistema constituído por três partes: a base do suporte, um apoio fixo para prender o arame ou a fita de NiTi e um apoio móvel para fixar o varão de aço. O suporte tem 3 graus de liberdade, dados pelo apoio móvel.

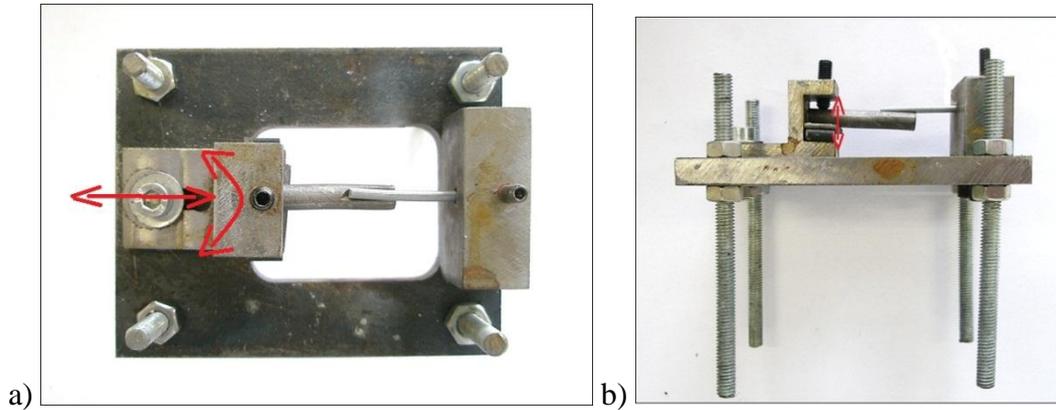


Figura 3.3 – Suporte construído para a soldadura. a) Vista de topo ilustrando os 2 graus de liberdade, em XX e em YY, b) Vista lateral onde está representado o grau de liberdade adicional em ZZ

O aspecto final da montagem, antes da soldadura com os materiais colocados no suporte é ilustrado na Figura 3.3.

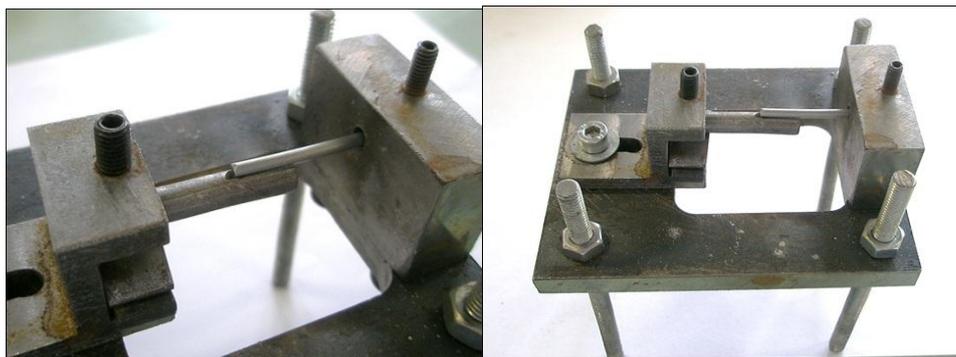


Figura 3.4 - Vista geral do suporte da soldadura com os materiais posicionados

Para os ensaios de soldadura, cortaram-se 20 provetes com 35 mm de comprimento de um varão em aço com diâmetro de 6 mm, de um arame de NiTi com  $\phi = 3$  mm, bem como de fita de NiTi com uma área de secção recta de 1 x 3 mm.

Os provetes em aço foram limpos quimicamente com Nital a 5 % para remoção dos óxidos de superfície. Os provetes de NiTi foram decapados quimicamente com uma mistura constituída por Acido Fluorídrico + Acido Nítrico + Acido Acético + Água numa proporção de 3: 5: 20: 72 durante 10 minutos, seguida de limpeza em álcool durante 5 minutos e posteriormente limpas e secas com papel.

De modo a aumentar a superfície de contacto entre o varão de aço e o arame ou fita de NiTi, melhorando com isto as propriedades mecânicas da ligação, facejaram-se os varões de aço a ligar à fita de NiTi e abriram-se rasgos com uma fresadora convencional nos varões a ligar ao arame de NiTi. Os varões de aço, após maquinação, foram novamente decapados quimicamente com a mesma mistura e o mesmo procedimento.



Figura 3.5 – Vista dos dois tipos de varões de aço, a) Varão com chanfro (P.11), b) Varão facejado (P.12)

A Figura 3.6 mostra o aspecto dos provetes após soldadura.



Figura 3.6 – Provetes de aço/NiTi brasados com liga de 20 % Ag (P.6, P.7, P.4, P.5)

A análise metalográfica foi feita após corte, montagem e polimento das amostras, num microscópio de marca Olympus, modelo X40RF200 com uma câmara Olympus acoplada, modelo DP21 UCMAD3.

### 3.4. *Seleção da liga de brasagem*

A brasagem foi feita manualmente assistida por chama oxiacetilénica mantendo tanto quanto possível as condições operatórias, e testaram-se diversas ligas de brasagem de modo a maximizar a resistência mecânica das ligações. Assim, testaram-se ligas de brasagem com 20, 40 e 50 % de Ag., com a composição indicada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Composição total das ligas de brasagem

Composição da liga de brasagem	Ag	Cu	Zn	Cd	$\Phi$ (mm)
Liga de brasagem com 20 % Ag	20 %	50 %	25 %	15 %	2
Liga de brasagem com 50 % Ag	50 %	15,5 %	16.5 %	18 %	1,5

Após soldadura extraíram-se provetes para ensaios de tracção e ciclagem registando-se a força aplicada em função da deformação medida. Para os ensaios de tracção e ciclagem foi utilizado o equipamento da marca Shimadzu com uma célula de carga tipo: SBL-500 N com número de série NO35602 e capacidade 500 N. A velocidade do travessão para todos os testes foi de 1 mm/min.

Na Figura 3.7 ilustra-se o comportamento observado para uma junta brasada com uma liga contendo 20 % Ag.

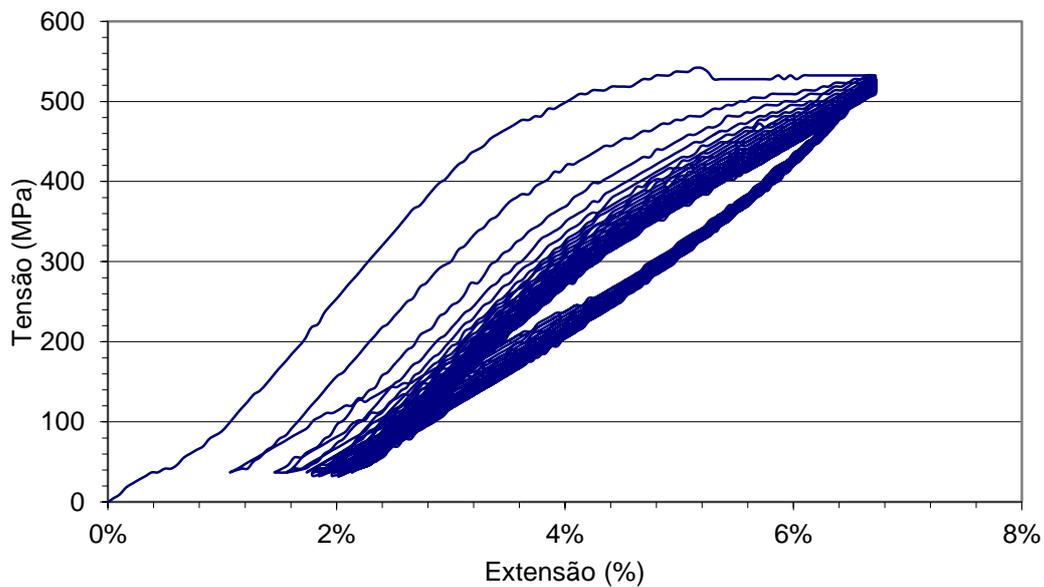


Figura 3.7 – Curva tensão-extensão para um provete varão de aço facejado/fita de NiTi, brasado com uma liga contendo 20 % Ag

Dos ensaios mecânicos realizados, apenas os provetes brasados com a liga com 20 % Ag conduziram a valores de carga aplicada satisfatórios e até 60 ciclos de carga. Assim, retiveram-se para as etapas seguintes deste estudo os provetes soldados com esta liga.

Nas Tabelas 3.4 e 3.5 descrevem-se de forma resumida as condições dos provetes.

Tabela 3.4 - Resumo das condições de brasagem com liga a 20 % Ag

Referência	Material	Configuração	Macro da ligação
P.1	NiTi	Arame	
P.2	NiTi	Fita	
P.3	Aço	Varão	
P.4	Aço/ NiTi	Varão com Chanfro/Arame	
P.5	Aço/ NiTi	Varão com Chanfro/Arame (Repetição do anterior)	
P.6	Aço/ NiTi	Varão Facejado/Fita	
P.7	Aço/ NiTi	Varão Facejado/Fita (Repetição do anterior)	
PVV_Long	Aço/NiTi	Varão com Chanfro/Arame	
PVF_Long	Aço/NiTi	Varão Facejado/Fita	

Tabela 3.5 - Resumo das condições sem soldadura

Referência	Material	Configuração	Foto
P.8	NiTi	Arame	
P.9	NiTi	Fita	
P.10	Aço	Varão	

P.11	Aço	Varão Rasgado	
P.12	Aço	Varão Facejado	
P.13	Aço /NiTi	Varão/Arame (Ligados com Super Cola)	
P.14	Aço /NiTi	Varão/Fita (Ligados com Super Cola)	

### 3.5. Ensaios não Destrutivos

Para estes ensaios foram desenvolvidas e construídas em laboratório sondas dedicadas à aplicação visada.

Foram ainda utilizados equipamentos desenvolvidos no âmbito do grupo de investigação do Núcleo de Tecnologia Industrial em particular, uma Mesa X-Y e o Software “*Ionic*”.

#### 3.5.1. Produção das sondas: bobinas helicoidais cilíndricas

Para este trabalho foi necessário conceber e produzir diferentes bobinas com diâmetros de fio de esmalte diferentes, nº de enrolamentos, largura da bobina e diâmetro interno da bobina diferente (Figura 3.8). Este plano de produção teve como objectivo obter uma grande variedade de sondas para avaliar experimentalmente os efeitos dos vários factores distintivos presentes em cada uma, nomeadamente verificar a influência do nº de enrolamentos na detecção dos defeitos na soldadura e da variação do diâmetro do fio de esmalte, no efeito “pele”, e ainda detectar a frequência ideal, para diferentes bobinas.

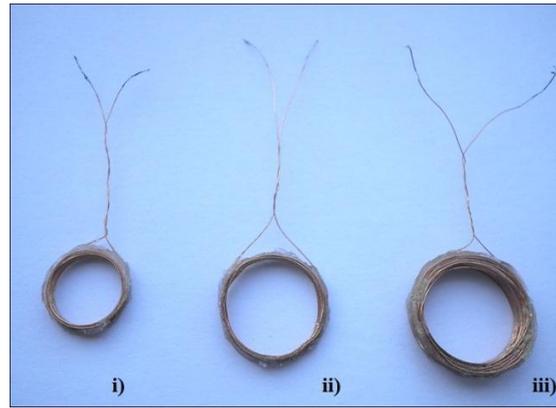


Figura 3.8 – Aspecto final das bobinas, i) B5, ii) B2, iii) B3

### 3.5.2. Construção dos moldes das bobinas

Foram concebidos e produzidos os moldes das bobinas com diâmetros de 11 e 15 mm (Figura 3.9 - a) e Figura 3.8 - b) respectivamente). Estes dois diâmetros foram no final, o diâmetro interno final de cada bobina.

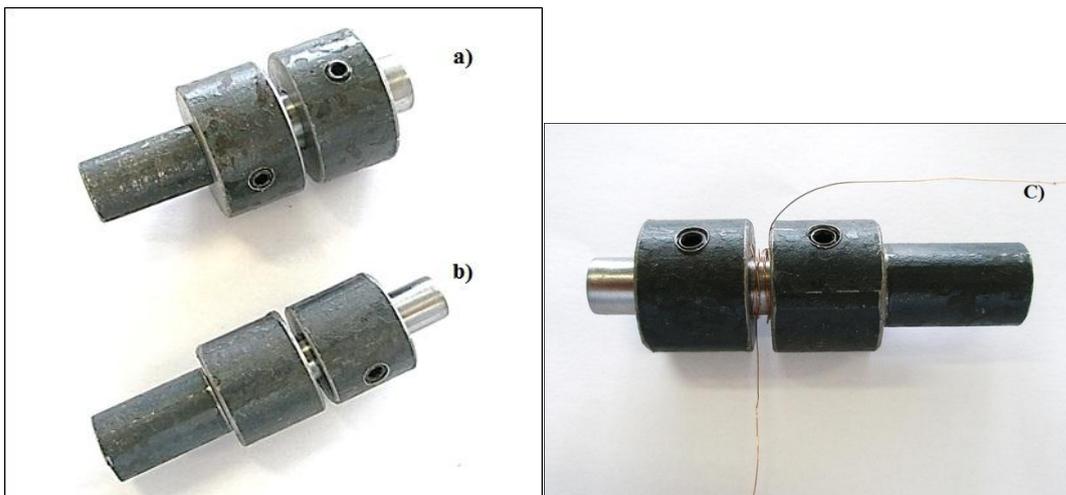


Figura 3.9 - Moldes das bobinas, a) Molde da bobina que deu origem a uma bobina com diâmetro interno 15 mm, b) Molde da bobina que deu origem a uma bobina com diâmetro interno de 11 mm, c) Molde da bobina com 11 mm de diâmetro e com o fio de esmalte

### 3.5.3. Fabricação e validação das bobinas

Com os moldes e com fio de esmalte de diâmetros 0,11, 0,18, 0,22 mm, fabricaram-se bobinas com um número de enrolamentos de 30, 39, 90; com diferentes larguras de bobines, 1,7 e 2,9 mm; e diâmetros de 11 e 15 mm.

Tabela 3.6 – Características das bobinas construídas

Referência	$\Phi_{\text{bobina}}$ (mm)	$\Phi_{\text{fio}}$ (mm)	$H_{\text{bobina}}$ (mm)	Nº de Espiras
B0	15	0,22	2,9	90
B1		0,18	2,9	90
B2		0,18	1,7	30
B3		0,11	1,7	30
B4	11	0,18	2,9	90
B5		0,18	1,7	30
B6		0,11	1,7	30
B7		0,22	2,9	39

Todas as bobinas, foram testadas e validadas para despistar qualquer erro ou defeito, como por exemplo o fio de esmalte poderia estar cortado fazendo curto-circuito no interior da bobina, o que influenciaria os testes futuros dos END. Retirou-se o esmalte das extremidades das bobinas com um ferro de soldar a 400 °C e com solda de estanho.

Seguidamente efectuaram-se as medições da resistência eléctrica das bobinas, sabendo que teoricamente para o mesmo  $\Phi_{\text{bobina}}$  e  $\Phi_{\text{fio}}$  a resistência aumenta com o aumento do n.º de enrolamentos. Analogamente, para o mesmo  $\Phi_{\text{bobina}}$ ,  $H_{\text{bobina}}$  e n.º de enrolamentos, a resistência diminui com o aumento do  $\Phi_{\text{fio}}$ . Na Tabela 3.7 apresentam-se os resultados das medições efectuadas.

Tabela 3.7 – Medições estáticas das bobinas

$\Phi_{\text{bobina}}$ (mm)	$\Phi_{\text{fio}}$ (mm)	$H_{\text{bobina}}$ (mm)	Nº de espiras	Medição da resistência eléctrica ( $\Omega$ )			Média aproximada
				#1	#2	#3	
11	0,11	1,70	30	2,80	2,80	2,80	2,80
	0,18	1,70	30	1,30	1,40	1,30	1,33
	0,18	2,90	90	3,70	3,80	3,70	3,73
	0,22	2,90	39	1,00	1,00	1,00	1,00
15	0,11	1,70	30	4,20	4,10	4,20	4,16
	0,18	1,70	30	1,80	1,00	1,90	1,83
	0,18	2,90	90	5,00	5,00	4,90	4,96
	0,22	2,90	90	2,90	2,90	2,90	2,90

#### 3.5.4. Equipamentos utilizados nos ensaios não destrutivos

Na Figura 3.10, representa-se esquematicamente a interligação dos diferentes elementos do sistema de END. A sonda foi posicionada e movida pela mesa X-Y controlada pelo *software* através de uma placa multifunções DAQ (*data acquisition*) de 16-bit modelo *National Instruments*, modelo NI USB-6251. A excitação da sonda em corrente é feita pelo *driver* de excitação, que recebe a forma de onda a partir do gerador de sinais. A tensão induzida  $U_{\text{out}}$  aos terminais das bobinas sensíveis da sonda é enviada para o detector de amplitude e diferença de fase, sendo comparada com a corrente de referência fornecida pelo *gerador de sinais*. O detector de amplitude e diferença de fase calcula esses valores que são adquiridos pelo DAQ e enviados para o PC para processamento através do *software* dedicado (Figura 3.10).

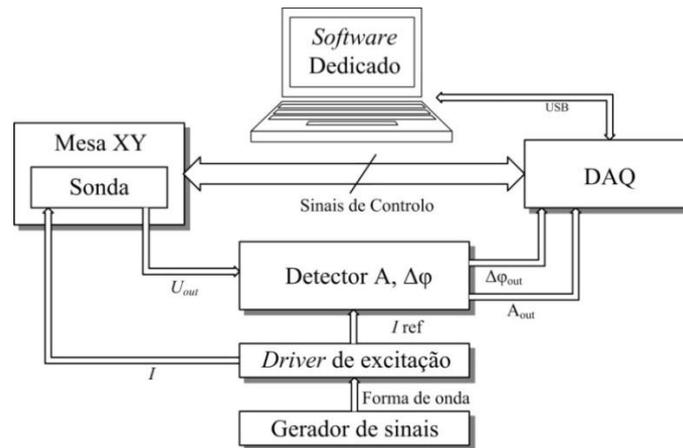


Figura 3.10 - Representação esquemática global do sistema de END por CI [33]

A bobina é o elemento activo de um sistema de END, mas são necessários também: a) equipamento adicional para a geração, aquisição e processamento de sinal; b) meio de posicionamento e locomoção automatizada das trajectórias de inspecção, e c) *software* dedicado para coordenar todos os elementos do sistema. Só com este conjunto de equipamentos e *software* (Figura 3.11) é que é possível fazer a inspecção.

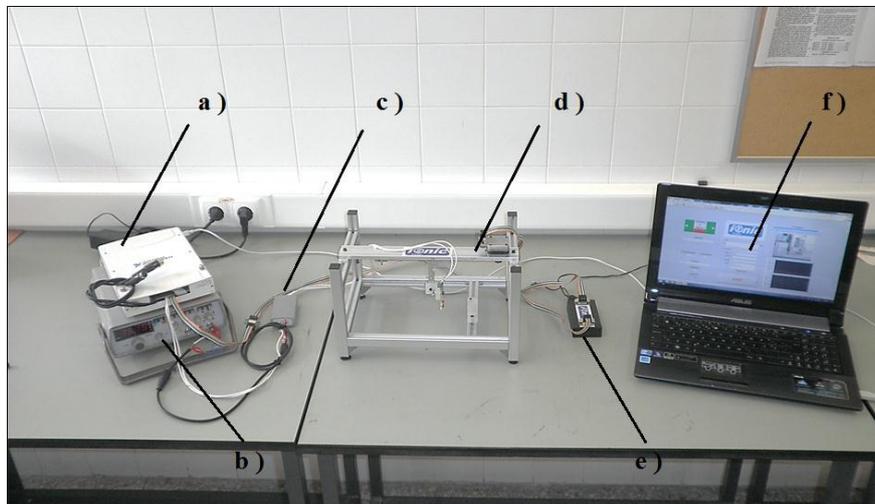


Figura 3.11 - Visão global de todos os equipamentos utilizados para o END, a) Placa de aquisição de dados; b) gerador de sinais; c) Resistência eléctrica calibrada em série com excitação para a medição de corrente; d) Mesa X-Y; e) Caixa de excitação do motor passo-a-passo; f) Computador com o *Software* instalado

### Mesa X-Y

O dispositivo automatizado de posicionamento e locomoção das sondas consistiu numa mesa X-Y com uma área útil de inspeção de 320 x 190 mm e cotas de atravancamento de 490 x 420 x 140 mm. O movimento segundo X e Y foi assegurado por um motor, marca NMB. A potência eléctrica foi fornecida a cada motor através de quatro conjuntos de oito transístores Darlington ULN2008A que amplificavam o sinal proveniente da DAQ. A mesa funciona para inspeção de pequenos provetes fixos ao chassi da mesa. Na Figura 3.12 mostra-se a vista geral da mesa X-Y, com o motor incorporado. Na Tabela 3.8 representam-se as características da mesa X-Y.

Tabela 3.8 – Características técnicas da Mesa X-Y

Cotas de atravancamento (mm)	Área útil de inspeção (mm)	Peso (Kg)	Velocidade de inspeção (ms <sup>-1</sup> )
350 x 240 x 200	310 x 200	2.047	0,001

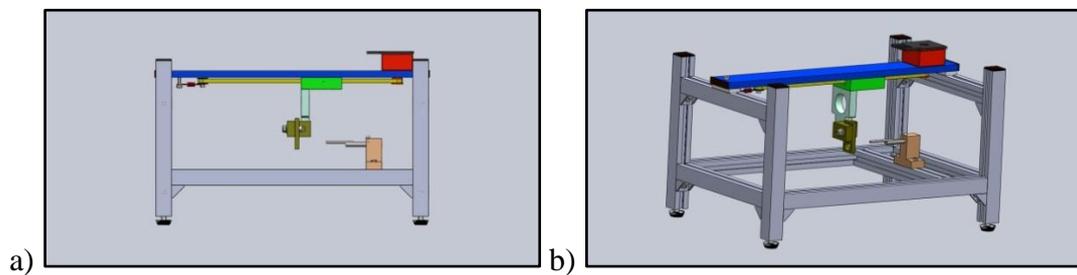


Figura 3.12 – Vista geral da Mesa X-Y em SolidWorks, a) Vista de perfil; b) vista de perspectiva

Para utilizar a Mesa X-Y foi necessário desenvolver dois suportes em acrílico. O primeiro suporte era fixo ao Chassi da mesa, ficando com a função de fixar o provete aquando da inspeção (na Figura 3.13 – c). O outro suporte em acrílico teve como função transportar a bobina (Figura 3.13 – a). Em anexos apresenta-se o dimensionamento de cada suporte. Este suporte estava fixo na haste com o motor, fazendo com que este suporte percorra o comprimento total (movimento em XX) dos provetes.

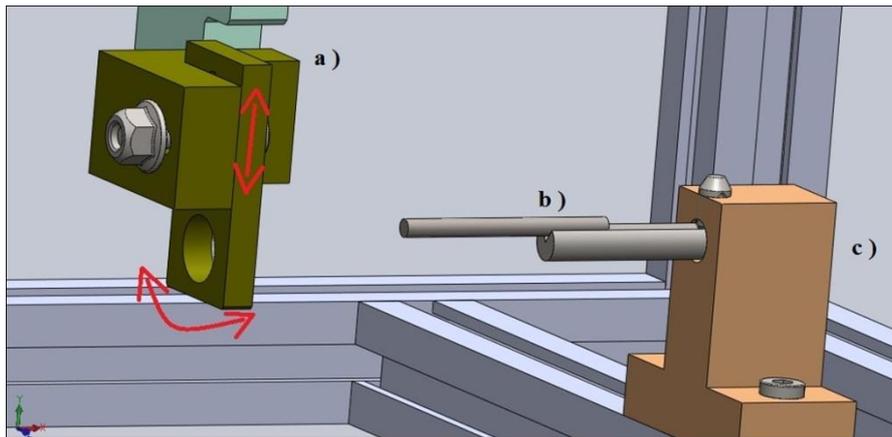


Figura 3.13 – Vista pormenorizada dos constituintes da Mesa X-Y modelados em SolidWorks, a) Suporte das bobinas em acrílico, com os graus de liberdade representados, b) Provete varão de aço com chanfro/arame NiTi, c) Suporte dos provetes em acrílico

### ***Electrónica de Geração, Aquisição e Condicionamento de Sinal***

A fiabilidade dos END está relacionada com os dispositivos de geração, aquisição e condicionamento de sinal. Fiabilidade é a precisão e exactidão com que estes dispositivos calculam os valores de amplitude e diferença da fase da tensão induzida  $U_{out}$  aos terminais da bobina. Contudo, esta condiciona o desempenho das próprias bobinas das CI.

O método para calcular os valores de amplitude e diferença de fase da tensão induzida  $U_{out}$  é uma solução implementada através de *software* baseado num algoritmo *sine-fitting* [27]. Este reconstitui as formas de onda da tensão induzida  $U_{out}$  e da tensão de excitação da bobina, para estimar a amplitude e a diferença de fase de ambos. Os procedimentos deste método consistem em introduzir uma resistência de precisão de  $10\ \Omega$  em série com o sinal de excitação da bobina, a tensão aos terminais dessa resistência e a tensão induzida  $U_{out}$  são adquiridas directamente pelo DAQ a uma taxa de aquisição de 500 KS/s com 10000 pontos em cada canal. A amplitude e a diferença de fase são obtidas através dos parâmetros das formas de onda, que são calculados à posteriori pelo algoritmo *sine-fitting*.

Apesar de ser um sistema simples e de fácil implementação, tem como desvantagens o uso de placas com elevadas taxas de aquisição, comprometendo a

velocidade de inspeção devido ao tempo de cálculo gasto pelo algoritmo *sine-fitting*. Apesar destas desvantagens é um modelo amplamente utilizado em todas as medições.

A Figura 3.14 ilustra uma alternativa ao *software sine-fitting*. A amplitude e a diferença de fase foram calculadas por um circuito electrónico de geração e condicionamento de sinal [33]. A sua constituição deriva de um circuito indutivo e de um AMPOP de alta corrente e ganho unitário. Possui também um detector de fase e amplitude (com amplificador de tensão para aumentar o sinal do circuito indutivo, com um conversor RMS-DC que permite transformar a amplitude da corrente em tensão e com um detector de fase XOR). Assim, e através de uma placa de aquisição, é possível obter os dados de fase e de amplitude da impedância de teste.

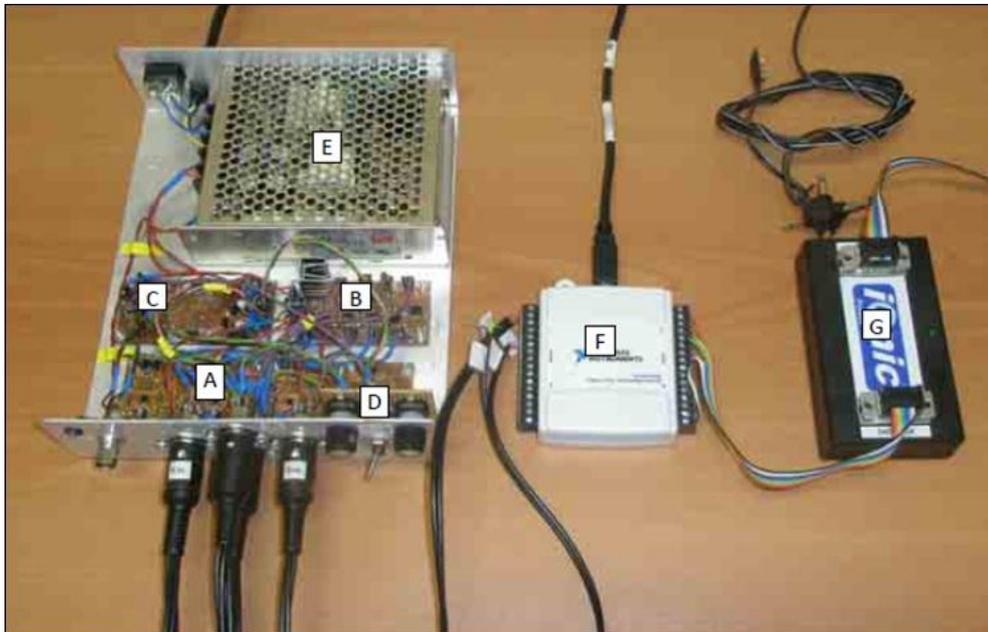


Figura 3.14 - Circuito electrónico de geração e condicionamento de sinal, a) Detectores de amplitude, b) Detectores de diferença de fase, c) Circuito de excitação de onda, d) Variação da fase e da amplitude dos sinais de excitação da Bobina, e) Fonte de potência de 12 V, f) Placa de aquisição de dados e gerador de excitação de sinal para motor passo-a-passo, g) Dispositivo de excitação do motor passo-a-passo [31]

## Software

Foi utilizado um *software* desenvolvido no âmbito da tese de mestrado de João Faria [31] para coordenar todos os elementos constituintes do sistema END. O software tem como base a linguagem G, no ambiente LabVIEW<sup>®</sup> 8.0 da NATIONAL

INSTRUMENTS<sup>®</sup>. Este software tem um elevado potencial para a aquisição, processamento e análise de dados em tempo real, assim como na criação de *Graphical User Interfaces* (GUI).

O programa é composto por 8 sub\_Vis e uma interface gráfica de controlo do movimento da bobina, respectiva posição e imagem, gravação de dados e visualização de resultados, como se ilustra na Figura 3.15. Na Figura 3.16, apresenta-se parte do código deste programa.

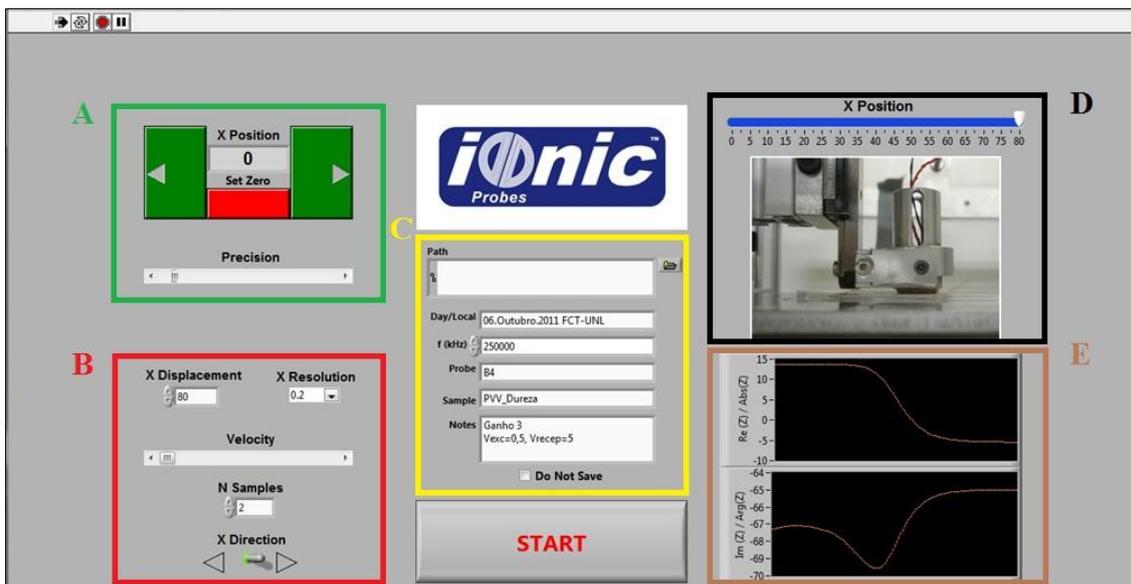


Figura 3.15 - Interface de locomoção da mesa X-Y; **Zona verde A**: definição de posição da bobina; **Zona Vermelha B**: definições de deslocamento e aquisição de dados; **Zona Laranja C**: opções de gravações, dados e notas; **Zona Preta D**: Posição da bobina; **Zona Castanha E**: representação gráfica da parte Real e Imaginária da impedância eléctrica da bobina

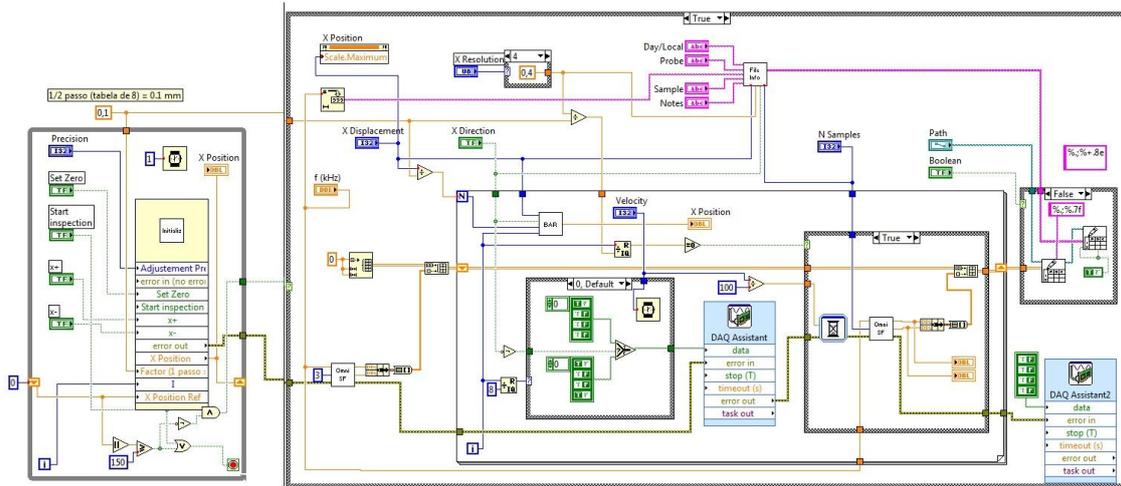


Figura 3.16 – Diagrama de blocos do código Labview do programa de movimentação da mesa e aquisição de dados

Os dados gerados pelo *software* são gravados em formato \*.txt. Além dos valores das componentes Real e Imaginária da impedância eléctrica, também são gravados dados importantes, como as condições do ensaio (tipo de frequência; ganho de excitação; ganho aquisição; resolução do teste; tipo de bobina), onde foi efectuado o teste, hora do teste e identificação do corpo de teste.

-22,379	-29,100
-22,376	-29,104
-22,369	-29,112
-22,363	-29,100
	...
-22,263	-29,143
-22,240	-29,191
Re(Z)	Im(Z)

----- Testing Parameters -----

Day/Local : 18.Julho.2011 FCT-UNL  
 Probe : B4  
 f = : 497000  
 Sample : PVV1  
 X Displac : 80  
 X Resolut : 0,20  
 X Directi : X+ -->  
 N Samples : 2  
 Notes : Ganho 3  
 Vexc=0,1, Vrecep=5

Figura 3.17 – Parte ficheiro \*.txt gerado pelo Software de END, com toda a informação sobre o ensaio

### 3.6. Análise metalográfica

Após soldado e efectuada a inspecção a todos os provetes, estes foram cortados transversal e longitudinalmente, embutidos em resina para preparação e observação metalográfica.

Esta análise teve como objectivo verificar o aspecto do cordão, a sua forma e penetração, e identificar eventual fusão dos materiais de base e nesse caso a extensão das zonas afectadas pelo calor.

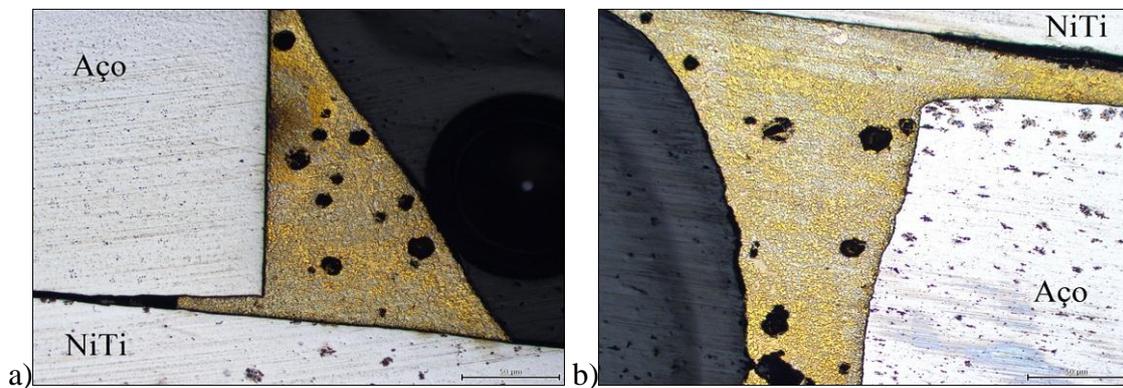


Figura 3.18 - Imagens do provete PVV\_Longitudinal\_20 %, a) Fotomicrografia com ampliação 5X, escala 50µm e luz 5, b) Fotomicrografia com ampliação 5X, escala a 50 µm e luz 5.5

Nas fotomicrografias, observaram-se vários poros no MA, bem como a não ligação do MA com o NiTi, quer seja sob a forma de arame ou de fita. Entre o MA e o aço, existiu ligação. Pontualmente em certos locais dos provetes, Figura 3.18, não houve ligação entre o MA e o aço. Isto acontece devido à elevada viscosidade da liga de 20 % e a uma deficiente deposição durante a soldadura. De forma a perceber se os poros eram causados pela elevada viscosidade desta liga, foram soldados dois provetes com os mesmos MB's mas com uma liga de brasagem de 50 % Ag (na Tabela 3.3 e 3.9, apresenta-se a composição completa da liga de brasagem e o resumo das condições de brasagem com liga de 50 % Ag, respectivamente). Estes provetes foram igualmente sujeitos aos mesmos END, cortados longitudinalmente, embutidos em resina e polidos.

Na Figura 3.19, estão as fotomicrografias dos provetes soldados com a liga de brasagem de 50 % Ag. Efectivamente diminui o número de poros mas ocorrem outros defeitos devido á maior temperatura de fusão desta liga de brasagem.

Tabela 3.9 – Resumo das condições de brasagem com liga de 50 % Ag

Referência	Material	Configuração	Foto
P.15	Aço/NiTi	Varão com Chanfro/Arame	
P.16	Aço/NiTi	Varão Facejado/Fita	
PVV_Long.	Aço/NiTi	Varão com Chanfro/Arame	
PVF_Long.	Aço/NiTi	Varão Facejado/Fita	

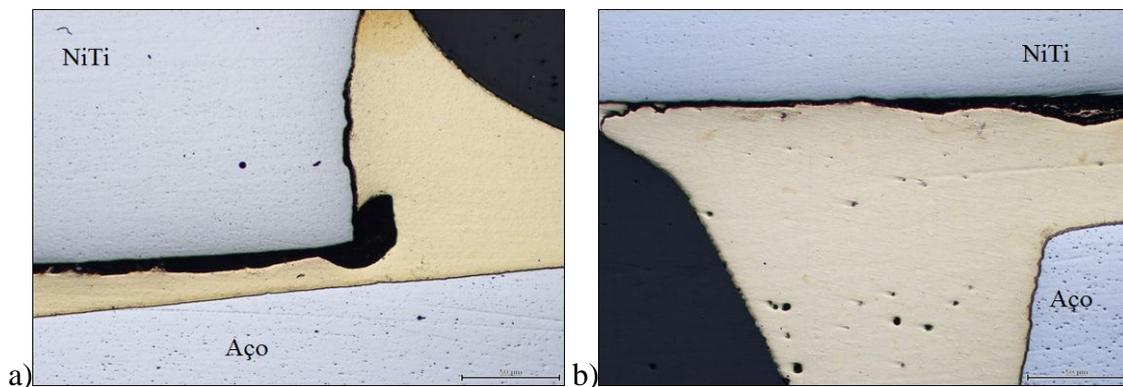


Figura 3.19 - Imagens do provete PVV\_Longitudinal\_50 %, a) Fotomicrografia com ampliação 5X, escala 50µm e luz 5, b) Fotomicrografia com ampliação 5X, escala a 50 µm e luz 5

### 3.7. Síntese do capítulo

Neste capítulo descreveu-se o processo da soldadura e o sistema de END utilizado para a execução do trabalho.

Foi modelado e criado um suporte de soldadura de três graus de liberdade para fixar as amostras de aço e de NiTi. Estas amostras foram preparadas quimicamente antes da

soldadura. A escolha da liga de brasagem foi realizada com base nos resultados dos ensaios de tracção e de ciclagem.

Desenvolveram-se bobinas para os ensaios por correntes induzidas. Utilizou-se um chassis e modelaram-se e fabricaram-se dois suportes em acrílico. Um suporte para fixação dos provetes e outro para fixação das bobinas.

Tendo como base o LabVIEW<sup>®</sup> 8.0, foi desenvolvido um *software* de END dedicado. Com este *software* foi possível comandar o suporte de fixação da bobina, acoplado a um motor passo a passo. Além do controlo do movimento, este *software* também permitiu armazenar os dados, controlar a electrónica de geração, aquisição e condicionamento de sinal.



## **4. Resultados e discussão**

### ***4.1. Introdução***

Neste capítulo analisam-se os resultados dos ensaios não destrutivos efectuados às diferentes juntas brasadas produzidas.

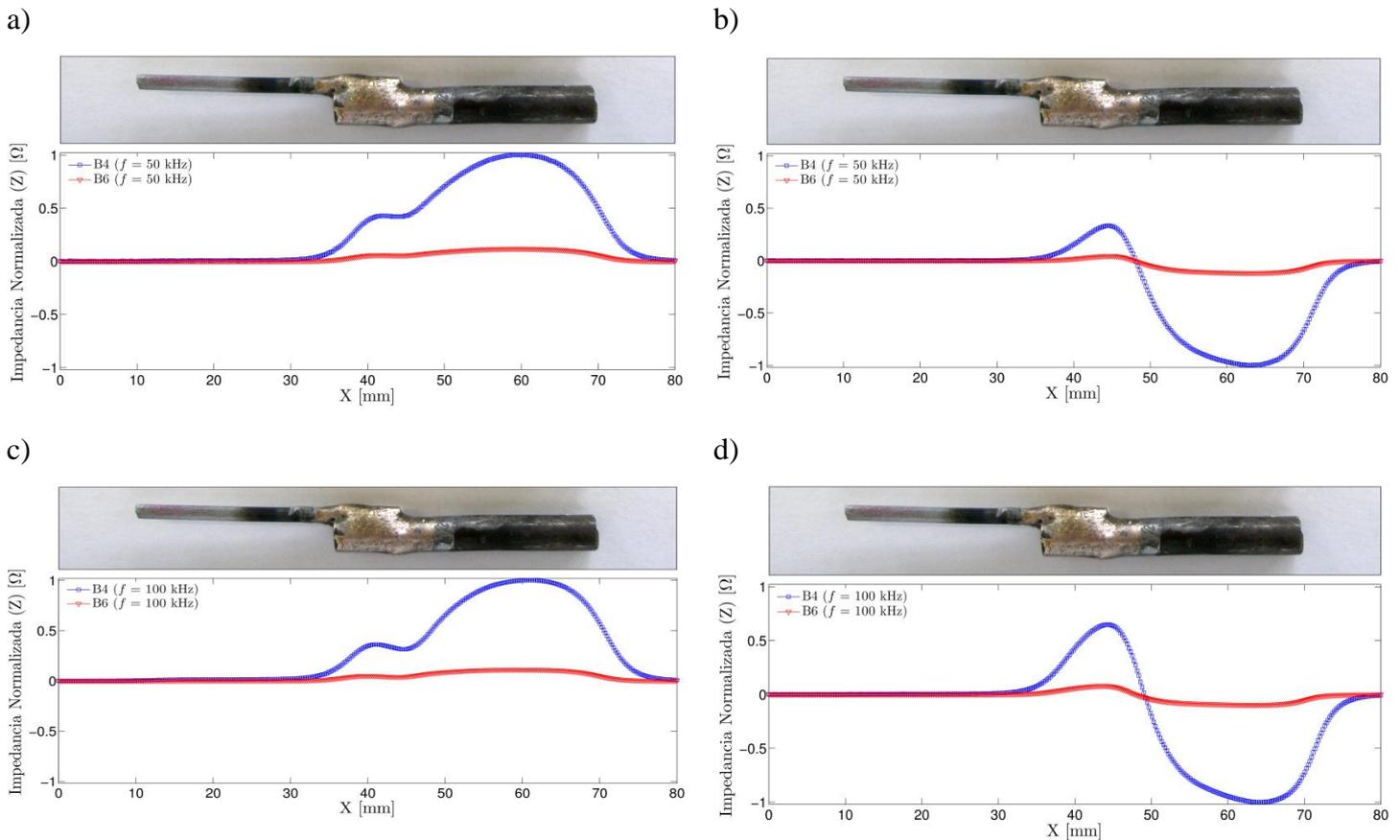
Antes de se iniciar os ensaios aos provetes brazados foi necessário definir alguns parâmetros, nomeadamente: i) caracterização das sondas de inspecção (das oito bobinas projectadas e construídas só uma iria ser usada nos ensaios aos provetes brazados), ii) influência dos parâmetros de inspecção (tipo de onda, ganho e gama de frequências a ser utilizados nos ensaios). A perfeita definição destes parâmetros permite reduzir e/ou eliminar as variáveis de influência que já foram referidos anteriormente (capítulo 2).

Após definição dos parâmetros de inspecção caracterizou-se os materiais de base com diferentes configurações, com e sem liga de brasagem. Esta caracterização permitiu entender como se comporta os ensaios perante os dois materiais de base com diferentes configurações e ligados, ou não, ao material de adição. Por último, e sendo este o objectivo específico desta dissertação foram realizados os ensaios não destrutivos aos provetes brazados.

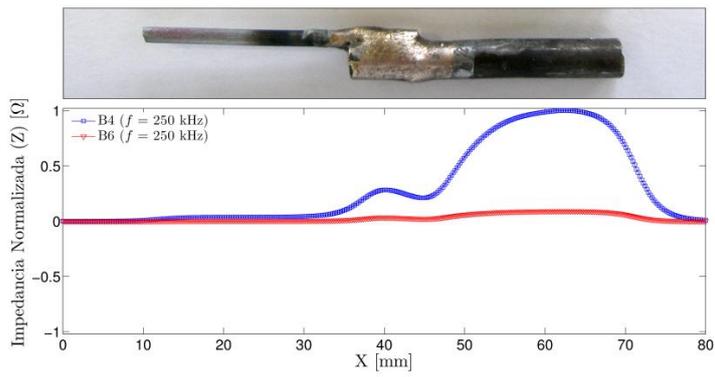
## 4.2. Caracterização das sondas de inspeção

Como referido no capítulo 3 foram construídas e validadas oito bobinas. Destas, foram retidas para os ensaios não destrutivos as bobinas B4 e B6. A selecção destas duas bobinas foi baseada em dois critérios, nomeadamente: i) a geometria e ii) resultados obtidos. Em relação ao primeiro critério, a geometria, sabe-se que quanto menor for a distância das espiras ao material a ser inspeccionado, maior é a intensidade da corrente induzida e consequentemente, melhor a caracterização.

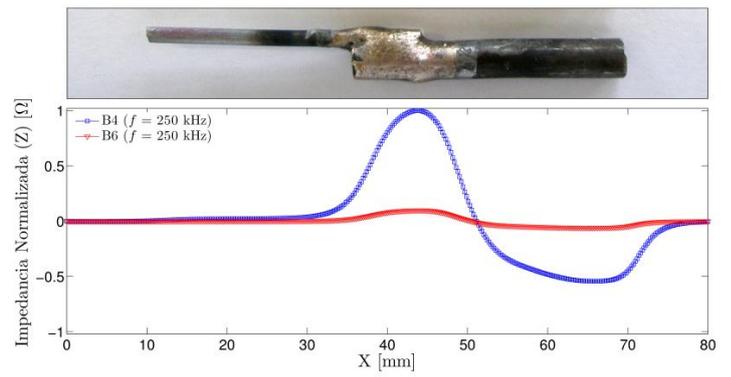
Por outro lado, verificou-se experimentalmente que a sonda B4 dava melhores resultados do que a B6 (Figura 4.1). A melhor caracterização por parte da bobina B4 deve-se ao facto de ter um maior número de enrolamentos e de diâmetro do fio. Consequentemente a largura da B4 é superior à largura da B6. Esta diferença entre bobinas tem como consequência para a bobina B6, uma menor intensidade de corrente induzida. Esta menor intensidade implica a não identificação das zonas brasadas como se ilustra na Figura 4.1 a qualquer frequência.



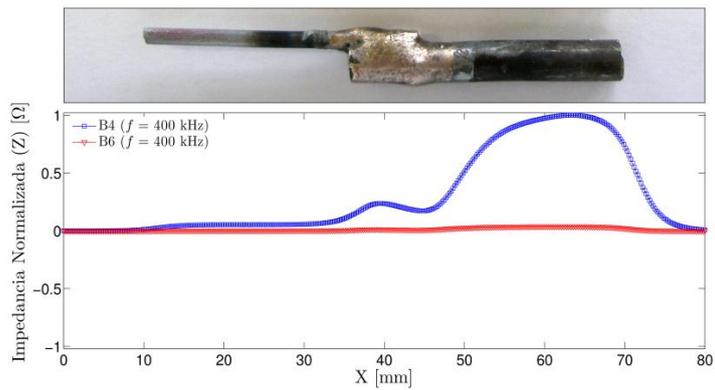
e)



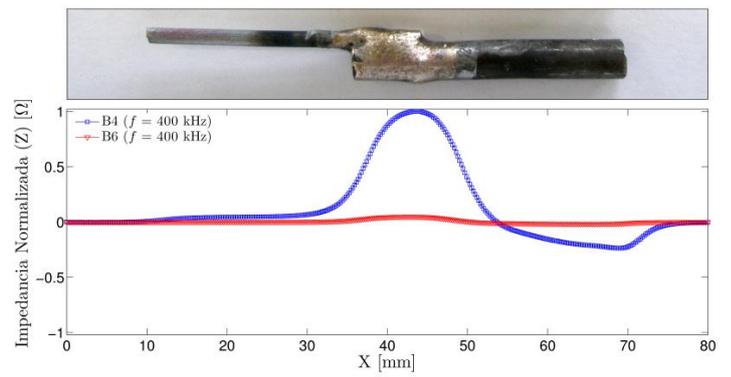
f)



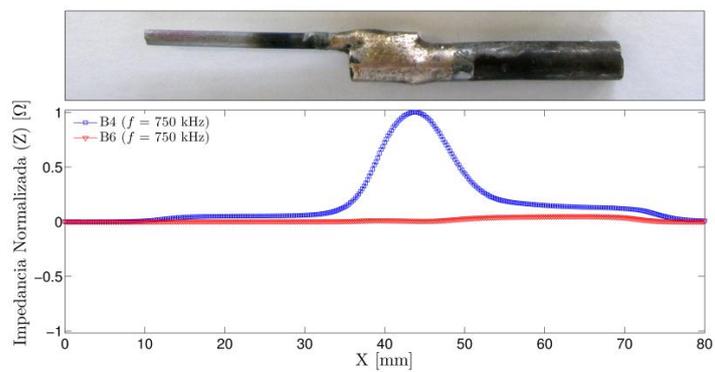
g)



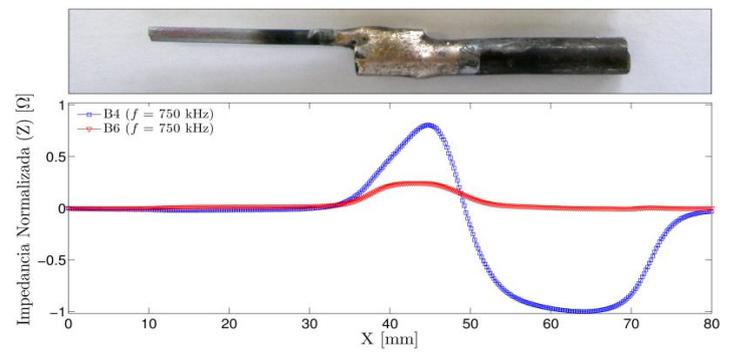
h)



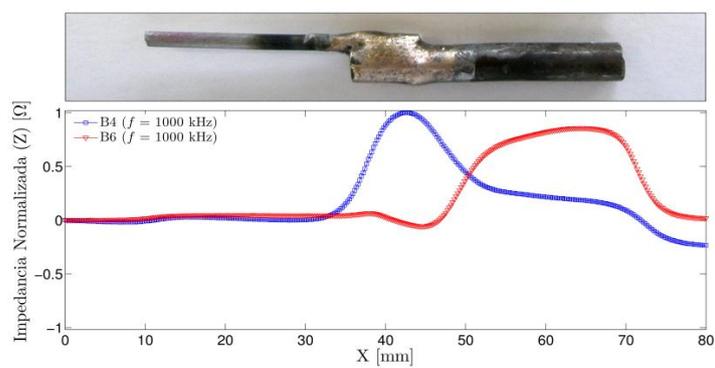
i)



j)



k)



l)

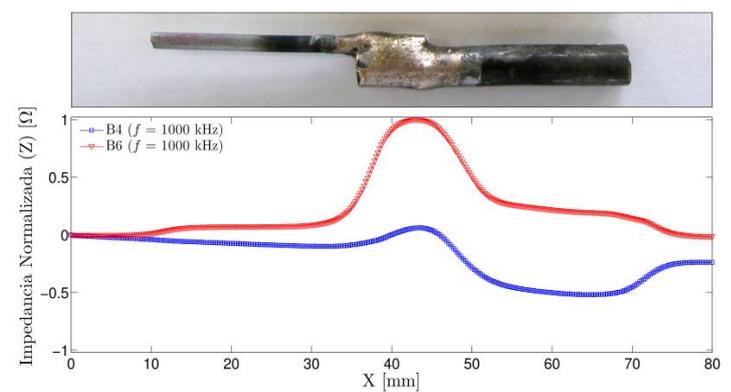


Figura 4.1 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para duas bobinas. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária

Com este ensaio excluiu-se todas as outras bobinas, principalmente as bobinas com diâmetro interno de 15 mm. Os ensaios futuros foram realizados com a bobina B4.

### 4.3. *Influência dos parâmetros de inspecção*

Nestes ensaios variaram-se três parâmetros de inspecção: i) A frequência, ii) O ganho e iii) O tipo de onda. O impacto destes parâmetros na inspecção foi dividido em duas etapas: a) na primeira etapa manteve-se constante a frequência (250 kHz), a bobina (B4), o provete (P.4), variando-se o ganho e tipo de onda (Tabela 4.1); b) depois de analisar a influência do ganho e do tipo de onda, variou-se a frequência, mantendo constante o ganho, o tipo de onda, a bobina (B4) e o provete.

Tabela 4.1- Esquema da primeira etapa utilizando o provete P.4

Tipo de onda	Ganho		
	3	4	5
Triangular	#A	#B	#C
Sinusoidal	#D	#E	#F
Quadrada	#G	#H	#I

Nota: Nesta etapa os ensaios foram efectuados à frequência de 250 kHz

Desde logo, foi impossível fazer a inspecção com o tipo de onda quadrada. Isto aconteceu devido ao algoritmo (iterativo) estar optimizado para interpolar curvas sinusoidais. Se a curva for triangular ou quadrada podem surgir problemas de convergência no cálculo dos parâmetros da curva sinusoidal, que não se ajusta convenientemente a essas formas. Só com a onda quadrada é que não foi possível fazer o ensaio. Então nesta etapa os ensaios foram realizados analisando a resposta para a onda sinusoidal e triangular (Figura 4.2).

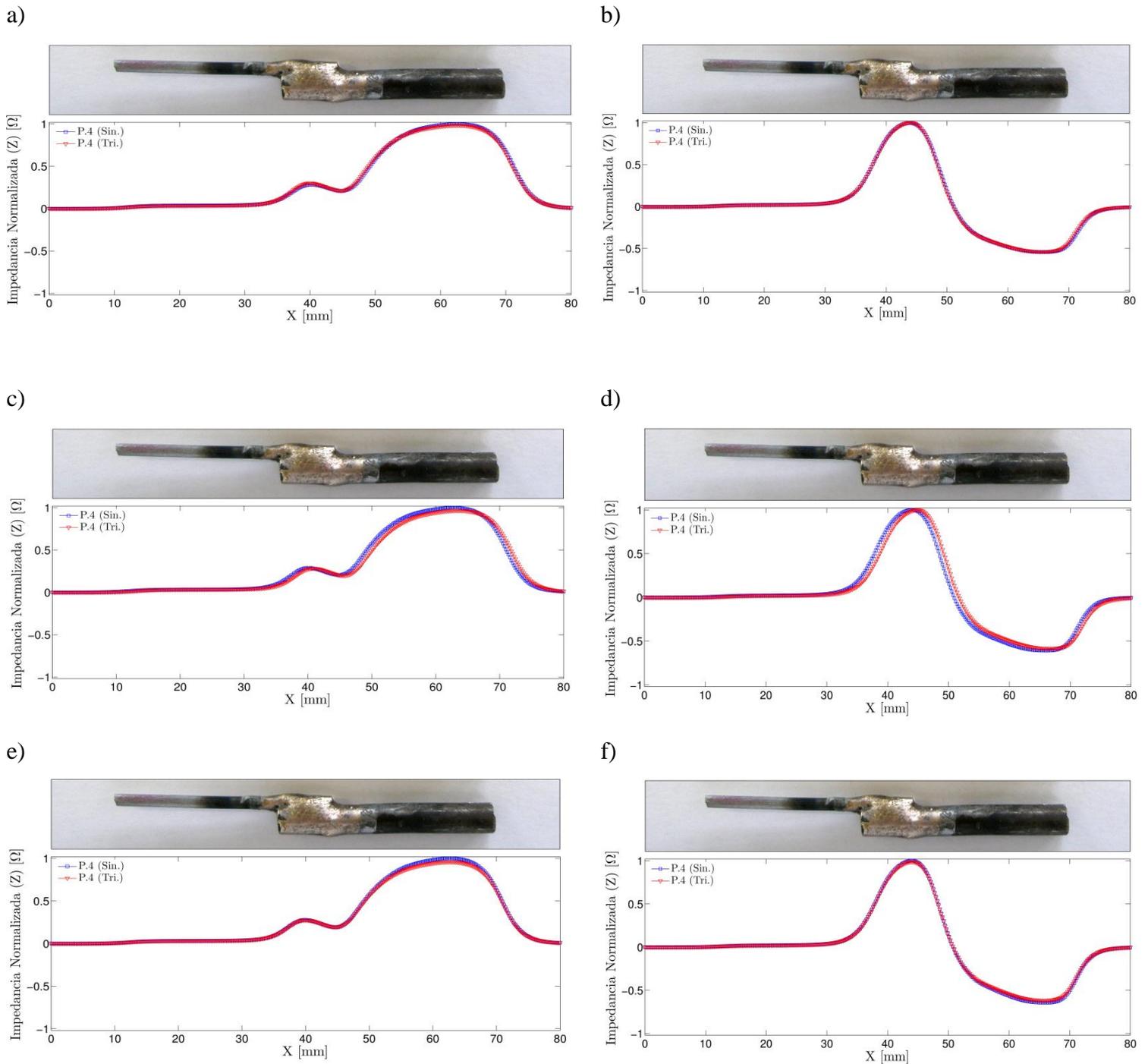


Figura 4.2 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, variando o tipo de onda. a) Parte Real entre #A e #D, b) Parte Imaginária entre #A e #D, c) Parte Real entre #B e #E, d) Parte Imaginária entre #B e #E, e) Parte Real entre #C e #F, f) Parte Real entre #C e #F

Verificou-se que a diferença da resposta da onda sinusoidal ou triangular é pouco significativa. Então definiu-se como um parâmetro para futuras inspeções, a resposta em onda sinusoidal.

Definido o tipo de onda, a etapa um ficou finalizada ao definir-se o ganho padrão. O ganho é uma característica apresentada por um dispositivo amplificador e consiste em modificar a amplitude de um sinal aplicado à sua entrada. Sabendo que a resistência da bobina é zero, quanto menor for a tensão melhor. Iniciaram-se os testes variando os ganhos. À semelhança dos testes do tipo de onda, as diferenças entre ganhos foi pouco significativa (Figura 4.3). Nesse caso, escolheu-se o menor ganho (Ganho 3).

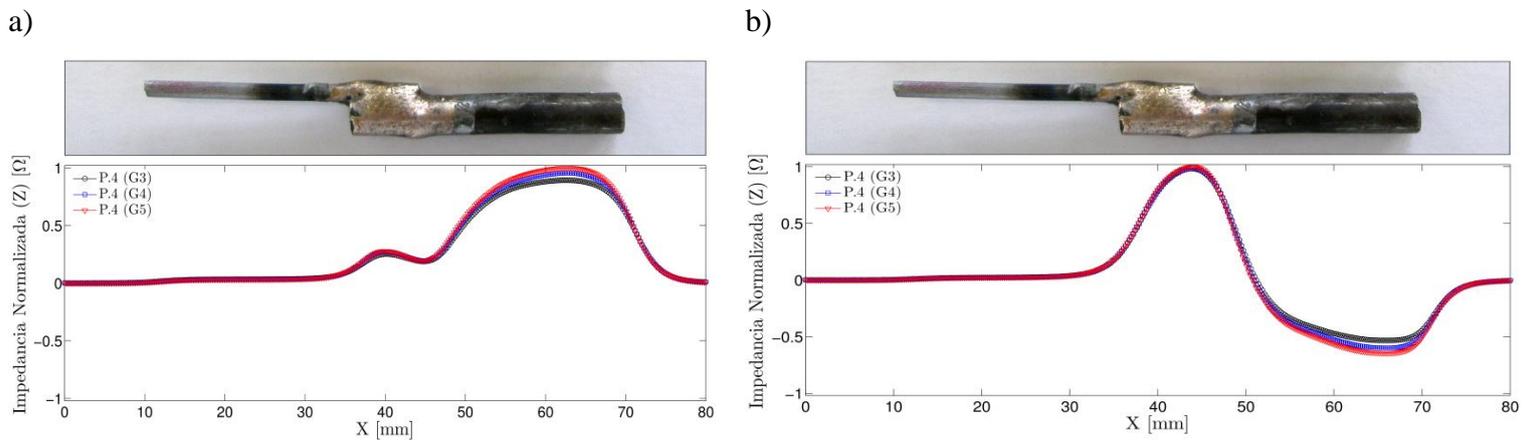


Figura 4.3 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para vários ganhos. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária

Na segunda etapa, variaram-se as frequências (50 kHz, 100 kHz, 250 kHz, 400 kHz, 750 kHz e 1000 kHz) mantendo constantes os restantes parâmetros. Eliminaram-se dos testes, as duas frequências mais extremas, 50 kHz e 1000 kHz. A primeira frequência não permitia identificar qualquer defeito ou descontinuidade isto porque esta frequência detectava o volume (Figura 2.11). Por outro lado, as correntes induzidas circulam só à superfície (efeito de pele), sendo só possível detectar-se defeitos superficiais ou subsuperficiais. Então, e lembrando a Figura 2.11, quanto maior é a frequência mais à superfície se realiza a inspeção. Como tal a segunda frequência era muito sensível à variação da topografia da superfície e com isto o efeito de pele era muito evidente, tornando-se impossível de se distinguir o que era defeito de soldadura ou da forma e geometria do provete.

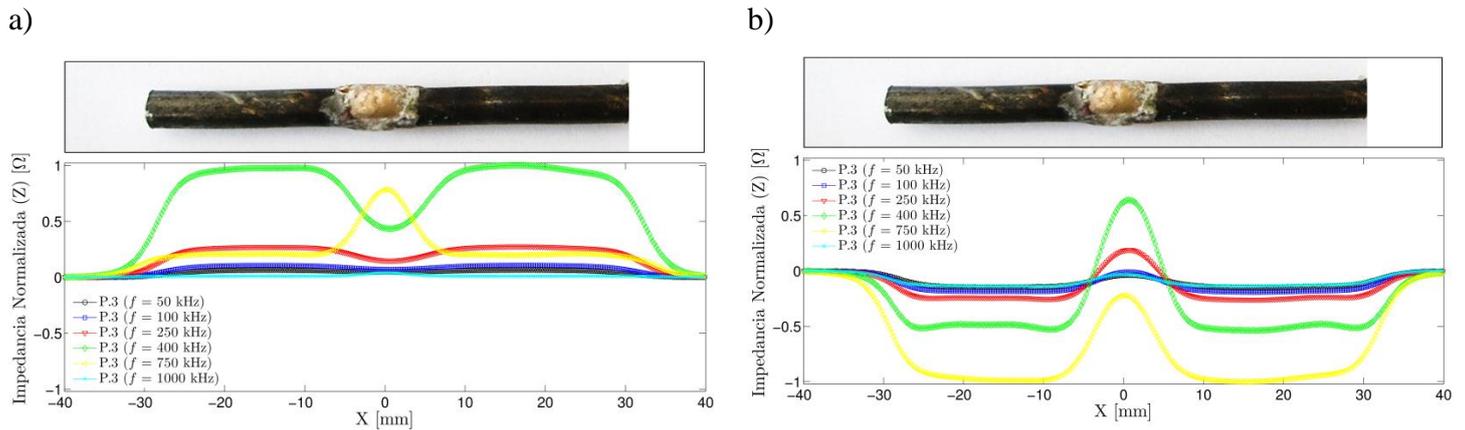


Figura 4.4 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para várias frequências. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária

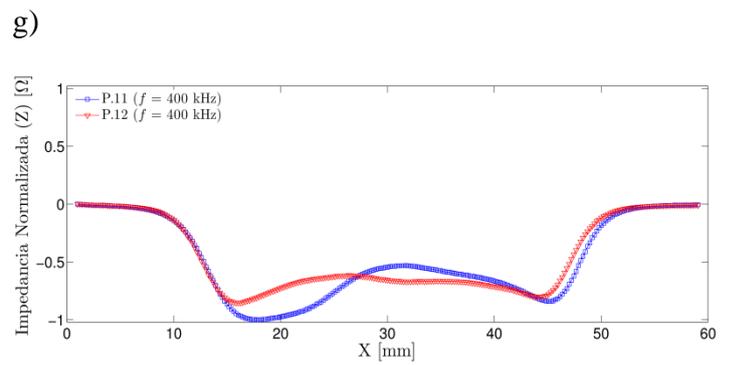
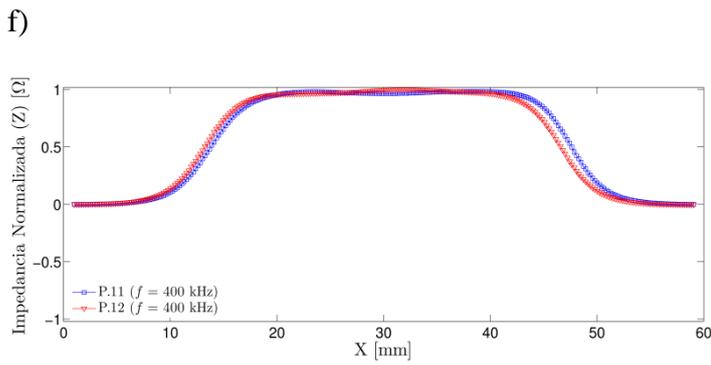
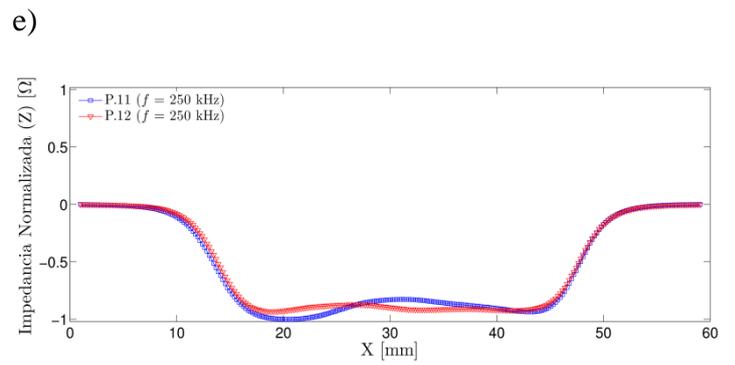
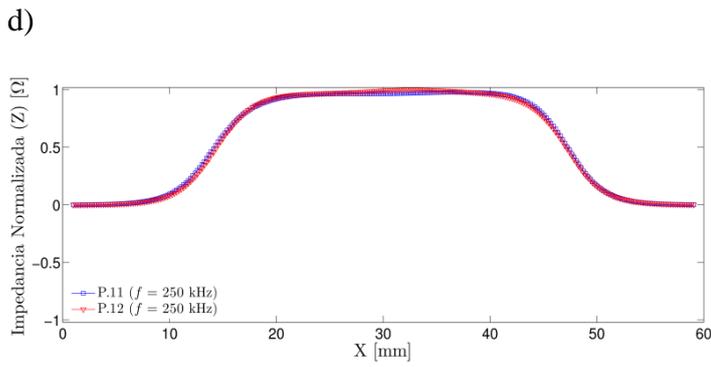
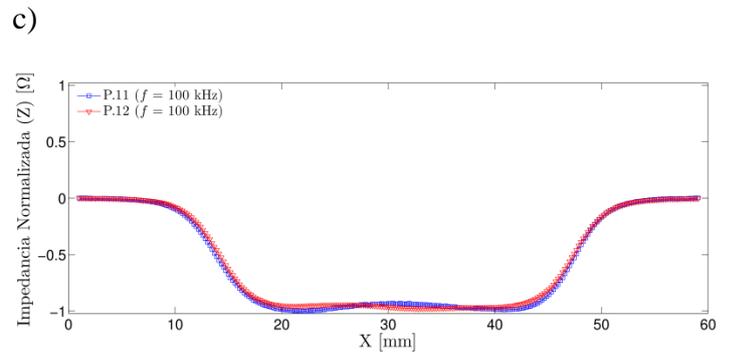
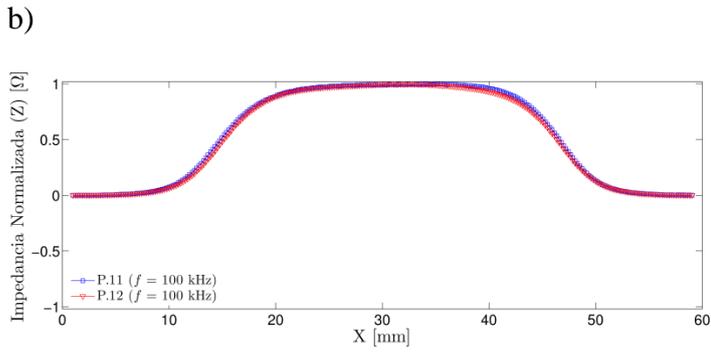
De acordo com a figura anterior, a componente real está mais relacionada com a permeabilidade magnética do meio. Enquanto a componente imaginária está mais relacionada com a condutividade eléctrica do meio.

Resumindo, neste sub-capítulo definiram-se os seguintes parâmetros de inspeção a ser usados nos ensaios posteriores: a) Onda sinusoidal, b) Ganho 3, c) Frequências entre 100 e 750 kHz.

#### 4.4. Ensaios não destrutivos

##### 4.4.1. Materiais de base com e sem soldadura

Os testes nos materiais base sem soldadura foram feitos em provetes de varão de aço com rasgo e com facejamento. Os resultados obtidos com estes materiais e com estas configurações foram muito idênticos. Só na Figura 4.5- h é que se observaram diferenças significativas entre os provetes P.11 e P.12. Este resultado em concreto deve-se à elevada frequência utilizada, e consequentemente, ao efeito de pele por ela induzida. Até aos 400 kHz não foram perceptíveis diferenças na componente Real, nos provetes com chanfro ou com facejamento. A partir dessa frequência e devido à circulação à superfície das correntes induzidas, percebe-se que o P.11 é o provete com chanfro e o P.12 é o provete com facejamento.



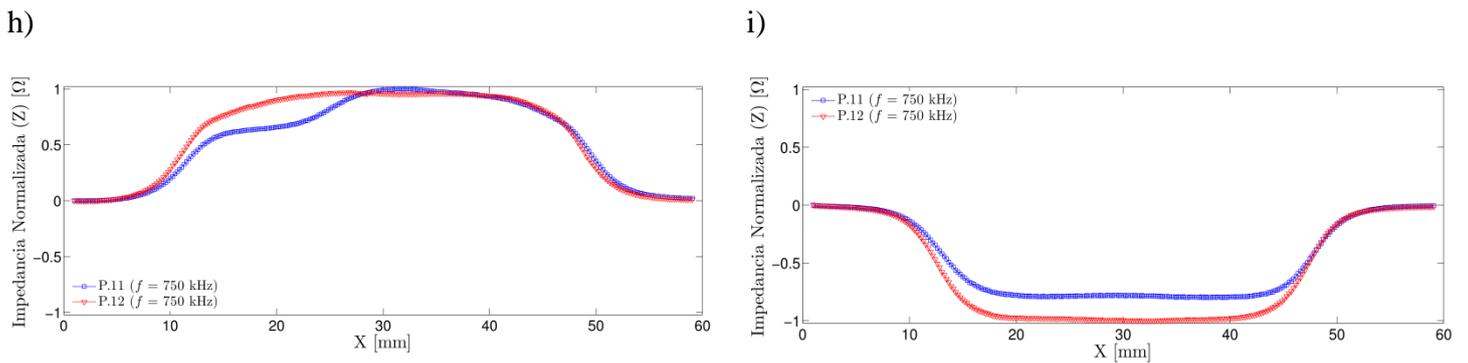
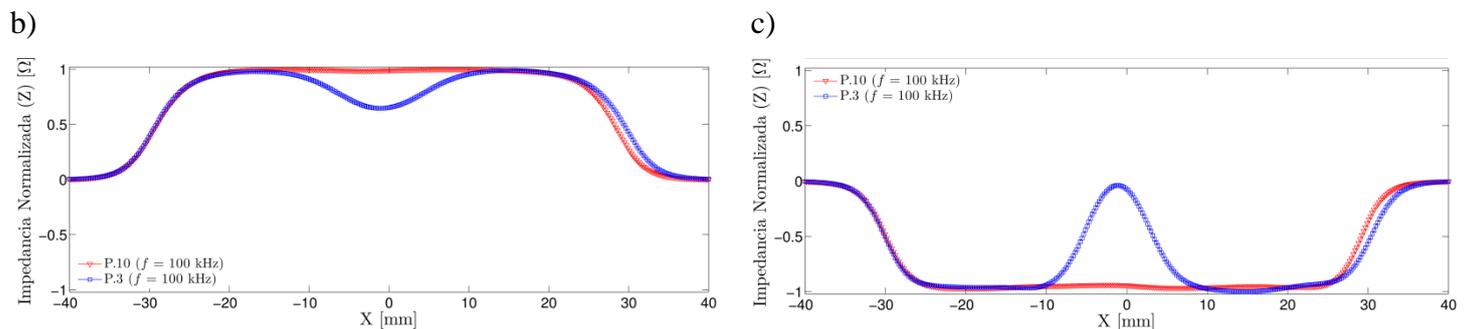
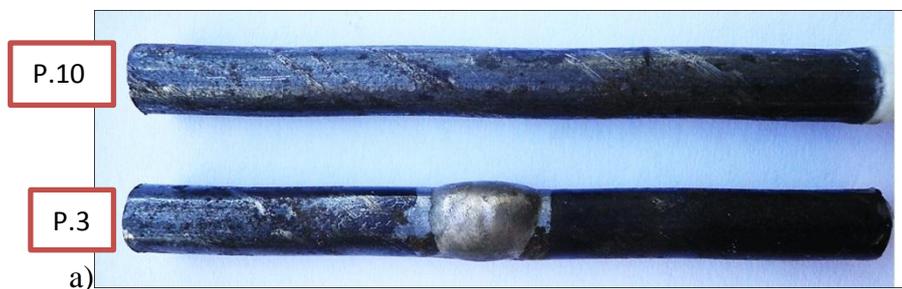


Figura 4.5 – Variação da impedância eléctrica com a distancia inspeccionada, para os provetes de varão de aço com rasgo e facejados. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária

Relativamente à componente Imaginária, nestas condições com estes provetes não se observou uma diferença significativa. Porém a diferença na componente Imaginária aumenta quando se comparam as medições dos provetes P.10 e P.3, como se apresenta na figura abaixo.



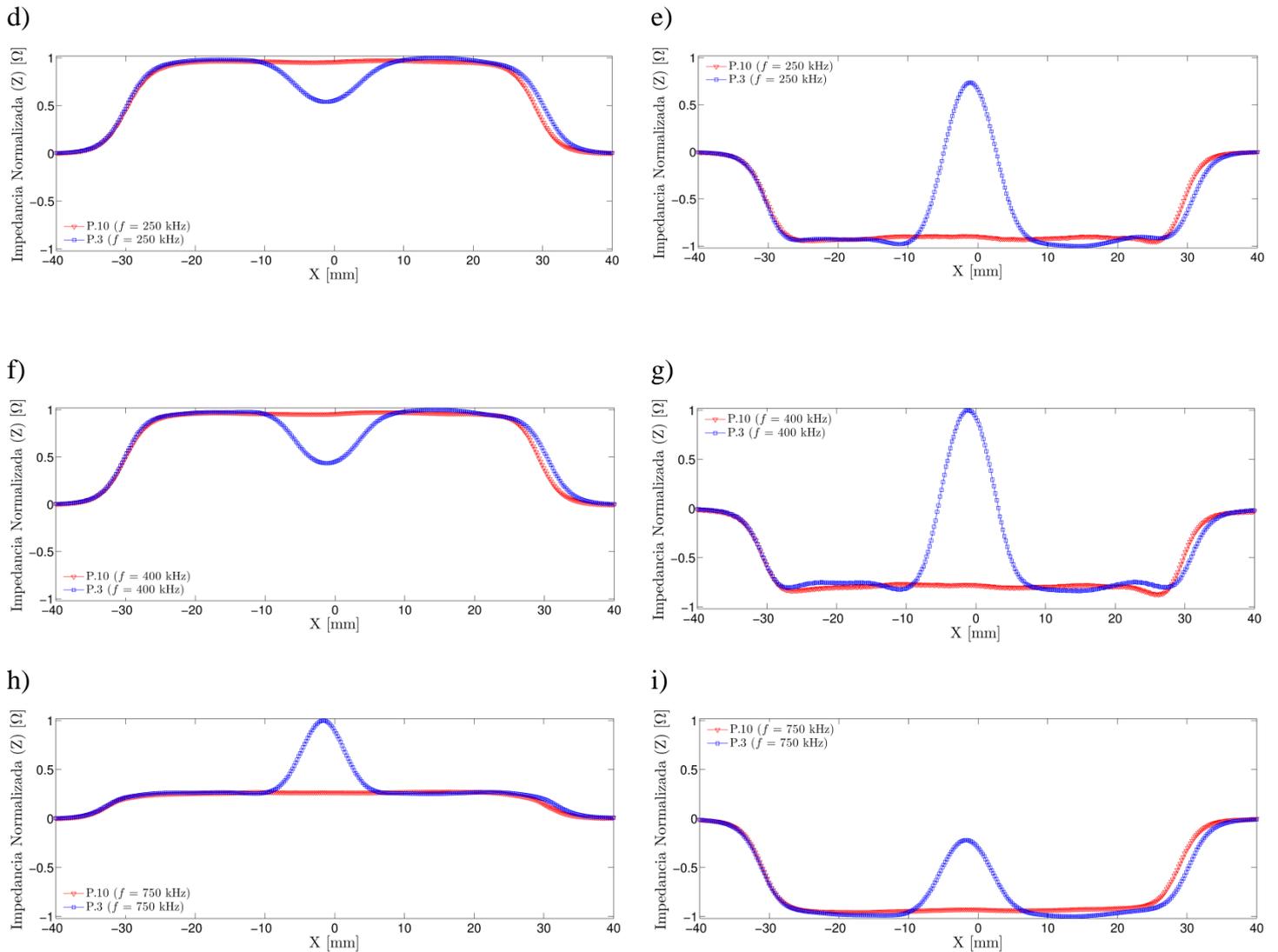


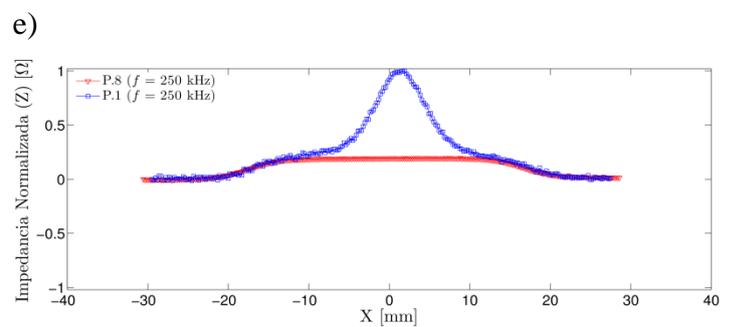
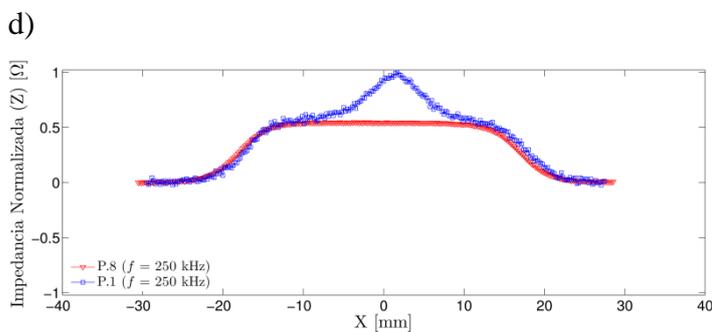
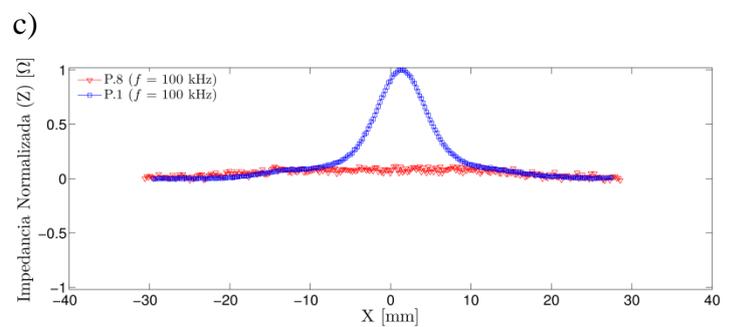
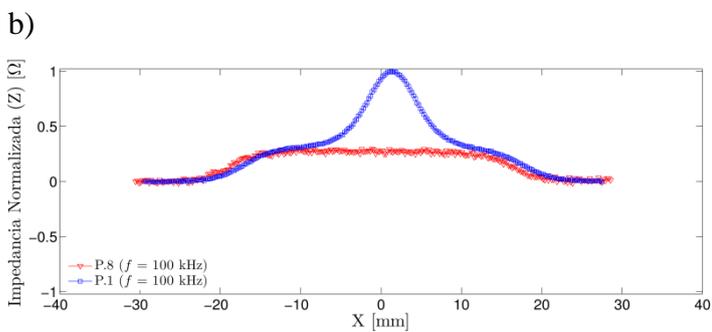
Figura 4.6 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para os provetes de varão de aço com e sem material de adição. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária

Conforme se mostra na Figura 4.6, e contrariamente ao que aconteceu na Figura 4.5, existiu uma diferença significativa nos resultados obtidos quer por parte da componente Imaginária quer por parte da componente Real. Observando a componente Imaginária do provete P.10, concluiu-se que a entrada da bobina no provete provocou um acréscimo da impedância eléctrica mantendo-se constante ao longo do comprimento do provete. O valor da impedância eléctrica voltou a decrescer quando a sonda deixou de percorrer o provete e entrou no ar. Por outro lado, no provete P.3 a sonda exibiu um comportamento semelhante ao verificado no provete o P.10, excepto na zona da brasagem. Neste local observou-se um pico na impedância eléctrica detectado a

400 kHz. Até a este valor da frequência, o valor da impedância aumenta com o aumento da frequência. A 750 kHz privilegia-se a variação da topografia na superfície da liga de Ag em deterioro da condutividade eléctrica.

Na parte Real, também é detectada a presença da liga de brasagem havendo um aumento da impedância eléctrica. Mas ao contrário da parte Imaginária, o valor absoluto deste acréscimo mantém-se constante em todas as frequências.

A caracterização do NiTi (arame e fita) foi feita utilizando o mesmo procedimento. Os resultados obtidos apresentam-se nas Figuras 4.7 e 4.8 para o arame e para a fita respectivamente.



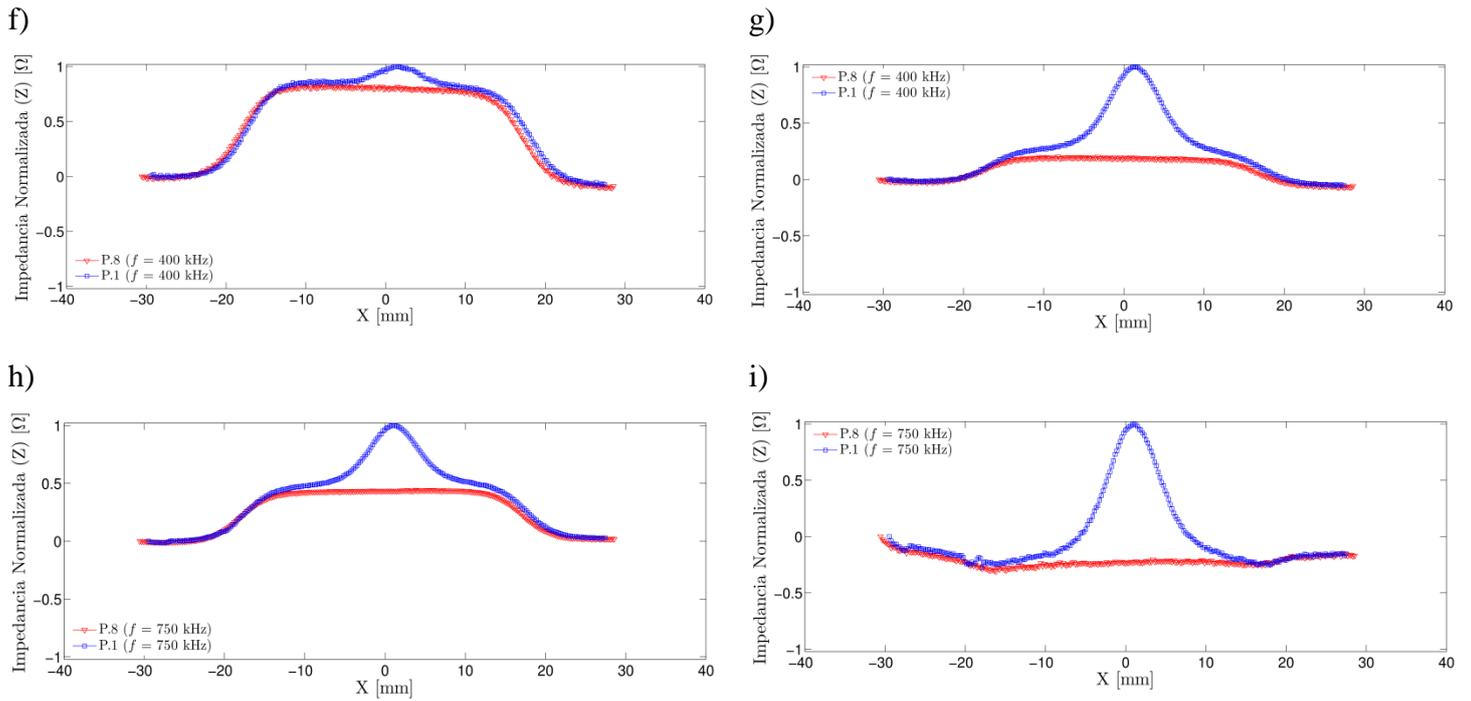
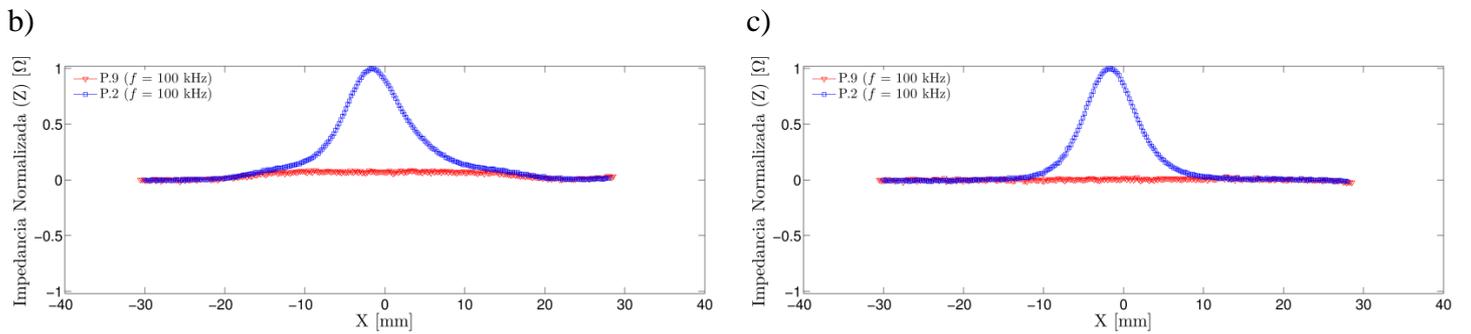
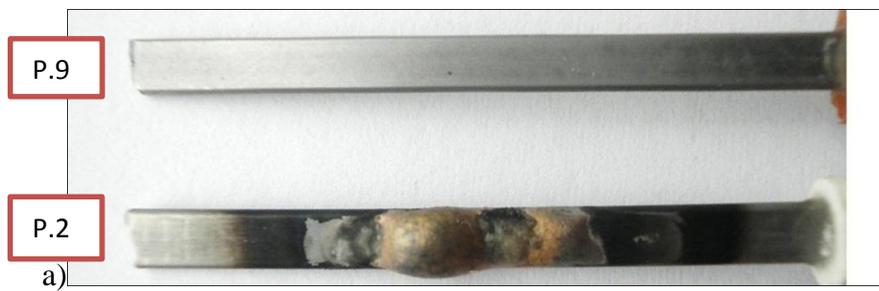


Figura 4.7 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para os provetes de arame de NiTi com e sem material de adição. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária



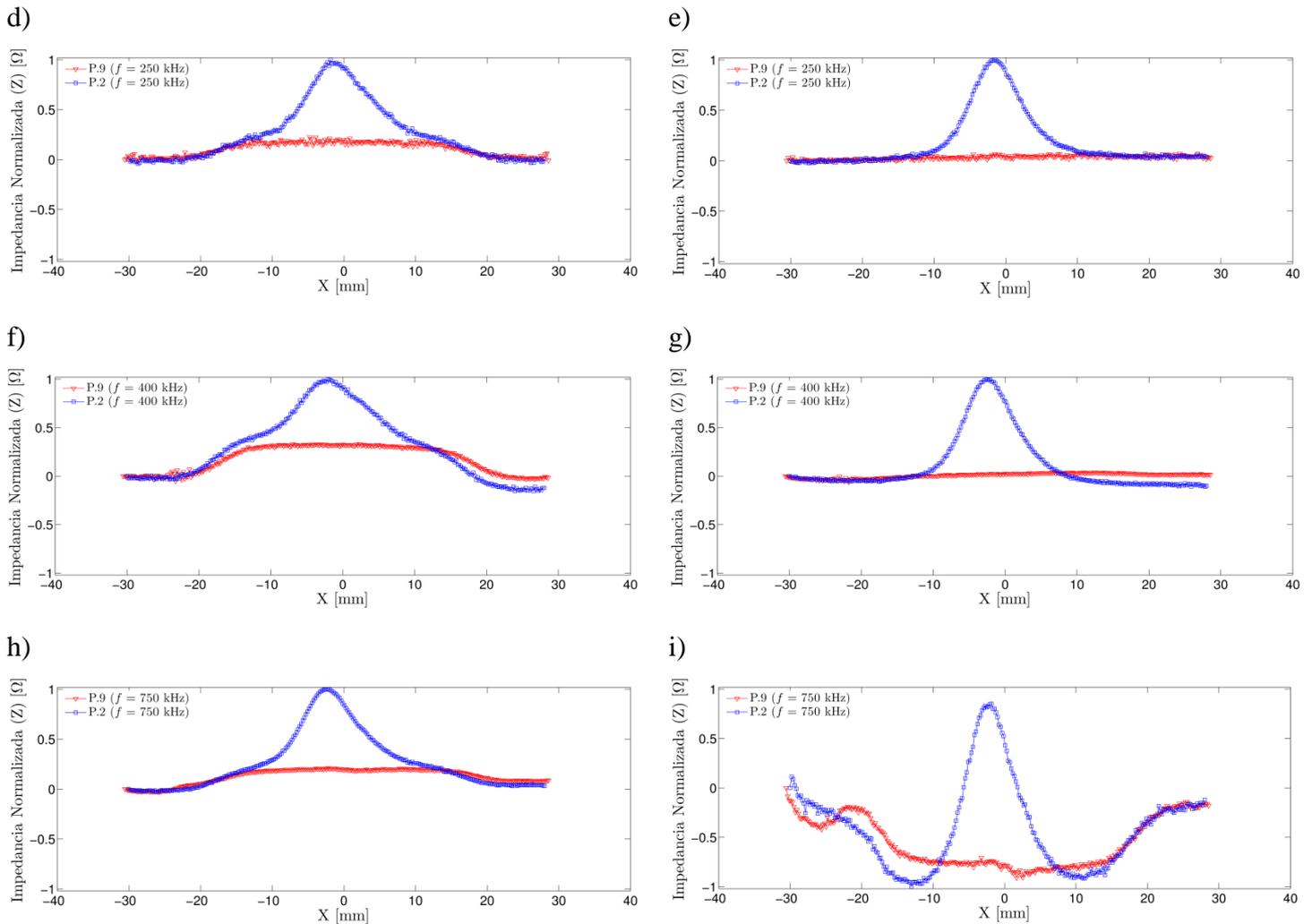
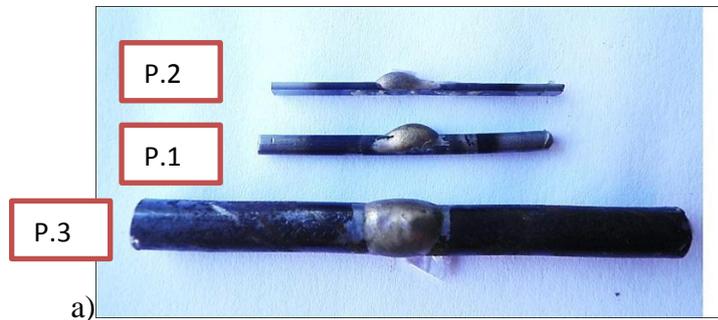


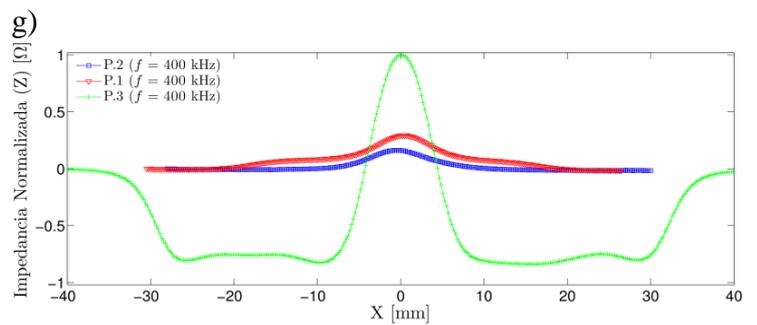
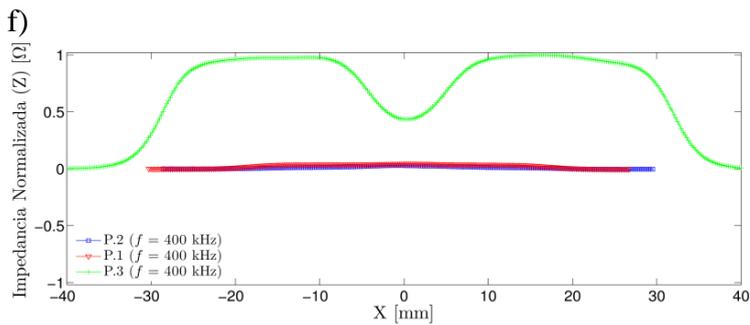
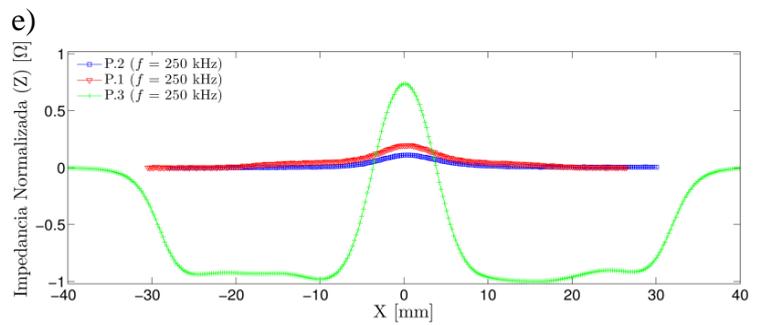
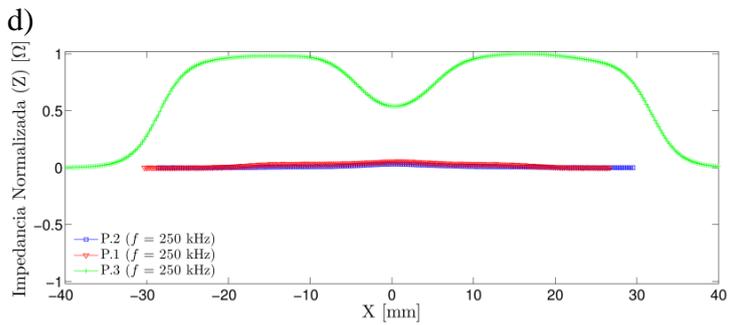
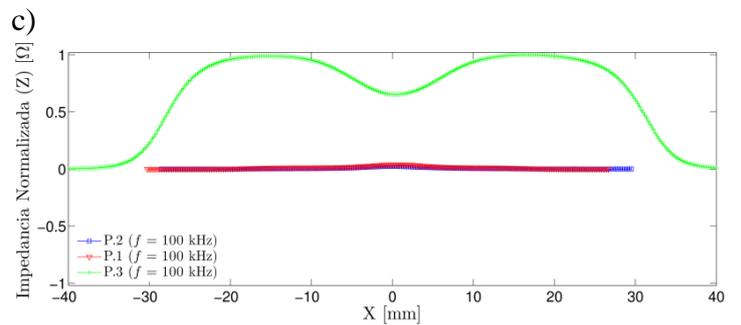
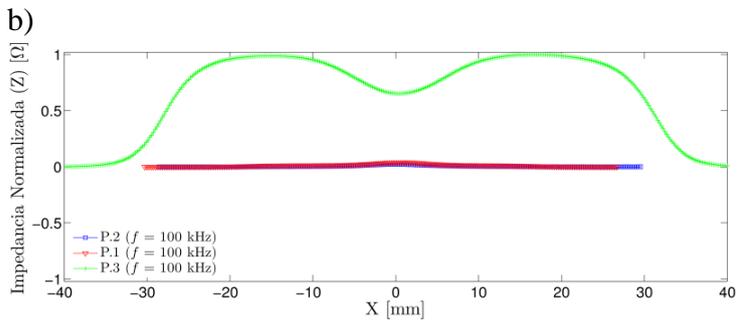
Figura 4.8 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para os provetes de fita de NiTi com e sem material de adição. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária

De notar que tanto para a componente Real como para a Imaginária, a impedância eléctrica é maior no arame de NiTi. Isto deve-se à área de secção do arame de NiTi ser maior do que a área de secção da fita, tornando assim mais fácil detectar a entrada das sondas no NiTi (por exemplo Figura 4.7 – e) e Figura 4.8 – e)). Neste material, nas duas formas, detectou-se muito ruído, como se observa por exemplo nas Figuras 4.7 – c) e 4.8 – f). Os resultados obtidos na Figura 4.7 e 4.8 são muito semelhantes aos resultados obtidos na Figura 4.6. Resumidamente, é possível detectar os materiais com diferentes configurações de uma forma separada, isto é, quando o teste é feito apenas a um MB. A componente Imaginária privilegia materiais condutores, enquanto a componente Real privilegia o meio ferromagnético.

De forma a resumir a informação deste sub-capítulo (MB com e sem material de adição) cruzaram-se os testes dos provetes P.2, P.1 e P.3 (Figura 4.9).



a)



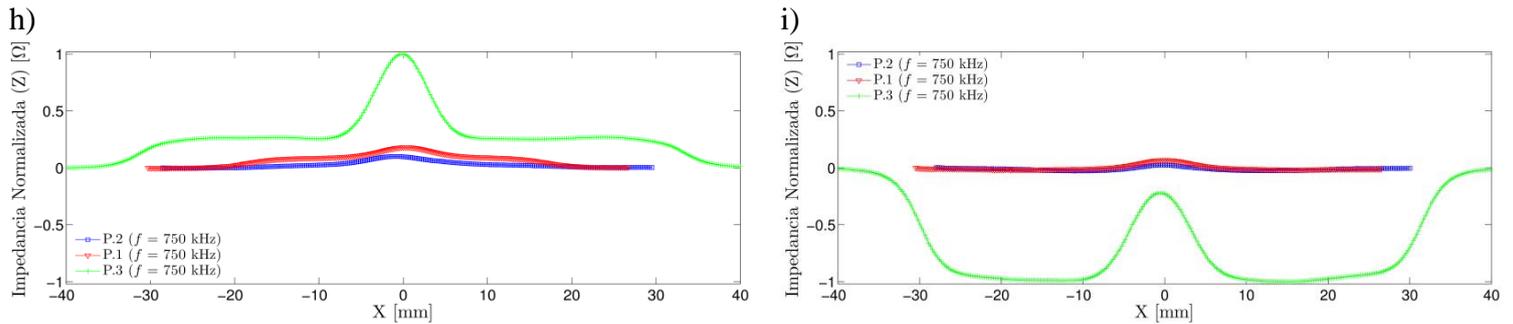


Figura 4.9 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para os provetes de varão de aço, arame de NiTi e fita de NiTi, todos com liga de brasagem. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária

Neste teste comparou-se entre os três MB com liga de brasagem, o comportamento da impedância eléctrica de cada MB. Como seria de esperar o valor da impedância eléctrica para a componente Real e Imaginária é muito superior no varão de aço. A impedância eléctrica do NiTi em ambas as formas é praticamente nula, se comparar ao varão de aço. De salientar que sendo mesmo pouco expressiva a impedância do NiTi, é visível a distinção entre a impedância eléctrica da fita de NiTi ou do arame de NiTi.

#### 4.4.2. Provetes brasados

Nas duas figuras apresentam-se os ensaios não destrutivos aos provetes P.4, P.5, P.13, P.6, P.7 e P.14. Os três primeiros provetes foram a ligação entre varão de aço a arame de NiTi. Os três últimos referem-se à ligação entre o varão aço e a fita de NiTi. Para entender melhor o resultado da união da liga de brasagem, conceberam-se 2 provetes, P.13 e P.14, em que em vez de estarem soldados com liga de brasagem estão ligados por super cola. O objectivo é perceber se dois materiais base diferentes eram passíveis de serem detectados pela sonda quando sobrepostos, e principalmente entender o que mudaria na impedância ao adicionar a liga de brasagem.

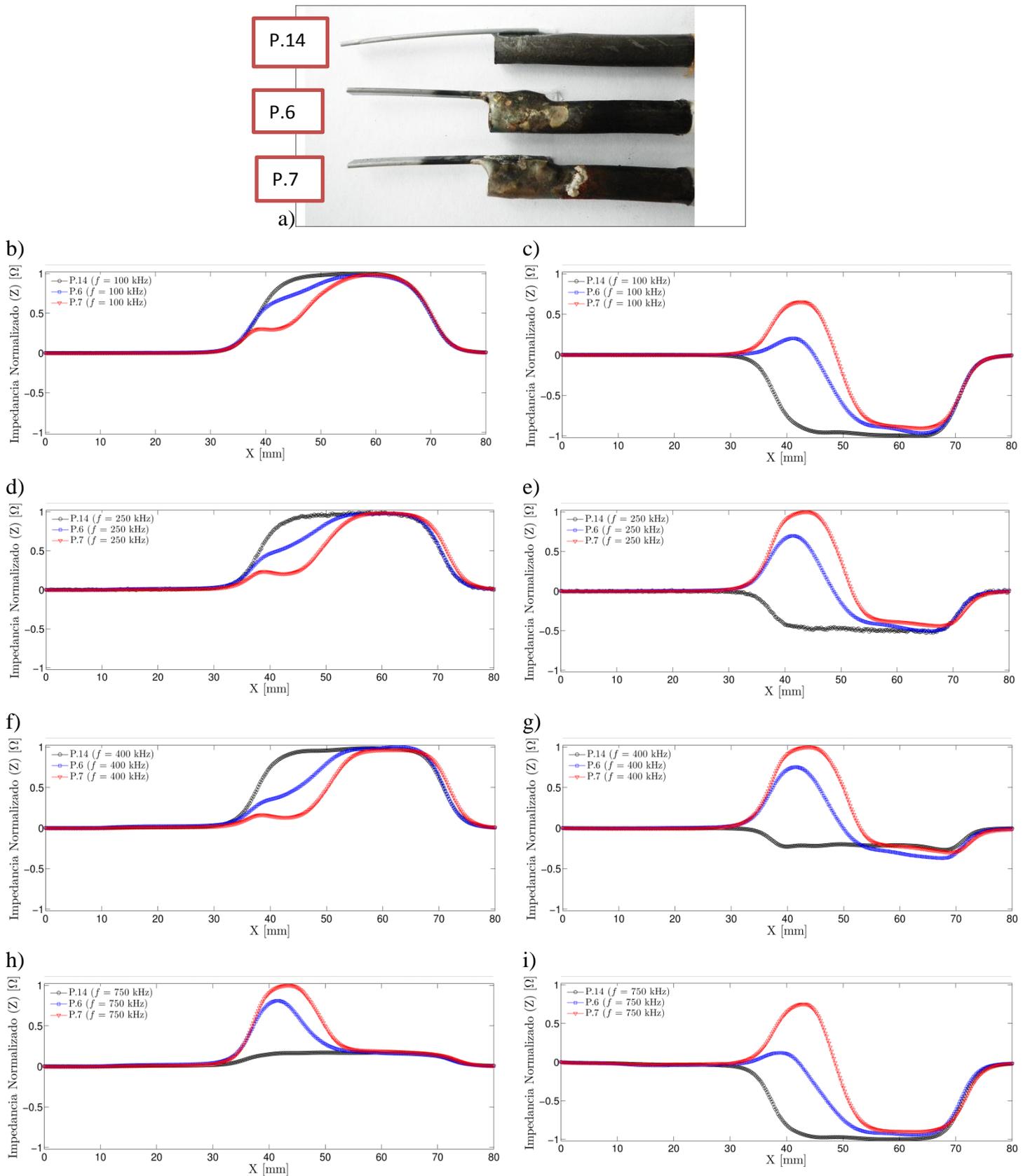


Figura 4.10 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para os provetes P.6, P.7 e P.14. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária

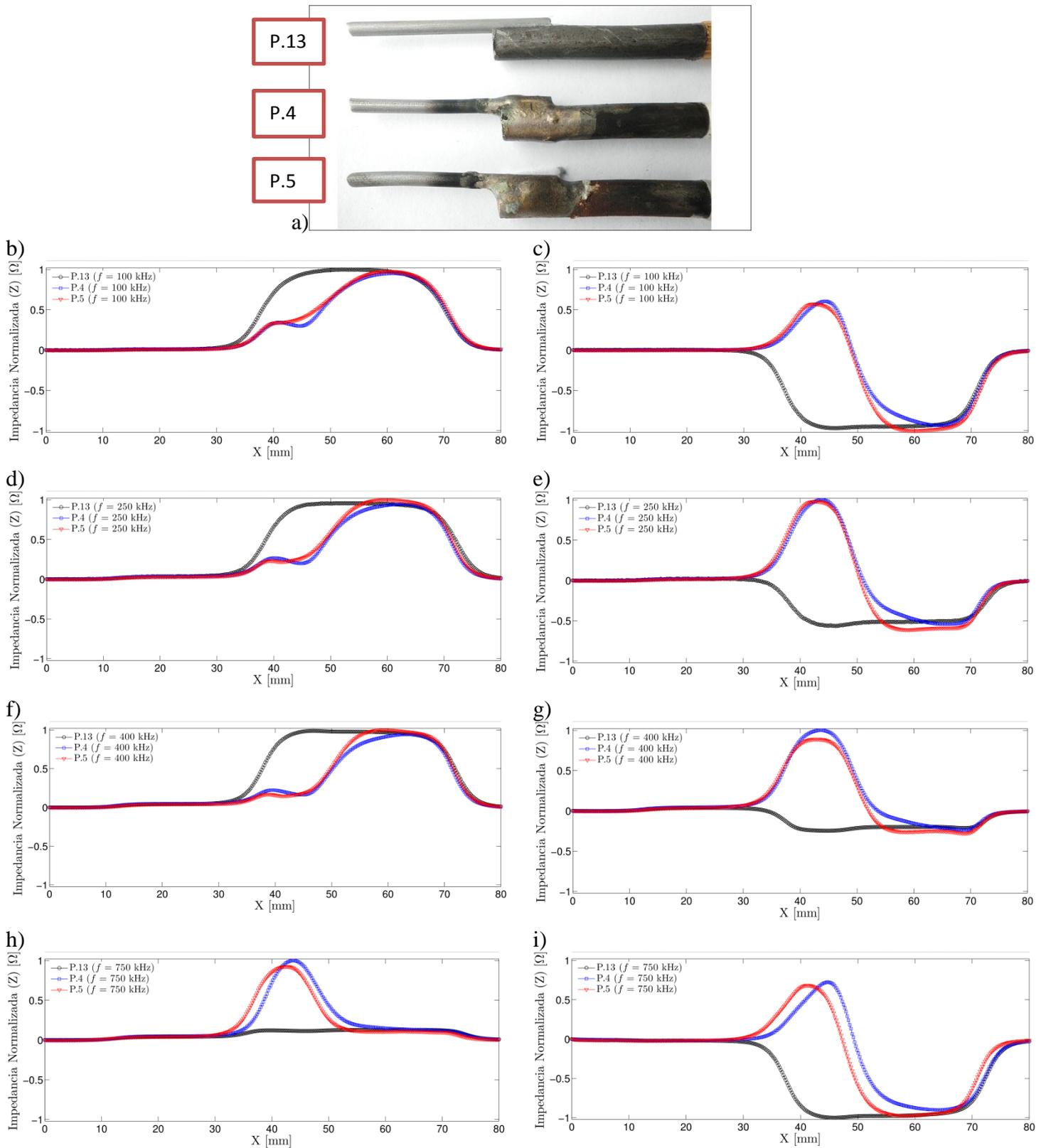


Figura 4.11 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para os provetes P.4, P.5 e P.13. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária

A sonda nestes ensaios, com parâmetros operatórios otimizados, permite detectar e localizar a liga de brasagem, bem como localizar nos provetes a zona de maior concentração de liga. Apesar de se ter tentado recriar as mesmas condições de soldadura para os mesmos provetes, observou-se uma diferença na impedância eléctrica entre o P.6 e P.7 (Figura 4.10). Na Figura 4.10, e em particular para a coluna dos ensaios da componente Imaginária, o valor da impedância eléctrica é sempre maior no P.7 do que no P.6. Esta diferença poderá ser explicada pela maior deposição de liga de brasagem no P.7 do que no P.6. liga de brasagem que contém prata que é um elemento condutor. Por outro lado, na coluna dos ensaios da componente Real, o P.6 tem um valor de impedância maior do que o P.6. Conclui-se que o P.6 neste caso em concreto e neste local do provete (local da ligação da liga com os dois materiais de base) tem um valor de impedância maior, por ter menos material condutor. Esta menor deposição do material condutor (liga de brasagem) à volta do material magnético (varão de aço) faz com que o valor da impedância eléctrica da componente Real seja superior no P.6. Mais tarde, quando foram efectuadas as fotomicrografias observou-se uma maior folga entre a fita de NiTi e o varão de aço no P.7.

Na Figura 4.11, observa-se que para os dois provetes soldados, a quantidade de liga brasagem é idêntica nos dois provetes. Porém é notório, nomeadamente na componente Imaginária deste ensaio, que a localização da zona brasada não é a mesma. Isto é, o local onde está a maior concentração de soldadura nos dois provetes está desfasado entre estes dois provetes por mm (Figura 4.11 – i)). Neste ensaio localizou-se o local de brasagem.

Conclui-se também que as melhores frequências de inspecção são entre a gama de 250 e 400 kHz.

Finalmente a sonda conseguiu captar os diferentes materiais base mesmo quando estes são do mesmo material mas com variação de geometria. Apesar da área da secção ser menor na fita de NiTi do que no arame de NiTi, é notória a diferença de impedância quando se cruzam os resultados, como está expresso na Figura 4.12. A linha azul, da mesma figura, representa a impedância eléctrica do P.4. Em todas as frequências testadas a impedância eléctrica do provete de NiTi na forma de varão é maior do que na forma de fita (P.6).

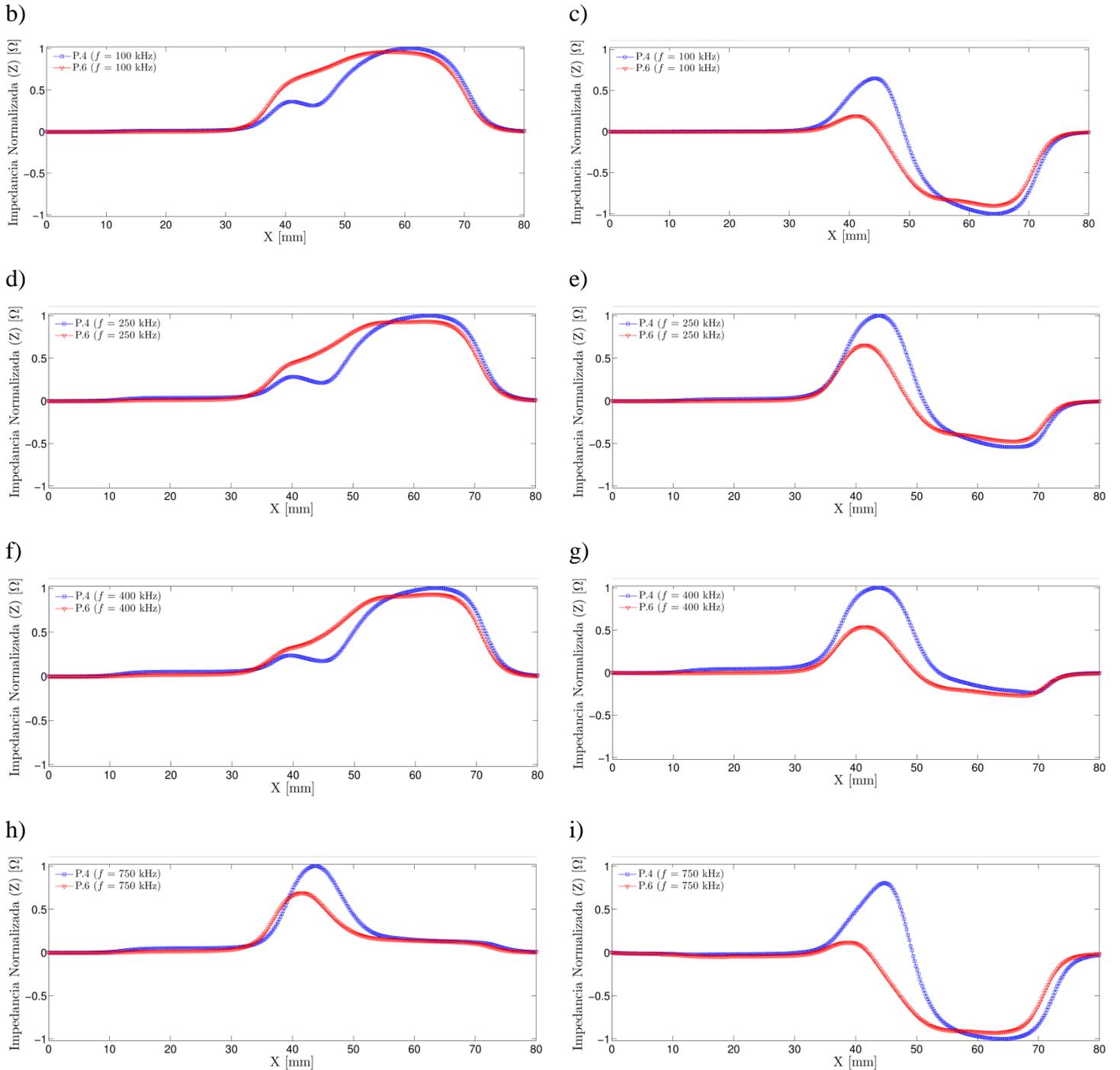
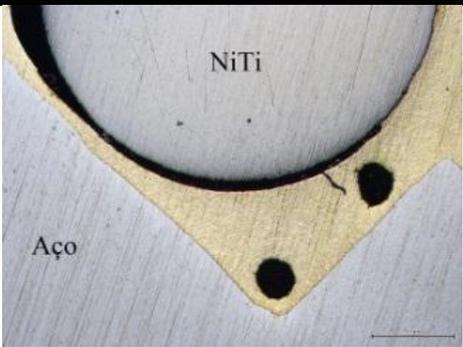
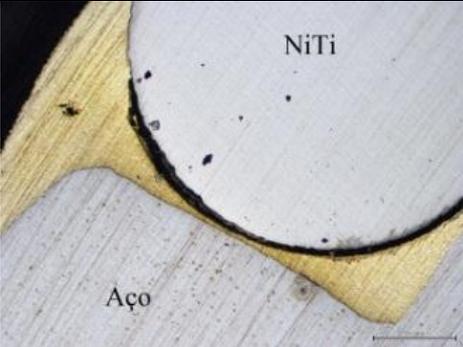


Figura 4.12 – Variação da impedância eléctrica com a distância inspeccionada, para os provetes P.4 e P.6. À esquerda estão os ensaios da componente Real e à direita da componente Imaginária, a) Macrografia dos P.11 e P.12

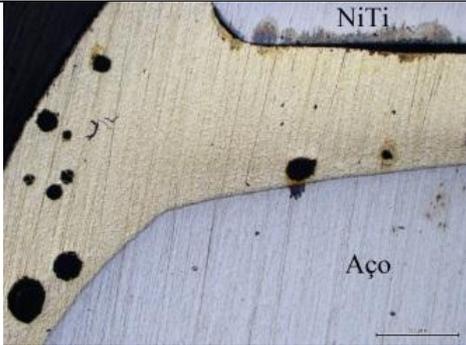
#### 4.5. Fotomicrografias com liga de brasagem

Após a soldadura dos MB e o MA, foi visível a falta de ligação entre o NiTi e a liga de brasagem. Esta dificuldade foi ainda maior pela restrição que se impunha de não aquecer directamente o NiTi para evitar a oxidação alterando as suas características. Assim, realizaram-se fotomicrografias das ligações que se ilustram na Tabela 4.2

Tabela 4.2 - Fotomicrografias dos provetes com liga de brasagem a 20 % Ag

Provete	Perfil do provete	Fotomicrografia
P.4	Transversal	 Micrograph showing the interface between NiTi (top) and Aço (bottom) for specimen P.4. The NiTi is a light grey circular area, and the Aço is a darker grey area. There is a distinct gap between them, and several dark, circular spots are visible in the Aço region.
P.5	Transversal	 Micrograph showing the interface between NiTi (top) and Aço (bottom) for specimen P.5. The NiTi is a light grey circular area, and the Aço is a darker grey area. There is a distinct gap between them, and several dark, circular spots are visible in the Aço region.
P.6	Transversal	 Micrograph showing the interface between NiTi (top) and Aço (bottom) for specimen P.6. The NiTi is a light grey circular area, and the Aço is a darker grey area. There is a distinct gap between them, and several dark, circular spots are visible in the Aço region.

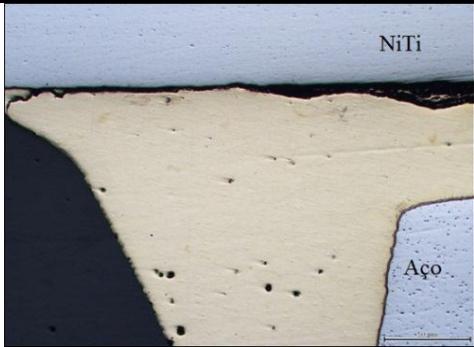
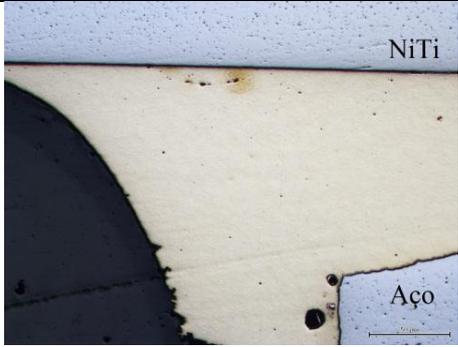
---

P.7	Transversal	
PVV_Long.	Longitudinal	
PVF_Long	Longitudinal	

---

Da análise destas macrografias é visível a falta de ligação entre o NiTi e a liga de brasagem ou mesmo falta de liga de brasagem, como por exemplo, no provete PVF\_Long da Tabela 4.2. Nas macrografias também se observam poros na liga de brasagem. Produziram-se dois provetes (Tabela 3.9) com o objectivo de verificar se a origem das porosidades estava na viscosidade da liga de brasagem.

Tabela 4.3 - Fotomicrografias dos provetes com liga de brasagem a 50 % Ag

Provete	Perfil	Fotomicrografia
PVV_Long	Longitudinal	
PVF_Long	Longitudinal	

O número de poros foi reduzido significativamente com o aumento da percentagem de Ag, e conseqüentemente com o aumento da viscosidade da liga. Porém, a falta de ligação entre o NiTi e a liga de brasagem persiste.

#### 4.6. Síntese do capítulo

Neste capítulo apresentaram-se os resultados dos ensaios não destrutivos, possibilidades e limitações. Com esta técnica foi possível detectar os materiais de base e a liga de brasagem, bem como a sua localização.

Concluiu-se que a componente Real detecta o meio magnético enquanto o meio condutor é detectado pela componente Imaginária. A gama de frequência ideal para estes ensaios situava-se entre os 250 e 400 kHz.

Por último, observou-se pelas fotomicrografias que não houve ligação entre a liga de brasagem e o NiTi.

## **5. Conclusões dos resultados e desenvolvimentos futuros**

### **5.1. Conclusões**

Do trabalho realizado foi possível concluir o seguinte:

i. Soldadura

Não é fácil promover uma ligação do NiTi ao aço. Dada a baixa entrega térmica do processo não há uma ligação da liga de brasagem para o NiTi, fazendo com que esta ligação tenha resistências mecânicas baixas quando traccionada, ou haja mesmo uma separação mecânica entre os dois materiais de base.

Tratando-se de um processo manual verificou-se que o suporte de soldadura concebido foi eficiente para diminuir a folga entre materiais e promover a molhabilidade destes.

A liga de brasagem com 20 % Ag tem melhor molhabilidade do que a liga com 50 % de Ag, conduzindo a melhores ligações.

ii. END

Os moldes das bobinas revelaram-se um método eficaz e rápido de construção de bobinas. Os suportes em acrílico para fixação das bobinas e dos provetes revelaram-se

eficientes, não interferindo com os ensaios, mais propriamente, influenciando a impedância eléctrica.

A mesa X-Y é adequada em termos de precisão, manuseamento e velocidade de inspecção. Cada ensaio, mesmo a baixa frequência (50 kHz) e para os provetes mais longos (60 mm), não demorou mais do 1 minuto. O *software* utilizado, Labview®, permite controlar o ensaio e apresentaras informações relevantes.

Esta metodologia fornece uma ampla gama de informações sobre as juntas soldadas, nomeadamente: distinguir os materiais de base (ferromagnéticos e não ferromagnéticos), avaliar a área de secção transversal sob inspecção, a condutividade eléctrica e a localização precisa de uma variação local correspondente à liga de brasagem.

É possível através das características da componente Real e Imaginária da impedância eléctrica da bobina distinguir materiais distintos. Mesmo materiais com diferentes propriedades electromagnéticas.

Testaram-se diferentes frequências e mostrou-se que não há variação qualitativa do sinal, apenas varia a intensidade do sinal que está relacionado com a profundidade de penetração.

A técnica utilizada demonstrou ser eficaz e expedita na localização da soldadura.

## **5.2. Desenvolvimentos futuros**

No que diz respeito à soldadura, é possível melhorar o suporte da soldadura, desenvolvendo um sistema que faça pressão entre os dois materiais a ligar. Por outro lado, poderá utilizar-se outra técnica de ligação onde exista um maior controlo, como o TIG com adição de material.

Nos ensaios não destrutivos, existem soluções que poderão ser viáveis, nomeadamente: i) Construção das bobinas (outro formato de bobina, que consiga uniformizar a espessura da bobina, promovendo uma maior distribuição do fio de esmalte), ii) Diminuir o *lift-off* ao máximo (utilizando processos de ligação ou de fusão

com maior controlo no acabamento da mesma), iii) Explorar as frequências entre os 250 e os 400 kHz, iv) Utilização de Sonda de corrente induzida com modo de funcionamento diferencial. No modo de funcionamento diferencial compara-se a variação de impedância de duas bobinas, estando uma delas colocada num padrão, ou junto à primeira mas com enrolamento em sentido oposto.



## 6. Referências Bibliográficas

- [1]. F. M. Braz Fernandes, “*Ligas com memória de forma*”, Departamento de Ciência dos Materiais / CENIMAT, Abril de 2006.
- [2]. George B. Kauffman, Isaac Mayo, “*The Story of Nitinol: The Serendipitous Discovery of the Memory Metal and Its Applications*”. New York, Vol .2, No. 2.
- [3]. K. Otsuka, X. Ren, “*Martensitic transformations in nonferrous memory shape alloys*”, Materials Science and Engineering A273–275 (1999) 89–105.
- [4]. W. Tang, B. Sundman, R. Sandström, C. Qiu. “*New modelling of the B2 phase and its associated martensitic transformation in the Ti-Ni system*”, Actamaterialia. Vol 47 (1999), 3457-3468.
- [5]. Han-Seong Kim, Joo-Suk Kim, Min-Gyun Kim, Kwon-Koo Choo, Tae-Hyun Nam, “*Supererlastic electrodes using Ti-Ni Shape memory alloys*”, Journal of power Sources, Vol. 178,1 April 2008, 758-764.
- [6]. K. Otsuka, X. Ren, “*Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys*”. Progress in Materials Science 50 (2005), 511–678.
- [7]. Lagoudas, Dimitris C.; Shape Memory Alloys: *Modeling and Engineering Applications*. USA: Springer, 2008

- [8]. Otsuka, K.; Wayman, C.M., “*Shape Memory Materials*”. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998
- [9]. T. Jarvis, W. Voice, R. Goodall, “*The bonding of Nickel foam to Ti-6Al-4V using Ti-Cu-Ni braze alloy*”, *Materials Science and Engineering A* 528 (2011) 2592-2601
- [10]. Casper van der Eijk, Zuhair K. Sallom and Odd M. Akselsen, “*Microwave brazing of NiTi shape memory alloy with Ag-Ti and Ag-Cu-Ti alloys*”, *Scripta Materialia* 58 (2008) 779–781
- [11]. T. Tadaki, K. Shimizu, “*Shape Memory Alloys*”, *Annu. Rev. Mater. Sci.* 1988
- [12]. J. F. O. Santos, L. Quintino, “*Processos de Soldadura*”. Lisboa, Portugal: Edições técnicas do Instituto de Soldadura e Qualidade 1998.
- [13]. D.M. Jacobson, G. Humpston, “*Principles of Brazing*”, Chapter 2, ASM International, Ohio, 2005.
- [14]. R. C. McMaster, “*Introduction to electromagnetic testing*”, In R. C. McMaster, P. McIntire, and M. L. Mester, editors, *Electromagnetic Testing*, volume 4 of *Nondestructive Testing Handbook*, pages 1-23. American Society for Nondestructive Testing, Columbus, OH, 2nd ed. 1986
- [15]. R. C. McMaste, S., S. Udpa.” *Basic concepts and theory of eddy current testing*”, In R. C. McMaster, P. McIntire, and M. L. Mester, editors, *Electromagnetic Testing*, volume 4 of *Nondestructive Testing Handbook*, pages 25 - 51. American Society for Nondestructive Testing, Columbus, OH, 2nd edition, 1986.
- [16]. Bernat Esteban, Jordi-Roger Riba , Grau Baquero & Cèèsar Ferrater, “*An eddy-current-based sensor for preventing knots in metallic wire drawing processes*”, *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 26, No. 2, June 2011, 169–180
- [17]. F. P. Almeida, J. Barata, P. Barros, “*Ensaaios não destrutivos*”. Lisboa, Portugal: Edições técnicas do Instituto de Soldadura e Qualidade 1992

- 
- [18]. M. Talvard, “*NDT Techniques EC*”, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 2011, Pages 6011-6015
- [19]. Luis S. Rosado, Telmo G. Santos, Moisés Piedade , Pedro M. Ramos, Pedro Vilaça, “*Advanced technique for non-destructive testing of friction stir welding of metals*”, Measurement 43 (2010) 1021–1030
- [20]. B. Helifa , A. Oulhadj , A. Benbelghit , I.K. Lefkaier a F. Boubenider , D. Boutassouna, ”*Detection and measurement of surface cracks in ferromagnetic materials using eddy current testing*”, NDT&E International 39 (2006) 384–390
- [21]. D.E. Bray and RK.Stanley; "*Nondestructive Evaluation: A Tool for Design, Manufacturing and SeMces.*" McGraw-Hill Book Company, Toronto, 1989
- [22]. D. D. Mackintosh, D. L. Atherton, and S. P. Sullivan.” *Remote eddy current signal analysis in small-bore ferromagnetic tubes.*” Materials Evaluation, 51(4):492 - 495, 1993
- [23]. R. C. McMaster, P. McIntire, and M. L. Mester, editors, ” *Electromagnetic Testing, volume 4 of Nondestructive Testing Handbook.*”, American Society for Nondestructive Testing, Columbus, OH, 2nd edition, 1986
- [24]. Telmo Gomes dos Santos, Pedro M. Ramos, Pedro dos Santos Vilaça, “*Nondestructive testing of friction stir welding: Comparison of planar eddy current probes*” 16th IMEKO TC4 Symposium, Sept. 22-24, 2008, Florence, Italy
- [25]. M. J. Maulucci. Magnetic saturation techniques. In R. C. McMaster, P. McIntire, and M. L. Mester, editors, Electromagnetic Testing, volume 4 of Nondestructive Testing Handbook, pages 212 - 214. American Society for Nondestructive Testing, Columbus, OH, 2nd edition, 1986
- [26]. Pedro Vilaça and Telmo G. Santos, “*Non-Destructive Testing Techniques for Detecting Imperfections in Friction Stir Welds of Aluminium Alloys*”. Caparica Portugal
-

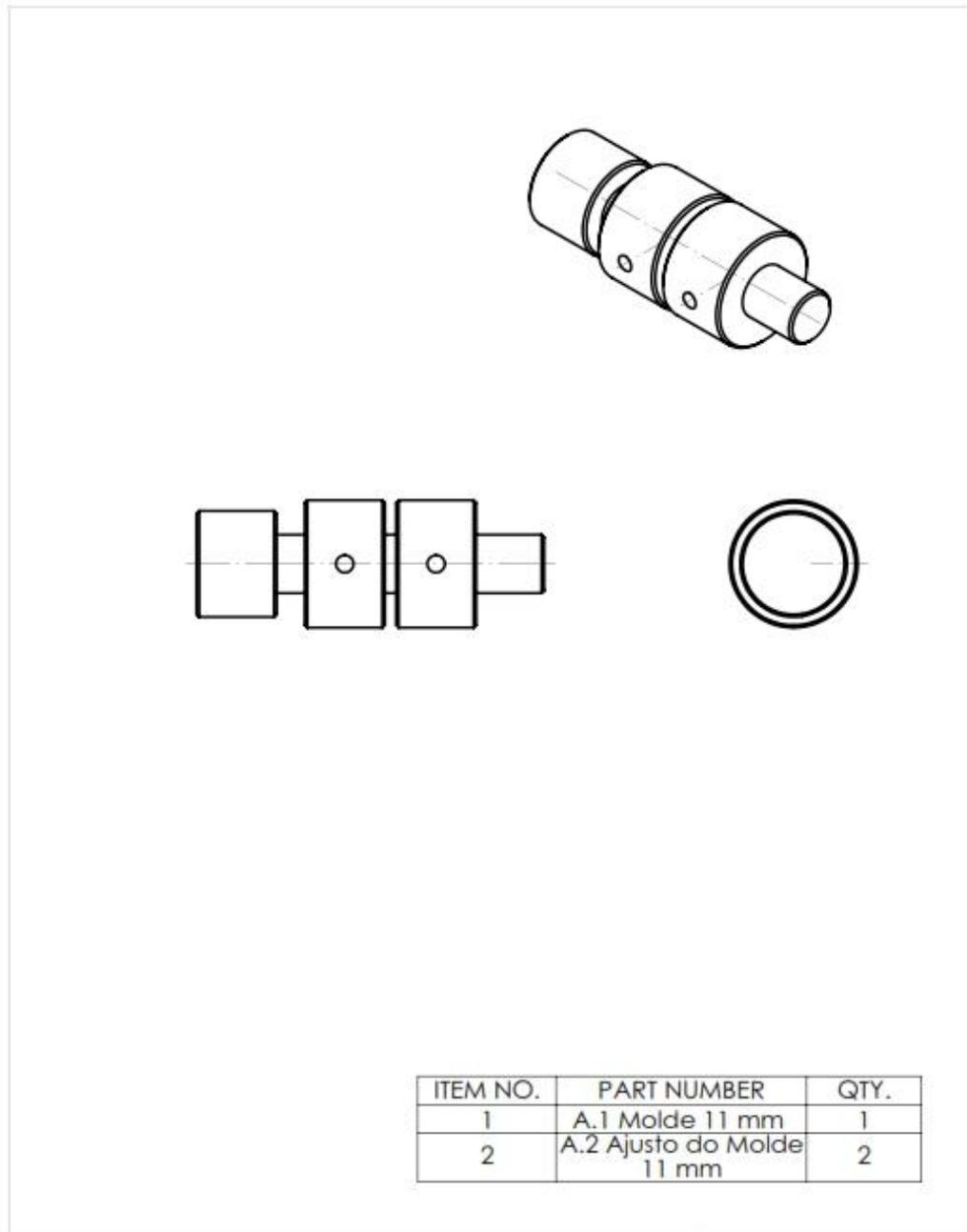
- [27]. Pedro M. Ramos, A. Cruz Serra, “A new sine-fitting algorithm accurate amplitude and fase measurements in two channel acquisition systems”, *Measurement*, Elsevier, Vol. 41, No. 2, pp 135-143, 2008
- [28]. L. V. Mendonça, ”*Termografia por Infravermelhos Inspeção de Betão*”, Publicado na revista *Engenharia & Vida*, nº 16, Setembro 2005, pp. 53-57
- [29]. L. M. A. Vieira, “*Soldadura laser de ligas com memória de forma*”, tese, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, 2010
- [30]. L. A. P. Semião; “*Utilização de SMAs no controlo de vibrações em Estruturas Inteligentes de Engenharia Civil*”, tese, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, 2010
- [31]. Faria J., ”*Aplicação de Ensaios Não Destrutivos por Correntes Induzidas à Caracterização de Propriedades Eléctricas de Materiais Processados no Estado Sólido*” tese, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica 2010
- [32]. <http://moodle.fct.unl.pt/course/view.php?id=2575>, Sítio Internet da *disciplina de Tecnologia Mecânica IV* acedido em Janeiro de 2012
- [33]. Santos T, “*Ensaios Não Destrutivos por Correntes Induzidas: Desenvolvimento e Aplicação à Soldadura por Fricção Linear*”, PhDthesis, IST, Julho de 2009
- [34]. Rosado L., “*Non-Destructive Testing Based on Eddy Currents Detector*”, tese, Instituto Superior Técnico, Lisboa 2009
- [35]. S. Udpa, L. Udpa, ”*Eddy Current Testing- Are we at the limits?*”, WorkShop, Department of Electrical and Computer Engineering, Michigan State University, East Lansing, MI USA
- [36]. Telmo Santos, Pedro Vilaça, Luísa Quintino, “*Sondas de Correntes de Eddy para END: Funcionalidade e Aplicação à SFL*”, *Workshop “Ensaios Não Destrutivos – Inovação e Qualidade”*, Lisboa, 03 de Abril de 2008.

- [37]. Bagnato O.R., Gabos C.B., Pardine C., “*Brasagem Metal/Metal e Metal/Cerâmica*”. Congresso de Aplicações de Vacuo na Ciência e na Industria, Julho 2006.
- [38]. FURUKAWA TECHNO MATERIAL CO. (2010, August) Shape memory alloys and super-elastic alloys Furukawa NT Alloys. [Online].
- [39]. Ryhanen, Jorma, *BIOCOMPATIBILITY EVALUATION OF NICKEL-TITANIUM SHAPE MEMORY METAL ALLOY*. OULU, OULUN YLIOPISTO, May 1999. [Online]
- [40]. [www.wikipédia.org](http://www.wikipédia.org) acessido em Janeiro de 2012
- [41]. [www.NDT-ed.org](http://www.NDT-ed.org) acessido em Janeiro de 2012

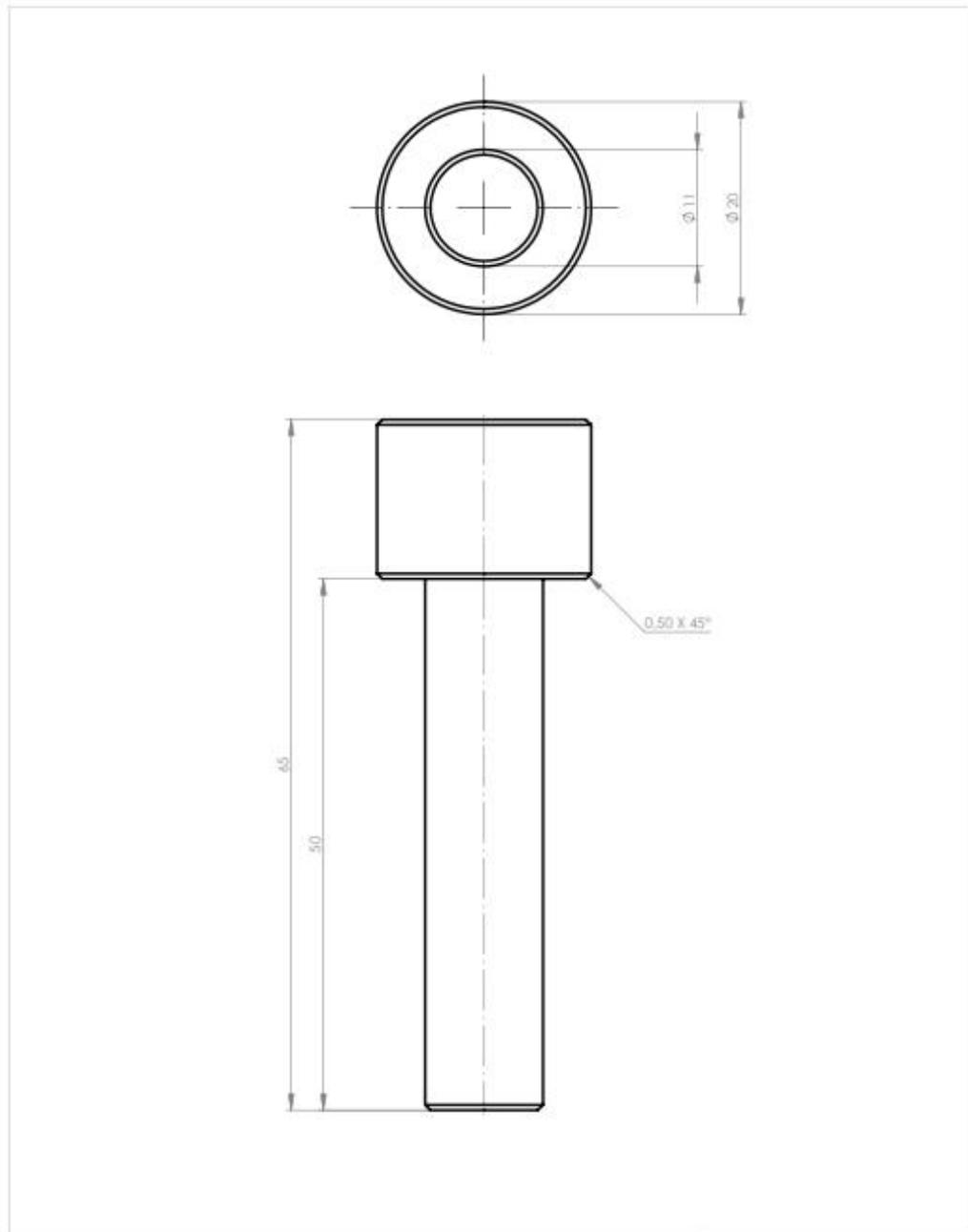


7. Anexos

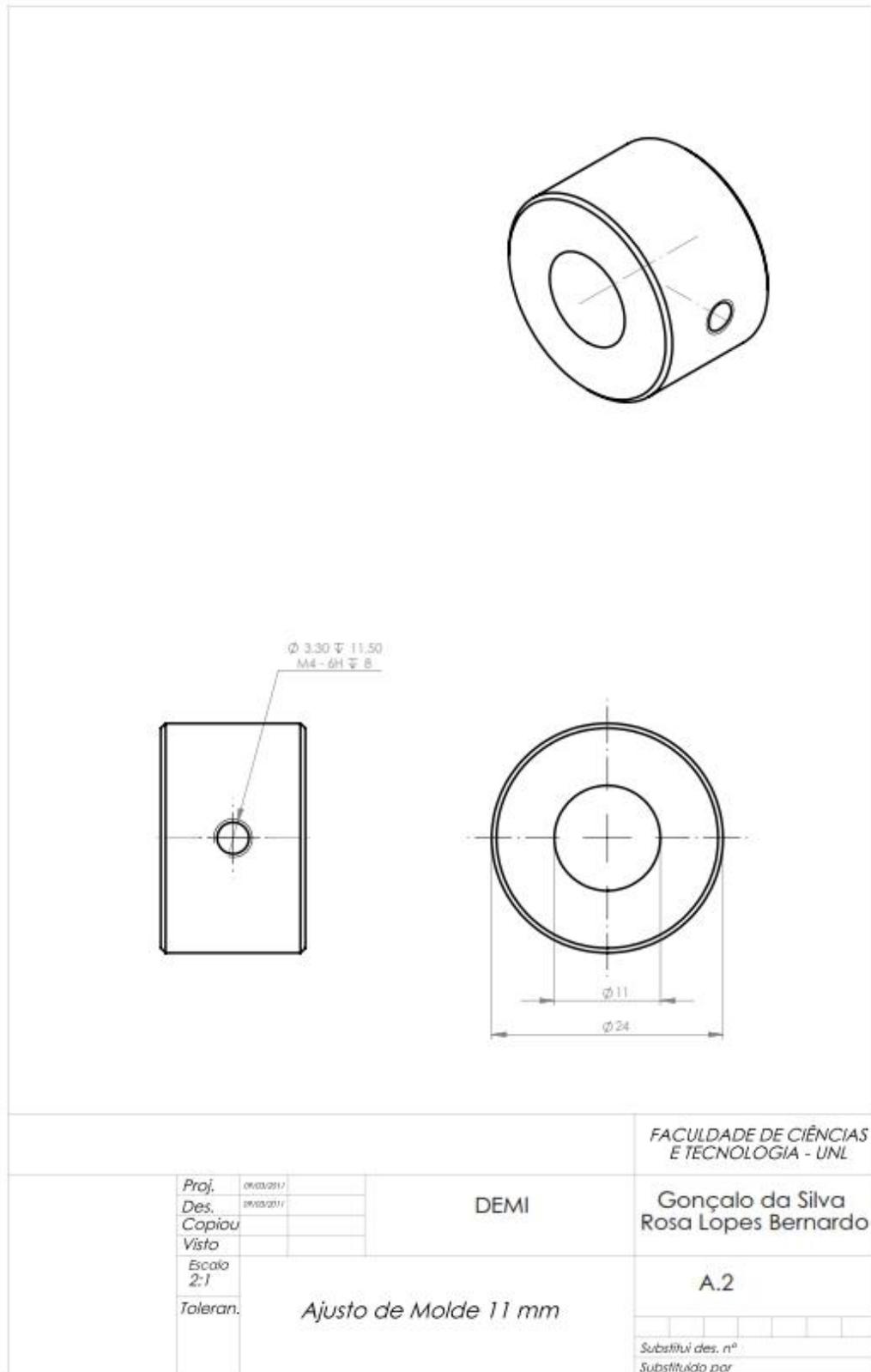
Conjunto A

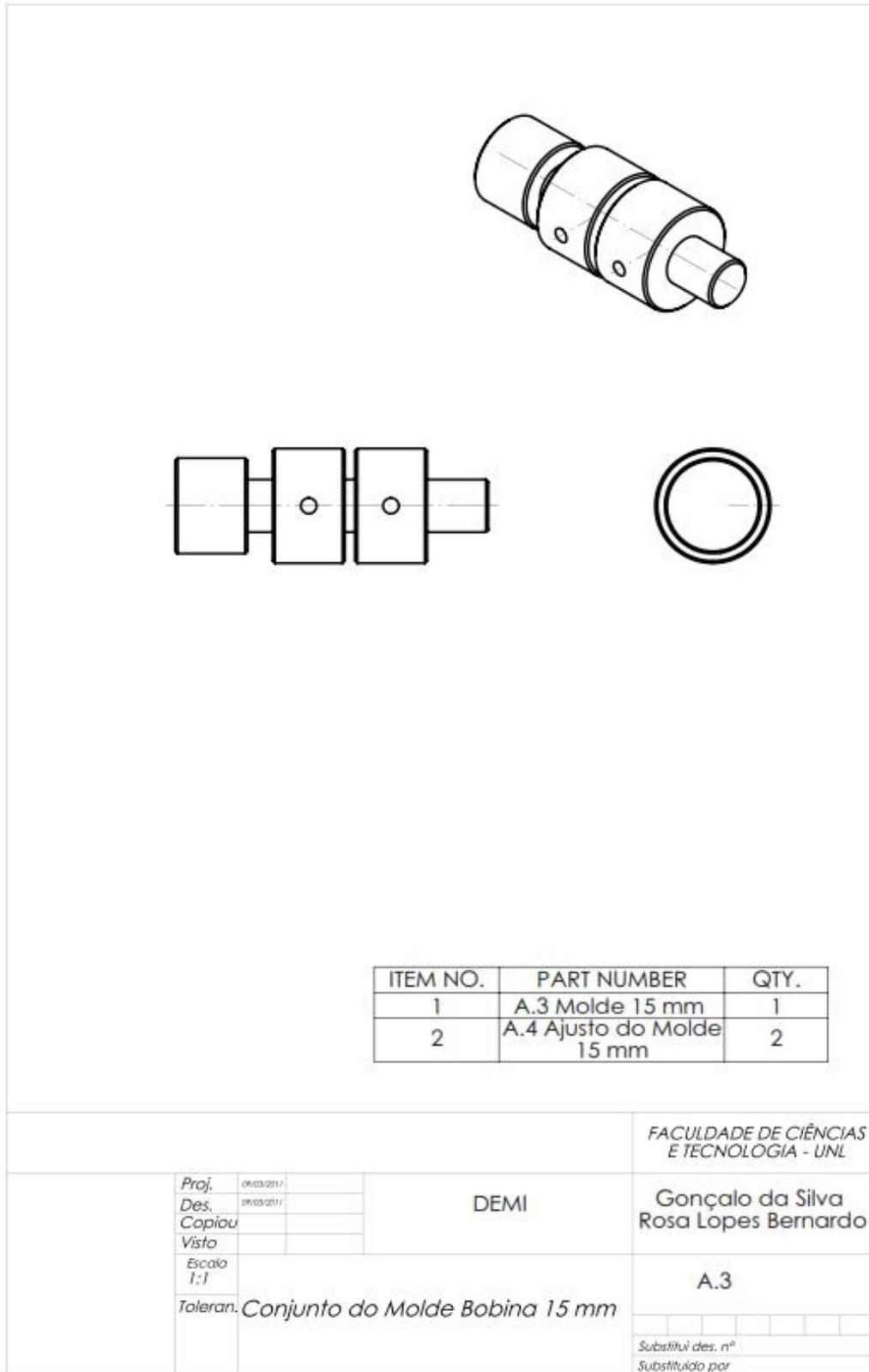


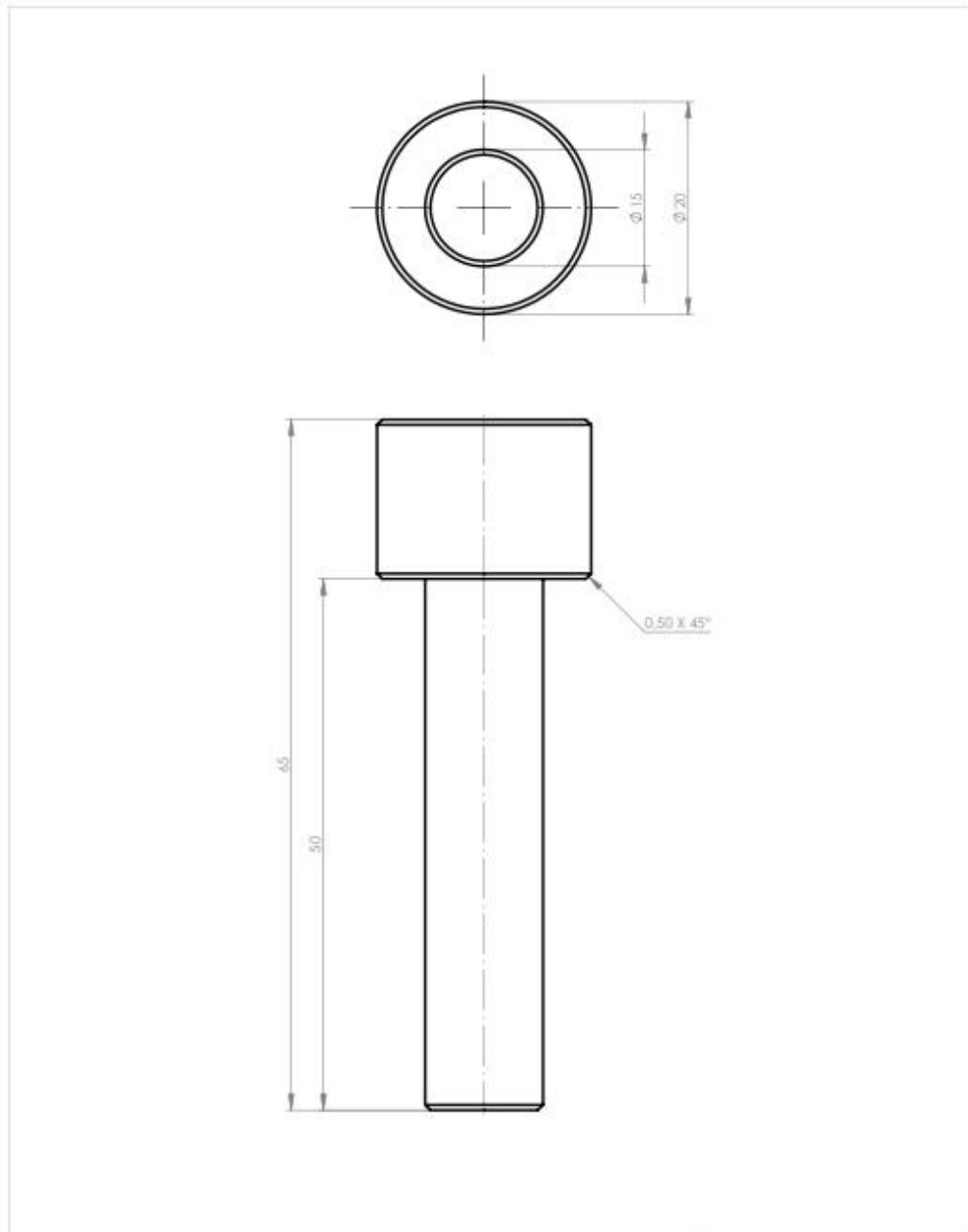
		<i>FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - UNL</i>	
<i>Proj.</i>	06/03/2017	DEMI	Gonçalo da Silva Rosa Lopes Bernardo
<i>Des.</i>	06/03/2017		
<i>Copiou</i>			
<i>Visto</i>			
<i>Escala</i>	1:1	A.0	
<i>Toleran.</i>	<i>Conjunto do Molde Bobina 11 mm</i>		
		<i>Substitui des. n°</i>	
		<i>Substituído por</i>	



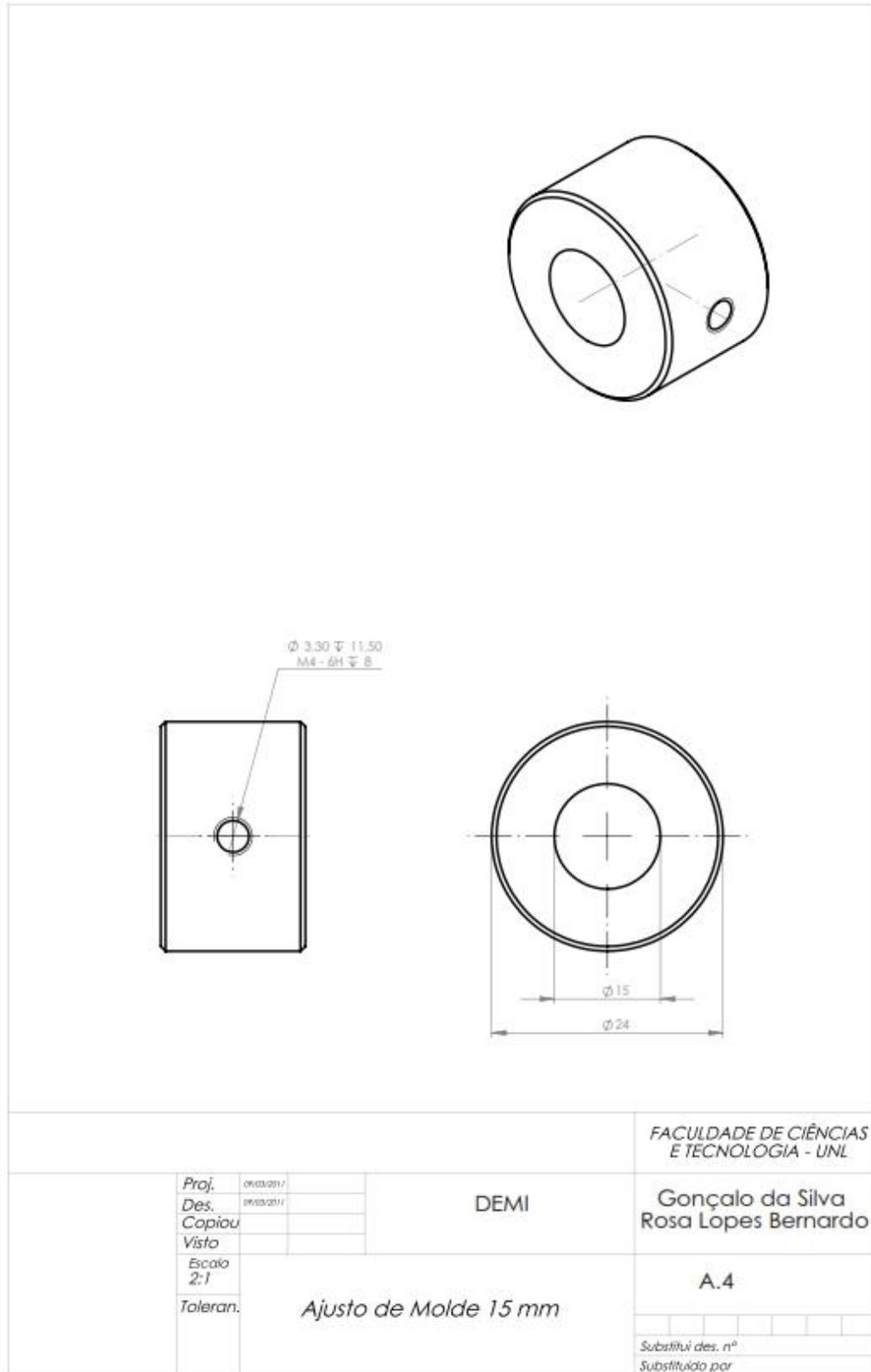
			<i>FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - UNL</i>	
<i>Proj.</i>	06/03/2017	<b>DEMI</b>	<b>Gonçalo da Silva Rosa Lopes Bernardo</b>	
<i>Des.</i>	06/03/2017			
<i>Copiou</i>				
<i>Visto</i>			<b>A.1</b>	
<i>Escala</i>	<b>2:1</b>	<b>Molde <math>\phi</math> 11 mm</b>		
<i>Toleran.</i>				
			<i>Substitui des. n°</i>	
			<i>Substituído por</i>	



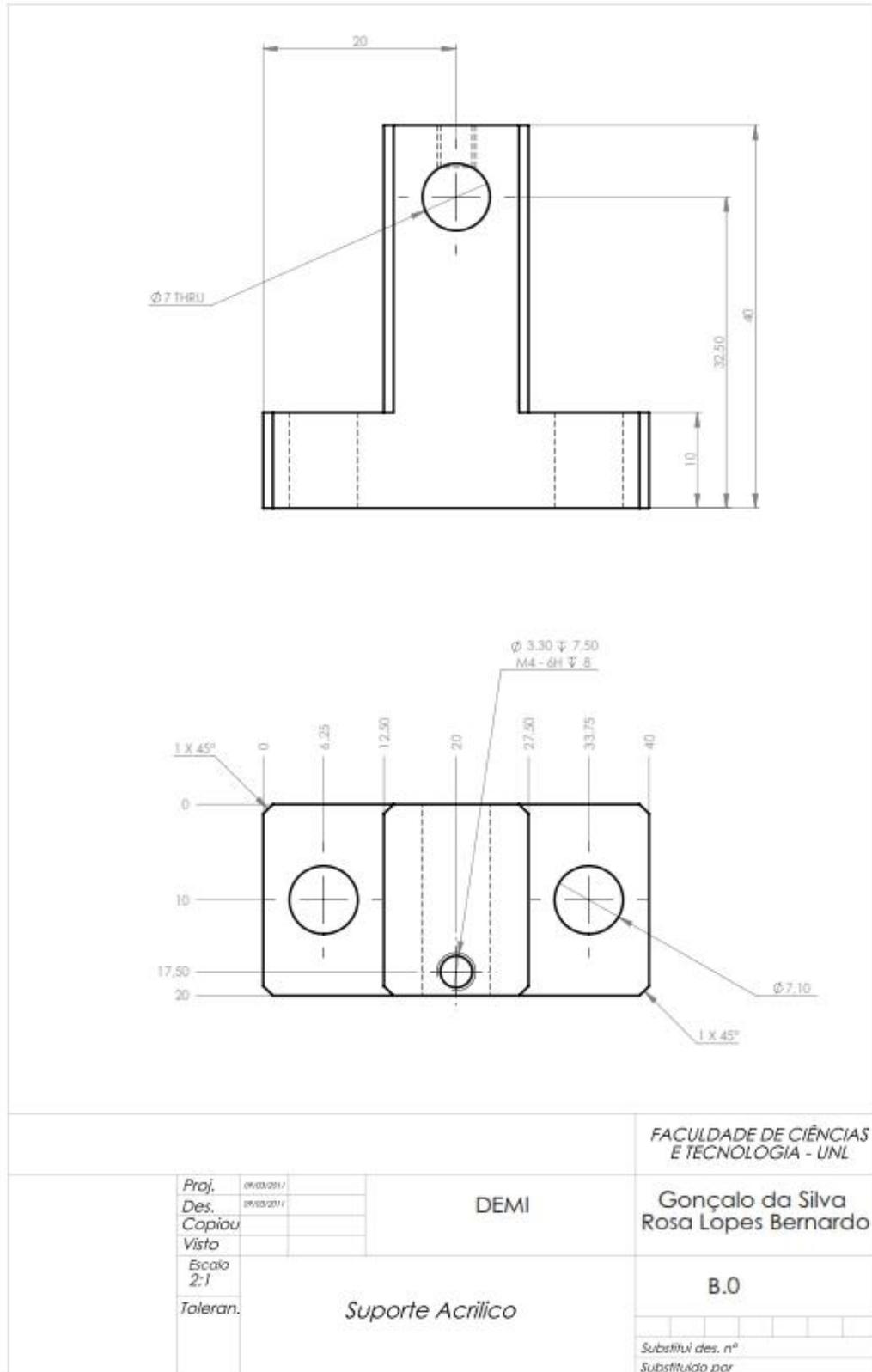




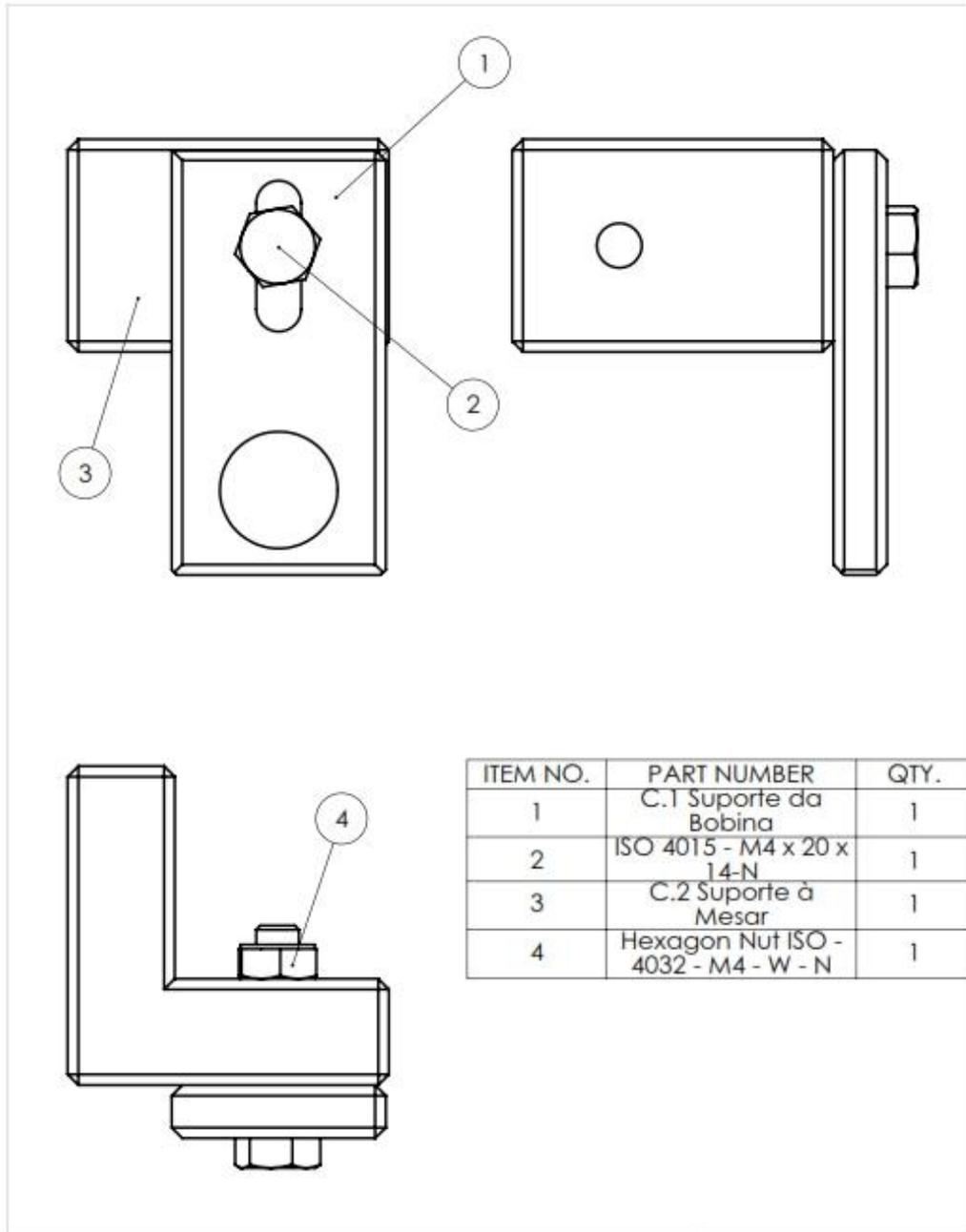
			FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - UNL	
<i>Proj.</i>	06/03/2017	DEMI	Gonçalo da Silva Rosa Lopes Bernardo	
<i>Des.</i>	06/03/2017			
<i>Copiou</i>				
<i>Visto</i>			A.3	
<i>Escala</i> 2:1				
<i>Toleran.</i>	Molde $\phi$ 15 mm			
			Substitui des. nº	
			Substituído por	



# Conjunto B

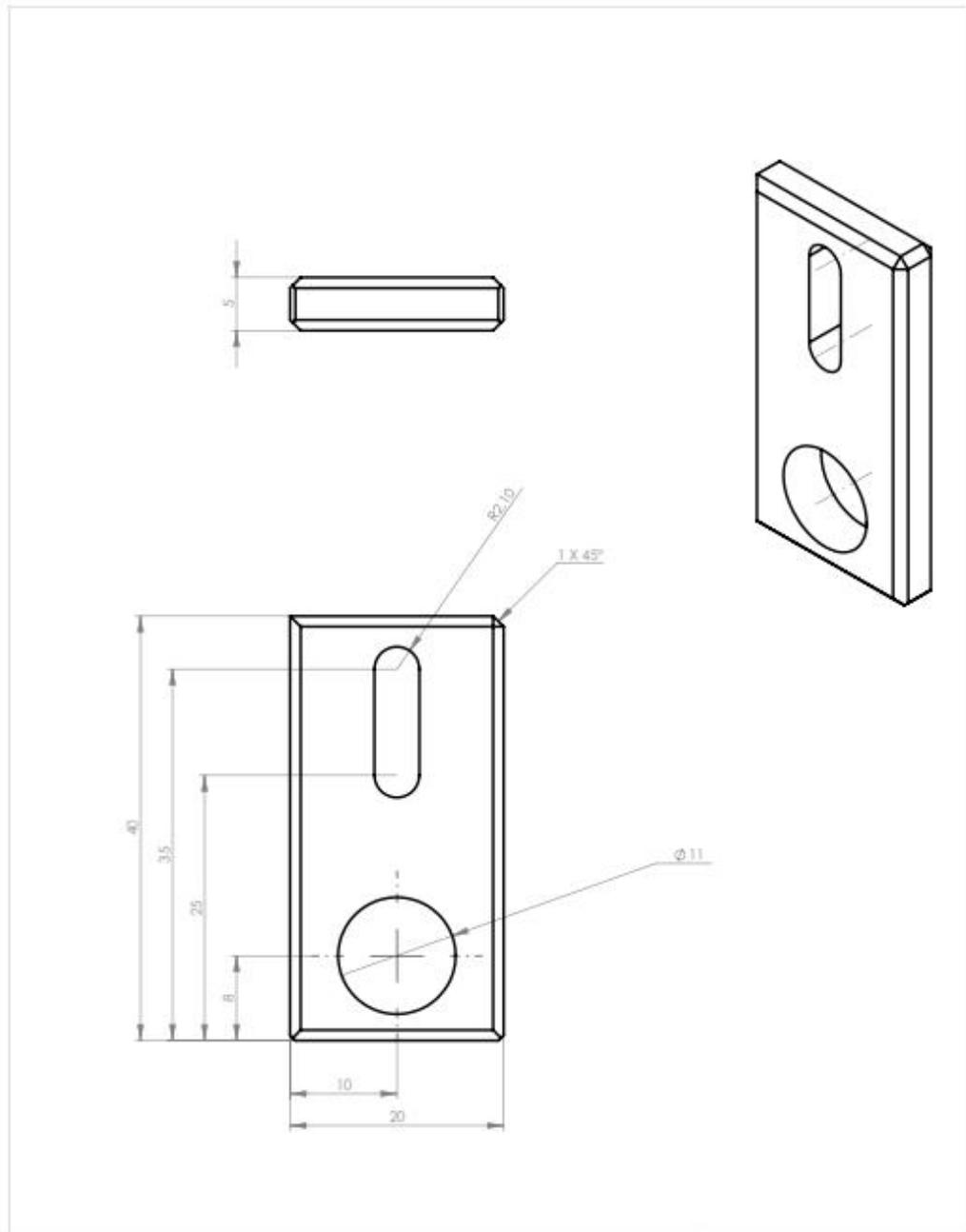


## Conjunto C

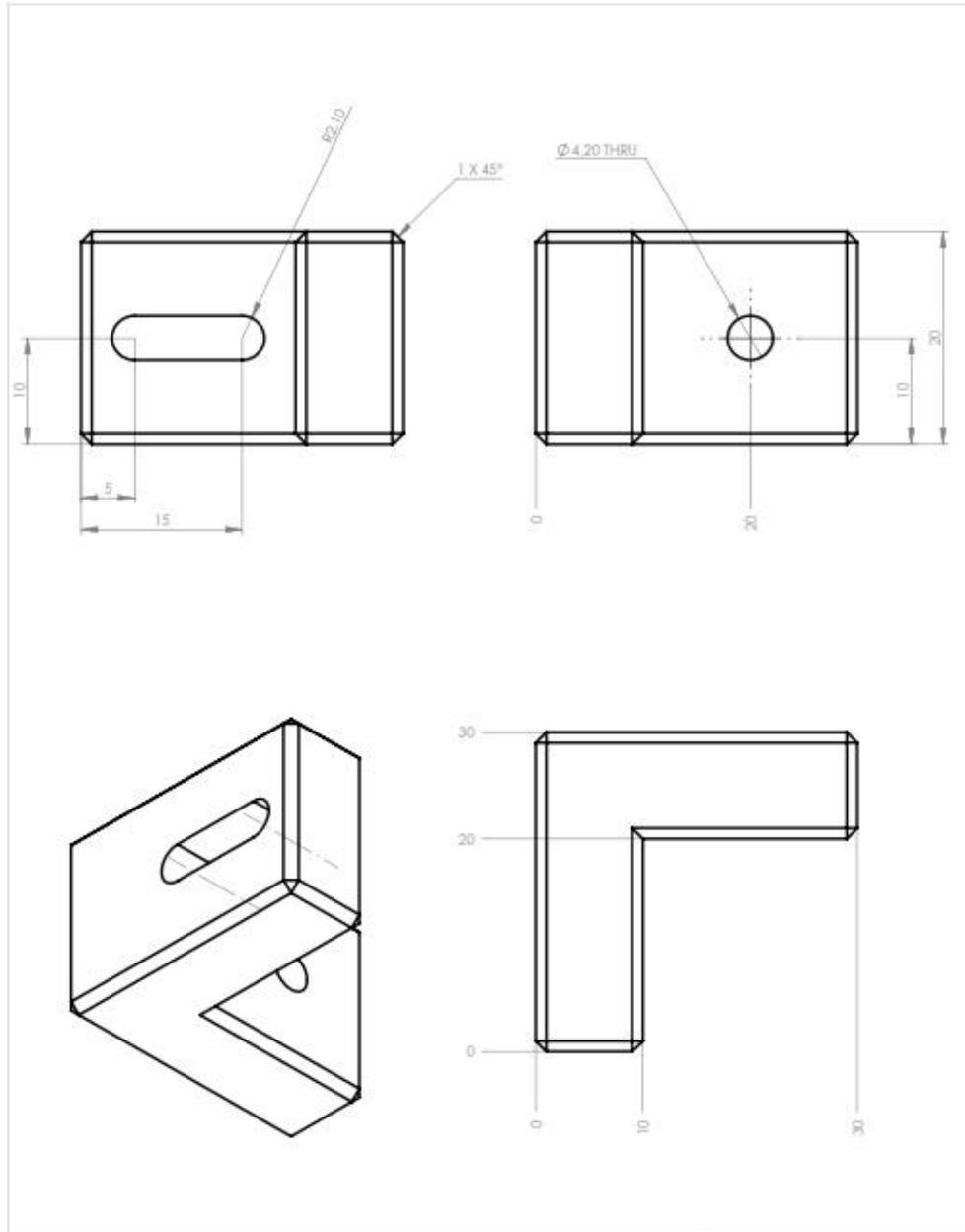


ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	C.1 Suporte da Bobina	1
2	ISO 4015 - M4 x 20 x 14-N	1
3	C.2 Suporte à Mesar	1
4	Hexagon Nut ISO - 4032 - M4 - W - N	1

		<i>FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - UNL</i>	
<i>Proj.</i>	06/03/2017	<b>DEMI</b>	<b>Gonçalo da Silva Rosa Lopes Bernardo</b>
<i>Des.</i>	06/03/2017		
<i>Copiou</i>			
<i>Visto</i>			
<i>Escala</i>	1:1	<b>C.0</b>	
<i>Toleran.</i>		<i>Montagem do Suporte Movel em Acrílico</i>	
		<i>Substitui des. nº</i>	
		<i>Substituido por</i>	



			FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - UNL		
	Proj.	06/03/2017	DEMI	Gonçalo da Silva Rosa Lopes Bernardo	
	Des.	06/03/2017			
	Copiou				
	Visto				
	Escala	2:1	C.1		
	Toleran.	<i>Suporte da Bobina</i>		Substitui des. nº	
			Substituído por		

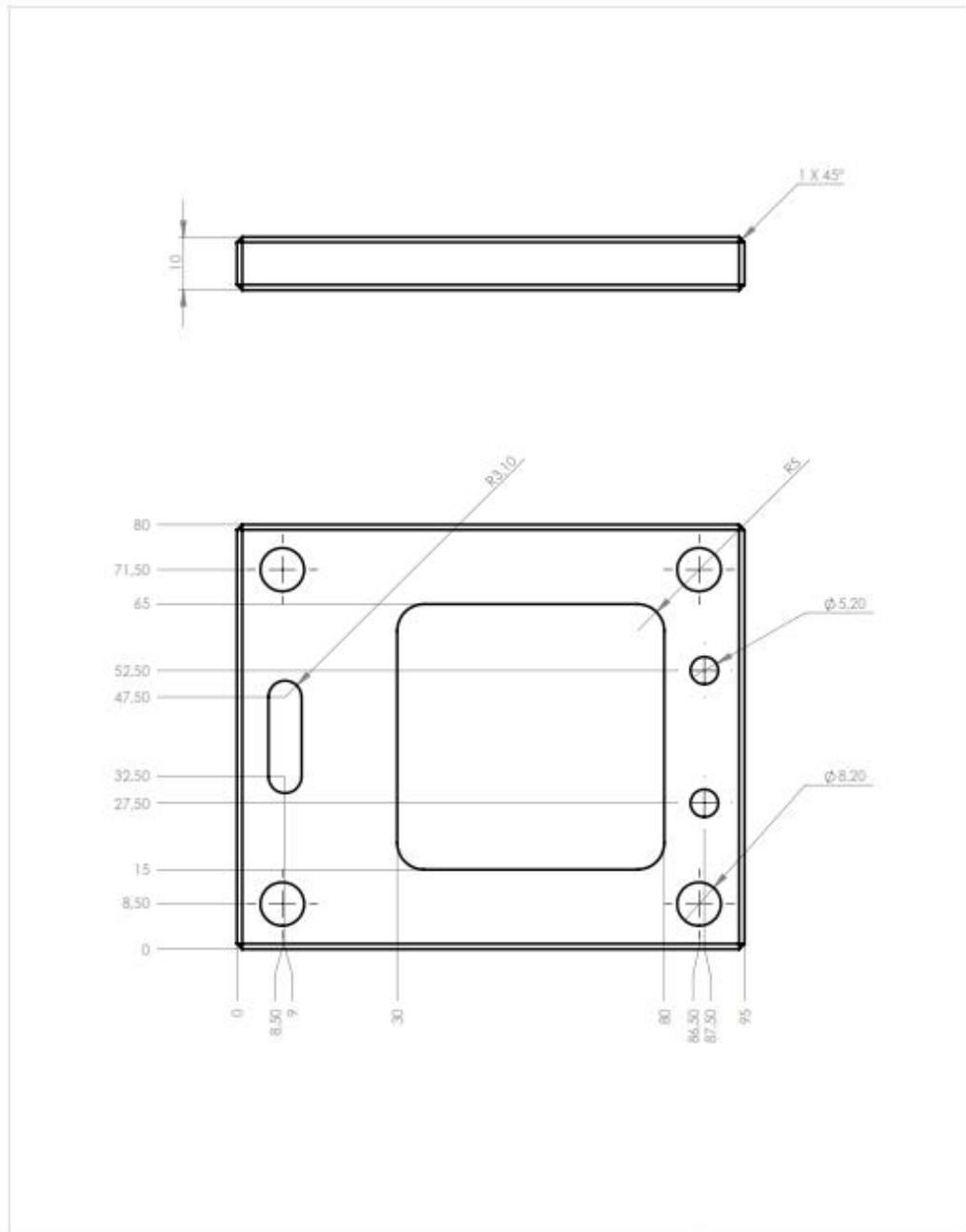


		<i>FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - UNL</i>	
<i>Proj.</i>	06/03/2017	DEMI	Gonçalo da Silva Rosa Lopes Bernardo
<i>Des.</i>	06/03/2017		
<i>Copiou</i>			
<i>Visto</i>			
<i>Escala</i>	2:1	<i>Suporte à Mesa</i>	C.2
<i>Toleran.</i>			
		<i>Substituí des. nº</i>	
		<i>Substituído por</i>	

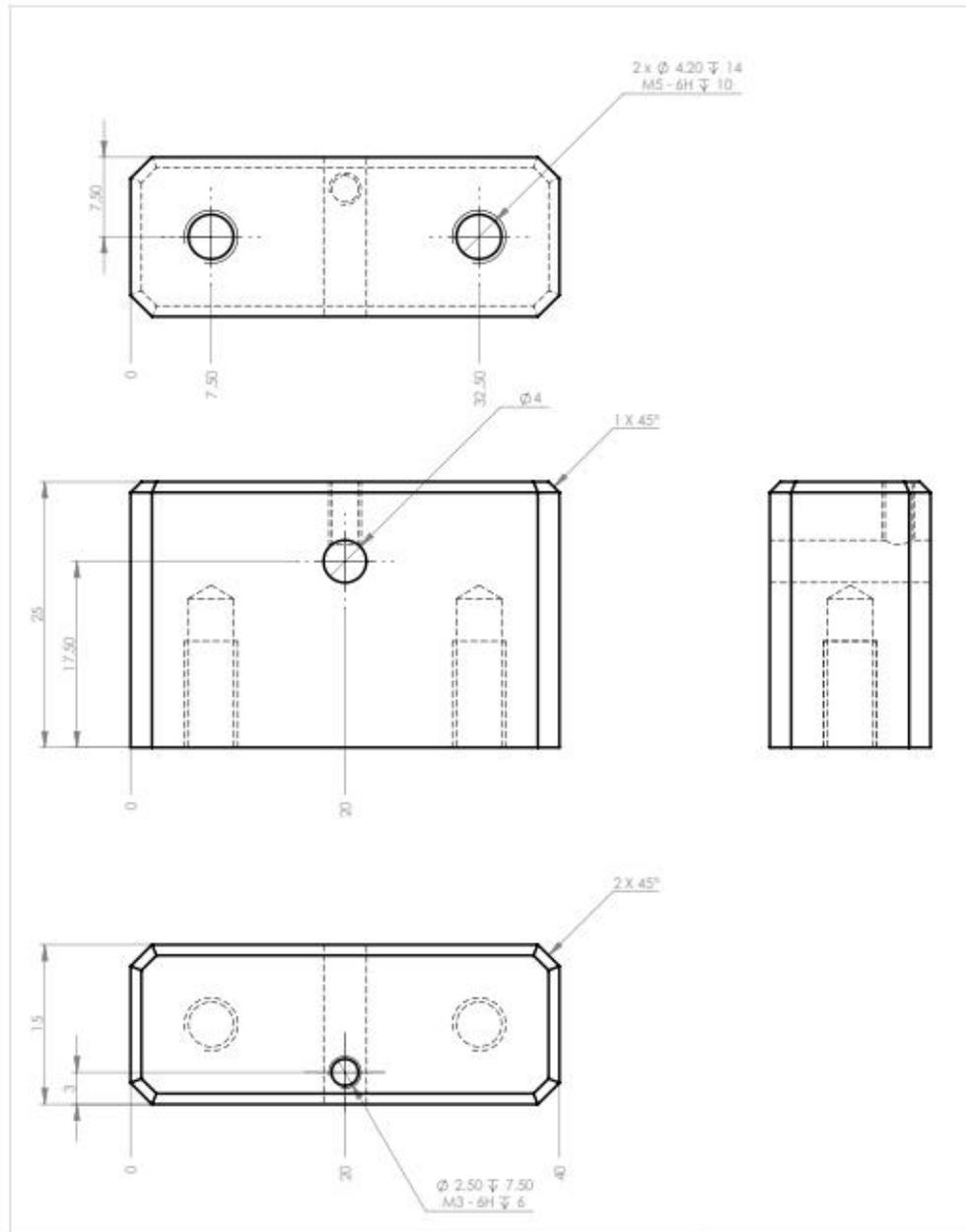
# Conjunto D

ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	D.1 Base Soldadura	1
2	D.2 Apoio Fixo	1
3	D.3 Apoio Movei	1
4	ISO 4016 - M6 x 30 x 18-WN	1
5	Hexagon Flange Nut ISO - 4161 - M6 - N	1
6	Hexagon Flange Nut ISO - 4161 - M8 - N	8
7	ISO 4017 - M5 x 20-N	2
8	ISO 4026 - M3 x 8-N	1
9	ISO 4026 - M5 x 10-N	1
10	D.4 Pés da Base	4
12	D.5 Batente	1

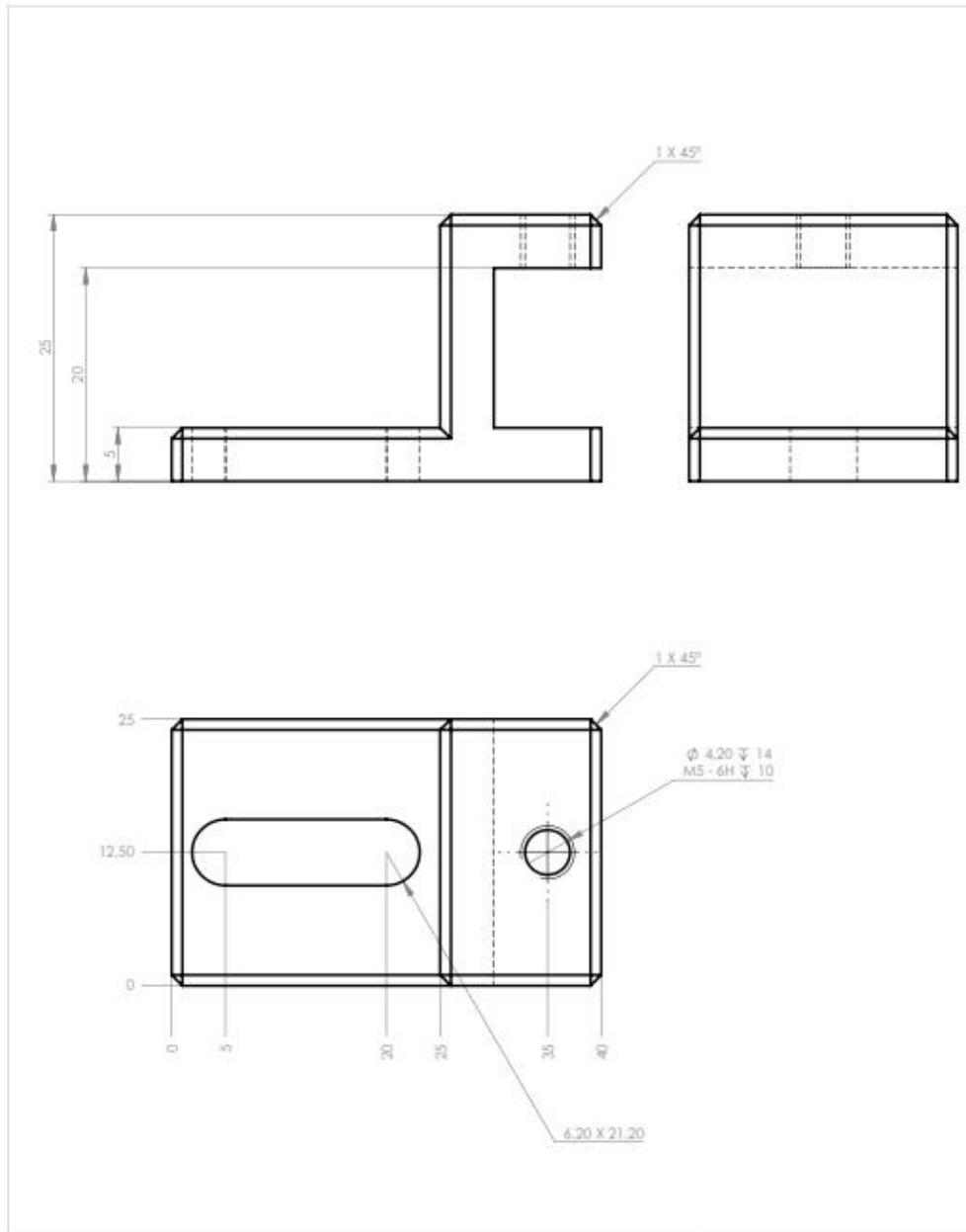
		FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - UNL	
Proj.	06/03/2017	DEMI	Gonçalo da Silva Rosa Lopes Bernardo
Des.	06/03/2017		
Copiou			
Visto			
Escala	1:1	D.0	
Toleran.	Conjunto Suporte de Soldadura		
		Substitui des. nº	
		Substituido por	



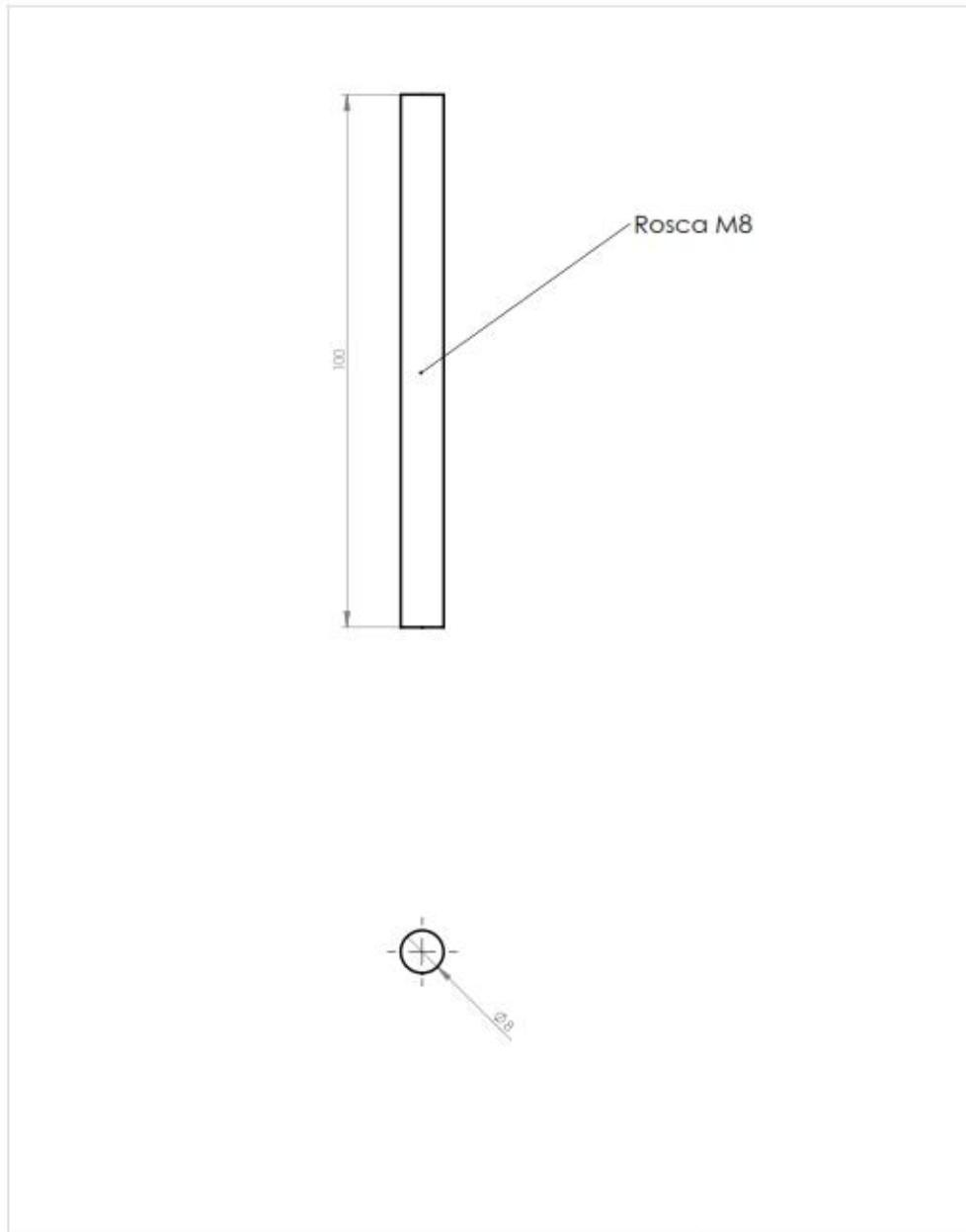
		FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - UNL	
Proj.	06/03/2017	DEMI	Gonçalo da Silva Rosa Lopes Bernardo
Des.	06/03/2017		
Copiou			
Visto			
Escala	1:1	D.1	
Toleran.		Base Soldadura	
		Substitui des. nº	
		Substituido por	



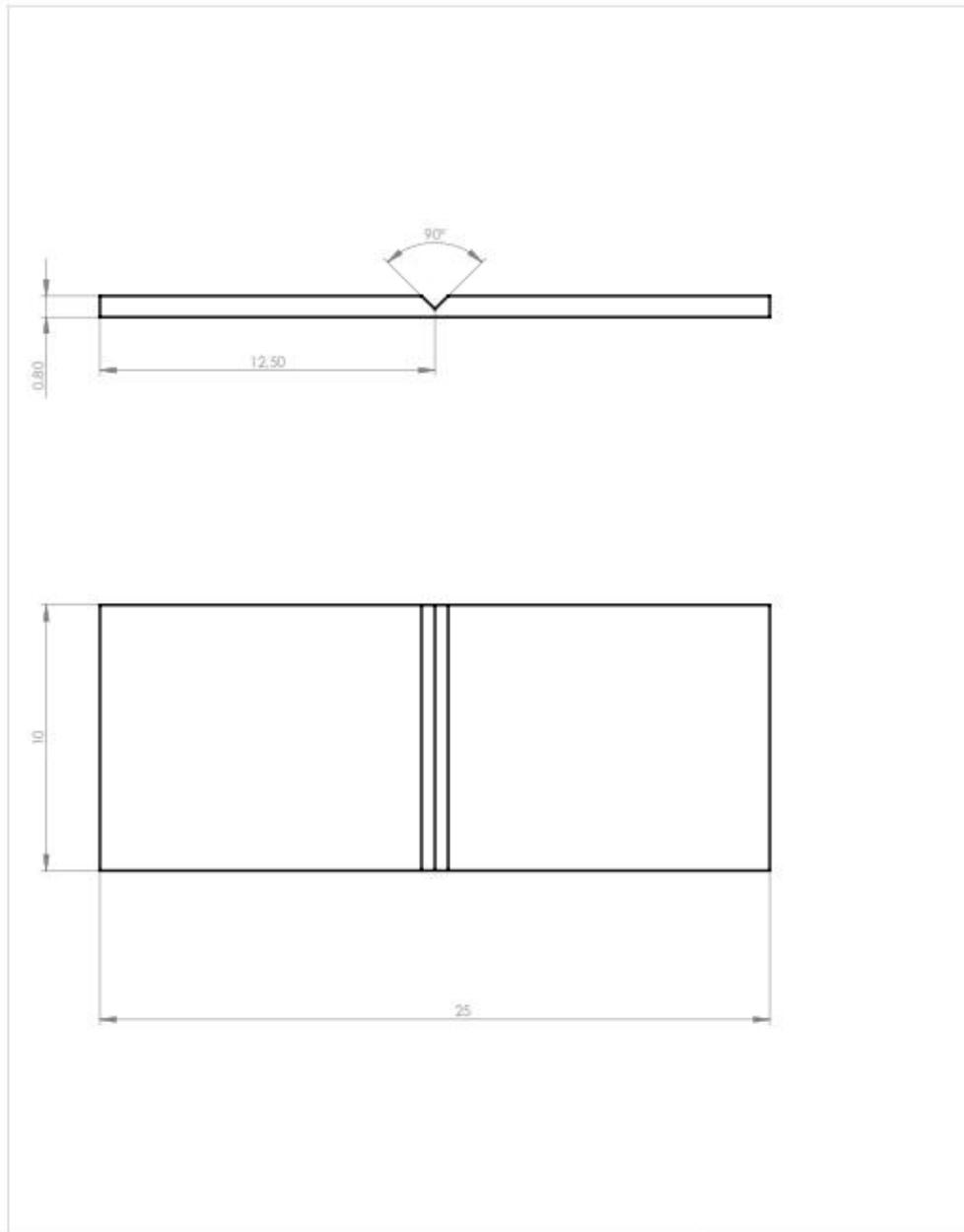
		FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - UNL	
Proj.	06/03/2017	DEMI	Gonçalo da Silva Rosa Lopes Bernardo
Des.	06/03/2017		
Copiou		Apoio Fixo	D.2
Visto			
Escola			
2:1			
Toleran.			
		Substitui des. nº	
		Substituído por	



		<i>FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - UNL</i>	
<i>Proj.</i>	06/03/2017	DEMI	Gonçalo da Silva Rosa Lopes Bernardo
<i>Des.</i>	06/03/2017		
<i>Copiou</i>			
<i>Visto</i>			
<i>Escala</i>	2:1		D.3
<i>Toleran.</i>		<i>Apoio Movel</i>	
		<i>Substitui des. nº</i>	
		<i>Substituído por</i>	



			<i>FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - UNL</i>	
<i>Proj.</i>	06/03/2017		DEMI	Gonçalo da Silva Rosa Lopes Bernardo
<i>Des.</i>	06/03/2017			
<i>Copiou</i>				
<i>Visto</i>				
<i>Escala</i>	<i>Pés Base</i>		D.4	
<i>1:1</i>				
<i>Toleran.</i>				
			<small>Substitui des. nº</small>	
			<small>Substituído por</small>	



			<i>FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - UNL</i>	
<i>Proj.</i>	06/03/2017		DEMI	Gonçalo da Silva Rosa Lopes Bernardo
<i>Des.</i>	06/03/2017			
<i>Copiou</i>				
<i>Visto</i>				
<i>Escala</i>	Calço			D.5
<i>5:1</i>				
<i>Toleran.</i>				
				<i>Substitui des. nº</i>
				<i>Substituído por</i>