



INSPEÇÃO DE TUBAGENS PARA EQUIPAMENTOS SOB PRESSÃO

PEDRO MANUEL NEVES SEIXAS

DISSERTAÇÃO DE Mestrado REALIZADA NO ÂMBITO DO Mestrado INEGRADO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

MANUEL FERNANDO GONÇALVES VIEIRA

ORIENTADOR

PROFESSOR DOUTOR, NO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

ANDRÉ ALVES FERREIRA

COORIENTADOR FEUP

DOUTORANDO, NO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

HELENA HENRIQUES

COORIENTADORA FEUP

CORDENADORA DE SOLDADURA NA BUERAU VERITAS RINAVE

Porto, 13 de outubro de 2021



CANDIDATO Pedro Manuel Neves Seixas *Código* 201605955

TÍTULO INSPEÇÃO DE TUBAGENS PARA EQUIPAMENTOS SOB PRESSÃO

JÚRI *Presidente* José Carlos Magalhães Duque da Fonseca DEMM-
FEUP

Arguente Omid Emadinia INEGI

Orientador Manuel Fernando Gonçalves Vieira DEMM-
FEUP

DATA 26 de outubro de 2021

HORA 18h30

Resumo

A presente dissertação de mestrado descreve um projeto desenvolvido em ambiente empresarial na Burea Veritas Rinave. O seu objetivo é a qualificação de dois procedimentos de soldadura dos aços TP 316L e P265GH TC1.

A qualificação de um procedimento de soldadura exige a utilização da norma ISO 15614-1. Esta indica todos os ensaios necessários e passos para que seja obtida e aprovada a EPS. Primeiramente, foram executados ensaios não destrutivos após a execução dos corpos de prova, estando os resultados obtidos de acordo com a respetiva norma. Em seguida aplicam-se os ensaios destrutivos, os quais revelaram valores dentro dos padrões da norma. Contudo não foi possível aprovar o procedimento devido à falta de material necessário para produzir provetes para realização de todos os ensaios destrutivos que a norma requer.

Os dois aços utilizados para a EPS são comumente utilizados em componentes de sistemas de pressão, nomeadamente tubagens. Os materiais utilizados em sistemas de pressão não podem apresentar defeitos que possam provocar falhas durante o serviço. No caso do aço TP 316L as falhas ocorrem especialmente devida a fenómenos de corrosão. No caso do aço P265GH TC1 a fissuração a frio é o principal problema.

Palavras-Chave

Soldadura, sistemas de pressão, inspeção de juntas soldadas, EPS.

Abstract

This master's thesis describes a project developed in a business environment at Burea Veritas Rinave. The objective is the qualification of two welding procedures for TP 316L and P265GH TC1 steels.

The qualification of a welding procedure requires the use of the ISO 15614-1 standard. This indicates all the necessary tests and steps to obtain and approve the WPS. First, non-destructive tests are performed after the execution of the specimens, and the results obtained are in accordance with the required norm. Next, destructive tests were applied, which revealed values within the standards of the norm. However, it was not possible to approve the procedure due to the lack of material needed to produce specimens to perform all the destructive tests required by the norm.

The two steels being used for WPS are commonly used in pressure system components, namely pipes. Materials used in pressure systems must not have defects that could cause failures during service. In the case of TP 316L steel, failures occur especially due to corrosion phenomena. In the case of P265GH TC1 steel cold cracking is the main problem.

Keywords

Welding, pressure systems, welded joint inspection, WPS.

Índice

1. Introdução	1
1.1 Contextualização e Objetivos	1
1.2 Estrutura da Dissertação	2
2. Revisão da Literatura.....	2
2.1 Equipamentos de pressão	2
2.2 Aço inoxidável austenítico	4
2.3 Aços de baixo carbono	4
2.4 Metalurgia da soldadura	5
2.5 Processos de soldadura.....	7
2.5.1 TIG (141).....	8
2.6 Tensões residuais	10
2.7 Soldabilidade.....	11
2.8 Soldadura do aço inoxidável austenítico.....	11
2.8.1 Suscetibilidade à corrosão de aços inoxidáveis austeníticos após processos de soldadura	14
2.9 Soldadura de aço de baixo carbono	15
2.10 Especificação do Procedimento de Soldadura	17
2.10.1 Especificação de Procedimentos de Soldadura preliminar (EPSp)	17
2.10.2 EPS.....	17
2.10.3 Qualificação do procedimento de soldadura	18
2.11 Ensaios não destrutivos	18
2.11.1 Inspeção visual	19
2.11.2 Líquidos penetrantes.....	19
2.11.3 Partículas magnéticas.....	20
2.11.4 Ultrassons.....	21
2.11.5 Radiografia industrial	21
2.12 Ensaios destrutivos	22
2.12.1 Ensaio de tração	22
2.12.2 Ensaio de dobragem.....	23
2.12.3 Ensaio de choque	23
2.12.4 Ensaio de Dureza	23
2.12.5 Metalografia.....	23
3. Materiais.....	24
3.1 Metais de base	24
3.1.1 AISI 316L.....	24
3.1.2 P265GH TC1	25
3.2 Materiais de adição	25

3.2.1 W 19 12 3 L Si	25
3.2.2 W 42 5 W3Si1	25
4. Resultados.....	26
4.1 Qualificação de procedimentos de soldadura	26
4.1.1 Análise da EPSP	26
4.1.2 Execução dos corpos de prova	26
4.1.3 Análise e testagem dos provetes	28
4.1.4 Relatório da Qualificação do Procedimento de Soldadura	37
5. Análise microestrutural	38
5.1 Discussão de resultados	38
5.1.1 AISI 316L.....	38
5.1.2 P265GH TC1	44
6. Conclusões	49
6.1 Trabalhos futuros	50
Bibliografia	51
Anexos.....	54
Anexo I	54
Anexo II	59
Anexo III	60

Lista de Figuras

Figura 1 - Sistema de tubagens de uma caldeira.	4
Figura 2 - Diferentes zonas da junta, após soldadura.....	6
Figura 3 - Sistema de coordenadas..	7
Figura 4 - Esquema da reação entre o elétrodo o material a ser trabalhado.	8
Figura 5 - Montagem experimental para a realização da soldadura por TIG.	9
Figura 6 - Esquema dos vários tipos de distorção.....	10
Figura 7 - Diagrama proposto por Saeffler para aços inoxidáveis.	13
Figura 8 - Fenómeno de sensibilização típico dos aços inoxidáveis.....	14
Figura 9 - Fissuras devido à corrosão sob tensão de um SS316L.....	15
Figura 10 - Gradiente da microestrutura para um aço com teor de 0,18% de carbono ...	16
Figura 11 - Exemplo de consumíveis utilizados	20
Figura 12 - Exemplo de consumíveis para o ensaio de partículas magnéticas.....	20
Figura 13 - Corpo de prova para o aço inoxidável	27
Figura 14 - Corpo de prova do aço de baixo carbono	27
Figura 15 - Zona para obtenção de provetes segunda a norma.....	29
Figura 16 - Consumíveis usados no ensaio de líquidos penetrantes.....	30
Figura 17 - Corpo de prova do aço inoxidável após o ensaio de líquidos penetrantes	30
Figura 18 - Corpo de prova do aço carbono após o ensaio de líquidos penetrantes	30
Figura 19 - Setup para a Radiografia do tubo de carbono.....	31
Figura 20 - Filme do aço de baixo carbono	32
Figura 21 - Filme do aço inoxidável	31
Figura 22 - Diferentes zonas avaliadas para o ensaio de impacto. a) ZF; b) zona de fronteira entre o material de adição e o de base; c) ZTA	34
Figura 23 - Esquema das zonas de indentação do ensaio de dureza nas amostras	35
Figura 24 - Macrografia para o aço inoxidável	36
Figura 25 - Macrografia para o aço de baixo carbono.....	37
Figura 26 - Microestrutura da zona não afetada do aço inoxidável.	39
Figura 27 - Gradiente de tamanho de grão na ZTA.....	40
Figura 28 - Microestrutura da ZF do aço inoxidável.....	40
Figura 29 - Quantificação da ferrite- δ através do diagrama de Schaeffler	41
Figura 30 - Óxido avaliado por EDS	43
Figura 31 - Imagem SEM do provete de tração do aço inoxidável.....	44
Figura 32 - Imagem SEM do provete de tração do aço inoxidável com maior ampliação .	44
Figura 33 - Microestrutura da zona não afetada do aço de baixo carbono.	45
Figura 34 - Microestrutura da ZF e diferença de tamanho de grão entre passes.....	45
Figura 35 - Ampliação da microestrutur bainítica	46
Figura 36 - Microestrutura da ZTA do aço de baixo carbono.....	47
Figura 37 - Gradiente de tamanho de grão.	47
Figura 38 - Imagem SEM da fratura do ensaio de tração para o aço de baixo carbono ...	48

Figura 39 - Imagem SEM da fratura do ensaio de tração para o aço de baixo carbono com maior ampliação..... 48

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Categorias e propriedades de vários aços.	5
Tabela 2 - Tipos de solidificação na ZF num aço inoxidável austenítico	12
Tabela 3 - Composição química do aço AISI 316L	24
Tabela 4 - Composição química do aço Aço P265GH TC1	25
Tabela 5 - Composição química do material de adição para o aço inoxidável	25
Tabela 6 - Composição química do material de adição para o aço de baixo carbono.....	26
Tabela 7 - Parâmetros de soldadura para o aço inoxidável	27
Tabela 8 - Parâmetros de soldadura para o aço de baixo carbono	27
Tabela 9 - Valores obtidos no ensaio de tração ao aço inoxidável.....	32
Tabela 10 - Valores obtidos no ensaio de tração ao aço de baixo carbono	33
Tabela 11 - Resultados do ensaio de dobragem	33
Tabela 12 - Resultados obtidos para o ensaio de impacto	34
Tabela 13 - Resultado dos ensaios de dureza para o aço inoxidável.....	35
Tabela 14 - Resultado dos ensaios de dureza para o aço de baixo carbono.	35
Tabela 15 - Percentagem dos elementos de liga do oxido avaliado por EDS	43

Lista de Nomenclaturas

- CINFU - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição
- CEMUP - Centro de Materiais da Universidade do Porto
- CE - Carbono Equivalente
- CQ - Composição Química
- ED - Ensaio Destrutivo
- EDS - Espectrometria de Raios-X por Dispersão de Energia (Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy)
- END - Ensaio Não Destrutivo
- EPS - Especificação de Procedimento de Soldadura
- EPSP - Especificação de Procedimento de Soldadura Preliminar
- ISO - International Organization for Standardization
- MB - Metal Base
- OES - Espectrometria de Emissão Ótica (Optical Emission Spectroscopy)
- QPS - Qualificação de Procedimento de Soldadura
- RQPS - Relatório de Qualificação de Procedimento de Soldadura
- SEM - Microscópio Eletrónico de Varrimento (Scanning Electron Microscopy)
- TIG - Tungsten Inert Gas
- ZF - Zona de fusão
- ZTA - Zona Afetada Termicamente
- ZPF - Zona Parcialmente Fundida

1. Introdução

Em engenharia, a escolha de um material adequado é imperativa, de forma a obtermos um desempenho de qualidade e sem falhas, por parte do componente. Desta forma, tem-se assistido a um aumento exponencial na necessidade de entendimento do comportamento dos materiais, numa tentativa de mitigar possíveis falhas em serviço. Os sistemas de pressão, não são exceção, uma vez que existem alterações nas suas propriedades, quando este se encontra em serviço. A escolha do material para estes sistemas é definida com recurso a uma norma, que define todas as variáveis e valores que tem de ser cumpridos para que haja o bom funcionamento destes sistemas. Atualmente, os materiais mais usados para produzir sistemas de pressão são os aços.

Nos sistemas de pressão não são meramente afetados pela escolha dos materiais adequados, mas também pelos processos associados ao seu fabrico. Certas partes destes sistemas são produzidas através de processos de soldadura. A aplicação de um processo de soldadura a qualquer material provoca alterações nas propriedades do mesmo. Este fenómeno é justificado, pela existência de um gradiente proveniente das temperaturas atingidas durante o processo. Assim a zona soldada, pode ser uma zona mais débil devido à presença de defeitos ou tensões. Esses problemas podem provocar fissuras, pondo em causa o sistema de pressão. Estas falhas podem implicar acidentes com perdas materiais e humanas. Todas as etapas associadas à soldadura dos sistemas de pressão exigem um elevado nível de segurança e qualidade.

A presente dissertação terá como alvo de estudo a realização de duas EPS que por consequência necessitam de RQPS. Os materiais utilizados foram um aço inoxidável austenítico (TP316L) e um aço de baixo carbono (P235TR1). Estes materiais foram escolhidos devido ao seu elevado uso em componentes de pressão. Isto acontece devido às propriedades que apresentam quando submetidos a altas pressões e a fenómenos de corrosão. Então, após a qualificação, será estudado os efeitos do processo no material e se estes seriam aplicados caso estivessemos perante uma peça real.

1. 1 Contextualização e Objetivos

Esta tese foi desenvolvida em ambiente empresarial com o objetivo de proceder à qualificação de duas juntas soldadas. A empresa Bureau Veritas Rinave Soc. Unip. Lda. é uma empresa cuja missão é reduzir os riscos do cliente, melhorar desempenho e apoiar esforços de inovação, tendo em consideração obrigações relativas às regulamentações em termos de qualidade, saúde, segurança, proteção ambiental e responsabilidade social. Por isto esta empresa presta serviços de auditoria, análise, inspeção e certificação. Pela sua qualidade de serviço e de colaboradores é contactada por diversas empresas para efetuar qualificações de um procedimento de soldadura ou soldadores.

Após esta qualificação foi feita uma caracterização microestrutural das duas juntas para inferir sobre a possibilidade de aplicação destas num sistema de pressão. Para isso é necessário realizar uma caracterização microestrutural da junta. Esta caracterização foi realizada no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com o auxílio do CINFU e CENFIM.

1.2 Estrutura da Dissertação

A estrutura principal desta dissertação está enunciada abaixo:

O capítulo 2 é feita uma introdução teórica em que são abordados os sistemas de pressão, tópicos importantes sobre soldadura. Ainda serão abordados a especificação e qualificação de procedimento de soldadura, ensaios destrutivos e não destrutivos.

O capítulo 3 apresenta os materiais e características destes. Estes foram os materiais utilizados para esta dissertação.

O capítulo 4 demonstra os passos necessários para que seja possível executar a qualificação de um procedimento de soldadura. Estão apresentados todas as variáveis e resultados importantes para que possam ser avaliadas as juntas. Também é feita a análise das microestruturas para obter uma melhor descrição das propriedades do material.

O capítulo 5 neste capítulo apresenta e analisa obtidas. Também foram realizados outros testes. A apresentação e análise desses resultados estão apresentadas neste capítulo.

Por fim temos o capítulo 6 em que são apresentadas as conclusões desta dissertação.

2. Revisão da Literatura

2.1 Equipamentos de pressão

Os equipamentos sob pressão podem ser recipientes utilizados para a contenção de um fluido, podendo este ser gasoso, líquido ou ambos. O recipiente pode ser pressurizado internamente ou externamente [1]. Caso a pressão seja aplicada internamente, o fluido exerce pressão no interior do recipiente superior, igualando a que este sofre no seu exterior. Esta pressurização descrita é a mais comum. O desenvolvimento e o conhecimento de equipamentos sob pressão são importantes já que a má utilização destes dispositivos pode ter consequências catastróficas [1].

Uma parte fundamental para que estes equipamentos funcionem de maneira correta é o design e a escolha do material. Para executar um design correto e obter um

bom funcionamento por parte do sistema é necessário estudar o efeito da temperatura, das condições atmosféricas, da corrosão, das pressões internas e externas. Um sistema em que o valor da pressão ultrapasse significativamente a atmosférica, deve ser considerado um sistema de pressão. Por isso, deve ser construído um equipamento de pressão adequado. Existem vários tipos de equipamentos [2]:

- Sistemas de pressão (reatores e recipientes de armazenamento);
- Componentes de sistemas de tubagem (válvulas e flanges);
- Meios de adição, controlo ou remoção do calor (aquecedores de ar, vaporizadores, condensadores, refrigeradores, permutadores de calor, entre outros);
- Meios de aumento, controlo ou redução da pressão (bombas, compressores, ventiladores, turbinas de descarga e válvulas de controlo);
- Meios de adição/remoção de fluidos/sólidos do sistema (bombas, compressores e válvulas de descarga);
- Dispositivos e sistemas de medição/controlo (instrumentação);
- Utilidades e serviços (eletricidade, vapor, água, ar, entre outros).

Os materiais e processos utilizados para a sua produção consideram as propriedades e características necessárias para que não ocorram falhas em serviço. As tubagens destes sistemas são constituídas habitualmente por aço inoxidável austenítico ou aço de baixo carbono. Estes componentes são de extrema importância apresentando *designs* especificados e normalizados. Os tubos são produzidos por extrusão ou por laminagem de chapas, sendo posteriormente soldados. Tubos com diâmetro máximo de 304 mm são geralmente extrudidos, enquanto, para dimensões superiores, devem ser laminados e soldados com chapa. Os extrudidos são geralmente fornecidos ao cliente no estado recozido, variando consoante o fabricante. Os sistemas de tubagem descritos, dependendo do respetivo modelo, podem conter cerca de 150 a 200 juntas soldadas. A Figura 1 ilustra um sistema de tubagens de uma caldeira [3].

Quando são soldados e aplicados num sistema de pressão os aços inoxidáveis austeníticos estão suscetíveis a sofrer fenómenos de corrosão. Para que esse efeito seja o menor possível é preciso evitar os defeitos que a soldadura causa como o elevado teor de ferrite- δ e a presença de zonas sensibilizadas. No caso do aço de baixo carbono o principal problema deste após a soldadura é a suscetibilidade à fissuração a frio. Estes problemas apresentados impulsionam a fissuração das juntas e conseqüentemente falha do componente em questão.

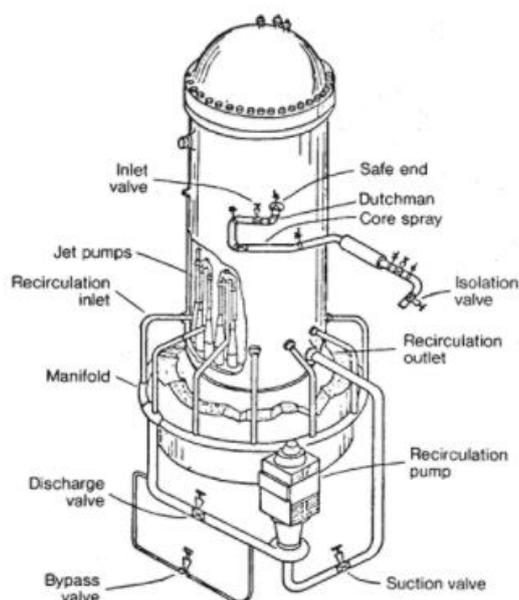


Figura 1 - Sistema de tubagens de uma caldeira [3].

2.2 Aço inoxidável austenítico

Os aços, para serem classificados como inoxidáveis, apresentam na sua matriz metálica um teor de no mínimo 12% a 27% de crómio e 1 a 2% de manganês. A utilização destes aços deve-se, principalmente, à elevada resistência à corrosão e oxidação devido ao crómio presente na matriz. O crómio, ao entrar em contacto com o oxigénio atmosférico, passiva e cria na superfície do aço uma camada de espessura muito reduzida e aderente, que o protege. Grande parte dos aços inoxidáveis podem ser soldados, mas requerem procedimentos especiais. Com soldadura, ocorre uma alteração significativa da microestrutura na ZTA e no metal de soldadura em relação ao metal base, provocando a formação de constituintes intermetálicos, crescimento do tamanho de grão, segregação de elementos de liga e impurezas, entre outros. Estes tipos de aços estão divididos em cinco categorias: ferríticos, martensíticos, austeníticos, duplex e endurecíveis por precipitação. A categorização apresentada é realizada desta forma devido às diferentes microestruturas que apresentam e ao processamento térmico distinto que podem sofrer. Neste trabalho, será estudado um aço inoxidável austenítico. Esta família de aços pode ter uma microestrutura constituída por austenite e ferrite ou 100% austenítica. O teor de ferrite presente na microestrutura está dependente do teor de elementos gamagéneos e alfa-géneos presentes na liga [4-6].

2.3 Aços de baixo carbono

Nesta categoria de aços, o teor em carbono não excede 1 % e o de manganês é habitualmente inferior a 1,65 %. Existem outros elementos de liga em percentagens residuais tendo, por isso, um efeito limitado nas propriedades mecânicas. Estas estão maioritariamente dependentes do teor de carbono, apresentando, de modo geral, boa soldabilidade. Estes aços estão categorizados em: *low carbon steel*, *mild steel*, *medium carbon steel* e *high carbon steel*, como podemos observar na tabela 1 [4].

Tabela 1 - Categorias e propriedades de vários aços [4].

Categoria	Percentagem de carbono	Dureza típica	Soldabilidade
<i>Low carbon</i>	0,15 (máx)	60 HRB	Excelente
<i>Mild</i>	0,15-0,30 (máx)	90HRB	Boa
<i>Medium</i>	0,30-0,50 (máx)	25 HRC	Aceitável
<i>High</i>	0,50-1,00 (máx)	40 HRC	Pobre

Nos processamentos por soldadura, esta família de aços pode ser divididos em seis grupos, dadas (os) as diferentes composições químicas, tratamentos térmicos, propriedades mecânicas e resistência à corrosão - *carbon steels*, *high-strength low-alloy steels* (HSLA), *quenched and tempered steels* (QT), *heat-treatable low-alloy steels* (HTLA), *precoated steels* e *chromium-molybdenum steels* [7].

2.4 Metalurgia da soldadura

A soldadura é um processo que compreende a ligação localizada de materiais metálicos ou não metálicos que podem ser aquecidos até à temperatura de soldadura com ou sem a aplicação de pressão. Pode também ser usado um material de adição consoante a necessidade. A escolha do material de adição deve levar em conta as propriedades do material de base e a sua composição química. Se não ocorrer esta concordância, poderá ocorrer um impacto negativo nas propriedades da junta soldada. Depois de aplicado o processo de soldadura, passamos a ter três principais zonas distintas na junta: zona de fusão (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e a zona parcialmente fundida (ZPF). Estas zonas estão ilustradas na Figura 2 [7,8].

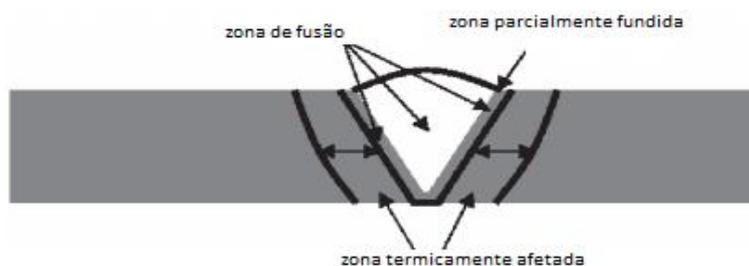


Figura 2 - Diferentes zonas da junta, após soldadura. Adaptado de [9].

A ZF apresenta uma composição normalmente uniforme já que ocorre uma mistura entre os materiais usados no processo. Nesta zona, temos uma interface sólido/líquido, podendo esta ser planar, celular, colunar, dendrítica ou equiaxial. À medida que se desloca desta zona, antes da ZTA, passamos a ter um gradiente da mistura entre os materiais, ou seja, passamos a ter uma zona em que a composição química muda gradualmente, em condições de equilíbrio. Este gradiente pode influenciar no comportamento da junta soldada e no aparecimento de defeitos. Neste local, as microestruturas que são constituídas por grãos equiaxiais finos apresentam duas grandes vantagens: redução da suscetibilidade ao aparecimento de fissuras na solidificação e melhoria das propriedades mecânicas (por exemplo o alongamento) [10].

Na zona parcialmente fundida as temperaturas variam entre a de *liquidus* e *solidus* do metal de base. Com isto, a diferença entre esta zona e a do metal de base não é muito significativa, mas poderão estar presentes fases secundárias de baixo ponto de fusão [10].

Na ZTA a temperatura não ultrapassa a de *solidus*, contudo é alta o suficiente para que ocorram transformações no estado sólido. Estas alterações podem ser: transformações de fases, variação do tamanho de grão e dissolução de precipitados. A largura da ZTA é em função da intensidade da fonte de calor. Essa intensidade varia com diferentes processos de soldadura, bem como, com diferentes variações do mesmo processo [9,10].

Quando o metal de base funde para ocorrer o processo de união, temos uma soldadura de fusão. A soldadura de fusão engloba três principais categorias, consoante a fonte de calor: soldadura por arco, por feixe de alta energia e a gás. A intensidade dessa fonte é maior para o feixe de alta energia e em seguida para o arco. Com uma intensidade elevada na fonte de calor, podemos ter um material a fundir quase instantaneamente, passando a ter maior velocidade de soldadura, maior penetração e, por fim, melhor qualidade da junta soldada sem ocorrer danos na mesma. O fluxo térmico tem uma elevada influência nas transformações de fase durante a soldadura e, por consequência, na microestrutura, propriedades, distorção e tensões residuais após o processo. O rendimento dessa intensidade da fonte de calor pode ser calculado relacionando taxa de transferência da fonte de calor para a peça em joule, o tempo de soldadura em segundos (t_{weld}) e a potência nominal da fonte de calor em joule ($Q_{nominal}$) - Equação 1 [10].

$$\text{Rendimento do fluxo térmico} = \frac{Q \times t_{\text{weld}}}{Q_{\text{nominal}}} \quad \text{Equação 1}$$

É de realçar que o rendimento nunca será 100%, pois existem perdas de calor, por convecção e condução para as imediações, existindo ainda outras variáveis importantes como a capacidade da fonte de calor de fundir o material e a distribuição da densidade de energia da fonte de calor. A Figura 3 mostra o sistema de coordenadas recorrentemente usado numa fonte de calor, a velocidade constante.

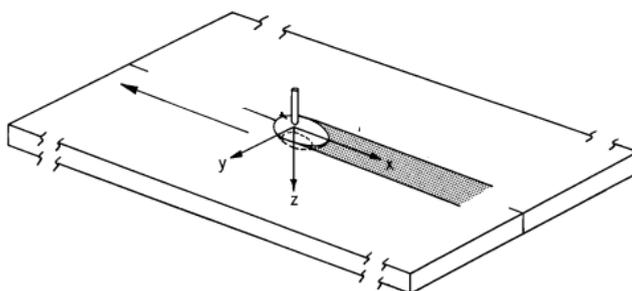


Figura 3 - Sistema de coordenadas. Adaptado de [10].

Um observador a mover-se no sentido negativo do eixo das abcissas (eixo xx) considera que a distribuição de temperatura e a geometria da poça de fusão, não mudam ao longo de tempo, para simplificar os cálculos matemáticos do fluxo de térmico. A transferência de calor e a velocidade de soldadura têm influência direta na poça de fusão, sendo que o aumento desses parâmetros altera a respetiva geometria passando de uma forma elíptica para elíptica alongada. Os parâmetros do fluxo térmico citados têm também impacto na taxa de arrefecimento, no gradiente de temperaturas, na distribuição da densidade de energia e na dissipação de calor na peça a ser trabalhada [10].

2.5 Processos de soldadura

A soldadura de fusão engloba três principais categorias, consoante a fonte de calor: soldadura por arco, por feixe de alta energia e a gás.

O termo soldadura de arco aplica-se a um grande e diversificado grupo de processos de soldadura que usam um arco elétrico como fonte de calor. A criação de uma junta soldada entre metais que utilizam estes processos habitualmente não envolve pressão, porém pode ser necessário utilizar um metal de enchimento, sendo que o arco é a ligação entre a peça de trabalho e a ponta do eletrodo. O calor produzido pelo arco, funde parte do metal base e passamos a ter uma junta soldada. As operações de soldadura de arco podem ser realizadas segundo duas vias: através da aplicação de corrente elétrica que atravessa ou eletrodos consumíveis (fio ou varetas) ou eletrodos não consumíveis (constituídos por hastes de carbono ou tungsténio) [7, 9, 11]. Os processos de arco elétrico

que utilizam elétrodos consumíveis fundem o metal dos elétrodos (metal de enchimento) com o metal de base, criando a junta soldada [7,9]. Podem ser feitos processos de arco em que os elétrodos utilizados não são consumíveis e não utilizam material de enchimento. Fundem o metal de base e criam a ligação. Estamos perante uma soldadura autogénea. O metal de enchimento, se necessário, pode ser alimentado manualmente ou mecanicamente na poça de fusão, sendo que, neste último caso, o elétrodo não consumível serve apenas para sustentar o arco [7, 9]. Dentro dos processos que usam arco com fonte de calor temos: *manual metal arc welding* (MMA), *submerged arc welding* (SAW), *gas metal arc welding* (MIG/MAG), *gas tungsten arc welding* (TIG) e *plasma welding* [11].

2.5.1 TIG (141)

TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) é um método de soldadura em que o arco é estabelecido entre um elétrodo de tungsténio não consumível e a peça a ser trabalhada, como podemos observar na Figura 4. Segundo a norma europeia é representado por os números 141. O 14 advém da Soldadura com elétrodo não consumível sob proteção gasosa. O 1 seguinte provém do elétrodo não ser consumível e atmosfera é inerte.

Durante o processo, tanto a poça de fusão, como os elétrodos estão protegidos por um gás inerte, normalmente árgon, que é fornecido por uma bilha de gás localizada no final da tocha de soldadura, dentro da qual se encontra posicionado, centralmente, o elétrodo do processo [11].

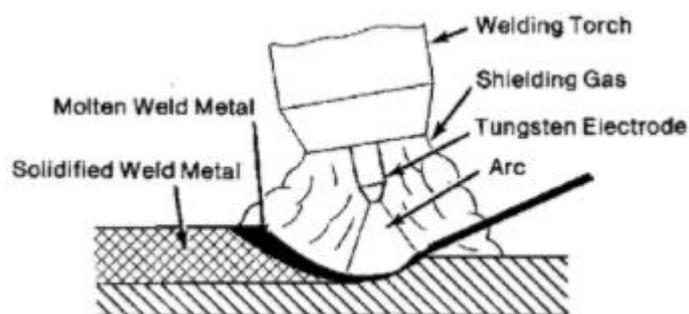


Figura 4 - Esquema da reação entre o elétrodo o material a ser trabalhado [11].

Esta metodologia apresenta um amplo espectro de aplicações, incluindo metais ferrosos e não ferrosos, sendo habitualmente utilizada em peças de secção fina (0,5 a 5 mm). O método 141 pode ser concretizado com ou sem metal de adição, sendo que, neste último caso, ocorre a fusão de um material proveniente de um fio ou vareta no banho de fusão. As aplicações deste método incluem a junção de tubos e a ligação destes a placas finais de permutadores de calor. A par da tocha de soldadura, para a realização da soldadura, é necessário um gerador de alta frequência para a ignição do arco, uma fonte de energia, um gás de proteção (árgon, por exemplo) e um equipamento de controlo [11]. A Figura 5 ilustra a montagem experimental necessária à realização de soldadura por TIG.

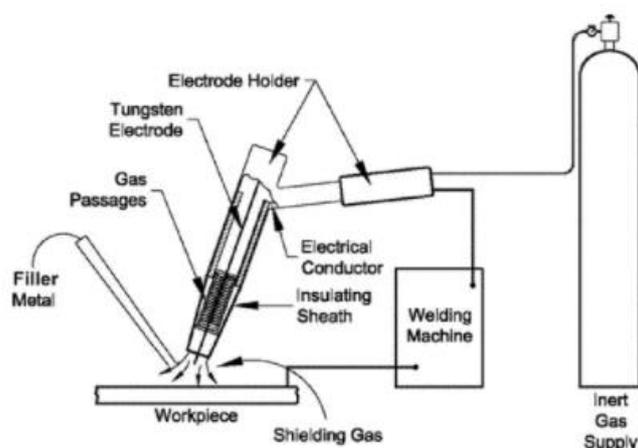


Figura 5 - Montagem experimental para a realização da soldadura por TIG [13].

As tochas de soldadura mencionadas anteriormente podem ser arrefecidas com água ou ar. Dependendo do meio de arrefecimento selecionado, podemos ter diferentes intensidades de corrente: máximo de 400 amperes com água e de 200 para o ar. A ignição do processo está intimamente ligada ao escorvamento do arco, podendo esta ser por curto-circuito, *lift-arc start* ou por pulso de tensão [11].

A fonte de energia do processo usa, habitualmente, corrente contínua, estando o elétrodo conectado ao polo negativo (ânodo). Isto acarreta algumas implicações, especialmente, a maior exposição da peça a ser trabalhada ao calor. As fontes de energia tem características elétricas importantes, sendo elas a intensidade de corrente de curto circuito (corrente máxima que a fonte é capaz de fornecer), a tensão em vazio (tensão máxima disponível entre os terminais da fonte quando a corrente é nula) e, finalmente, o fator de marcha (parâmetro importante para a escolha de uma fonte de energia, porque identifica em que regime de potência a fonte pode operar e durante quanto tempo, sem que ocorra sobreaquecimento e danos por efeito Joule) [12]. A corrente utilizada no processo 141, para além de contínua, pode ser também alternada ou pulsada. Com diferentes correntes obtêm-se diferentes capacidades de penetração [8].

Em relação aos gases de proteção estes são selecionados consoante o material a trabalhar, o arco e a penetração desejada. Para a soldadura de aços inoxidáveis (à exceção

dos austeníticos) e ligas reativas (alumínio e titânio), utiliza-se o argon. Para aços austeníticos e ligas de níquel, é comum recorrer-se a uma mistura de argon e hidrogênio porque a atmosfera tem a vantagem de ser redutora e restringir o arco, ocorrendo uma maior penetração. Se uma maior velocidade de soldadura/penetração for pretendida, poderá ser interessante utilizar uma atmosfera com argon e hélio. Isto porque o hélio permite uma entrega térmica superior, devido à sua energia de ionização, mas o seu custo é mais elevado e há também uma maior dificuldade em escorvar o arco [11].

O eletrodo que é escolhido interfere na qualidade da junta soldada, daí existir a necessidade de normalização deste parâmetro. Os eletrodos devem apresentar uma baixa resistividade elétrica, um elevado ponto de fusão, boa emissão de elétrons e boa condutividade térmica. Estes são compostos por tungstênio, podendo ser adicionados outros elementos, como por exemplo o tório. Outra variável, é a geometria do eletrodo que deve ser selecionada de forma a obter a melhor estabilidade do arco [11].

2.6 Tensões residuais

Ao ser aplicado um processo de soldadura existe a possibilidade de ocorrerem problemas como tensões residuais, distorções e a ocorrência de fadiga, podendo provocar falhas na junta soldada. As tensões residuais formam-se porque o material sofre variações de temperatura e, portanto, expansões e contrações. Essas movimentações são impedidas pelas zonas da junta mais distantes da zona de fusão, pois estes locais não são tão afetados pela temperatura e, por conseguinte, não acompanham essas movimentações. Ao ocorrer um arrefecimento até à temperatura ambiente, teremos mais tensões de tração residuais no metal de soldadura e na zona adjacente e mais tensões compressivas nas áreas mais afastadas de zona de fusão. A peça soldada pode encolher no sentido transversal, longitudinal ou ao longo da soldadura. A distorção angular ocorre, geralmente, quando se executa a solda a partir do topo da peça. Esta aumenta a espessura da peça devido ao aumento da porção de metal soldado que, por consequência, provoca uma maior contração da estrutura na solidificação e uma contração térmica superior. A Figura 6 informa sobre as distorções que podem ocorrer. Para impedir esta falha podemos diminuir



Figura 6 - Esquema dos vários tipos de distorção.
Adaptado de [7].

o volume de metal de soldadura diminuindo a distorção angular, soldar de forma alternada nos dois lados da soldadura, efetuar a gestão térmica durante o processo e, realizar tratamentos térmicos antes e após a soldadura [12].

2.7 Soldabilidade

Segundo a AWS (*American Welding Society*), soldabilidade é definida como: “a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço”.

A norma ISO TR 581 indica que para avaliar a soldabilidade de um material é necessário ter em conta três pontos de vista:

- Do material (composição química, características metalúrgicas, propriedades físicas)
- Do processo (Preparação/execução do processo de soldadura, Pós-tratamento)
- Da aplicação (conceção estrutural, estado de tensões)

Ao considerarmos a metalurgia da soldadura para determinar a soldabilidade temos de considerar a percentagem de carbono, que quanto maior o teor maior a soldabilidade do material. Temos também de considerar o carbono equivalente, isto é, as influências dos elementos de liga têm. Isto é avaliado, pois a presença destes provoca alterações na temperabilidade dos aços, facilitando a formação de fases frágeis. Por fim a soldabilidade do material pode ser avaliada pelos diagramas TAC que relacionam a microestrutura em função do arrefecimento.

Tendo como exemplo os aços de baixo carbono estes apresentam baixa soldabilidade devido ao aparecimento de fissuras, formação de precipitados intermetálicos frágeis na ZTA e falta de união [8,9].

2.8 Soldadura do aço inoxidável austenítico

Os aços inoxidáveis austeníticos são muito usados na indústria petrolífera e para a produção de equipamentos sob pressão. Portanto, ao ser aplicado um processo de soldadura, é preciso um forte controlo da microestrutura, sendo esta afetada pela solidificação e pelas transformações no estado sólido. A microestrutura poderá ser austenítica e ferrítica ou 100% austenítica, já que esta família tem amplos teores de elementos de liga que podem estar presentes influenciando, assim, a microestrutura final. A presença de ferrite- δ é importante em percentagens de volume superiores a 5% e

inferiores a 10%. Para aços inoxidáveis austeníticos com volume de ferrite-δ inferior a 5% temos uma maior suscetibilidade que apareçam fissuras na solidificação e para valores superiores a 10% temos uma diminuição da ductilidade e resistência à corrosão. A ferrite é a fase que mais transformações sofre no estado sólido e, por essa razão, os aços inoxidáveis austeníticos com maior percentagem desta fase exigem um controlo superior, após a solidificação. A microestruturas nas diferentes zonas da junta soldada variam, como já referido, estando então associadas quatro tipo de reações. Existem transformações são do tipo A, AF, FA, F [13]:

- **tipo A** - a austenite é a fase primária na solidificação e a microestrutura obtida é 100% austenítica;
- **tipo AF** - a fase primária, na solidificação é a austenite e a microestrutura obtida apresenta austenite e ferrite, nas fronteiras das células e dendrites;
- **tipo FA** - a ferrite-δ é a fase primária na solidificação e a microestrutura obtida apresenta austenite e *skeletal* e *lathy* ferrite proveniente da transformação da ferrite em austenite;
- **tipo F** - a fase primária a solidificar é a ferrite-δ e a microestrutura obtida é composta por austenite e ferrite acicular ou por uma matriz ferrítica com fronteiras de grão austeníticas *Widmanstatten side plates*.

É importante realçar que ocorre uma modificação microestrutural adicional no estado sólido para os tipos FA e F devido à instabilidade da ferrite a temperaturas mais baixas [13]. A Tabela 2 concentra informação acerca das reações que ocorrem e das respetivas microestruturas.

Tabela 2 - Tipos de solidificação na ZF num aço inoxidável austenítico [13].

Tipo de solidificação	Reação	Microestrutura obtida
A	$L \rightarrow L + A \rightarrow A$	100% austenítica
AF	$L \rightarrow L + F \rightarrow F + A$	Austenítica com ferrite na fronteira das células e dendrites
FA	$L \rightarrow L + F \rightarrow L + F + (F + A)_{per/eut} \rightarrow F + A$	Austenite e ferrite skeletal (e lathy (ripas) proveniente da transformação da ferrite em austenite
F	$L \rightarrow L + A \rightarrow L + A + (A + F)_{eut} \rightarrow A + F_{eut}$	Austenite e ferrite acicular ou por uma matriz ferrítica com fronteiras de grão austeníticas <i>Widmanstatten side plates</i>

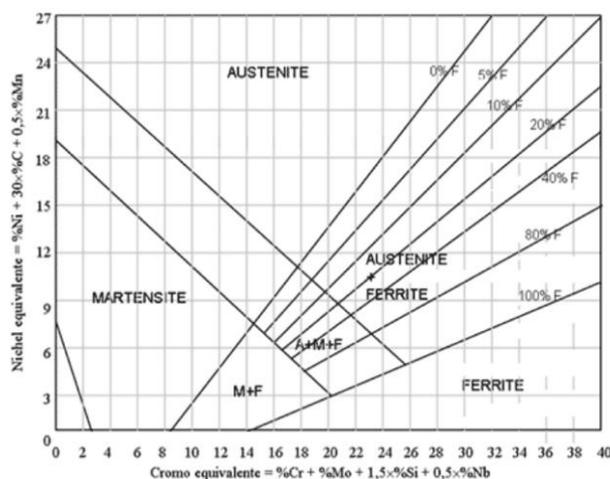


Figura 7 - Diagrama proposto por Schaeffler para aços inoxidáveis [13].

Outra ferramenta importante nesta análise é o diagrama de *Schaeffler*, que se encontra representado na Figura 7. Este permite estimar a microestrutura da zona de fusão, recorrendo ao cálculo da quantidade de níquel (Ni_{eq}) e de cromo equivalente (Cr_{eq}) dada pelas equações 2 e 3, respetivamente, de todos os metais. Pode também ser utilizado para determinar o metal de adição mais adequado, tendo em conta a microestrutura desejada [14,15].

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30\%C + 0.5\%Mn \quad \text{Equação 2}$$

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5\%Si + 0.5\%Nb \quad \text{Equação 3}$$

Este diagrama é utilizado não só na soldadura de aços inoxidáveis austeníticos, mas também, na de ferríticos e martensíticos. No caso dos austeníticos, é aplicado na estimativa da quantidade de ferrite- δ presente na microestrutura e é também usado na seleção do material de adição. A microestrutura da ZTA é condicionada pela composição e microestrutura do metal de base, podendo ocorrer as seguintes transformações: crescimento do tamanho de grão, formação de ferrite, precipitação de carbonetos e nitretos e fusão das fronteiras de grão austeníticas. O crescimento do tamanho de grão nos aços inoxidáveis austeníticos é baixo, pois, normalmente, são soldados após recozimento de solubilização ou laminagem a quente. Caso o metal de base tenha sofrido laminagem a frio, recristalização ou alteração do tamanho de grão, ocorre um amaciamento da microestrutura da ZTA provocado pelo aumento do tamanho de grão [16]. A transformação da ferrite é lenta e o ciclo térmico da ZTA após a soldadura é rápido, o dificulta a formação ferrite. A formação de ferrite na solidificação após a soldadura, na ZTA, restringe o crescimento de grão e diminui a probabilidade da fusão das fronteiras de

grão austeníticas, podendo provocar o aparecimento de fissuras [16]. A ZTA está exposta a temperaturas próximas das de fusão e, por isso, poderá ocorrer a dissolução de compostos presentes no metal de base, podendo assim a matriz austenítica ficar sobressaturada. No arrefecimento, fruto dessa sobressaturação, irão formar-se precipitados (nitretos e carbonetos), habitualmente nas fronteiras de grão na ZTA ou na interface austenite/ferrite, caso esta esteja presente. O último fenómeno referido é a fusão das fronteiras ao longo do grão austenítico devido à segregação de fósforo e enxofre, resultando, assim, na diminuição da temperatura de fusão. Este fenómeno pode levar a que ocorra a fissuração na ZTA [16]. Nos aços inoxidáveis austeníticos, ocorre, geralmente, um amaciamento da ZTA após a soldadura. Por esta razão, quando é realizado o ensaio de tração na secção transversal da junta soldada, a fratura pode ocorrer nessa zona ao invés de ocorrer no aço soldado. A presença de ferrite aumenta a resistência mecânica em relação ao metal de base e à ZTA, à temperatura ambiente. Apesar disso o aumento do teor de ferrite presente na microestrutura provoca uma diminuição da resistência à fluência desse material o que é prejudicial para materiais utilizados em equipamentos sob pressão [16].

2.8.1 Suscetibilidade à corrosão de aços inoxidáveis austeníticos após processos de soldadura

O aço inoxidável austenítico apresenta uma elevada suscetibilidade ao fenómeno de sensibilização quando sujeito a um processo de soldadura. O fenómeno consiste na precipitação de carbonetos de crómio (Cr_{23}C_6) nas fronteiras de grão, ficando a matriz metálica empobrecida de crómio, observado na Figura 8 [4].

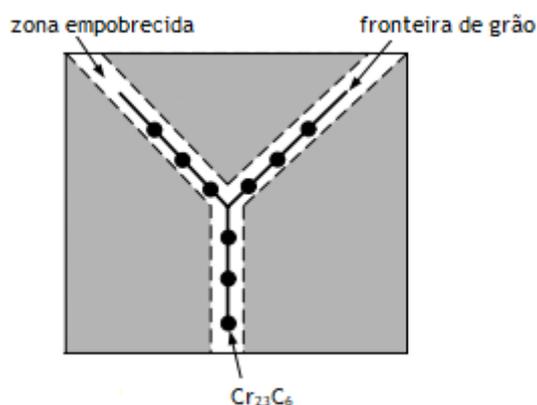


Figura 8 - Fenómeno de sensibilização típico dos aços inoxidáveis. Adaptado de [4].

Estas zonas empobrecidas tornam-se, conseqüentemente, anódicas e, por isso, são pontos onde a corrosão intergranular ocorre preferencialmente quando o aço é exposto a meios corrosivos. A sensibilização ocorre de forma mais intensa na gama de temperaturas

entre 400 °C e 850 °C. Por essa razão, a zona mais propícia será a ZTA. Para evitar este problema podemos:

- adicionar elementos de liga carburígenos que formem carbonetos mais estáveis do que os aqueles formados com o carbono e o cromo;
- utilizar teores de carbono mais baixos;
- aplicar um tratamento térmico, após a soldadura, para homogeneizar a austenite entre as temperaturas de 1000 °C a 1100 °C seguida de uma hipertêmpera para evitar uma nova precipitação de carbonetos [4,6].

Outro problema que pode ocorrer neste aço após a soldadura é a corrosão sob tensão, particularmente crítica em ambientes com cloro (como por exemplo ambientes marinhos). A baixa condutividade térmica e o elevado coeficiente de expansão térmica podem estar na origem das tensões residuais críticas e, quando o material é exposto a meios corrosivos, podem aparecer fissuras na ZTA que podem chegar até ao metal de base, estando este fenómeno representado na Figura 9. Para aliviar as tensões são feitos tratamentos de revenido, mas a temperatura de estágio deste tratamento tem de ser cuidadosamente escolhida para que não ocorra na gama de temperaturas de sensibilização. A corrosão sob tensão pode ser evitada em aços inoxidáveis com teores de níquel inferiores a 5% e superiores a 20% [17].

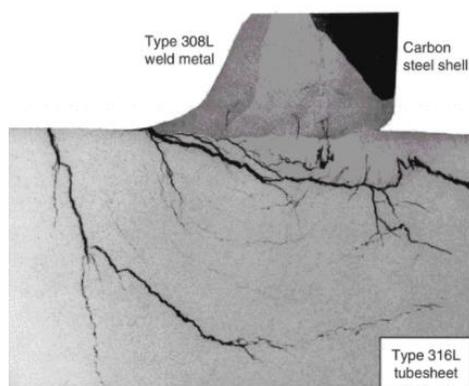


Figura 9 - Fissuras devido à corrosão sob tensão de um SS316L [17].

2.9 Soldadura de aço de baixo carbono

Para a realização da soldadura a arco elétrico de um aço de baixo carbono, é necessário analisar diversos aspetos tais como a microestrutura, o carbono equivalente, inclusões não metálicas, o teor de hidrogénio e a taxa de arrefecimento após aplicação do processo de soldadura [18].

Entretanto, em relação à microestrutura, sabe-se que as temperaturas atingidas durante a soldadura são de uma ordem de grandeza elevada, estabelecendo-se gradientes térmicos significativos, inclusive nas microestruturas. As alterações microestruturais dependem da composição química do aço de baixo carbono e das taxas de aquecimento e arrefecimento. A Figura 10 demonstra esse gradiente. Em alguns casos, pode ocorrer a formação de martensite no metal soldado e na ZTA. Esta transformação (motivada pela elevada dureza resultante) pode ser um fator que propicie o aparecimento de fissuras no metal soldado e na ZTA, já que o material deixa de ser capaz de aliviar tensões inerentes a esta transformação [18].

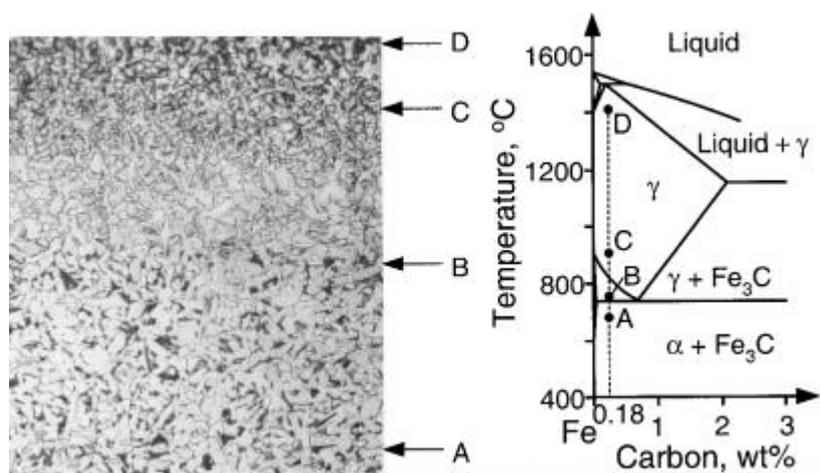


Figura 10 - Gradiente da microestrutura para um aço com teor de 0,18% de carbono [8].

O carbono é o elemento mais importante para avaliar a capacidade de soldadura de um aço de baixo carbono, sendo esta tanto maior quanto menor a percentagem de carbono na microestrutura. Deste modo, para avaliar o impacto dos diferentes elementos de liga, é reportado o respetivo efeito como equivalente ao carbono. Passa a ser possível, conseqüentemente, estabelecer uma fórmula empírica que identifica o efeito dos elementos de liga na soldabilidade do material o que, posteriormente, viabiliza a averiguação do risco de aparecimento de defeitos provenientes do processo de soldadura. Em termos aritméticos, um aço com baixos valores de carbono equivalente (0,20) tem boa capacidade para ser soldado, ao passo que, quando o carbono equivalente atinge os 0,6, existe a possibilidade de ocorrer o fenómeno de *underbead cracking* [18].

Nos aços de baixo carbono, são efetuadas pequenas adições de enxofre e fósforo para melhorar a maquinabilidade, provocando, contudo, um abaixamento da soldabilidade do aço. A presença de compostos com baixo ponto de fusão nas fronteiras de grão, que incorporam estes elementos na sua constituição, pode provocar a fissuração devido às tensões provocadas pelo arrefecimento. A presença de hidrogénio em aços de baixo carbono é um parâmetro que deve ser tido em conta, uma vez que torna o material extremamente suscetível ao aparecimento de fissuras (fenómeno que tem origem na corrosão pelo hidrogénio). Este tipo de defeito denomina-se de fissuração a frio. Este fenómeno acontece devido ao hidrogénio dissolvido que está aprisionado em pequenos

vazios ou deslocções no metal de solda e na ZTA. As microestruturas dos aços que, após solda, apresentarem martensite ou bainite nos constituintes, estão mais suscetíveis a este tipo de fissuração pelo hidrogénio [18].

As taxas de arrefecimento, juntamente com o carbono equivalente do material, são determinantes no grau de endurecimento para a zona do metal soldado e para a ZTA. Como tal, devem ser cuidadosamente analisadas quando se pretende soldar um aço de baixo carbono. Sabe-se, neste contexto, que as taxas de arrefecimento dependem de três fatores: espessura da secção e *design* da junta; temperatura do metal de base antes de ser aplicado um processo de soldadura e, por fim, taxa de transferência da fonte de calor para a peça. Para teores de carbono mais altos e espessuras elevadas, as temperaturas aplicadas no pré-aquecimento e no próprio processo devem ser maiores para reduzir a suscetibilidade ao aparecimento de fissuras [19].

2.10 Especificação do Procedimento de Soldadura

Para um ambiente industrial muito importante que existam formas de poder executar corretamente uma soldadura, garantir a sua repetibilidade e qualidade. Para que isto seja possível foram criados documentos que contenham este tipo de informação. Assim são feito EPS que após estarem validados estão aptos para serem aplicados.

Para que existam garantias que as variáveis utilizadas para soldar obtêm uma junta de qualidade são feitos ensaios destrutivos e não destrutivos. Os ensaios que devem ser realizados consoante a aplicação da junta e do nível de qualidade necessário. A norma que indica isto é a ISO 15614:2017 [20].

2.10.1 Especificação de Procedimentos de Soldadura preliminar (EPSp)

Para poder ser feita a Especificação do Procedimento de soldadura (EPS) é necessário considerar os parâmetros que se pretendem avaliar. Temos o exemplo: tipo de soldadura, metal de base, metal de adição, entre outros. Para essa avaliação é realizada uma Especificação de Procedimentos de Soldadura preliminar (EPSp). O documento apresenta diversas informações sendo estas importantes para a execução da junta soldada garantido a sua qualidade. As informações que devem estar presentes neste procedimento estão referidos na norma ISO 15609 -1:2019 [21].

2.10.2 EPS

Após a elaboração de uma EPSp são feitos os corpos de prova segundo as diretrizes. Estes serão submetidos a testes. Caso os resultados corresponderem aos requeridos pela norma ou pelo cliente a EPS é validada. Então para obter um EPS é preciso ter um EPSp validado. Em ambiente de industrial é essencial para um soldador o acesso a um EPS, para que, possa produzir componentes com a melhor qualidade e o maior rendimento possível.

2.10.3 Qualificação do procedimento de soldadura

Para que uma EPS possa ser validada é necessário submeter corpos de prova a diversos ensaios, para que seja garantido resultados em conformidade com a norma. Se os valores não corresponderem aos necessários pela norma, o procedimento deve ser reavaliado e novamente realizado. Existem dois níveis de qualificação que pode ser feita. O nível 2 requer mais ensaios e a exigência de qualidade de valores é maior em relação ao nível 1. Nesta dissertação será utilizado um nível 2 de qualificação. Isto faz todo o sentido, pois estes materiais podiam ser aplicados em sistemas de pressão. Caso isso acontecesse

Para validar a EPS são realizados ensaios destrutivos e não destrutivos como: ensaio de tração, dobragem, inspeção visual, entre outros. Os provetes usados para estes ensaios são executados segundo as respectivas normas, assim como as condições dos ensaios. Com isto é possível garantir que os resultados obtidos são viáveis e capazes de validar a EPS [21].

2.11 Ensaios não destrutivos

Na indústria existe uma necessidade elevada de assegurar a integridade e fiabilidade dos produtos, materiais utilizados e produzidos. As falhas podem ocorrer devido à combinação de fatores como: a presença de defeitos, utilização incorreta e design inadequado. Os ensaios não destrutivos permitem verificar a presença de defeitos numa peça, desde a sua produção até à sua inspeção, durante o tempo de serviço. A escolha dos ensaios a aplicar é consoante a capacidade de deteção deste, do tipo de material utilizado e as características da superfície a ser analisada. Por exemplo, para um aço inoxidável não pode ser aplicado o ensaio de partículas magnéticas devido à polaridade magnética que este material apresenta que o impede de revelar fissuras presentes na junta [22].

Existe uma capacidade de deteção de defeitos por parte de cada ensaio não destrutivo. Existem ensaios que apenas avaliam a superfície a ser analisada, ou seja, não temos informação relativo ao interior da peça. Com isto têm de ser usados outros métodos com capacidade de identificar defeitos interiores. Estes métodos fazem uso de ultrassons, do magnetismo, raios x ou gama e capilaridade [23, 24].

Sendo a soldadura extremamente usada na produção e manutenção de sistemas de pressão a utilização de ensaios não destrutivos tomam uma elevada importância. Isto acontece, porque com estes passamos a ter a noção do estado do material sem comprometer a sua integridade. São normalmente aplicados os seguintes: líquidos penetrantes, inspeção visual, partículas magnéticas, radiografia, durezas, ultrassons. Quando se pretende avaliar defeitos superficiais são utilizados os ensaios de líquidos penetrantes, inspeção visual, partículas magnéticas. Caso seja necessário inferir sobre a estrutura interna ou determinar o volume são usados ensaios de radiografia e ultrassons [25, 26].

2.11.1 Inspeção visual

A inspeção visual é o ensaio mais universal e que de forma involuntária, se aplica constantemente. Este ensaio apresenta diversas vantagens como: o baixo custo, pode ser aplicado em qualquer de vida do material, permite a correção precoce de falhas, pode indicar procedimentos incorretos, aviso prévio de falhas em desenvolvimento quando o material está a ser utilizado. Neste ensaio podem ser usadas lupas, lanternas, ou outros materiais que apoiem visualmente durante a execução [26,27].

2.11.2 Líquidos penetrantes

Quando os defeitos da superfície não são imediatamente aparentes, a sua presença pode ser realçada utilizando sprays com um líquido penetrantes e com revelador. Um líquido penetrante é aplicado na superfície de material, onde devido à sua tensão superficial e molhabilidade, existe um forte efeito capilar, que faz com que o líquido penetre nas aberturas da superfície. Cerca de 10 minutos após essa aplicação, a superfície é limpa (com a ajuda de um spray de limpeza) e aplica-se um spray que terá a função de revelar as aberturas, onde o líquido penetrante foi aplicado. Na Figura 11 estão representados um tipo de consumíveis que podem ser usados. As aberturas são visíveis sob a forma de uma mancha em torno dos defeitos. Uma vez que o revelante, ou é vermelho vivo ou fluorescente sob luz ultravioleta, pequenos defeitos tornam-se facilmente visíveis. O processo penetrante em si pode ser tornado altamente automatizado para a produção em grande escala, mas ainda requer inspetores certificados para a avaliação final [26,28].



Figura 11 - Exemplo de consumíveis utilizados

2.11.3 Partículas magnéticas

Este ensaio faz uso das propriedades ferromagnéticas do material a ser testado. Um campo magnético atravessa a superfície alinhado perpendicularmente à configuração e geometria da peça. Os defeitos presentes distorcem o campo magnético e passam a ser áreas onde magnetização é mais intensa, e por isso as partículas magnéticas são atraídas para estas zonas. Através da aplicação de um spray próprio as partículas magnéticas presentes nos defeitos da superfície da peça reagem e possibilita a observação a olho nu das fissuras [26].

Este método começa com a limpeza da superfície a ser testada, sendo depois aplicado um *spray* no qual estão inseridas as partículas magnéticas e ao ser aplicado corrente, a reação magnética irá mover as partículas para as fissuras na superfície da peça. Em seguida, é aplicado outro *spray* que aplica um contrastante permitindo a visualização das fissuras. Na Figura 12 estão apresentados exemplos de consumíveis usados neste ensaio. Para que seja possível ocorrer a reação magnética é necessário um fluxo, que é obtido aplicando a lei de ampere consoante: o tipo de material, forma e de corrente que é aplicada. O uso deste ensaio é condicionado pelas propriedades magnéticas do material, o que faz com que este ensaio seja limitado [26, 29].



Figura 12 - Exemplo de consumíveis para o ensaio de partículas magnéticas

2.11.4 Ultrassons

No ensaio de ultrassons é emitido um feixe sonoro direcionado para o componente a ser analisado, na forma de ondas mecânicas ou vibrações de alta frequência. As frequências do ensaio situam-se normalmente na gama de 0,5-10 MHz e o feixe é emitido através de uma sonda.

O feixe irá interagir com a estrutura do material e caso exista um defeito, a progressão do feixe é alterada. Se a falha está presente no interior do metal, a progressão do feixe de energia é modificada localmente. Essa modificação é detetada e exposta para permitir que o defeito seja diagnosticado. Para que a qualidade do ensaio seja a melhor possível, existe a necessidade de entender a natureza do feixe de energia, a sua interação com as características estruturais do componente em teste e o historial de fabrico do componente.

Os feixes sonoros de alta frequência são normalmente refletidos pela superfície oposta da peça (se as superfícies da peça forem paralelas), chamados os ecos de fundo, ou então, são refletidos pelos defeitos ou descontinuidade (interfaces) presentes no material a inspecionar. Estes feixes sonoros são captados pelo transdutor e devido a incompatibilidade acústica do feixe sonoro que é refletido pelo defeito da peça e o que é refletido no final da peça (eco de fundo) é possível localizar e determinar que a peça apresenta defeitos. Por sua vez, os feixes sonoros são convertidos em impulsos elétricos e apresentados num aparelho específico [26, 30].

2.11.5 Radiografia industrial

A radiografia industrial é um tipo de ensaio não destrutivo que faz uso das diferentes absorções de radiação de alta energia por parte dos materiais. Esta propriedade nos materiais denomina-se de radioatividade. O tipo de radiação penetrante utilizado por este END podem ser raios-X ou raios- γ . Com estas radiações, passa a ser possível detetar variações de espessuras, defeitos ou falhas. As espessuras máximas das amostras dependem do tipo de material [31, 32].

Como os materiais e descontinuidades apresentam densidades e geometrias diferentes a absorção da radiação é maior ou menor. A deteção dessas diferentes absorções é detetada com recurso a um filme ou outro sistema de deteção. Posteriormente, o filme é analisado e identificadas as falhas ou descontinuidades que possam estar presentes em todo o volume da amostra ensaiada.

Na área da inspeção da soldadura, este ensaio toma uma importância muito elevada pois permite, avaliar a qualidade da soldadura sem comprometer a peça. Apesar desta

grande vantagem, este ensaio requer elevado cuidados devido ao risco de exposição acidental [26].

2.12 Ensaios destrutivos

Estes ensaios são aplicados de forma a levar os materiais a serem testados a falhar. As variáveis são controladas e os resultados obtidos são comparados com os valores das normas para determinar a qualidade do material [20].

Os ensaios destrutivos possibilitam uma avaliação fiável do material em estudo. Porém a necessidade de ser maquinado um provete torna a execução destes ensaios dispendiosos. Este fato, obriga a um maior grau de consciencialização na hora de decidir que tipo de ensaio se deve realizar, destrutivos/não destrutivos. A seleção do ensaio a realizar tem de ter em conta, o compromisso entre fiabilidade e custo de teste. Desta forma, caso um ensaio não destrutivo nos forneça toda a informação necessária sobre a qualidade da peça, não é necessária a realização de ensaios destrutivos, isto é, estes passam a ser dispensáveis, a não ser que sejam requeridos pela norma [33].

Estes ensaios têm um valor acrescentado em engenharia e especialmente, na área da soldadura especificamente, por nos oferecerem garantias elevadas, em relação aos resultados obtidos. Com estes ensaios torna-se possível garantir a qualificação de uma EPS e QPS. De entre os diversos ensaios destrutivos que existem, os que serão abordados ao longo desta dissertação são: tração, dobragem, choque, dureza e micrografia.

2.12.1 Ensaio de tração

No ensaio de tração temos um provete, dimensionado de acordo com a norma utilizada, que é fixado por amarras e tracionado por uma força uniaxial, com aplicação lenta até à rotura. O provete é fixado para garantir que durante o ensaio, a direção da carga aplicada está correta.

A carga ao qual o material está sujeito é controlada através de células de carga e a deformação por extensómetros calibrados aplicados nos provetes antes do início do ensaio. No final temos um gráfico com informações que permitem determinar a tensão de cedência ($R_{p0,2}$), tensão de rotura (R_m) e módulo de young [34].

Este ensaio está intimamente relacionado com a qualificação de um procedimento de soldadura e de um soldador. Por exemplo, um provete que sofra rotura na zona de soldadura, significa que a junta não apresenta qualidade para ser certificada, segundo a norma.

2.12.2 Ensaio de dobração

Em relação ao ensaio de dobração, o provete está sobre dois suportes paralelos e é colocado, de forma ao centro do provete estar alinhado com o mandril. Este irá aplicar uma força perpendicular à superfície do provete. Esta carga é aplicada de forma contínua e até o provete atingir o ângulo de dobração apresentado na norma.

Para aplicar este ensaio numa junta soldada é necessário consultar a norma ISO 15614 para perceber que tipo de ensaio de dobração deve ser executado (dobração lateral ou longitudinal). Com este ensaio é possível verificar a presença de defeitos nas juntas e também permite estudar a ductilidade da junta [20, 33, 35].

2.12.3 Ensaio de choque

O ensaio de choque ou Charpy, é realizado num provete, com um entalhe, com o auxílio de um pendulo. Apenas é aplicado um golpe pelo pendulo com o objetivo de avaliar a energia absorvida, a expansão lateral e o aspeto da fratura. O provete é colocado em dois apoios e o entalhe fica no meio destes. As dimensões e o tipo de entalhe do provete, o tipo de pendulo e temperatura de ensaio são variáveis a ter atenção durante o ensaio.

O ensaio de choque é frequentemente utilizado em testes de rotina e de aprovação em ambiente industrial. O seu uso para a certificação na soldadura é muito comum. Para estes testes, pode não ser importante se a amostra de teste está completamente fraturada, parcialmente fraturada, ou simplesmente deformada plasticamente, mas sim se os resultados correspondem ao pedido pela respetiva norma [33, 36].

2.12.4 Ensaio de Dureza

Este ensaio consiste em aplicar uma pressão, através de um indentador, na superfície da amostra com uma força pré-definida. Com uma fórmula matemática que faz uso das variáveis (carga, área de indentação ou profundidade de indentação) obtém-se a dureza do material. A realização destes ensaios tem de cumprir os parâmetros definidos na norma, para o ensaio ser válido [37].

Na área de inspeção de soldadura é regularmente empregue o ensaio de dureza Vickers. Com este ensaio é possível observar variações das propriedades nas diferentes zonas da peça.

2.12.5 Metalografia

A metalografia consiste na obtenção de imagens em que podem estar presentes as diferentes zonas da peça ou microestruturas. Com a análise das imagens obtidas pode ser estabelecida uma relação entre estrutura do material com propriedades mecânicas, físicas, composição química, entre outros. Para ser possível observar as imagens um procedimento necessita de ser cumprido [38].

O procedimento passa por um desbaste através de lixas com diferentes granulometrias e em seguida, um acabamento com recurso a panos adequados e suspensão de diamante. Para poder ser observado as zonas ou microestruturas da peça é necessário realizar um ataque químico. Este ataque permite obter um contraste que diferencia as diferentes fases.

Na área de soldadura são utilizadas macrografias ou micrografias. Macrografias as imagens são obtidas com recurso a uma lupa e permitem identificar as diferentes zonas que estão presentes numa junta soldada, a profundidade de penetração e defeitos ou descontinuidades. Já a micrografia, com recurso ao microscópio ótico, permite obter imagens da microestrutura do material estudado. Este nível de pormenor permite tirar conclusões mais estruturadas sobre o comportamento das juntas [33,38].

3. Materiais

3.1 Metais de base

3.1.1 AISI 316L

Um dos aços que será estudado é o AISI 316L - aço inoxidável austenítico, cuja composição química está presente na Tabela 3. É utilizado para condições de elevadas temperaturas e pressões. A presença de molibdénio confere a este aço, uma resistência mecânica superior a elevadas temperaturas e melhor resistência à corrosão em meios redutores, face a outros aços inoxidáveis austeníticos. A presença de níquel dilige o aumento da resistência à fratura e da resistência à corrosão do material. De forma a evitar problemas, como a sensibilização, esta liga tem um teor de carbono inferior a 0,03%, representado pela letra L [7]. Este aço apresenta um valor de tensão de rotura entre 490 e 760 MPa.

Tabela 3 - Composição química do aço AISI 316L

Composição química	C	Si	S	P	Mn	Cr	Ni	Mo	Co	Cu	N
%	0.019	0.3	0.001	0.023	1.110	16.640	10.100	2.050	0.150	0.450	0.047

3.1.2 P265GH TC1

O P265GH TC1 - aço de baixo carbono, apresenta a composição química que se pode visualizar, na Tabela 4. Este aço incorpora a família *mild* devido ao seu teor em carbono e na família dos *carbon steels* tendo em conta o processamento por soldadura, podendo ser utilizado para a produção de equipamentos sob pressão [8]. Este aço apresenta um valor de tensão de rotura entre 410 e 570 MPa. O teor de carbono neste aço diminui a probabilidade de precipitarem carbonetos e melhora a soldabilidade do material. A letra P significa que é usado em sistemas com pressões altas, o H indica que é uma seção oca e o G apresenta informações gerais sobre as características. Por fim, o TC1 significa que é normalmente usado em temperaturas ambientes.

Tabela 4 Composição química do aço P265GH TC1

Composição química	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Ti	Nb(Cb)	V	N	Mo	Cu
%	0.19	0.23	0.46	0.008	0.005	0.08	0.1	0.034	0.005	0.003	0.005	0.008	0.01	0.18

3.2 Materiais de adição

3.2.1 W 19 12 3 L Si

Os materiais de adição têm de ser escolhido cuidadosamente. Estes devem ser semelhantes ao material de base para evitar a ocorrência de defeitos ou tensões na peça. Para a soldadura dos tubos de aço inoxidável foi utilizado um fio sólido W 19 12 3 L Si com um diâmetro de 2 mm. Este material apresenta esta denominação, devido à norma ISO 14343-A [39]. A Tabela 5 apresenta a composição química deste material. O metal depositado por este consumível apresenta uma tensão de rotura de 624 MPa.

Tabela 5 - Composição química do material de adição para o aço inoxidável

Composição química	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	V
%	0.023	0.90	1.60	0.027	0.012	18.5	11.4	2.53	0.03	0.06	0.043

3.2.2 W 42 5 W3Si1

Como referido os materiais de adição devem ter uma composição química semelhante ao metal de base para evitar a formação de defeitos. Para o aço de baixo carbono foi utilizado um fio sólido do tipo W 42 5 W3Si1 com 2,4 mm de diâmetro. Este

material apresenta esta denominação, devido à norma ISO 636 [40]. A Tabela 6 apresenta a composição química deste material. O metal depositado por este consumível apresenta uma tensão de rotura de 604 MPa.

Tabela 6 - Composição química do material de adição para o aço de baixo carbono

Composição química	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	AL	Ti+Zr
%	0.065	0.84	1.46	0.007	0.005	0.03	0.02	0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.020

4. Resultados

4.1 Qualificação de procedimentos de soldadura

Para ser feito a qualificação do procedimento para este trabalho foi necessário cumprir diversas etapas. Foram fornecidas EPSp e foram executadas QPS para os dois cordões de soldadura. Uma para um tubo do aço P265GH TC1 e outro para o tubo de aço AISI 316L. O método de soldadura usado para ambos os cordões de soldadura foi o 141, mais conhecido como TIG. As juntas foram feitas de Topo-Topo na posição H-L045.

4.1.1 Análise da EPSp

De acordo com a norma ISO 15609-1 foi feita a análise da EPSp. Na análise realizada para garantir que na EPSp estão descritas todas as informações necessárias e corretas para executar a soldadura dos corpos de prova. O processo de soldadura executado, o design da junta soldada, o material de base, o material de adição são exemplos de informação contida na EPSp [21].

4.1.2 Execução dos corpos de prova

Antes da execução dos corpos de prova é necessário haver uma preparação da junta. Como estamos perante juntas topo-topo foi feito um chanfro de 60 ° para o aço inoxidável com 2 mm de profundidade. No caso do aço de baixo carbono foi feito um chanfro com 60° também mas com uma profundidade de 3,5 mm. Após isto é feita uma limpeza na zona que vai sofrer o processo de soldadura com recurso a uma rebarbadora. Isto serve para evitar a presença de impurezas.

Para a execução da soldadura a norma ISO 15614-1 indica que o corpo de prova tem de ter no mínimo 300 mm de comprimento. Durante a soldadura dos tubos é necessário registrar as informações da sequência e parâmetros de soldadura.

Dois tubos de aço inoxidável foram soldados com um diâmetro de 114,3 mm e uma espessura de 2 mm. O corpo de prova obtido está representado na Figura 13. Dois tubos de aço de baixo carbono com um diâmetro de 168,3 mm e uma espessura de 4,5 mm e está representado na Figura 14. O comprimento total dos tubos corresponde ao que a norma requer. Os parâmetros de soldadura para os dois corpos de prova estão apresentados nas Tabelas 7 e 8. Para ser feita a soldadura no tubo de inox teve de ser usado um gás de proteção para a raiz composto por 100 % de Ar a um débito de 12 a 14 l/min. No caso do aço de baixo carbono é utilizado também uma atmosfera com 100 % de Ar mas com um débito de 14 a 16 l/min.

O soldador executou os corpos de prova segundo a EPSp e foi sempre acompanhado por um inspetor de soldadura. Caso haja alteração de alguma variável é da responsabilidade do inspetor de alterar para que todas as informações estão certas.



Figura 13 - Corpo de prova do aço inoxidável



Figura 14 - Corpo de prova para o aço de baixo carbono

Tabela 7 - Parâmetros de soldadura para o aço inoxidável

Passe	Processo	Ø Material de adição (mm)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Tipo de corrente/ Polaridade	Tempo (s)	Entrega térmica (kJ/mm)
1	141	2,0	60-90	9-12	DC/-	469	1,71 - 3,42

Tabela 8 - Parâmetros de soldadura para o aço de baixo carbono

Passo	Processo	Ø Material de adição (mm)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Tipo de corrente	Tempo (s)	Entrega térmica (kJ/mm)
1	141	2,4	60-80	9-10	DCEP	889	2,08 - 3,10
2	141	2,4	80-100	10-12	DCEP	1531	5,6 - 8,4

4.1.3 Análise e testagem dos provetes

Após a execução dos corpos de prova e retirado os valores necessários, segundo a norma ISO 15614-1 será necessário executar ensaios não destrutivos e destrutivos. Estes servem para obter garantia de que a junta que foi executada segue a EPS certificada [20]. Os ensaios aplicados apresentam os valores das propriedades mecânicas e verificam a presença de defeitos. Estes resultados são avaliados segundo a norma para que possa ser certificada a QPS e por fim, ser feito o RQPS (relatório final).

Segundo a norma, para que possa ser obtida a certificação de nível dois, são necessários executar ensaios específicos. Os ensaios requeridos são: ensaio de inspeção visual, um ensaio que verifique a presença fissuras na superfície da junta radiografia ou ultrassons, ensaio de tração, ensaio de dobragem, ensaio de impacto, ensaio de durezas e uma macroscopia.

Os ensaios escolhidos foram aplicados consoante a disponibilidade da empresa e com o auxílio do CATIM que permitiu a execução dos provetes e de ensaios destrutivos nas suas instalações. Nos dois tubos foram aplicados os seguintes ensaios não destrutivos: líquidos penetrantes, inspeção visual, radiografia e macrografia.

Para serem executados os ensaios destrutivos é necessário a maquinação de provetes. Estes provetes têm de ser retirados de zonas específicas da junta soldada. A Figura 15, retirada da norma, demonstra as zonas onde podem ser retirados os provetes

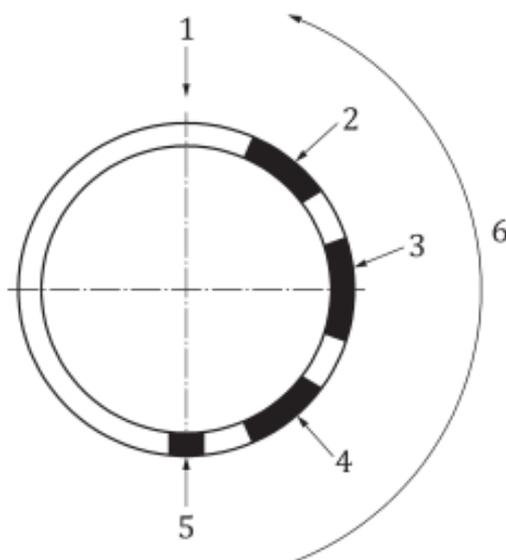


Figura 15 - Zona para obtenção de provetes segunda a norma [21]

para os respetivos ensaios. A zona 1 representa o fim do cordão de soldadura e a 5 (zona oposta) o início. Da zona 5 são retirados os provetes para os ensaios de durezas e macrografia. Nas zonas 4 e 2 são retirados os ensaios de dobragem e de tração. Por fim, a zona 3 temos os provetes para os ensaios de impacto.

Devido à falta de material para a produção de provetes não foi possível cumprir todos os ensaios destrutivos requeridos pela norma. Devido a este problema não foi possível certificar a QPS segundo a norma. Como não é possível certificar a QPS também não vai ser possível certificar a EPS. Para o tubo de aço inoxidável foi executado um ensaio de dobragem, três ensaios de tração, uma macroscopia e um ensaio de durezas. O tubo de aço de baixo carbono foi submetido a ensaios de impacto, três ensaios de tração, dois ensaios de dobragem, uma macroscopia e um ensaio de durezas.

4.1.3.1 Inspeção visual

O ensaio de inspeção visual foi aplicado em toda a extensão dos cordões de soldadura dos dois corpos de prova após a soldadura. Em ambos os tubos não foram visualizados defeitos superficiais como fissuras poros respingos. Ao não serem registados estes defeitos as amostras estão em conformidade com os critérios de aceitação da norma ISO 15614-1 [20].

4.1.3.2 Ensaio de líquidos penetrantes

Como foi referido no capítulo da revisão bibliográfica foram utilizados os consumíveis representados na Figura 16 e aplicados segundo a norma ISO 3452-1:2013 [28]. Este ensaio foi aplicado após ser obtida a validação do ensaio de inspeção visual, segunda a respetiva norma.

Em primeiro lugar, foi aplicado um solvente com o objetivo de remover alguma gordura ou oxido que possa estar presente. Com recurso a um pano esse solvente é removido e em seguida é aplicado o penetrante em todo o cordão. O tempo de penetração



Figura 16 - Consumíveis usados no ensaio de líquidos penetrantes

aplicado foi de 15 minutos. Após este tempo é removido o excesso de penetrante e aplicado de forma uniforme um revelador. Após 10 minutos temos os resultados observados nas Figuras 17 e 18. Não foram verificadas descontinuidades em nenhum dos dois cordões de soldadura o que significa que temos resultados válidos segundo a norma de qualificação ISO 15614-1 [20].



Figura 17 - Corpo de prova do aço inoxidável após o ensaio de líquidos penetrantes

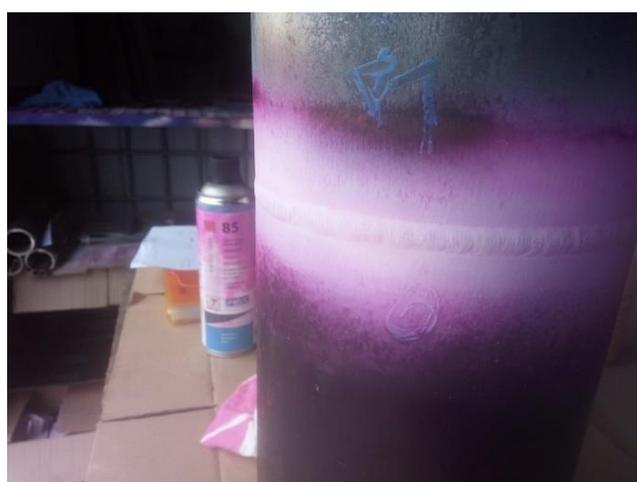


Figura 18 - Corpo de prova do aço carbono após o ensaio de líquidos penetrantes

4.1.3.3 Radiografia

A Figura 19 apresenta o *setup* para os de radiografia realizados. Estes foram feitos segundo a norma ISO 17636-1 [31]. A Figura 20 apresenta o resultado deste ensaio para o aço de baixo carbono. Por sua vez a Figura 21 apresenta uma imagem do filme obtido do ensaio para o tubo de aço inoxidável. Como pode ser verificado, não foram detetados defeitos em nenhum dos tubos o que significa que está dentro dos parâmetros de aceitação da norma de certificação.



Figura 19 - Setup para a Radiografia do tubo de carbono

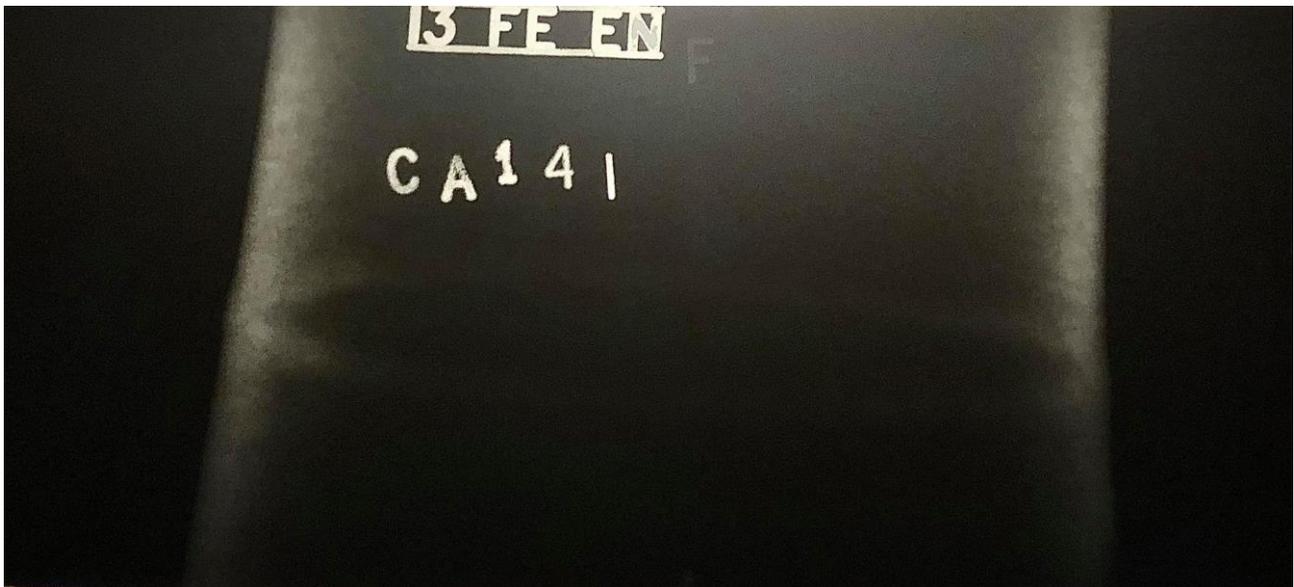


Figura 21 - Filme do aço inoxidável

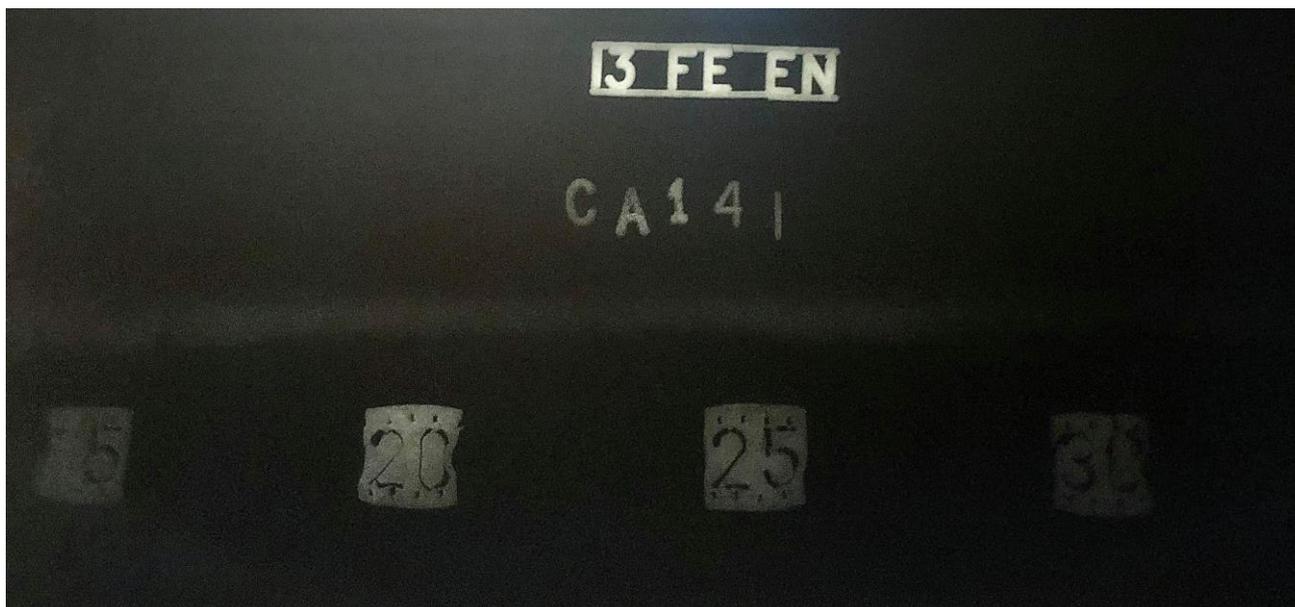


Figura 20 - Filme do aço de baixo carbono

4.1.3.4 Ensaio de tração

O provete para este ensaio foi maquinado consoante a norma ISO 4136 e retirado da zona especificada, como foi indicado anteriormente [34]. Todos os provetes apresentam no centro, o cordão de soldadura para que seja possível, avaliar o comportamento deste ao ensaio de tração.

Segundo a norma 15614-1 os valores obtidos têm de ser correspondentes ao estado de fornecimento do material de base [20]. Com isto, é possível afirmar que, quando submetido a forças de tração, o cordão reage como o metal de base e não é uma zona mais propícia a fissurar. Os resultados obtidos dos ensaios para os tubos estão representados nas Tabelas 9 e 10.

A norma do fornecedor para os valores de resistência à tração para o aço inoxidável seria entre 490 - 760 N/mm² e para o aço de baixo carbono entre 410 - 570 N/mm². Todos os valores obtidos nos ensaios correspondem a esse intervalo de valores. Isto significa que, neste ensaio todos os provetes estão dentro dos padrões de aceitação da norma correspondente. Os boletins dos ensaios realizados estão presentes no Anexo I.

Tabela 9 - Valores obtidos no ensaio de tração ao aço inoxidável

Provete 1	Provete 2	Provete 3
607	612	615

Tabela 10 - Valores obtidos no ensaio de tração ao aço de baixo carbono

Provete 1	Provete 2
490	487

4.1.3.5 Ensaio de dobragem

Os provetes utilizados para este ensaio foram maquinados de forma ao cordão de soldadura se encontrar no centro deste. A norma refere que os ensaios de dobragem devem ser feitos à raiz e à face da junta. Neste ensaio é verificado a presença de fissura quando o provete deformado pelo mandril atinge um ângulo de 180°. Para calcular a distância entre rolos e o diâmetro do mandril foi feito o cálculo segundo a norma ISO 5173-2009 [35]. Após os cálculos foram obtidos os valores de 20 mm de diâmetro para o mandril e de 30 mm de distância ente rolos. Estes valores são iguais para os ensaios de dobragem no aço de baixo carbono e inoxidável.

Como foi referido anteriormente devido à falta de material não foi possível maquinar provetes suficientes para que possa ser feita validação segundo a norma. Para o aço inoxidável foi feito um ensaio para avaliar a raiz. Para o aço de baixo carbono um ensaio para avaliar a raiz e outro para a face. Nos resultados dos ensaios efetuados, não foram verificadas fissuras pelo que o ensaio se mostrou em conformidade com o critério de aceitação da norma ISO 15614-1 [20]. Estão apresentados na Tabela 11 os resultados do ensaio. Os boletins dos ensaios realizados estão presentes no Anexo II.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de dobragem

Provete	Espessura (mm)	Largura (mm)	Diâmetro Do Mandril (mm)	Ang. De dobragem (graus)	Obser. Da parte convexa
Aço de baixo carbono Face	4.8	10.4	20.0	180	Sem fissuras
Aço de baixo carbono raiz	4.8	12.3	20.0	180	Sem fissuras
Aço inox Raiz	1.9	7.5	20.0	180	Sem fissuras

4.1.3.6 Ensaio de impacto

Os provetes para o ensaio de impacto segundo a norma são retirados de zonas específicas do tubo, como já foi indicado anteriormente, mas são avaliadas diferentes zonas da soldadura. Foram feitos três provetes para três zonas de soldadura diferentes

segundo a norma ISO 9016 [36]. Estas zonas foram a ZF (Figura 22 a), ZTA (Figura 22 c) e a zona de fronteira entre o material de adição e o de base (Figura 22 b). O esquema destas zonas está apresentado na Figura 23.

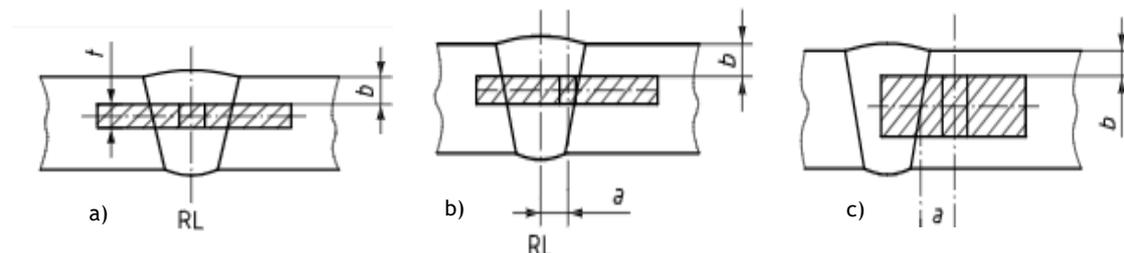


Figura 22 - Diferentes zonas avaliadas para o ensaio de impacto. a) ZF; b) zona de fronteira entre o material de adição e o de base; c) ZTA [36]

Antes de ser executado o ensaio de choque, é necessário verificar com rigor as dimensões dos provetes com recurso a um equipamento adequado. Em seguida, é testada a rugosidade da superfície para garantir que esta abaixo de 5 μm .

Os resultados obtidos estão presentes na Tabela 12. Segundo a norma do fornecedor do material o valor mínimo para o ensaio de impacto seria de 40 J a 0° C. O ensaio foi executado à temperatura ambiente já que a norma não requeria temperatura específica.

Após análise dos resultados verificou-se que nenhum dos locais testados apresenta o valor superior ao fornecido pela norma. Analisando também os valores entre as diferentes zonas, apesar da diferença não ser elevada, foi possível observar que à medida que nos afastamos do centro da soldadura os valores diminuem. Os boletins dos ensaios realizados estão presentes no Anexo III.

Tabela 12 - Resultados obtidos para o ensaio de impacto

ensaio número:	Zona soldada	Zona de ligação	ZTA
1	30,8	25,7	24,2
2	29,3	25,3	24,6
3	28,5	26,8	24,2

4.1.3.7 Ensaio de dureza

A Tabela 13 e 14 apresentam os valores obtidos de durezas dos respetivos aços. E a Figura 23 esquematiza a zona onde foram retirados os valores de dureza.

Como os materiais usados estão incluídos nos grupos 1.1 (aço de baixo carbono) e 8.1 (aço inoxidável) segundo a norma ISO 15614-1 não é necessário realizar este ensaio para obter certificação, pois não está a ser feita uma soldadura com materiais dissimilares [20]. Para todos os efeitos foi realizado como complemento.

Tabela 13 - Resultado dos ensaios de dureza para o aço inoxidável.

zona	MB 1			ZTA1			ZF			ZTA 2			MB 2		
indentação nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
aço inoxidável	162	171	162	169	168	170	159	157	163	190	186	173	164	156	153
Média	165			169			170			183			158		

Tabela 84 - Resultado dos ensaios de dureza para o aço de baixo carbono.

zona	MB1			ZTA1			ZF			ZTA 2			MB 2		
indentação nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
aço de baixo carbono	159	162	160	164	169	197	178	187	206	194	171	167	164	157	153
média	160			177			190			177			158		



Figura 23 - Esquema das zonas de indentação do ensaio de dureza nas amostras

4.1.3.8 Macroscopia

Neste ensaio a amostra foi retirada da zona especificada pela norma e foi preparado segundo a norma ISO 17639:2013 [38]. Devem estar presentes nas imagens a linha de fusão, a ZTA e o metal de base, segundo a norma ISO 15614-1 [20].

A amostra do aço inoxidável foi submetida a uma montagem a frio com recurso a resina epóxi. Após isto foi feito um desbaste com recurso a uma sequência de lixas de 180, 320, 400, 600, 800 mesh. Foi feito também um polimento em panos e com recurso a suspensão de diamante de 6 e 1 µm, pela respetiva ordem. Para o aço de baixo carbono o procedimento foi o mesmo, mas não houve necessidade de montar a amostra.

Foi feito um ataque para revelar a macroestrutura das amostras. O ataque utilizado para revelar a macroestrutura para o aço inoxidável foi o reagente de Vilella 45 ml de glicerol, 15 mL de ácido nítrico 65% e ácido clorídrico. Para o aço de baixo carbono foi usado o Picral, 50 mL de etanol e 1,5 g de ácido pícrico. Por fim, com recurso a uma lupa, foram retiradas as imagens da macroestrutura dos dois corpos de prova.

Com a Figura 24 é possível observar a macroscopia do aço inoxidável. É possível observar as diferentes zonas da junta e não se observam qualquer tipo de defeitos ou discontinuidades. Assim o critério de aceitação requerido pela norma foi correspondido.

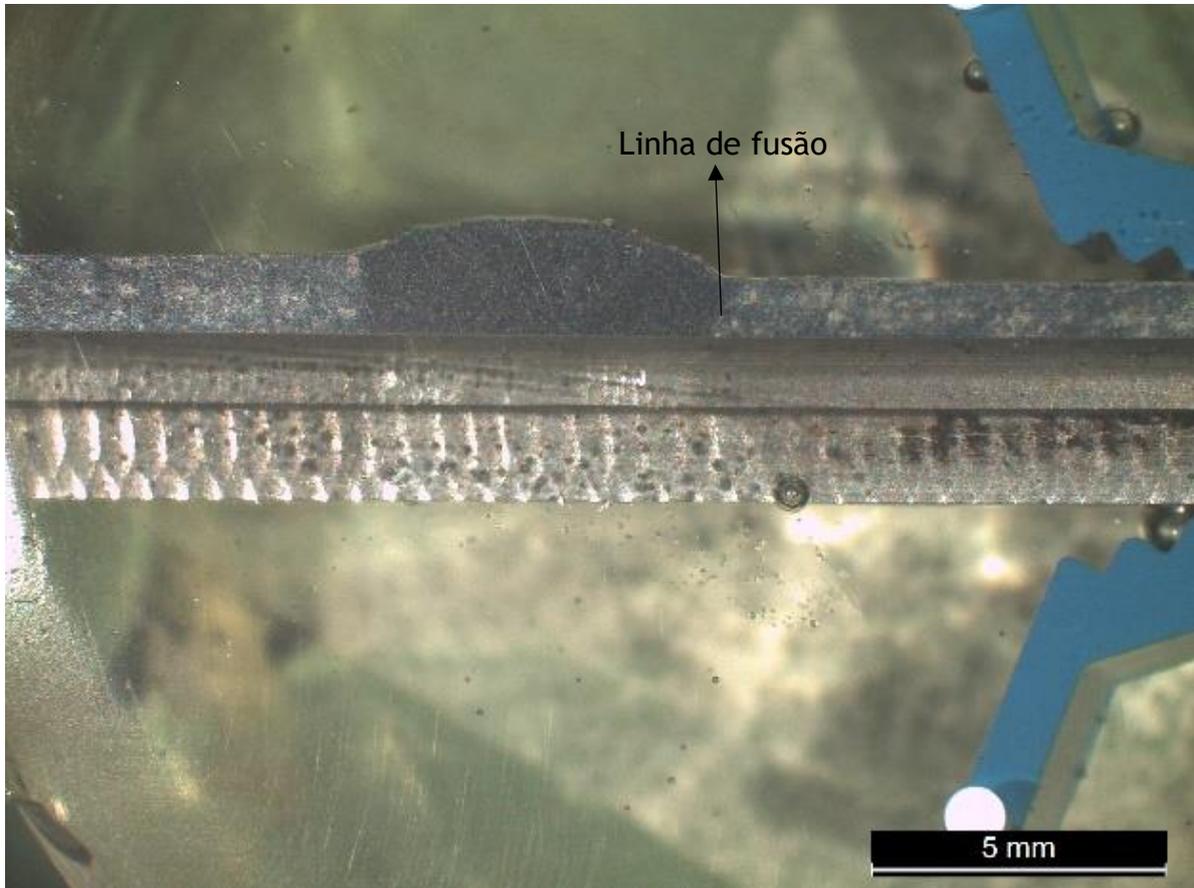


Figura 24 - Macrografia para o aço inoxidável

Na Figura 25 temos a macrografia para o tubo de aço de baixo carbono. Nesta imagem foi possível perceber que não existem defeitos ou descontinuidades. Foi também possível distinguir o número de passes executados durante a soldadura, neste caso dois. Está dentro dos critérios da aceitação requeridos pela norma.

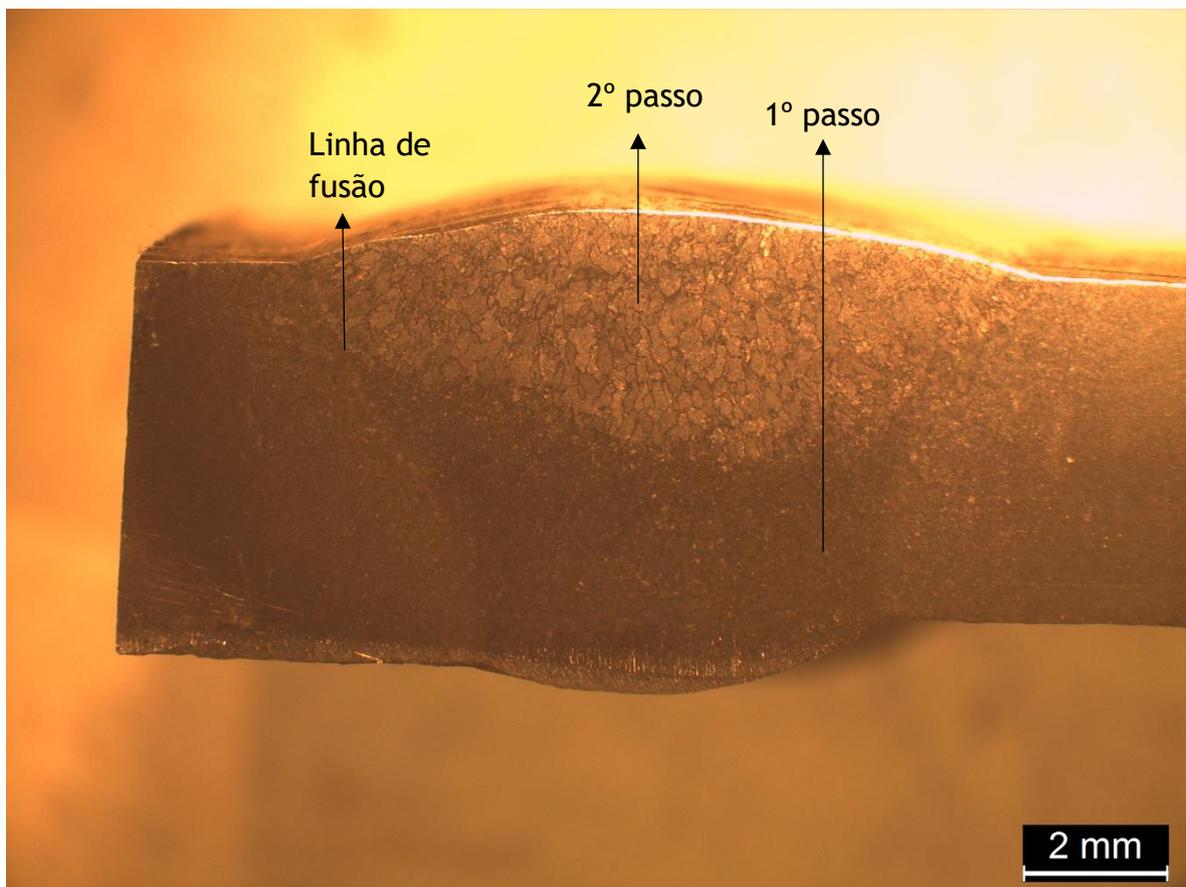


Figura 25 - Macrografia para o aço de baixo carbono

4.1.4 Relatório da Qualificação do Procedimento de Soldadura

Após a execução dos ensaios e verificação que os valores obtidos correspondem aos requisitados pela norma ou pelo cliente, a QPS pode ser certificada e, portanto, produzido o documento final desta qualificação (RQPS). Caso ambos os corpos de prova sejam validados ficam aprovadas as duas EPS. O aço inoxidável seria qualificado para espessuras entre 1,0 e 4,0 mm e com raios até 57,15 mm para um processo de soldadura TIG em todas as posições, com direção de soldadura ascendente. O aço de baixo carbono seria qualificado para espessuras entre 3,0 e 9,0 mm e raio máximo de 84,15 mm para um processo de soldadura TIG em todas as posições, com direção de soldadura ascendente.

Para os tubos deste trabalho não foi possível emitir certificações, apesar de todos os resultados obtidos corresponderem aos solicitados pela norma. Isto deve-se à ausência

de material suficiente para produção dos provetes necessários. Uma vez que não foram executados todos os ensaios requeridos pela norma o procedimento não foi validado.

5. Análise microestrutural

Com o fim da certificação, torna-se interessante avaliar se os corpos de prova, com os parâmetros de soldadura usados, teriam um bom desempenho num sistema de pressão. Consoante o tipo de aço, poderão estar presentes defeitos ou problemas provenientes do processo de soldadura ao qual foram submetidos.

As amostras obtidas para os ensaios de dureza executados para a QPS foram reutilizadas para que possa ser feita a análise microestrutural dos corpos de prova.

A preparação metalográfica foi feita com recurso a uma sequência de lixas de a uma sequência de lixas SiC de 180, 320, 400, 600, 800 mesh. Foi feito um polimento em panos e com recurso a suspensão de diamante de 6 e 1 μm , pela respetiva ordem. O ataque utilizado para o aço com baixo carbono foi o Picral e para o aço inoxidável foi utilizado o reagente de *Villela*.

Em relação ao aço AISI 316L os problemas que podem impedir a sua aplicação, após a soldadura, são a percentagem de ferrite- δ superior a 10% e a presença de zonas sensibilizadas. Para que esse estudo seja feito foi feita quantificação de ferrite- δ e serão procurados carbonetos de crómio com recurso ao EDS. Também foi feita a análise da zona de fratura resultante do ensaio de tração e os dos resultados de dureza como complemento.

Quando é aplicado um processo de soldadura no aço P265GH TC1 este fica propício ao fenómeno de fissuração a frio. Para avaliar a suscetibilidade a este fenómeno será feita uma análise microestrutural. Também foi feita a análise da zona de fratura resultante do ensaio de tração e dos resultados de dureza como complemento.

5.1 Discussão de resultados

5.1.1 AISI 316L

5.1.1.1 Microscópio ótico

Com recurso ao microscópio ótico foram retiradas as imagens da microestrutura do aço inoxidável soldado. As imagens foram observadas com diferentes ampliações ao microscópio ótico *LEICA* com *software LAS 4.4*.

Em relação à zona não afetada pela soldadura temos uma microestrutura com austenítica (seta azul) com ferrite (seta preta). A Figura 26 é possível observar esta microestrutura. Nesta imagem também é possível observar a direção de laminagem proveniente do processo de produção dos tubos.

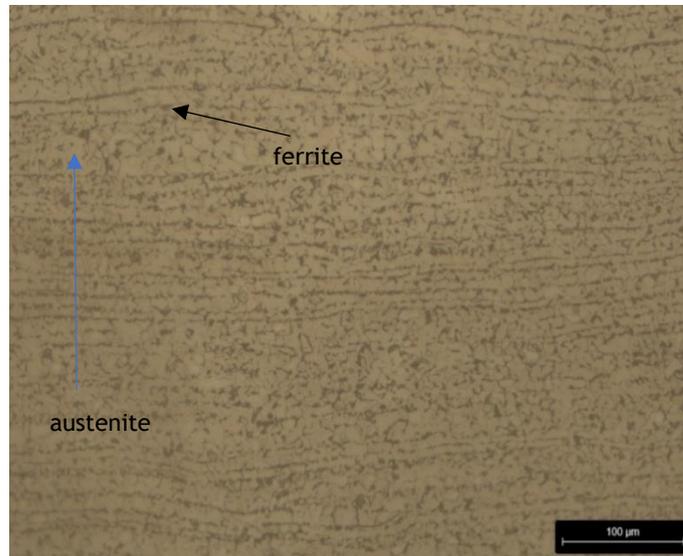


Figura 26 - Microestrutura da zona não afetada do aço inoxidável.

Na ZTA é observada uma microestrutura com os mesmos constituintes que a zona não afetada pela soldadura, mas com características diferentes. A temperatura na ZTA foi elevada o suficiente para provocar fenómenos de recristalização e crescimento de grão ferrítico. Com a Figura 27 é possível perceber que o grão ferrítico deixou de apresentar direção de laminagem e perdeu o alongamento tornando-se equiaxiais. Também se verifica um crescente gradiente de tamanho de grão ferrítico em direção à ZF.

Ocorre um aumento de tamanho de grão da ZTA devido às elevadas temperaturas à qual foi exposta. A combinação de tempo e temperatura foram suficientemente elevados para provocar a recristalização do grão de ferrite (perdendo a deformação proveniente da laminagem) e para provocar o seu crescimento. Quanto mais alta essa temperatura maior o tamanho de grão, daí existir o gradiente verificado na Figura 28. Com o aumento do tamanho de grão é expectável o amaciamento desta zona em relação à zona não afetada pela soldadura [16].



Figura 27 - Gradiente de tamanho de grão na ZTA do aço inoxidável

Na ZF temos uma microestrutura austenítica (seta azul) com ferrite- δ (seta preta). A microestrutura da ZF está apresentada na Figura 28. Com a imagem foi possível perceber que nesta zona ocorreu uma solidificação do tipo F [13]. A presença de ferrite- δ é um fator preponderante para identificar o tipo de solidificação que ocorreu durante o processo de soldadura.



Figura 28 - Microestrutura da ZF do aço inoxidável.

5.1.1.2 Quantificação da ferrite- δ

Através da Figura 28 é possível identificar ferrite- δ na microestrutura da ZF. Posto isto, a presença de ferrite- δ prejudica o desempenho da junta soldada. O desempenho é prejudicado porque este defeito torna as zonas afetadas pela soldadura propícias a fenómenos de corrosão. Nos aços inoxidáveis a presença de ferrite- δ deve estar entre os valores de 5% a 10% para haver otimização das propriedades [13].

Através do diagrama de Schaeffler é possível quantificar a percentagem de ferrite- δ presente na zona de fusão da junta soldada. Esta estimativa é feita com recurso aos valores de crómio e níquel equivalente. Estas equações estão apresentadas nas Equações 2 e 3. Os valores para o aço utilizado neste caso são 19,5 para a Equação 2 e 11,2 para o níquel equivalente. Pelo diagrama é esperado uma microestrutura com valores próximos de 5% de ferrite- δ . Com estes valores de ferrite o aço torna-se ideal para combater os fenómenos de corrosão, e por isso adequado para ser aplicado em tubagens de sistemas de pressão. A Figura 29 demonstra como foi realizada a quantificação.

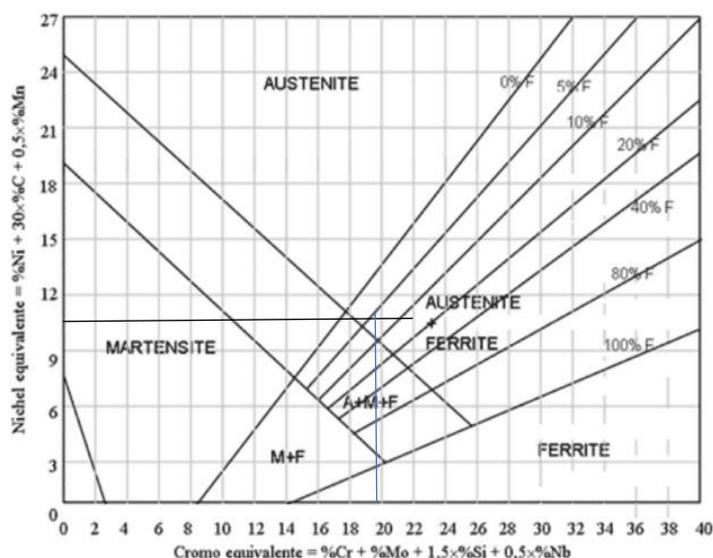


Figura 29 - Quantificação da ferrite- δ através do diagrama de Schaeffler

Em seguida, com recurso ao *software Leica Application Suite - Phase Expert*, foi possível fazer uma quantificação de diversos campos com ampliação de 200x. O valor obtido nessa quantificação foi $11,2 \pm 1\%$. O valor obtido foi um pouco discrepante do valor esperado provavelmente devido à entrega térmica do processo.

5.1.1.3 Ensaio de dureza

Os resultados dos ensaios de dureza do aço AISI 316L estão apresentados na Tabela 13. Este ensaio permite avaliar a presença de concentrações de tensão na junta. No aço

inoxidável a zona que regista maiores valores de dureza é a ZTA. Dentro desta zona o maior valor registado é de 190 HV próxima da fronteira entre a ZTA e ZF.

Na ZTA é registado um aumento de tamanho de grão como a Figura 27 demonstra. Teoricamente, o aumento de grão provocaria um amaciamento. Este efeito não corrobora os valores obtidos no ensaio. Uma das causas para esta situação pode ser a discrepância de tamanho de grão entre a austenite e a ferrite. As temperaturas atingidas nesta zona provocam a recristalização do grão ferrítico, mas não a do grão austenítico. Com isto o efeito do aumento do tamanho de grão ferrítico provoca tensões e assim maiores valores de dureza são obtidos em relação a outras zonas.

5.1.1.4 Presença de carbonetos de crómio

Com os altos valores de temperatura e tempos de arrefecimentos longos permitem a difusão de elementos e por isso é expectável que nas zonas afetadas termicamente pela soldura ocorram a formação precipitados. Caso esses precipitados sejam constituídos por crómio as zonas adjacentes perdem resistência à corrosão. Um aço inoxidável com zonas sensibilizadas é mais propício a sofrer fenómenos de corrosão [4].

Após execução da análise EDS não foram verificados carbonetos de crómio nas zonas afetadas termicamente pela soldadura. Foram encontrados vários constituintes que apresentam na sua composição química elevados conteúdos de oxigénio, manganês e crómio. A Tabela 15 apresenta um exemplo da composição química de um precipitado analisado. A Figura 30 apresenta uma imagem de um desses precipitados.

Na composição química obtida por EDS verifica-se um elevado teor de oxigénio. Podemos inferir que se trata de um óxido. Com uma nova pesquisa bibliográfica pode ser concluído que se tratava de uma inclusão não metálica. Estas inclusões podem ser provenientes do material ou então da reação da superfície com a atmosfera. Neste caso as inclusões ocorrem devido à diminuição da solubilidade do oxigénio durante o arrefecimento. Com o EDS foi possível perceber que o oxigénio se ligou ao manganês e ao crómio. Isto significa que nas zonas adjacentes a estas inclusões ocorre um

empobrecimento destes compostos e por isso o metal perde capacidade de resposta à corrosão.

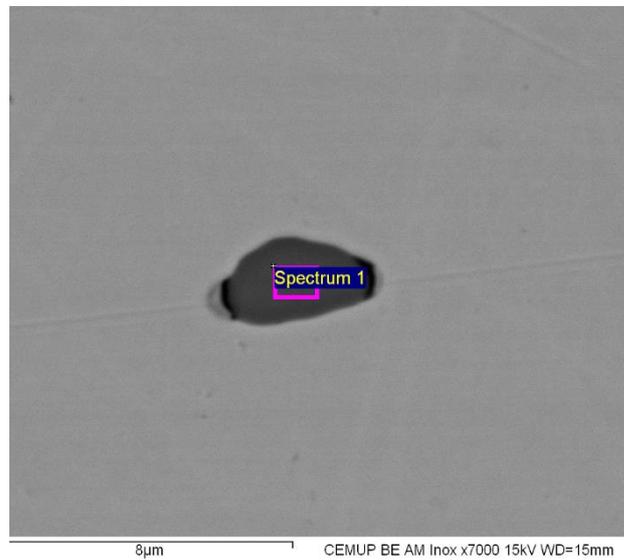


Figura 30 - Óxido avaliado por EDS

Tabela 95 - Percentagem dos elementos de liga do oxido avaliado por EDS

Elementos	Peso %
C	2,01
O	27,72
Mg	2,84
Al	7,92
Si	9,
Ca	5,74
Ti	1,57
Cr	9,41
Mn	23.51
Fe	6,15
Ni	1,77
Total	100.00

5.1.1.5 Análise da fratura dos provetes de tração

Através da inspeção visual é descrever o tipo de fratura ocorrida. A zona de fratura apresenta deformação plástica muito reduzida o que significa que é uma fratura frágil. A presença de tensões provenientes das transformações causadas pelo processo de soldadura, atuam como facilitadores para a fissuração e por isso tornam a zona propícia a fissurar em relação ao MB e ZF.

Um dos provetes de tração foi observado ao microscópio, para possa ser comentada a superfície de fratura com maior pormenor. A superfície da amostra continha presente algum tipo de contaminação impedindo a correta observação desta. As imagens obtidas estão apresentadas nas Figura 31 e 32. Devido a este problema torna-se impossível poder inferir conclusões com certeza.

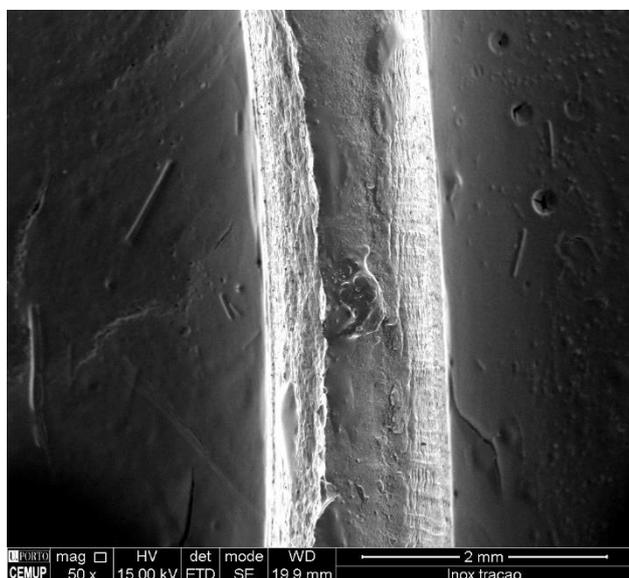


Figura 31 - Imagem SEM do provete de tração do aço inoxidável

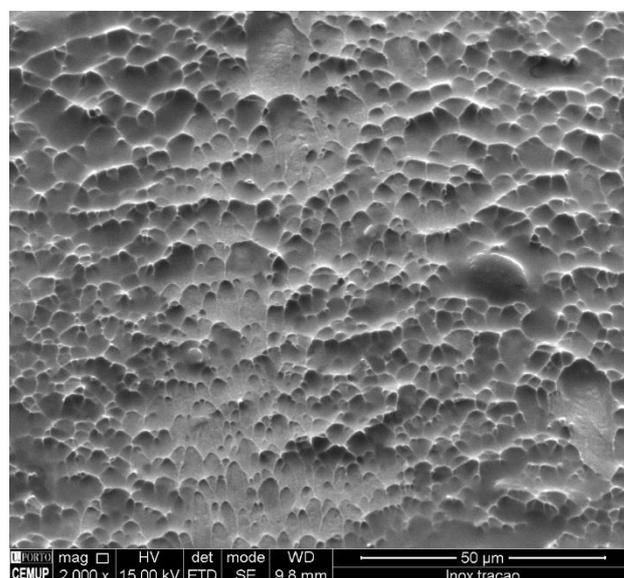


Figura 32 - Imagem SEM do provete de tração do aço inoxidável

5.1.2 P265GH TC1

5.1.2.1 Microscópio ótico

Com recurso ao microscópio ótico foram retiradas as imagens da microestrutura do aço baixa soldado. As imagens foram observadas com diferentes ampliações ao microscópio ótico LEICA com software LAS 4.4.

Na Figura 33 podemos observar uma microestrutura com matriz ferrítica (seta azul) e perlite (seta preta). Esta microestrutura está em conformidade com a esperada pelo diagrama de Fe-C para a composição do aço. Esta zona corresponde à zona que não é afetado pelo processo de soldadura e ainda é possível observar a direção da laminagem do aço.

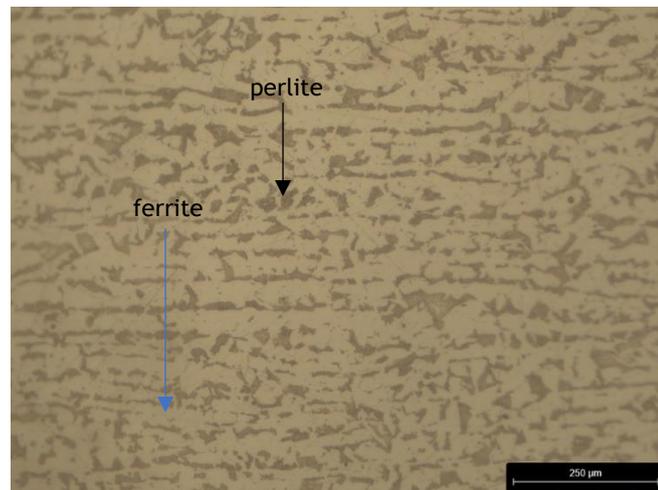


Figura 33 - Microestrutura da zona não afetada do aço de baixo carbono.

Neste processo de soldadura foram aplicados dois passes. Ao ser aplicado o segundo passe o primeiro sofre alterações microestruturais. Os grãos do primeiro passe são afetados pela temperatura do passe seguinte, e assim sofrem um processo de revenido. Os grãos do primeiro passe sofrem processos de recristalização e passam a ser mais refinados do que os presentes na zona do segundo passe. A temperatura permitiu a recristalização e o tempo foi curto pelo que o grão se tornou refinado. Com a Figura 34 é possível observar a diferença entre o tamanho de grão dos passes e também se nota o tamanho de grão refinado no primeiro passe.

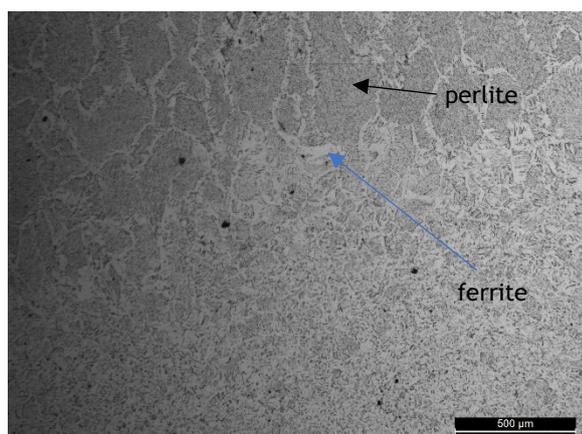


Figura 34 - Microestrutura da ZF e diferença de tamanho de grão entre passes

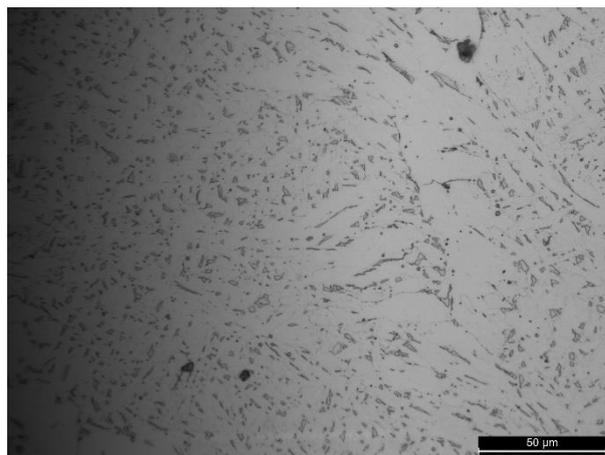


Figura 35 - Ampliação da microestrutura do 2º passe

Teoricamente na ZTA e ZF, para o aço de baixo carbono, podem estar presentes bainite, martensite ou perlite [18]. A Figura 34 apresenta a microestrutura da ZF sendo para o segundo passe estamos perante ferrite (seta azul) e perlite (seta preta). A Figura 35 representa uma zona ampliação desta pelo que a microestrutura aparenta ser perlítica. Como o primeiro passe sofreu fenómenos de recristalização temos uma diferença entre as microestruturas dos diferentes passes. Essa diferença pode induzir tensões na peça sendo prejudicial para o desempenho da junta. Na Figura 34 podemos observar um microestrutura ferrítica com perlite na zona do primeiro passe (zona inferior da imagem) temos uma microestrutura ferrítica (zona mais clara) e perlite (zona mais escura). As temperaturas e tempos de exposição do primeiro passe aquando da execução do segundo permitem o refinamento do tamanho de grão perlítico.

Na ZTA é possível observar na microestrutura ferrite (seta azul), perlite (seta preta), representado na Figura 36. A ZTA é exposta a temperaturas próximas da de fusão, o que leva a ocorrência de transformações na microestrutura. Na Figura 37 à medida que nos aproximamos da ZF ocorre um progressivo aumento de tamanho de grão. Isto ocorre devido ao gradiente de temperatura que esta zona é exposta. Esse gradiente provoca tempos de arrefecimento diferentes na ZTA provocando alterações no tamanho de grão [18].

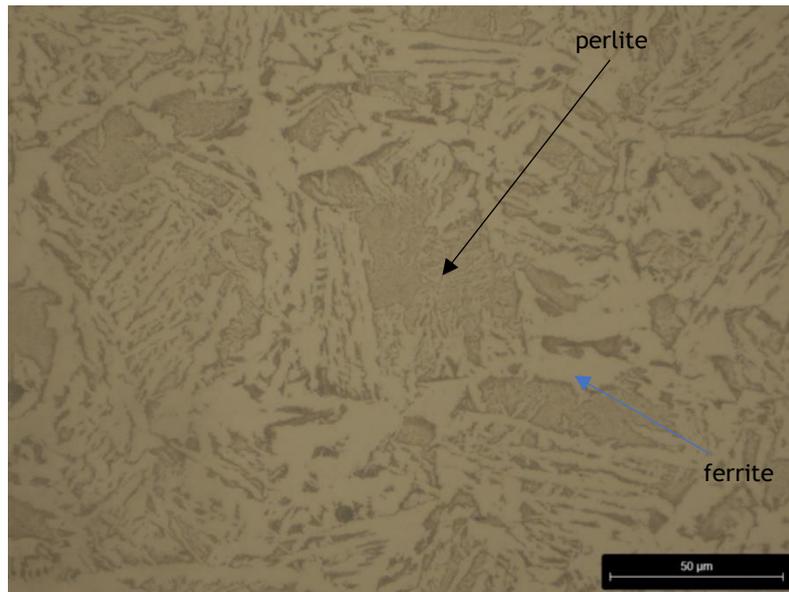


Figura 36 - Microestrutura da ZTA do aço de baixo carbono.

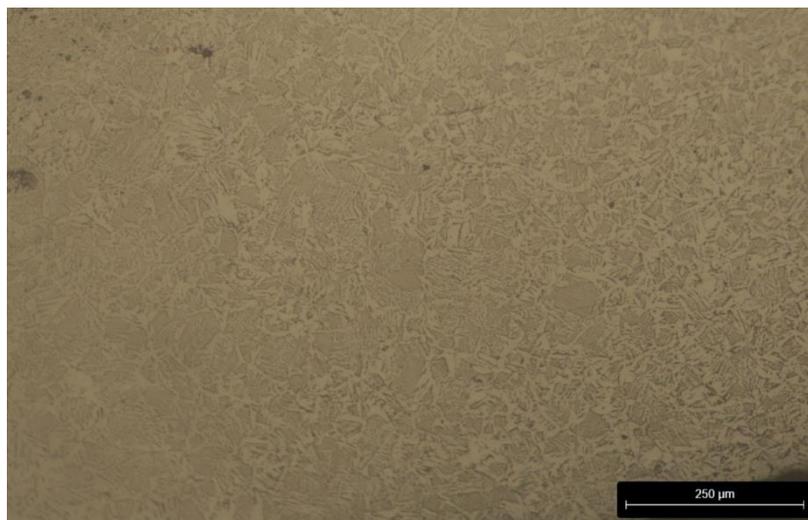


Figura 37 - Gradiente de tamanho de grão.

Ao ser aplicado um processo de soldadura num aço de baixo carbono este está suscetível à fissuração a frio que pode ocorrer num espaço de horas ou dias. Para que este fenómeno ocorra é necessário estar presente na microestrutura ao mesmo tempo três fatores: inclusões de hidrogénio, tensões residuais e uma microestrutura frágil (bainite ou martensite). Através da observação as imagens não foram verificadas inclusões de hidrogénio o que significa que um dos fatores não está presente. Isto significa que este tubo não está suscetível à fissuração a frio.

5.1.2.2 Ensaio de durezas

A Tabela 14 apresenta os resultados do ensaio de dureza realizado no aço, onde os maiores valores de dureza estão na ZF. Nesta zona existe uma elevada diferença de tamanho de grão entre os passes como é observado na Figura 34. O ensaio de dureza na ZF foi realizado na zona entre passes como a Figura 23 apresenta. Com isto podemos deduzir que a discrepância de valores de dureza advém da diferença de tamanho de grão.

5.1.2.3 Análise SEM da fratura dos provetes de tração

As Figuras 38 e 39 apresentam as imagens obtidas através de SEM para os provetes de aço de baixo carbono tracionados. Na Figura 39 temos a zona de fratura com maior ampliação e são observadas diversas cavidades. A presença das cavidades com profundidade é característica de uma fratura dúctil. É possível inferir esta afirmação, mas é preciso realçar que amostra observada também apresentava vestígios de contaminações, o que pode influenciar as conclusões retiradas.

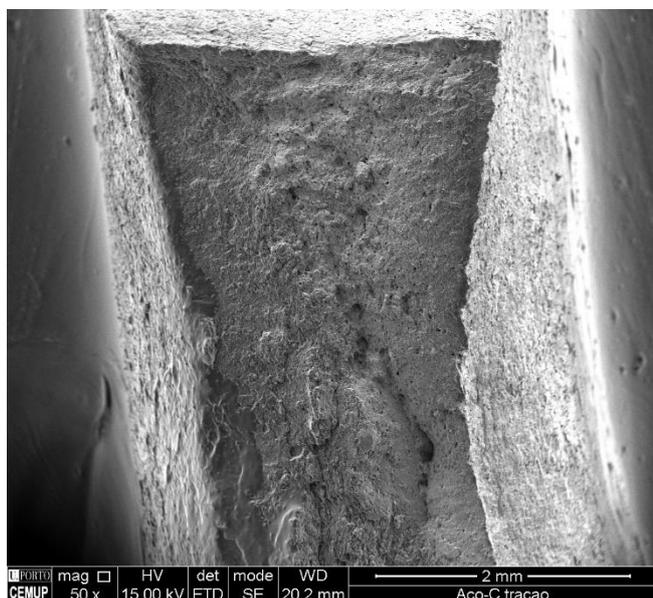


Figura 38 - Imagem SEM da fratura do ensaio de tração para o aço de baixo carbono

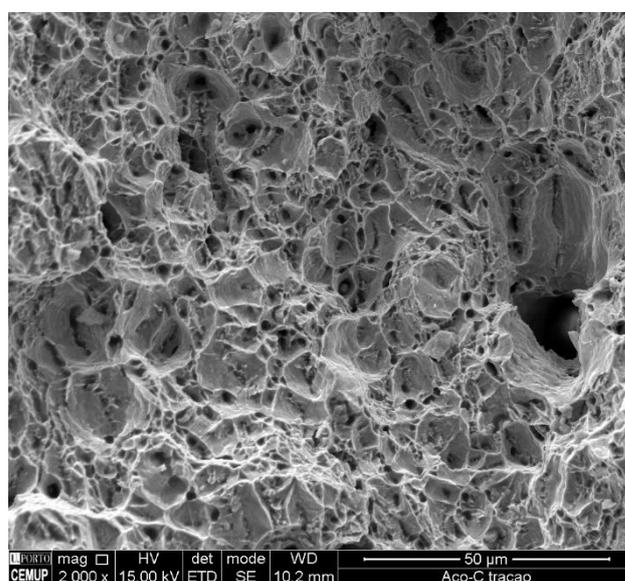


Figura 39 - Imagem SEM da fratura do ensaio de tração para o aço de baixo carbono com maior ampliação

6. Conclusões

Com este trabalho houve a tentativa de emitir duas RQPS de tubos dos aços AISI 316L e P265 TC1 recorrendo a ED e END estabelecidos pela norma de certificação. Em seguida foi estudada a aplicabilidade destes tubos num sistema de pressão.

Para poder ser certificado, o EPS tem de passar por várias etapas: analisar a EPS, assistir ao procedimento de soldadura e realizar os ensaios requeridos pela norma. Todos os ensaios aplicados respeitaram a respetiva norma de aceitação e de execução.

O ensaio de inspeção visual foi realizado para verificar a existência de defeitos superficiais na junta e o de líquidos penetrantes permitiu analisar a superfície quanto à presença de fissuras. A radiografia industrial foi aplicada para verificar a presença de defeitos no interior da junta. Os resultados obtidos nestes ensaios corresponderam àqueles requeridos pelas normas adequadas para qualificar o EPS.

É necessário referir que o número de ensaios não destrutivos aplicados não corresponde ao requerido pela norma para poder ser cumprida a validação. Isto aconteceu devido à falta de material disponível para a produção de provetes, por isso não foi possível validar a EPS. Através dos resultados obtidos seria expectável que com o número de ensaios requeridos a qualificação fosse passível de ser concretizada com sucesso.

Abordando a aplicabilidade dos tubos num sistema de pressão, é sabido que para uma junta de aço inoxidável, o principal problema é o efeito da corrosão. Os fatores preponderantes para que este fenómeno ocorra é o teor de ferrite- δ e a presença de zonas sensibilizadas. O valor de ferrite- δ quantificado foi de 11 %, pelo que se pode concluir que o aço não apresenta as propriedades ideais para a sua aplicabilidade. Através da análise por EDS tentou-se detetar carbonetos de crómio na ZTA e ZF do aço inoxidável. Não foram identificados carbonetos, mas sim óxidos. Estes óxidos estão ligados ao crómio o que nos leva a concluir que a zona adjacente a estes apresenta um empobrecimento do mesmo. Com este empobrecimento a zona fica propícia fenómenos de corrosão. Este fator aliado à percentagem de ferrite- δ presente no aço permite afirmar que este tubo não seja recomendado para um sistema de pressão. Algumas das hipóteses para resolver este problema seria a aplicação de um tratamento térmico após a soldadura de alívio de tensões ou a utilização de uma entrega térmica menor durante o processo.

Para o aço de baixo carbono, o principal problema que pode ocorrer é a fissuração a frio. Para que esta ocorra é necessário que exista uma microestrutura frágil, presença de hidrogénio e de tensões residuais. Através da análise microestrutural não foi possível observar a presença de inclusões de hidrogénio (Figura 34). Como um dos fatores necessários para que ocorra a fissuração a frio não está presente o tubo não está suscetível a esse fenómeno.

6.1 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros faria sentido avaliar tubos com diferentes tempos de utilização e não apenas após o procedimento de soldadura. Desta forma era possível ter uma perspetiva melhor da resposta dos materiais aos problemas que os afetam quando aplicados num sistema de pressão. Com isto também seria possível perceber se existem outros fatores ou fenómenos que possam provocar a falha dos tubos.

Bibliografia

- [1] Stewart, Maurice e Oran T. Lewis. 2013. "1 - History and Organization of Codes". Em *Pressure Vessels Field Manual*, edição de Maurice Stewart e Oran T. Lewis, 1-48. Gulf Professional Publishing.
- [2] Mannan, Sam. "12.2 Pressure System Components". Em *Lees' Loss Prevention in the Process Industries, Volumes 1-3 - Hazard Identification, Assessment and Control (4th Edition)*: Elsevier.
- [3] Davis, J. R. "10.2.2 Stress-Corrosion Cracking of Pipe Weldments". Em *Corrosion of Weldments*: ASM International.185
- [4] Kou, Sindo. " 18 Corrosion-Resistant Materials: Stainless Steels". Em *WELDING METALLURGY*. 2 ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.,
- [5] Forde, M. 40.4.10.1 Stainless Steel. *ICE Manual of Construction Materials, Volume 2 - Metals and Alloys; Polymers; Polymer Fibre Composites in Civil Engineering; Timber; Glass; Non-Conventional Materials; Appendices*, ICE Publishing.
- [6] Lippold, J. C. and D. J. Kotecki 1. Introduction. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, John Wiley & Sons.
- [7] "Welding Handbook", 7th ed., Vol. 1, American Welding Society, Miami, FL, 1976
- [8] Kou, Sindo. "1. Fusion Welding Processes". Em *WELDING METALLURGY*. 2 ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.,
- [9] *Welding Handbook*. 2001. 9 ed. Vol. 1. *WELDING SCIENCE AND TECHNOLOGY*.
- [10] Kou, Sindo. "2. Heat Flow in Welding". Em *WELDING METALLURGY*. 2 ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.,
- [11] Weman, Klas. 2003. "*Welding processes handbook*". Hall, Abington Woodhead Publishing Ltd,.
- [12] Tsai, C. L., Park, S. C. and Cheng. 1999. "Welding Distortion of a Thin-Plate Panel Structure
- [13] Lippold, John C. e Damian J. Kotecki. "6.3.1.1 Type A: Fully Austenitic Solidification". Em *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, 151-57. John Wiley & Sons.
- [14] - ASM Handbook Committee, "*Welding, Brazing, and Soldering*", Vol. 6, 1993.
- [15] - Diogo Almeida, "Determinação Das Tensões Residuais E Deformações Resultantes Do Processo De Soldadura Tig Através Do Método Dos Elementos Finitos", FCT/UNL, 2012.
- [16] Lippold, John C. e Damian J. Kotecki. "6.3.4 Preheat and Interpass Temperature and Postweld Heat Treatment". Em *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, 164-66. John Wiley & Sons.
- [17] Lippold, John C. e Damian J. Kotecki. "6.6.2 Stress Corrosion Cracking". Em *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, 206-08. John Wiley & Sons.
- [18] Davis, J. R. "2.2.3 Geometrical Factors". Em *Corrosion of Weldments*: ASM International.

- [19] Kou, Sindo. " Transformation-Hardening Materials: Carbon and Alloy Steels". Em WELDING METALLURGY. 2 ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.,
- [20] EN ISO 15614-1:2016 "Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test – Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys".
- [21] EN ISO 15609-1:2019 "Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure specification - Part 1: Arc welding".
- [22] Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, A370, American Society for Testing and Materials, 2011.
- [23] Deepak, J. R., V. K. Bupesh Raja, D. Srikanth, H. Surendran e M. M. Nickolas. 2021. "Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study". *Materials Today: Proceedings* 44: 3732-37.
- [24] Ashok Reddy, K. 2017. "Non-Destructive Testing, Evaluation Of Stainless Steel Materials". *Materials Today: Proceedings* 4, no. 8: 7302-12.
- [25] Hellier, Charles, McGraw-Hill, 2003 "Handbook of Nondestructive Evaluation"
- [26] G.A.Georgeou,"Non-Destructive Testing and Evaluation of Metals", Em Material Science and Engineering-Vol.III
- [27] ISO 17637, "Non-destructive testing of welds – Visual testing of fusion-welded joints"
- [28] ISO 3452-1:2013 "Non-destructive testing – Penetrant testing"
- [29] ISO 17638, "Non-destructive testing of welds – Magnetic particle testing"
- [30] ISO 17640, "Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Techniques, testing levels, and assessment"
- [31] ISO 17636-1, "Non-destructive testing of welds – Radiographic testing – Part 1: X- and gamma-ray techniques with film"
- [32] ISO 17636-2, "Non-destructive testing of welds – Radiographic testing – Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors"
- [33] Walker, H.F., et al., *References*, Em *Certified Quality Inspector Handbook (3rd Edition)*. American Society for Quality (ASQ). p. 202-211.
- [34] ISO 4136:2012 "Destructive tests on welds in metallic materials – Transverse tensile test"
- [35] ISO 5173:2009 "Destructive tests on welds in metallic materials – Bend tests"
- [36] ISO 9016, "Destructive tests on welds in metallic materials – Impact tests – Test specimen location, notch orientation and examination"
- [37] ISO 9015-1:2001, "Destructive tests on welds in metallic materials - Hardness testing - Part 1: Hardness test on arc welded joints".

[38] ISO 17639:2013, “Destructive tests on welds in metallic materials - Macroscopic and microscopic examination of welds”.

[39] ISO 14343:2017, “Welding consumables – Wire electrodes, strip electrodes, wires and rods for arc welding of stainless and heat resisting steels – Classification”

[40] ISO 636:2017 “Welding consumables – Rods, wires and deposits for tungsten inert gas welding of non-alloy and fine-grain steels – Classification”

Anexos

Anexo I

BOLETIM DE ENSAIO / Testing Bulletin

CINFU - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição
R. Duílio Pereira, 600 - 41065-199 Porto Alegre

Tele: 51 (21) 4171760/60
Fax: 51 (21) 4103160

LABORATORIO DE ENSAIOS MECANICOS (Mechanical Test Laboratory) **ENSAIO DE TRAÇÃO** (Tensile Testing)

EQUIP. DE ENSAIO / Testing Apparatus: Máquina Shimadzu LM 10000N
NORMAS DE REF. / Standard Methods: DE ENSAIO / Testing: ISO 6892-1:2016 B - PROJETOS / Test Specimens: EN ISO 4136:2011
AMOSTRA / Sample: Prova de aço Carbono

REQUERENTE / Client: FEUP Nº DE CONTE. / Val Number: 502 733 276
ENDEREÇO / Address: #
DATA DE ENTR. / Entrance date: 05.08.2018 NOSSA REF. / Your Order Number: #

NOSSA REF. / Our Reference: FEUP DATA DE ENSAIO / Testing Date: 05-08-2018

Ref.º Provetes:	Aço Carbono Nº1	Incerteza (%)
a	4.97 (mm)	
b	12.02 (mm)	
d0	(mm)	
Fp 0,2%	(N)	
Fm	29296.9 (N)	
L0	(mm)	
Lu	(mm)	
A	(%)	
(A alongamento)		
Rp 0,2%	(N/mm ²)	
(Limita Elástico)		
Rm	490.4 (N/mm ²)	1,9*
(Tensão de Ruptura)		
Z	(%)	
(Elongação)		

OBSERVAÇÕES:

- 1) A entrega do provete é da responsabilidade do requerente.
- 2)
- 3) **Resultados:**
- 4) A nota do provete localizou-se no material de base.
- 5)
- 6)
- 7) Os valores associados com (*) representam as incertezas expandidas obtidas pela incerteza padrão multiplicada por um fator de expansão de k=2, que corresponde a um intervalo de confiança de 95%.
- 8)

O TÉCNICO
Responsable Técnico

Paulino Sousa

RESPONSÁVEL TÉCNICO E TECNOLÓGICO
Technological and technical services responsible

Fernando Barbosa Eng.

DATA
Date

05-08-2018

Este boletim só pode ser reproduzido na íntegra, sem autorização expressa do CINFU.
 Os resultados de análise apresentados referem-se exclusivamente aos itens ensaiados.
 O por todo de reclamações dos itens ensaiados e de três dias, desde o qual o CINFU não se responsabiliza pelo destino dos mesmos.

IND-009_V08_018
pag. 1 de 1

BOLETIM DE ENSAIO / Testing Bulletin
 CINTU - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição
 R. Delfino Fereska, 800 - 4100-199 Porto Alegre, RS
 Tel.: 51 (21) 4175760/80 Fax.: 51 (21) 41033160

LABORATORIO DE ENSAIOS MECANICOS
(Mechanical Test Laboratory)

ENSAIO DE TRAÇÃO
(Tensile Testing)

EQAP. DE ENSAIO / Testing Apparatus: Máquina Hidráulica LBI 1800/NI
 NORMAS DE REF. / Standard Methods: DE ENSAIO / Testing: ISO 6892-1:2009 B PROJETOS / Test Specimens: EN ISO 4136:2011
 AMOSTRA / Sample: Prova em aço Carbono

REQUISITANTE / Client: FEUP Nº DE CONTR. / Via Number: 502 733 276
 ENDEREÇO / Address: 9
 DATA DE ENTR. / Entrance date: 05.08.2018 VOSSA REF. / Year Order Number: 8

NOSSA REF. / Our Reference: FEUP DATA DE ENSAIO / Testing Date: 05-08-2018

Ref.º Provetes:	Aço Carbono Nº2	Incerteza (%)
a	4.91 (mm)	
b	11.58 (mm)	
d0	(mm)	
Fp 0,2%	(N)	
Fm	27687.5 (N)	
L0	(mm)	
Lu	(mm)	
A (Alongamento)	(%)	
Rp 0,2% (Limite Elástico)	(N/mm ²)	
Rm (Tensão de Ruptura)	487.0 (N/mm ²)	1,9*
Z (Estiramento)	(%)	

OBSERVAÇÕES:

- 1) A execução do provete e da responsabilidade do requerente;
- 2)
- 3) **Resultado:**
- 4) A massa do provete realizou-se no material de base;
- 5)
- 6)
- 7) Os valores assinalados com (*) representam as incertezas expandidas obtidas pela incerteza padrão multiplicada por um fator de expansão de k=2, que corresponde a um intervalo de confiança de 95%.
- 8)

Q. TÉCNICO Responsável Técnico em Paulino Seixas	RESPONSÁVEL SERVIÇOS TÉCNICOS E TECNOLÓGICOS Technological and technical services responsible Fernando Barbosa (Eng.)	DATA Date 05-08-2018
---	--	-----------------------------------

Este boletim só pode ser reproduzido na íntegra, salvo autorização expressa do CINTU.
 Os resultados de ensaio apresentados referem-se exclusivamente aos itens ensaiados.
 O por todo do recebimento dos itens ensaiados e de outra data, sendo o qual o CINTU não se responsabiliza pelo destino dos mesmos.

INSUR LAB 018
pag. 1 de 1

BOLETIM DE ENSAIO / Testing Bulletin
 CNFU - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição Tel: 351 023 6175/6098
 R. Delfim Ferreira, 800 - 4100-199 Porto Fax: 351 023 6103160

LABORATORIO DE ENSAIOS MECANICOS **ENSAIO DE TRAÇÃO**
 (Mechanical Test Laboratory) (Tensile Testing)

EQUIP. DE ENSAIO / Testing Apparatus: Máquina Hidráulica LBI 1000kN
 NORMAS DE REF/Standard Methods: DE ENSAIO/Testing: ISO 6893-1:2014 B PROJETOS/Test Specimens: EN ISO 4136:2011
 AMOSTRA / Sample: Provette em aço inox

REQUISITANTE / Client: FEUP Nº DE CONTR. / Vat Number: 582 733 278
 ENDEREÇO / Address: 8
 DATA DE ENTR. / Entrance date: 05.06.2018 VOSSA REF./Your Order Number: 0

NOSSA REF. / Our Reference: FEUP DATA DE ENSAIO / Testing Date: 05-06-2018

Ref.º Provette:	Aço Inox Nº2	Incerteza (%)
a	1,97 (mm)	
b	11,96 (mm)	
d0	(mm)	
Fp 0,2%	(N)	
Fm	14421,9 (N)	
L0	(mm)	
Lu	(mm)	
A	(Alongamento)	(%)
Rp 0,2%	(Limite Elástico)	(N/mm ²)
Rm	612,1 (N/mm ²)	1,9*
Z	(Estricção)	(%)

OBSERVAÇÕES	1) A execução do provete é da responsabilidade do requerente;
	2)
Resumo	3) A rotura do provete localizou-se na ZTA;
	4)
	5)
	6)
	Os valores assinalados com (*) representam as incertezas expandidas obtidas pela incerteza padrão multiplicada por um fator de expansão de k = 2, que corresponde a um intervalo de confiança de 95%.
	7)
	8)

DIRETOR Responsável Técnico <p style="text-align: center;">Paulino Sousa</p>	RESPONSÁVEL SERVIÇOS TÉCNICOS E TECNOLÓGICOS Technical and technical services responsible <p style="text-align: center;">Fernando Barbosa (Eng.)</p>	DATA Date <p style="text-align: center;">05-06-2018</p>
---	--	--

Este boletim só pode ser reproduzido na íntegra, salvo autorização expressa do CNFU.
 Os resultados de ensaio apresentados referem-se exclusivamente aos itens ensaiados.
 O por não de declaração dos itens ensaiados e de cinco dias, sendo o qual o CNFU não se responsabiliza pelo destino dos mesmos.

Mod.030_LAB_078 pág. 1 de 1

BOLETIM DE ENSAIO / Testing Bulletin

CNPU - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição
R. De São Francisco, 800 - 4100-199 Porto

Tele. 351 221 6175/6090
Fax. 351 221 6163/140

LABORATORIO DE ENSAIOS MECANICOS
(Mechanical Test Laboratory)

ENSAIO DE TRAÇÃO
(Tensile Testing)

EQUIP. DE ENSAIO / Testing Apparatus: Máquina Shimadzu LHM 1000KN

NORMAS DE REF. / Standard Methods: DE ENSAIO / Testing: ISO 6892-1:2005 B PROJETOS / Test Specimens: EN ISO 4036:2011

AMOSTRA / Sample: Provete em aço inox

REQUISITANTE / Client: FEUP

Nº DE CONTR. / Val Number: 982 733 276

ENDEREÇO / Address: #

DATA DE ENTR. / Entrance date: 05.08.2018

NOSSA REF. / Your Order Number: 0

NOSSA REF. / Our Reference: FEUP

DATA DE ENSAIO / Testing Date: 05-08-2018

Re ^o Provete:	Aço inox N°3	Incerteza (%)
a	1.95 (mm)	
b	11.68 (mm)	
d0	(mm)	
Fp 0,2%	(N)	
Fm	14000.0 (N)	
L0	(mm)	
Lu	(mm)	
A (Alongamento)	(%)	
Rp 0,2% (Limite Elástico)	(N/mm ²)	
Rm (Tensão de Ruptura)	614.7 (N/mm ²)	1,9*
Z (Estirolço)	(%)	

OBSERVAÇÕES:

- 1) A execução do presente é da responsabilidade do requerente;
- 2)
- 3) A rutura do provete localizou-se na ZTA;
- 4)
- 5)
- 6)
- 7) Os valores assinalados com (*) representam as incertezas expandidas obtidas pela incertezas padrão multiplicado por um fator de expansão de k=2, que corresponde a um intervalo de confiança de 95%.
- 8)

QUISQUE
Responsable Técnico
Paulino Sousa

RESPONSÁVEL SERVIÇOS TÉCNICOS E TECNOLÓGICOS
Technological and technical services responsible
Fernando Barbosa (Eng.)

Data
Issu
05-08-2018

Este boletim não pode ser reproduzido na íntegra, salvo autorização expressa do CNPU.

Os resultados de ensaio apresentados referem-se exclusivamente aos itens ensaiados.

O por não de reclamações dos itens ensaiados e de cinco dias, tendo o qual o CNPU não se responsabiliza pelo destino dos mesmos.

BOLETIM DE ENSAIO / Testing Bulletin

CNPJ - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição
R. Delfin Ferreira, 800 - 4100-799 Porto Alegre

Tele: 51 (21) 6175.760/60
Fax: 51 (21) 6103160

LABORATORIO DE ENSAIOS MECANICOS
(Mechanical Test Laboratory)

ENSAIO DE TRAÇÃO
(Tensile Testing)

EQUIP. DE ENSAIO / Testing Apparatus: Máquina Shimadzu UH 1000&N1

NORMAS DE REF./Standard Methods: DE ENSAIO/Testing: ISO 6893-6:2016 B PROJETOS/Proj. Specimens: EN ISO 4136:2011

AVULSO / Sample: Projeto em aço inox

REQUISITANTE / Client: FEUP

Nº DE CONTR. / Val Number: 302.733.276

ENDEREÇO / Address: 0

DATA DE ENTR. / Entrance date: 05-08-2018

NOSSA REF. / Your Order Number: 0

NOSSA REF. / Our Reference: FEUP

DATA DE ENSAIO / Testing Date: 05-08-2018

Ref. Projeto:	Aço inox N°1	Incerteza (%)
a	1,96 (mm)	
b	12,51 (mm)	
d0	(mm)	
Fp 0,1%	(N)	
Fm	14875,0 (N)	
L0	(mm)	
Ld	(mm)	
A	(Alongamento)	(%)
Rp 0,2%	(Limite Elástico)	(N/mm2)
Rm	(Tensão de Ruptura)	606,7 (N/mm2)
Z	(Estiço)	(%)
		1,5*

OBSERVAÇÕES:

- 1) A execução do projeto e da responsabilidade do requerente;
- 2)
- 3) A ruptura do provete localizou-se na ZTA;
- 4)
- 5)
- 6)
- 7) Os valores associados com (*) representam as incertezas expandidas obtidas pela incertez padrão multiplicado por um fator de expansão de k=2, que corresponde a um intervalo de confiança de 95%.
- 8)

O. TÉCNICO
Responsable Técnico
Paulino Soares

RESPONSÁVEL TÉCNICO DE APOIO TECNOLÓGICO
Technological and technical services responsible
Fernando Barbosa (Eng.)

DATA
Data
05-08-2018

Este boletim só pode ser reproduzido na íntegra, salvo autorização expressa do CNPQ.

Os resultados de ensaio apresentados referem-se exclusivamente aos itens ensaiados.

O por todo de reclamação dos itens ensaiados e de três dias, sendo o qual o CNPQ não se responsabiliza pelo destino dos mesmos.

Anexo II

BOLETIM DE ENSAIO / Testing Bulletin

CINFLU - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição
R. Delfino Freire, 800 - 41300-000

Tel: 51 31 417176000
Fax: 51 31 4100160

LABORATORIO DE ENSAIOS MECANICOS (Mechanical Test Laboratory) **ENSAIO DE DOBRAGEM** (Bending Test)

EQUIP. DE ENSAIO / Testing Apparatus: Máquina Universal UH1000N6

NORMAS DE REF. / Standard Methods: DE ENSAIO / Testing
EN ISO 5175:2000

MATERIAL / Material: **Provetos prismáticos soldados**

EQUIP. DE ENSAIO / Class:	SILUR	Nº DE CONTRIBUINTE / Val. number:
ENDEREÇO Address:	0,00	
DATA DE ENTR. / Entrance date:	05.08.2021	ORDEN. REF. / Year Order Number: 0,00
NOTA REF. / Our Reference:	Aço Carbono Aço Inox	DATA DE ENSAIO / Testing Date: 05.08.2021

Refº Provetos	Espessura (mm)	Largura (mm)	Diam. do Mand. (mm)	Ang. de Dobragem (graus)	Obs. da parte cometa
Aço Carbono Face	4,8	10,4	20,0	180º	SFISSURA
Aço Carbono Raiz	4,8	12,3	20,0	180º	SFISSURA
Aço Inox Raiz	1,9	7,5	0,0	180º	SFISSURA

OBSERVAÇÕES / Remarks:

TÉCNICO RESPONSÁVEL Responsible Technician 	RESPONSÁVEL SERVIÇOS TÉCNICOS E TECNOLÓGICOS Technological and technical services responsible	DATA Date
---	--	--------------

Este relatório só pode ser reproduzido no íntegro, sob autorização expressa do CINFLU.
Os resultados de ensaio apresentados referem-se exclusivamente aos itens avaliados.

Modelo L48
O relatório, boletim de ensaio resultante do Aço Carbono Aço Inox, é por caráter preliminar e deve ser utilizado no prazo de 15 dias. Após o qual o CINFLU não se responsabiliza pelo conteúdo dos mesmos.

página 1 de 1

Anexo III

BOLETIM INTERNO
 CINFU - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição
 R. Delfim Feneira, 800 - 4100-199 Porto
 Tele. 351 (22) 617076080
 Fax. 351 (22) 6103160

LABORATÓRIO DE ENSAIOS MECÂNICOS **ENSAIO DE RESILIÊNCIA CHARPY**

EQUIP. DE ENSAIO: ERE01[]; ETR12[]; ERE02[]; ERE03[]; ERE04[]; ERE06 []; ERE07 []
 NORMAS DE REF. DE ENSAIO: EN ISO 148-1 PROVETES:

REF. PROVETE: ZL(2) AMOSTRA: AÇO CARBONO
 EMPRESA: FEVP
 DATA DE ENSAIO: 05/08/2021 NOSSA REF.: ZL2-1

MEDIDAS

Ra = 0,36 μm

TEMPERATURA DE ENSAIO: 25,0 °C
 RESULTADO: 26,8 J

TECNICO RESPONSÁVEL: [Signature]

Mod.102 - Ed.00 - 2012.05; Rev.01 - 2016.04 pág. 1 de 1

BOLETIM INTERNO
 CENPU - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição - Tele: 351 (22) 817576080
 R. Delfin Ferreira, 600 - 4103-100 Porto - Fax: 351 (22) 8103160

LABORATÓRIO DE ENSAIOS MECÂNICOS **ENSAIO DE RESILIÊNCIA CHARPY**

EQUIP. DE ENSAIO: ERE01[]; ETR12[]; ERE02[]; ERE03[]; ERE04[]; ERE06 []; ERE07 []
 NORMAS DE REF. DE ENSAIO: EN ISO 148-1 PROVETES:

REF. PROVETE: ZL(9) AMOSTRA: Aço CARBONO
 EMPRESA: FEUP
 DATA DE ENSAIO: 05/08/2021 NOSSA REF.: ZL2-3

MEDIDAS

Ra 0.34 µm

44.941
 8.014
 R=0.161
 2.503
 9.975
 27.345
 54.814

TEMPERATURA DE ENSAIO: 25.0 °C
 RESULTADO: 25.7 J

TÉCNICO RESPONSÁVEL: [Signature]

Mod. 02 - 04.00 - 2010.05 - Rev.01 - 2010.04 pág. 1 de 1



BOLETIM INTERNO

CEF - Centro de Formação Profissional da Indústria de Função - Tels. 351 (22) 0175700/00
R. Delfin Ferreira, 600 - 4106-190 Ponta Fax. 351 (22) 0103190

LABORATÓRIO DE ENSAIOS MECÂNICOS

ENSAIO DE RESILIÊNCIA CHARPY

EQUIP. DE ENSAIO: ERE01[]; ETR12[]; ERE02[]; ERE03[]; ERE04[]; ERE06 []; ERE07 []

NORMAS DE REF. DE ENSAIO: EN ISO 148-1

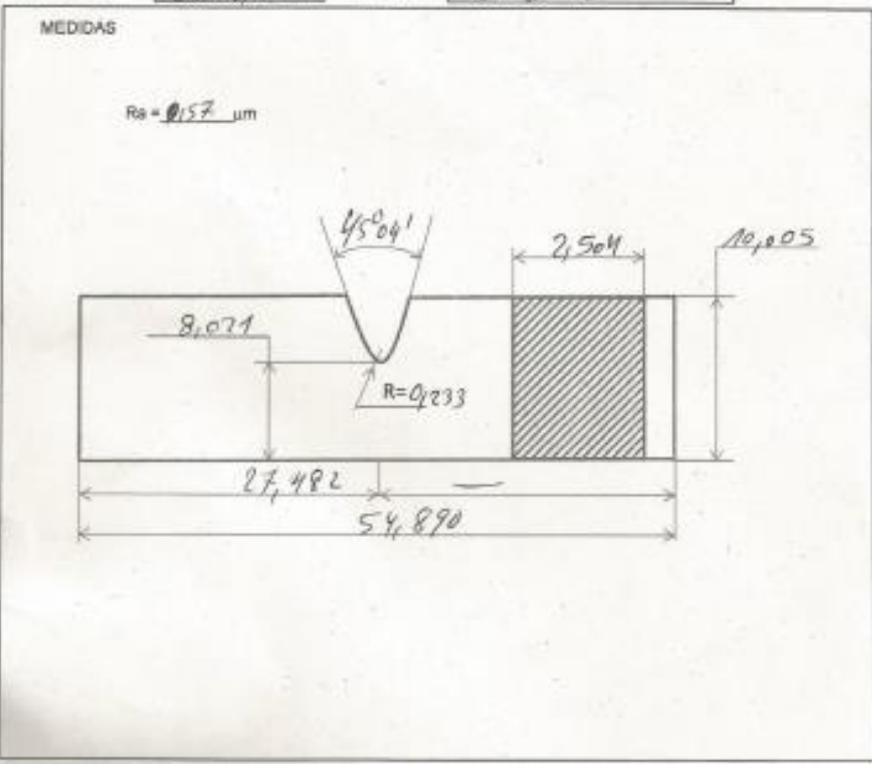
PROVETER

REF. PROVETE ZL2

AMOSTRA Aço CARBONO

EMPRESA FROUP

DATA DE ENSAIO: 05/08/2014 NOSSA REF. ZL2-2



TEMPERATURA DE ENSAIO 25,0 °C

RESULTADO 25,3 J

TÉCNICO RESPONSÁVEL [Signature]



BOLETIM INTERNO

CEFPI - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição - Tela: 351 (22) 8115760(9)
R. Delfino Faria, 600 - 4105-199 Porto - Fax: 351 (22) 8103180

LABORATÓRIO DE ENSAIOS MECÂNICOS

ENSAIO DE RESILIÊNCIA CHARPY

EQUIP. DE ENSAIO: ERE01[]; ETR12[]; ERE02[]; ERE03[]; ERE04[]; ERE06 []; ERE07 []

NORMAS DE REF. DE ENSAIO: EN ISO 148-1

PROVETES

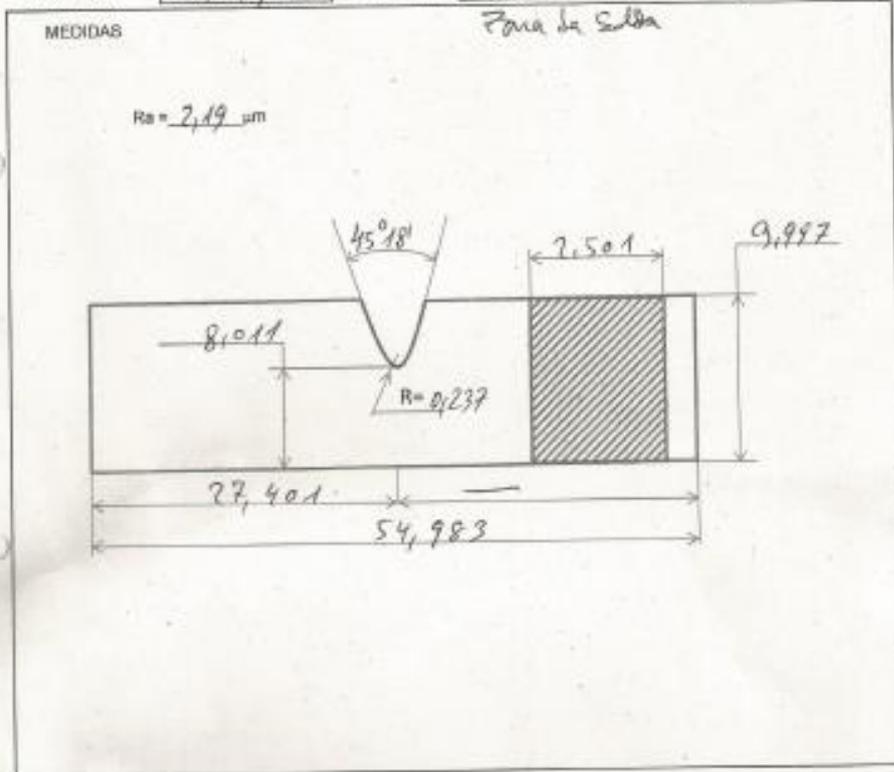
REF.º PROVETE: ZS (1)

AMOSTRA: AÇO CARBONO

EMPRESA: FEUP

DATA DE ENSAIO: 05/08/2021

NOSSA REF.º: ZS1-1



TEMPERATURA DE ENSAIO 24,3 °C

RESULTADO 30,8 J

TÉCNICO RESPONSÁVEL: [Signature]

Met 102 - Ed.00 - 2012.05, Rev.01 - 2016.30

pág. 1 de 1



BOLETIM INTERNO

CINFU - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição
 R. Delfim Ferreira, 800 - 4100-190 Porto Tels. 351 (22) 6175760/80
 Fax. 351 (22) 6103160

LABORATÓRIO DE ENSAIOS MECÂNICOS

ENSAIO DE RESILIÊNCIA CHARPY

EQUIP. DE ENSAIO ERE01[]; ETR12[]; ERE02[]; ERE03[]; ERE04[]; ERE06[]; ERE07[]

NORMAS DE REF. DE ENSAIO EN ISO 148-1

PROVETER

REF.º PROVETE ZS ①

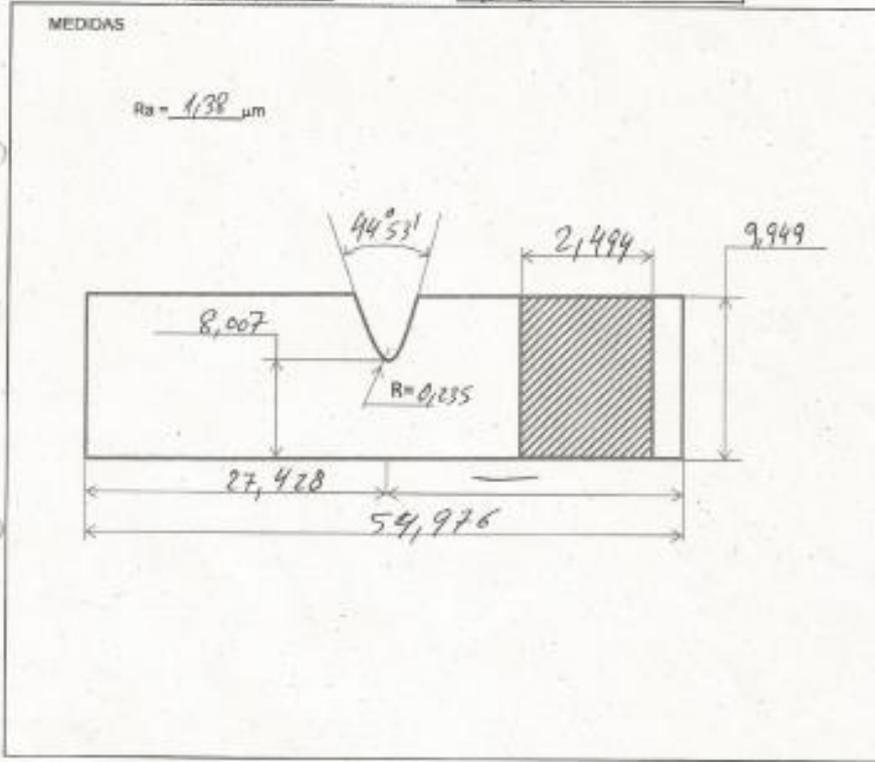
AMOSTRA AÇO CARBONO

EMPRESA FEUP

DATA DE ENSAIO: 05/08/2011

NOSSA REF.º ZS1-2

MEDIDAS



TEMPERATURA DE ENSAIO 24,3 °C

RESULTADO 29,13 J

TÉCNICO RESPONSÁVEL

[Handwritten Signature]



BOLETIM INTERNO

CENFU - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição
R. Dalto Facóia, 800 - 4105-199 Porto Alegre - RS
Tele: 351 (22) 8173700/80 Fax: 351 (22) 8103190

LABORATÓRIO DE ENSAIOS MECÂNICOS

ENSAIO DE RESILIÊNCIA CHARPY

EQUIP. DE ENSAIO: ERE01[]; ETR12[]; ERE02[]; ERE03[]; ERE04[]; ERE05 []; ERE07 []

NORMAS DE REF. DE ENSAIO: EN ISO 148-1

PROVETES:

REF. PROVETE: ZS (1)

AMOSTRA: Aço CARBONO

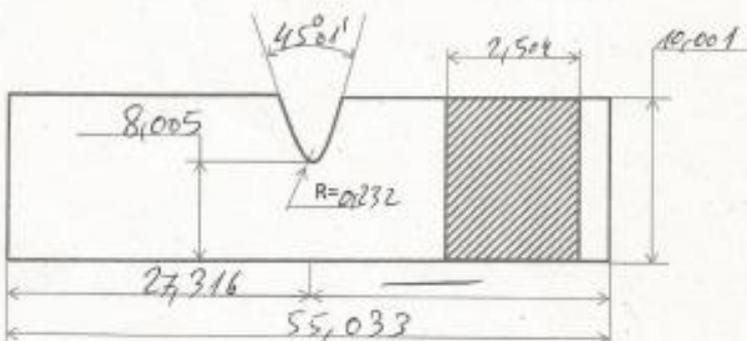
EMPRESA: FEVP

DATA DE ENSAIO: 05/08/2014

NOSSA REF.: ZS1 - (3)

MEDIDAS

Ra = 0,59 µm



TEMPERATURA DE ENSAIO: 24,3 °C

RESULTADO: 28,5 J

TÉCNICO RESPONSÁVEL:

[Empty box for technician name]

BOLETIM INTERNO
 CNPU - Centro de Formação Profissional de Instituto de Fundição - Telo. 351 (22) 6175760/80
 R. Cláudio Pereira, 880 - 4100-190 Poço - Fax. 351 (22) 6103160

LABORATÓRIO DE ENSAIOS MECÂNICOS **ENSAIO DE RESILIÊNCIA CHARPY**

EQUIP. DE ENSAIO: ERE01 []; ETR12 []; ERE02 []; ERE03 []; ERE04 []; ERE06 []; ERE07 []
 NORMAS DE REF. DE ENSAIO: EN ISO 148-1 PROMETES:

REF. PROVETE: ZTA-3 AMOSTRA: AÇO CARBONO
 EMPRESA: FEUP

DATA DE ENSAIO: 05/08/2021 NOSSA REF.: ZTA3-1

MEDIDAS

TEMPERATURA DE ENSAIO: 24,7 °C
 RESULTADO: 24,2 J

TÉCNICO RESPONSÁVEL: [Signature]

Mel. 102 - 08.09 - 2012.05 - Rev.01 - 0016.04 Pág. 1 de 1.

BOLETIM INTERNO
CNPQ - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição
R. Delfim Faria, 800 - 4100-150 Porto Alegre - RS
Telo: 351 (22) 4179700/800 Fax: 351 (22) 4103160

LABORATÓRIO DE ENSAIOS MECÂNICOS **ENSAIO DE RESILIÊNCIA CHARPY**

EQUIP. DE ENSAIO: ERE01[]; ETR12[]; ERE02[]; ERE03[]; ERE04[]; ERE06[]; ERE07[]
NORMAS DE REF. DE ENSAIO: EN ISO 148-1 PROJETOS:
REF. PROVETE: ZTA-3 AMOSTRA: Aço CARBONO
EMPRESA: FEUP
DATA DE ENSAIO: 05/08/2024 NOSSA REF.: ZTA3-2

MÉDIDAS

Technical drawing of a Charpy impact specimen. The drawing shows a rectangular specimen with a V-shaped notch. The surface roughness is indicated as $Ra = 0,16 \mu m$. The notch angle is $45^{\circ}16'$. The notch radius is $R = 0,244$. The specimen has a total length of $54,918$ and a width of $9,969$. The distance from the left end to the notch is $8,018$. The distance from the notch to the right end is $27,487$. A shaded rectangular area on the right side of the specimen has a width of $2,500$.

TEMPERATURA DE ENSAIO: 24,7 °C
RESULTADO: 24,6 J

TÉCNICO RESPONSÁVEL: *[Signature]*

Rev.132 - 01.00 - 2012.05; Rev.01 - 2016.06 Pág. 1 de 1

BOLETIM INTERNO
CENFLU - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição - Tels. 351 (22) 61750698
R. Delfino Fonseca, 890 - 4100-100 Porto Alegre - Fax. 351 (22) 6103160

LABORATÓRIO DE ENSAIOS MECÂNICOS **ENSAIO DE RESILIÊNCIA CHARPY**

EQUIP. DE ENSAIO: ERE01 []; ETR12 []; ERE02 []; ERE03 []; ERE04 []; ERE06 []; ERE07 []
NORMAS DE RESM DE ENSAIO: EN ISO 148-1 PROJETOS:

REF. PROVETE: ZTA-3 AMOSTRA: Aço CARBONO

EMPRESA: FEUP

DATA DE ENSAIO: 05/08/2021 NOSSA REF.: ZTA3-3

MEDIDAS

Technical drawing of a Charpy impact specimen. The drawing shows a rectangular specimen with a V-shaped notch. The notch has a depth of 8.001 mm and a radius of R=0.252 mm. The angle of the notch is 45°. The specimen has a total length of 54.849 mm and a width of 10.003 mm. The distance from the left end to the notch is 27.286 mm. The distance from the notch to the right end is 27.563 mm. The surface finish is Ra = 0.4 μm.

TEMPERATURA DE ENSAIO: 24.7 °C

RESULTADO: 24.2 J

TÉCNICO RESPONSÁVEL: *[Signature]*

Mat. 107 - Ed. 09 - 2012.09, Rev. 01 - 2018.05 pág. 1 de 1