



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Caracterização mecânica e análise da resistência à corrosão
em diferentes solos, de aços inoxidáveis duplex**

Elsa Marina Campos Tavares Monteiro de Pinho



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Caracterização mecânica e análise da resistência à corrosão
em diferentes solos, de aços inoxidáveis duplex**

Elsa Marina Campos Tavares Monteiro de Pinho

1870007

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP e Co-Orientação do Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José Augusto Abreu Peixoto Fernandes

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Rui Pedro Cardoso da Silva Martinho

Professor Adjunto, Escola Superior de Estudos Industriais e de Gestão

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu reconhecimento a todos os que contribuíram para a realização deste trabalho. Atendendo à importância da sua contribuição, devo destacar a colaboração das seguintes individualidade e instituições:

- Ao Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva, pela valiosíssima orientação, pelo apoio técnico concedido, pela paciência e incentivo constante, apesar das minhas limitações. Sem a sua preciosa ajuda, a conclusão deste trabalho não seria possível.
- Ao Professor Doutor João Paulo Meixedo Santos Silva, pela ajuda concedida, pelo apoio técnico e amizade de longa data.
- À OUTOKUMPU, representada pelo Dr. Rui Paulo, pela doação das amostras do material em estudo.
- Ao Dr. Hugo Cordeiro, funcionário da OUTOKUMPU, pela simpatia e disponibilidade constante na entrega das amostras do material em estudo.
- À empresa Metalomecânica ARSOPI, pela disponibilização de ajuda técnica e competente no tratamento dos provetes para o ensaio à Corrosão, bem como pela autorização da realização do referido ensaio nas suas instalações.
- Ao Engenheiro Manuel Bexiga, Diretor da Qualidade da ARSOPI, pelo conhecimento técnico, pela paciência e disponibilidade em me atender.
- Ao Sr. Rui Castelões, Diretor do Centro de Formação Profissional da ARSOPI, pela tolerância demonstrada e pelo incentivo constante.
- Ao pessoal do Centro de Formação Profissional, Sr. Luís e Cláudia, pela paciência e ajuda nos momentos difíceis.
- Aos Engenheiros Vitor Ribeiro e Victor Moreira, das Oficinas Mecânicas do ISEP, pela elaboração de todos os provetes necessários à realização dos ensaios.
- Ao pessoal do Laboratório de Tribologia da FEUP, nomeadamente o Engenheiro Jorge Seabra, pela ajuda na realização dos ensaios de Desgaste Abrasivo.
- À Engenheira Rafaela Casais, Coordenadora da Licenciatura em Engenharia Mecânica da ESEIG pela simpatia, amizade e disponibilização do uso do Laboratório de Materiais para a realização dos ensaios de impacto e observação metalográfica.
- À Professora Doutora Ana Cristina Meira Castro pela disponibilização do equipamento utilizado na realização dos ensaios de determinação de pH, teor de matéria orgânica e condutividade, bem como na preciosíssima ajuda na realização dos mesmos ensaios.
- Ao Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do DEG, pelas facilidades concedidas na realização de ensaios específicos.

- À Engenheira Fátima Andrade, pela preciosíssima ajuda na realização da maior parte dos ensaios práticos deste trabalho. Pela sua paciência, disponibilidade, incentivo e amizade, o meu sincero agradecimento.
- À minha amiga de longa data, Luísa Félix, pela paciência em escutar os meus desabaços e pelo incentivo constante. Muito Obrigada.
- Ao meu marido Jorge Guilherme, sem a sua contribuição, nada seria possível. Aos meus filhos Pedro Xavier e David Guilherme, pela privação de convívio e atenção que lhes causei.

Palavras-chave

Aço Duplex, Propriedades Mecânicas, Resistência à Corrosão, Micro-Abrasão, Meio ambiente, Solos

Resumo

O aço inoxidável é um material de alta durabilidade e resistência, utilizado nos mais diversos setores comerciais. O conhecimento das suas características e propriedades é essencial para uma escolha mais seletiva e vantajosa.

Pretende-se com este trabalho, estudar as propriedades mecânicas, a resistência ao desgaste e o comportamento, em ambientes mais agressivos de três tipos de aços inoxidáveis duplex, produzidos pela OUTOKUMPU e comercialmente conhecidos pelas designações LDX 2101, SAF 2507 e o SAF 2205.

Para tal efeito foram realizados ensaios de Dureza Vickers, antes e após dobragem; ensaios de tracção em duas diferentes situações: seguindo a norma NP EN 10002-1:2006 e após a realização de alguns ciclos de carga e descarga; ensaio de Impacto à temperatura ambiente e após arrefecimento criogénico; ensaio de resistência à corrosão. Também foi feito o estudo de resistência ao desgaste com base na técnica de micro-abrasão por esfera rotativa e o estudo metalográfico.

Foi também objetivo deste trabalho, relacionar o uso dos referidos aços duplex e as consequências que esse uso tem para o meio ambiente, bem como o seu comportamento quando exposto a condições extremas. Para tal, foram colocadas amostras dos referidos aços, em dois tipos de solos com condições de humidade e acidez diferentes analisando o seu estado após imersão em solo com condições controladas durante 272 dias.

Keywords

Duplex Stainless Steel, Mechanical properties, Corrosion resistance, Micro-abrasion, Environment, Soils

Abstract

Stainless steel is a material with extreme large durability and resistance, being used in several commercial fields. Complete knowledge about its characteristics and properties is crucial to take advantage in the selection process.

In this work the author intends to explore the mechanical properties, wear resistance and behavior when exposed to aggressive environmental conditions of duplex stainless steels produced by OUTOKUMPU and commercialized under the following brand names: LDX 2101, SAF 2507 and SAF 2205.

In order to pursue the objectives above, several tests were carried out as such Vickers hardness before and after bending (trying to analyze work hardening effects); tensile tests under two different situations: following the standard NP EN 10002-1:2006 and after some load-unload cycles; impact tests at room and cryogenic temperatures; corrosion resistance tests. Studies about wear resistance based on micro-abrasion wear test configuration, as well as metallographic analysis were also carried out.

The resistance of these materials under severe environmental conditions was also analyzed, trying to predict the behavior of the duplex stainless steel when applied in buried pipes. Thus, some samples of these steels were submerged in two kinds of soil under humidity and acidity controlled conditions and their surface and lost mass were analyzed after 272 days of immersion.

Índice

Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas.....	xix
Lista de Símbolos e Abreviaturas	xxi
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodologia.....	2
1.4. Estrutura.....	3
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Os Aços Inoxidáveis.....	5
2.1.1. Definição genérica das estruturas atômicas mais comuns nas ligas Fe-C	11
2.1.2. Classificação dos aços inoxidáveis segundo a sua estrutura	12
2.2. O caso particular dos aços inoxidáveis duplex.....	17
2.2.1. Importância dos elementos de liga.....	20
2.3. Caracterização dos aços inoxidáveis duplex	22
2.3.1. Análise da Estrutura.....	23
2.3.2. Ensaio de Tração.....	24
2.3.3. Resistência ao impacto	29
2.3.4. Tenacidade	36
2.3.5. Dureza	37
2.3.6. Resistência ao desgaste	41
2.3.6.1. Desgaste Abrasivo	42
2.3.6.2. Variáveis que podem influenciar os mecanismos de desgaste por abrasão	42
2.3.6.3. Efeito da dimensão do grão abrasivo.....	43
2.3.6.4. Variáveis que podem influenciar os mecanismos de desgaste por abrasão	44
2.3.7. Resistência à corrosão.....	46
2.3.8. Experiências com o material enterrado.....	49

2.3.8.1. Humidade, granulometria e matéria orgânica.....	50
2.3.8.2. Acidez e alcalinidade.....	50
2.3.8.3. Salinidade e resistividade.....	51
2.3.8.4. Avaliação da corrosão no solo	52
2.4. Outras propriedades dos aços inoxidáveis duplex.....	55
2.5. Aplicações características	55
3. Trabalho prático.....	57
3.1. Objetivos do trabalho prático	57
3.2. Planeamento dos trabalhos Experimentais	57
3.3. Caracterização dos aços inoxidáveis duplex	57
3.3.1 Caracterização metalográfica dos aços inoxidáveis Duplex.....	58
3.3.1.1 Caracterização do equipamento utilizado	59
3.3.1.2. Metodologia seguida nos ensaios metalográficos.....	62
3.3.1.3 Resultados da observação metalográfica	63
3.3.1.4 Análise crítica dos resultados da observação metalográfica	65
3.3.2 Caracterização da dureza dos aços inoxidáveis duplex	65
3.3.2.1 Caracterização do equipamento e parâmetros utilizados.....	66
3.3.2.2 Metodologia do ensaio seguida	67
3.3.2.3 Resultados dos ensaios de dureza	67
3.3.2.4 Análise crítica dos resultados.....	69
3.3.3 Caracterização da resistência mecânica dos aços inoxidáveis Duplex	69
3.3.3.1 Caracterização do equipamento utilizado nos ensaios de tracção.....	70
3.3.3.2 Metodologia seguida no ensaio de tracção	71
3.3.3.3 Metodologia utilizada nos ensaios Carga-Descarga	72
3.3.3.4 Resultados dos ensaios de tracção	72
3.3.3.5 Análise crítica dos resultados.....	76
3.3.4. Caracterização da Resiliência dos aços inoxidáveis Duplex	77
3.3.4.1 Caracterização do equipamento utilizado	78
3.3.4.2 Metodologia seguida no ensaio de impacto.....	79

3.3.4.3 Resultados dos ensaios de impacto	80
3.3.5 Caracterização da resistência à Corrosão dos aços inoxidáveis Duplex	81
3.3.5.1 Caracterização do equipamento utilizado nos ensaios de corrosão	81
3.3.5.2 Metodologia seguida nos ensaios de resistência à corrosão.....	83
3.3.5.3 Resultados dos ensaios de resistência à corrosão	86
3.3.5.4 Análise crítica dos resultados relativos aos ensaios de resistência à corrosão	86
3.3.6 Caracterização do desgaste por micro-abrasão dos aços inoxidáveis Duplex.....	88
3.3.6.1 Caracterização do equipamento utilizado nos ensaios de micro-abrasão	88
3.3.6.2 Metodologia seguida nos ensaios de micro-abrasão.....	90
3.3.6.3 Resultados dos ensaios de micro-abrasão	92
3.3.6.4 Análise crítica dos resultados.....	94
3.3.7 Ensaio em Geotecnia	96
3.3.7.1 Metodologia do ensaio	96
3.3.7.3. Resultados dos ensaios geotécnicos.....	107
3.3.7.4. Análise crítica dos resultados.....	109
4. Conclusões	111
5. Proposta de trabalhos futuros	113
6. Bibliografia e outras fontes de informação.....	115

Índice de Figuras

Figura 1 – Diagrama esquemático da formação da camada de Óxido de Crómio na superfície dos aços inoxidáveis (Fonte: www.euro-inox.org em 16.09.2012)	5
Figura 2 – Diagrama esquemático da evolução dos aços inoxidáveis em torno da composição básica atribuída ao aço inoxidável AISI 304 (Fonte: www.euro-inox.org em 16.09.2012).....	6
Figura 3 – Exemplos de aplicação dos diferentes aços inoxidáveis (Fonte: http://www.brasteelacosemetais.com.br em 16.09.2012)	8
Figura 4 – Composição química habitual dos diferentes tipos de aços inoxidáveis austeníticos (Fonte: www.euro-inox.org em 16.09.2012)	9
Figura 5 - Estrutura cúbica de faces centradas	11
Figura 6 - Estrutura cúbica centrada	11
Figura 7 - Estrutura hexagonal compacta	11
Figura 8 – Microestrutura típica do aço inoxidável ferrítico AISI 430.....	13
Figura 9 – Microestrutura típica do aço inoxidável martensítico AISI 410 (Toro, 2003)	15
Figura 10 – Microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico.....	16
Figura 11 – Microestrutura típica de um aço inoxidável duplex (Fonte: http://www.imoa.info/	17
Figura 12 – Representação das diferentes estruturas dos aços inoxidáveis no Diagrama de Schaeffler (Fonte: www.flickr.com/photos/cambridgeuniversity.../4708632987/ , em 20.09.2012)	18
Figura 13 – Formatos de provetes normalmente usados para a realização de ensaios de tracção (http://www.professionaltesting.co.th/web_page/tensile-test , em 15.09.2012)	24
Figura 14 – Equipamento electromecânico para a realização de ensaios de tracção	25
Figura 15 – Curva convencional Tensão x Deformação para um Aço Inoxidável AISI 304	26
Figura 16 – Pormenor da zona inicial do diagrama Tensão x Deformação referente a um Ensaio de Tracção, correspondente à Zona Elástica e à passagem para a Zona Plástica (www.mspc.eng.br em 15.09.2012)	27
Figura 17 – Pormenor da deformação (a) longitudinal e (b) transversal do provete cilíndrico no fim de um ensaio de tracção (http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/ consultado em 15.09.2012)	27
Figura 18 – Exemplo de uma ‘datasheet’ correspondente aos aços inoxidáveis duplex fabricados pela OUTOKUMPU, para ensaios efectuados à temperatura ambiente (Fonte: OUTOKUMPU)	28
Figura 19 – Exemplo de uma ‘datasheet’ correspondente aos aços inoxidáveis duplex fabricados pela OUTOKUMPU, para ensaios pulsados efectuados à temperatura ambiente (Fonte: OUTOKUMPU)	28

Figura 20 – Equipamento electromecânico para a realização de ensaios de tracção	30
Figura 21 – Aspecto da geometria de um provete para ensaio Charpy com entalhe em V,	31
Figura 22 – Metodologia de ensaio <i>Charpy</i> com o respectivo posicionamento do provete,	31
Figura 23 – Geometria dos provetes correspondentes à metodologia Izod (Davim,1992).....	32
Figura 24 – Critérios para o estabelecimento da temperatura de transição.....	34
Figura 25 - Exemplo de uma ' <i>datasheet</i> ' correspondente aos aços inoxidáveis duplex fabricados pela OUTOKUMPU (Fonte: OUTOKUMPU)	35
Figura 26 – Breve comparação entre as três principais metodologias de ensaio de dureza realizadas sobre materiais metálicos (www.kokch.kts.ru consultado em 15.09.2012)	37
Figura 27 - Identador Vickers	40
Figura 28 – Principais processos de desgaste (Zum-Gahr, 1987).....	42
Figura 29 – Esquema de desgaste a dois e três corpos (Zum-Gahr, 1987)	43
Figura 30 – Representação esquemática de um tribómetro para ensaios de desgaste por micro-abrasão através de esfera rotativa (Silva, 2009).....	45
Figura 31 – Representação esquemática de um tribómetro para ensaios de desgaste por micro-abrasão através de esfera rotativa (Silva, 2009).....	45
Figura 32 - Parâmetros relacionados por Steinrath para avaliação da corrosividade do solo (Loureiro et al, 2007).....	52
Figura 33 - Resultados dos testes subterrâneos com aços inoxidáveis, durante 2-7 anos.....	53
Figura 34 - Diagrama simplificado de uma MSF (Fonte Outokumpu).....	54
Figura 35-Condições ambientais para o teste do primeiro estágio da MSF (Fonte: Outokumpu)	54
Figura 36 - Resultados dos testes de corrosão após 858 dias de exposição, de uma câmara de evaporação de uma MSF no primeiro estágio. (Fonte: Outokumpu)	55
Figura 37 - Cortadora de amostras STRUERS DISCOTOM 2	60
Figura 38 – Máquina de montagem de amostras a quente STRUERS PREDOPRESS	60
Figura 39 – Máquinas de Lixagem e Polimento STRUERS ROTOPOL 25	61
Figura 40 – Hotte química.....	61
Figura 41 - Microscópio EPI- Iluminador Universal M e respectivo sistema de captação de imagem digital.....	62
Figura 42 - Estrutura metalográfica do aço inoxidável duplex LDX2101 (x200)	64
Figura 43 - Estrutura metalográfica do aço inoxidável duplex SAF 2205 (x200)	64
Figura 44 - Estrutura Metalográfica do aço inoxidável duplex SAF 2507 (x200)	64

Figura 45 - Durómetro EMCO M4U.....	66
Figura 46 – Resultados da Dureza Vickers	67
Figura 47- Dureza após dobragem em U (HV30) do aço inoxidável duplex SAF 2507.....	68
Figura 48- Dureza após dobragem em U (HV30) do aço inoxidável duplex LDX2101	68
Figura 49- Dureza após dobragem em U (HV30) do aço inoxidável SAF 2205	68
Figura 50 - Tipos de esforços a que os corpos podem estar sujeitos	70
Figura 51 - Máquina Universal Shimadzu Autograph AG-X	71
Figura 52 – Curva Força x Deslocamento para o aço SAF 2507	73
Figura 53 – Curva Força x Deslocamento para o aço SAF 2205	73
Figura 54 – Curva Força x Deslocamento para o aço LDX 2101.....	74
Figura 55 – Curva Força x Deslocamento para três ciclos de carga e descarga no aço SAF 2507	74
Figura 56 – Curva Força x Deslocamento para três ciclos de carga e descarga no aço SAF 2205	75
Figura 57 – Curva Força x Deslocamento para três ciclos de carga e descarga no aço LDX 2101	75
Figura 58 - Provete do tipo Charpy	77
Figura 59 - Pêndulo CHARPY de 300J da marca HOYTOM	78
Figura 60 - Provetes no líquido criogénico.....	79
Figura 61 - Amostras na solução fervente	82
Figura 62 – Quinadora utilizada na dobragem das amostras que sofreram ensaio de corrosão	82
Figura 63 - Lupa metalográfica ZEISS instalada no LMet do DEM/ISEP	83
Figura 64 - Aspecto da amostra do ensaio à corrosão segundo a norma ISO3561-2	84
Figura 65 - Amostras a serem retiradas da solução fervente ao fim de 24h	85
Figura 66 - Dobragem das amostras que sofreram ensaio à corrosão	85
Figura 67 - Aspeto final da amostra que sofreu ensaio à corrosão	86
Figura 68 - Aspeto da dobra do aço inoxidável duplex LDX 2101, após sofrer ensaio à corrosão	87
Figura 69 - Aspeto da dobra do aço inoxidável duplex SAF 2205, após sofrer ensaio à corrosão	87
Figura 70 - Aspeto da dobra do Aço inoxidável duplex SAF 2507, após sofrer ensaio à corrosão	88

Figura 71 - Tribómetro de micro-abrasão por esfera rotativa da marca PLINT, modelo TE 66..	89
Figura 72 - Microscópio Óptico Olympus BX51M	90
Figura 73 - Aspecto de ensaio de micro-abrasão.....	92
Figura 74 - Diâmetro das crateras dos três tipos de aços inoxidáveis Duplex.....	94
Figura 75 - Aspeto das partículas de Diamante (3µm) utilizadas nos ensaios de micro-abrasão	95
Figura 76 - Aspectos da preparação das amostras: a) pesagem, b) organização	96
Figura 77 - Os dois tipos de solo testados, antes da junção de qualquer aditivo. a) <i>solo1</i> ; b) <i>solo2</i>	97
Figura 78 - Os 24 diferentes pares <i>ambiente/tipo de solo</i> , com 3 tipos de aço em cada par.....	98
Figura 79- Aspecto do processo de emersão	98
Figura 80 - Aspectos relativos ao ensaio granulométrico: a) peneiração; b) <i>solo1</i> (fracções > 2.00 mm e < 2.00 mm, respectivamente, após lavagem); c) <i>solo2</i> (fracções > 2mm e < 2mm, respectivamente, após lavagem)	99
Figura 81 - Curva granulométrica correspondente ao Solo 1	101
Figura 82 - Curva granulométrica correspondente ao solo 2	102
Figura 83 - Equipamento TOC-VCSN Shimadzu, com módulo de leitura do lado esquerdo e com os dois módulos de determinação de TC e IC do lado direito.	102
Figura 84 - Colocação da barqueta cerâmica no TOC-VCSN Shimadzu, para determinação do IC	103
Figura 85 - Aspectos relativos à preparação das amostras, para determinação de salinidade e pH.	105
Figura 86 - Aspecto das superfícies das amostras totalmente enterradas, do solo 1	108
Figura 87 - Aspecto das superfícies das amostras totalmente enterradas, do solo 2	108
Figura 88 - Aspecto das superfícies das amostras enterradas parcialmente, do solo 1	108
Figura 89 - Aspecto das superfícies das amostras enterradas parcialmente, do solo 2	108
Figura 90 - Aspecto das superfícies das amostras enterradas em regime alternado, do solo 1	109
Figura 91 - Aspecto das superfícies das amostras enterradas em regime alternado, do solo 2	109

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas dos Aços Inoxidáveis Ferríticos	14
Tabela 2 - Relação entre a resistividade a a corrosividade (adaptado de Robinson, 1993)	51
Tabela 3 - Composição química dos aços inoxidáveis duplex em estudo.....	58
Tabela 4 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios à tração	72
Tabela 5 - Valores da energia absorvida nos ensaios de impacto CHARPY com entalhe em V ..	80
Tabela 6 - Resultado médio do diâmetro das crateras deixada sobre as amostras,	92
Tabela 7 - Resultado dos ensaios de micro-abrasão no aço SAF 2507	93
Tabela 8 - Resultado dos ensaios de micro-abrasão no aço SAF 2205	93
Tabela 9 - Resultado dos ensaios de micro-abrasão no aço LDX 2101	93
Tabela 10 - Teor de matéria orgânica dos solos em ensaio.....	104
Tabela 11 - Quadro resumo com dados dos solos utilizados na experiência	106
Tabela 12 - Quadro resumo das pesagens efectuadas às amostras antes e após os ensaios ..	107

Lista de Símbolos e Abreviaturas

AFNOR- Association Française de Normalisation

ASTM - American Society for Testing and Materials

BS - British Standard

CETRIB - Unidade de Tribologia e Manutenção industrial

DEG - Departamento de Engenharia Geotécnica

DEM - Departamento de Engenharia Mecânica

DIN- Deutschs Institut Für Normung (German institute for Standardization)

EN – European Norm

ESEIG - Escola Superior de Estudos Industriais e de Gestão

FEPA- Federation of European Producers of Abrasives

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FGD- Flue Gas Desulfurization

ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto

ISO - International Organization for Standardization

LEM - Laboratório de Ensaios Mecânicos

LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LGMC - Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção

LMET - Laboratório de Metalografia

MSF- Multi Stage Flash

NP – Norma Portuguesa

PRE- Pitting Resistance Equivalent

SWCC- Saline Water Conversion Corporation

“ O que sabemos é uma gota, o que ignorámos é um oceano”
ISAAC NEWTON

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Dos minérios de ferro disponíveis na natureza, Magnetite, Hematite, Limonite, Pirite e Siderite, obtém-se o ferro, através da redução dos óxidos de ferro pelo carbono.

Este processo aproveita o facto do carbono, a elevadas temperaturas, ter maior afinidade para o oxigénio que o ferro. Por isso, só os minerais constituídos por óxidos podem ser utilizados imediatamente na produção, nomeadamente a Magnetite, a Hematite e a Limonite. Os restantes minerais só eventualmente são aproveitados como minérios, sendo geralmente necessário um tratamento prévio que os transforme em óxidos.

O Ferro devidamente ligado ao carbono e a alguns elementos de liga, possuindo no mínimo 10,5% de crómio, dá origem a um material útil e versátil, que se designa por Aço Inoxidável (Caprio, 1999).

O aço inoxidável é um material de grande versatilidade, com ótimas características mecânicas e uma elevada resistência à corrosão.

Por ser de fabrico relativamente acessível, e sendo conhecidas as técnicas e fatores condicionantes das suas propriedades, é utilizado nas mais variadas funções. Desde a arte plástica até utensílios de cozinha, passando por todo um mercado técnico e especializado de projetos de engenharia, o aço inoxidável tem cada vez mais importância nos tempos atuais.

Trata-se de um material 100% reciclável, permitindo o desenvolvimento sustentável e a preservação do meio ambiente. Existe uma grande variedade de aços, cujas propriedades estão bem determinadas, assim como os fins a que se destinam (Cunat, 2002).

É um material cuja relação custo-qualidade é muito boa, principalmente quando utilizado em projetos expostos a condições favoráveis à corrosão, nomeadamente indústria química, petrolífera e aplicações que impliquem que fique soterrado.

Esse custo deve ser devidamente avaliado e ponderado, pois a sua utilização evita custos na correção de danos causados pela corrosão, já que se trata de um material bastante resistente à corrosão, evitando posteriores custos e privação de uso devido a operações de manutenção.

A questão ambiental também é importante, pois a energia gasta a realizar uma peça neste tipo de material é praticamente a mesma da energia gasta a fazer a mesma peça num aço ao carbono comum. No entanto, a vida útil da peça em aço inox é bem maior do que a registada por um aço ao carbono, em condições de uso ou ambientais agressivas.

Pode-se obter uma grande variedade de aços, de acordo com os elementos de liga introduzidos e as suas percentagens.

O aço inoxidável divide-se em quatro famílias principais, conforme a sua estrutura: os austeníticos, os ferríticos, os martensíticos e os duplex, que possuem características mecânicas distintas, assim como resistência a meios ambientes mais agressivos (Caprio,1999).

Este estudo teve como principal foco avaliar e comparar as propriedades mecânicas e tecnológicas, assim como a resistência ao desgaste e à corrosão em ambientes agressivos de três diferentes Aços Inoxidáveis Duplex comercializados por uma empresa europeia.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como principais objetivos:

- Caracterizar mecanicamente a família do aço duplex, tendo como base as amostras dos aços comercialmente conhecidos por LDX 2101 (ASTM- S32101), SAF 2507 (ASTM- S32750) e SAF 2205 (ASTM- S32205 ou S31803), gentilmente cedidos pela empresa OUTOKUMPU. Para tal, foram efetuados ensaios de Dureza Vickers com carga de 30Kgf; ensaios de Tracção, para determinar, entre outros valores, o Módulo de Elasticidade, a Resistência à Tracção, Limite Elástico, Alongamento após Rotura, Coeficiente de Poisson e Resistência ao Impacto (Método Charpy) a diferentes temperaturas.
- Avaliar a sua resistência à corrosão, salientando que esta depende do meio ambiente em que está inserido o material, bem como os tratamentos que possa ter sofrido;
- Proceder ao estudo metalográfico;
- Avaliar a resistência ao desgaste, através de ensaios de micro-abrasão por esfera rotativa;
- Verificar o seu comportamento quando submerso em diferentes solos e sujeito a diferentes condições.

1.3. Metodologia

A elaboração do presente trabalho seguiu a metodologia que seguidamente se descreve:

- Contacto com a OUTOKUMPU Portugal, no sentido de obter as amostras necessárias de aço inoxidável duplex, em quantidade e variedade necessária à prossecução dos objetivos deste trabalho;
- Mapeamento dos ensaios necessários à correta caracterização dos materiais tratados nesta dissertação;

- Pesquisa bibliográfica sobre a caracterização de aços inoxidáveis duplex, quer através da consulta de livros, quer também por consulta de artigos científicos e catálogos de fabricantes deste tipo de matéria-prima;
- Pesquisa das normas que regem os ensaios versados neste trabalho;
- Realização dos ensaios, utilizando meios do ISEP, da ESEIG, da FEUP e da ARSOPI;
- Recolha e organização dos resultados obtidos;
- Redação da presente dissertação.

1.4. Estrutura

A estrutura deste trabalho está assente essencialmente em duas partes: uma Revisão Bibliográfica inicial, onde se pretende enquadrar o leitor com o tema, passando em revista os desenvolvimentos técnicos e científicos que foram publicados em livros e periódicos científicos dedicados à matéria bem como, a entrevista de pessoas com conhecimentos e experiência na área, e o desenvolvimento do trabalho prático propriamente dito, com a referência aos ensaios desenvolvidos, assim como o tratamento e análise crítica dos resultados obtidos.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Os Aços Inoxidáveis

Aço inoxidável é o nome dado à família das ligas Fe-C resistentes à corrosão.

Os aços inoxidáveis são ligas que possuem características mecânicas e químicas, que lhes permitem ser extremamente competitivos nas mais diversas aplicações.

O cromo é o principal elemento de liga desta família de aços, conferindo-lhes propriedades únicas no que toca à resistência à corrosão.

Segundo a Norma EN 10088-1, a quantidade mínima de cromo que um aço inoxidável deve ter é de 10,5%, ao qual se adicionam outros elementos de liga, nomeadamente o Níquel e, em menor quantidade, quando aplicável, o Molibdénio.

O princípio dos aços inoxidáveis baseia-se, segundo uma teoria geralmente aceite, no facto do Cromo ter a propriedade de formar, na presença do Oxigénio, uma fina película superficial de óxido de cromo (muitas vezes a sua espessura é a de uma molécula), caracterizada por uma excepcional resistência a ataques dos agentes químicos. Diz-se que o aço, neste estado, adquire um estado passivo.

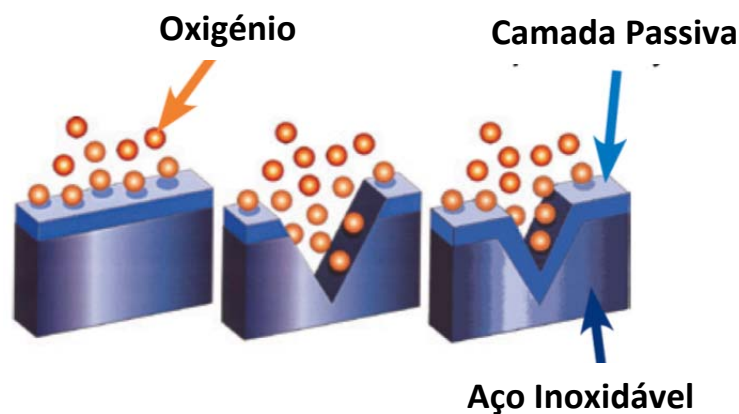


Figura 1 – Diagrama esquemático da formação da camada de Óxido de Crómio na superfície dos aços inoxidáveis (Fonte: www.euro-inox.org em 16.09.2012)

O estado passivo é, portanto, conferido aos aços pela adição de Cromo em teores superiores a 12 %, formando-se na sua superfície uma fina película de óxido de cromo (Cr_2O_3), invisível à vista desarmada, e que possui grande resistência à corrosão quando comparada com a dos aços sem liga ou de baixa liga.

Existe uma grande variedade de aços inoxidáveis, com níveis progressivamente maiores de resistência à corrosão. Isto é resultado da adição controlada de elementos de liga, cada um dando propriedades específicas relativamente à resistência mecânica e à possibilidade de resistir a diferentes meios corrosivos (Cunat, 2002).

A forma como os aços inoxidáveis podem ser manipulados em termos de composição química, e o efeito que essa mesma manipulação apresenta em termos de propriedades conseguidas, permitindo um campo de utilização cada vez mais específico em termos da melhoria selectiva de propriedades, poderá ser observado na figura seguinte. Nesta figura, a composição base de um aço inoxidável é atribuída à designação AISI 304, a qual pode evoluir em diferentes direcções através da adição de elementos bem determinados, conseguindo-se uma evolução notória das propriedades no sentido mais desejado, em função de cada aplicação específica.

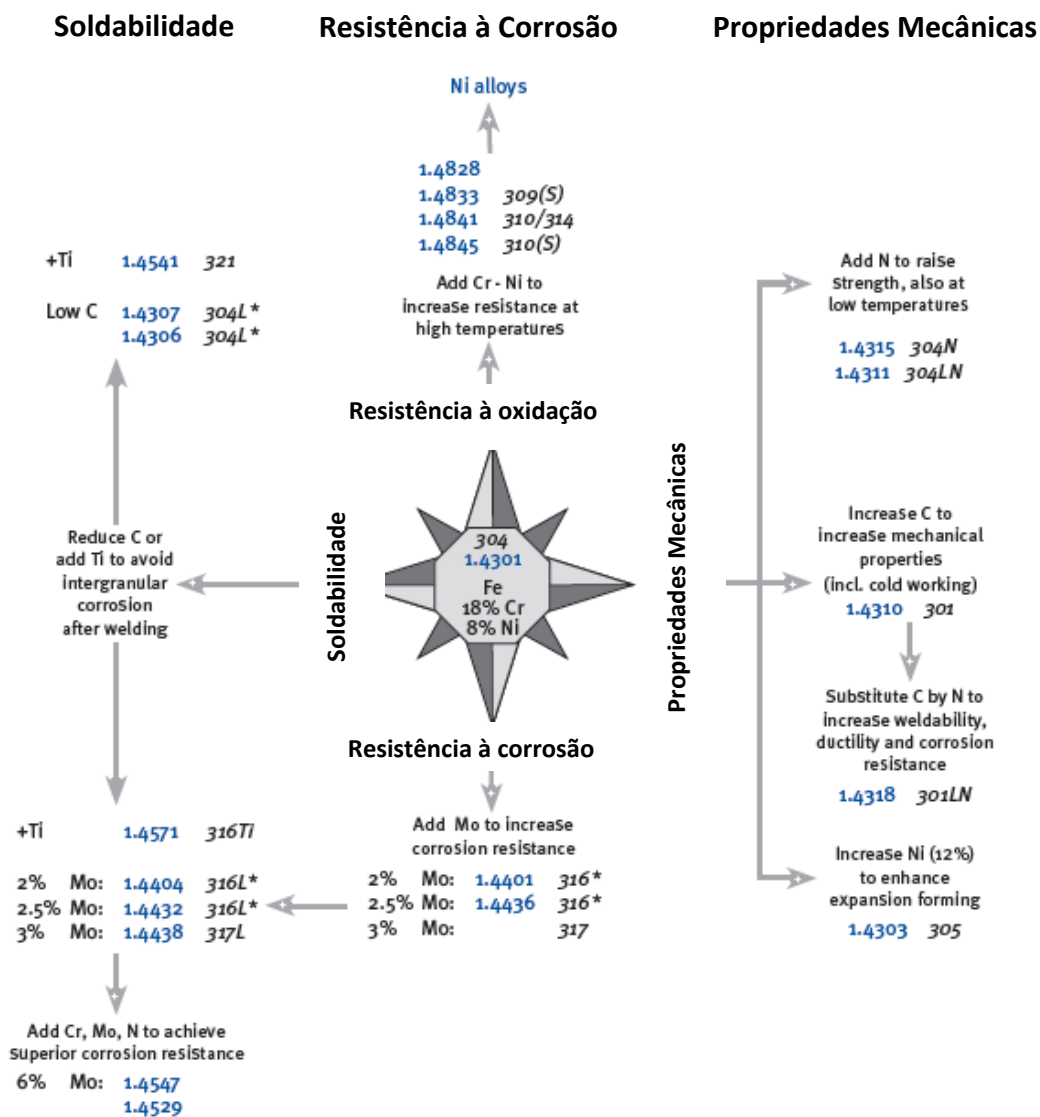


Figura 2 – Diagrama esquemático da evolução dos aços inoxidáveis em torno da composição básica atribuída ao aço inoxidável AISI 304 (Fonte: www.euro-inox.org em 16.09.2012)

A forma como os átomos dos elementos de liga se dispõem durante o processo de solidificação, confere aos aços diferentes estruturas, as quais estão na base da sua classificação por famílias.

Dentro de cada família, os aços inoxidáveis diferem em termos de composição química e de propriedades mecânicas, mas possuem muitas características comuns, as quais delimitam os campos de aplicação habitualmente atribuídos a cada família. De notar que, por vezes, uma alteração muito ligeira da composição química do aço inoxidável pode conferir-lhe propriedades significativamente melhoradas em relação à condição inicial. O exemplo provavelmente mais característico é a diferença de comportamento e preço existente entre os aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 316, entre os quais existe quase só a diferença do segundo conter Molibdénio adicionado de forma intencional (como elemento de liga), enquanto o primeiro não. A resistência à corrosão do segundo é significativamente superior à do primeiro, existindo ainda significativas diferenças no preço, já que a adição de Molibdénio onera de forma significativa o custo final do material.

Ainda segundo a Euro-Inox, organismo que congrega, a nível Europeu, os fabricantes de aços inoxidáveis e as instituições que habitualmente investigam e certificam este tipo de produtos, a classificação dos aços inoxidáveis em famílias processa-se de uma forma muito simples:

- **Austeníticos:** Ligas Fe – Cr – Ni, com teor em C < 0.1% e com composição típica de 12%Cr e 8% de Níquel. É normalmente fornecido na condição de não-magnético e corresponde a cerca de 65% do consumo mundial de aços inoxidáveis;
- **Ferríticos:** Ligas Fe – Cr, com C < 0.1%, normalmente não contendo Níquel, fornecidos na condição de magnético;
- **Martensíticos:** Ligas Fe – Cr, com C > 0.1%, normalmente não contendo Níquel, fornecidos na condição de magnético e endurecível através de tratamento térmico;
- **Duplex:** Ligas Fe – Cr - Ni, com estrutura distribuída de forma equitativa entre ferrite e austenite, fornecido na condição de magnético.

A composição química dos diferentes tipos de aços inoxidáveis normalmente existentes no mercado poderá ser analisada nas tabelas das páginas seguintes. Conforme se poderá constatar, existem referências diferentes cuja composição química é muito aproximada mas, essas pequenas diferenças são suficientes para produzir estruturas diferentes e lotes de propriedades que se adequam de melhor forma a requisitos impostos por determinadas aplicações mais específicas.

Normalmente, e como já referido anteriormente, estes materiais são procurados pela sua boa resistência mecânica e pelas óptimas características de resistência à corrosão. No entanto, neste capítulo, a corrosão a que estará sujeito um material em condições ditas normais de utilização, não poderá ser comparada à corrosão severa a que estão expostas determinadas aplicações em contacto directo com a água do mar ou expostos ao contacto com determinados produtos químicos (indústria petroquímica e indústria química – tintas e vernizes, etc.) que poderão representar uma forte ameaça para muitos aços, não preparados para o efeito.

As tabelas das figuras 4 e 5 apresentam-se divididas por famílias, embora se possa verificar que a classificação de alguns aços inoxidáveis não é propriamente exacta.



Figura 3 – Exemplos de aplicação dos diferentes aços inoxidáveis (Fonte: <http://www.brasteelacosemetais.com.br> em 16.09.2012)

GRADES	Name	Designation EN	EN Number	Designation AISI/ASTM	C	Si	Mn	P max	S	N	Cr	Mo	Ni	Others
AUSTENITIC	X12CrMnNi17-5-5	1.4372	201	X12CrMnNi17-5-5	<0,15	<1,00	5,50 to 7,50	0,045	<0,015	0,05 to 0,25	16,00 to 18,00		3,50 to 5,50	
	X12CrMnNi16-5-5	1.4373	202	X12CrMnNi16-5-5	<0,030	<1,00	7,50 to 10,50	0,045	<0,015	0,05 to 0,25	17,00 to 19,00		4,00 to 6,00	
	X2CrMnNi17-5-5	1.4371		X2CrMnNi17-5-5	<0,10	<2,00	6,00 to 8,00	0,045	<0,015	0,15 to 0,20	16,00 to 17,00		3,50 to 5,50	
	X6CrMnNi16-7-8-3	1.4897		X6CrMnNi16-7-8-3	<0,10	<2,00	6,50 to 9,50	0,040	<0,030	0,15 to 0,30	16,00 to 18,00		<2,00	Ca:2,00 to 3,50; B: 0,0005 to 0,0050
	X10CrNi19-9	1.4368		X10CrNi19-9	0,07 to 0,15	0,50 to 1,00	5,00 to 7,50	0,030	<0,015	0,20 to 0,30	17,50 to 19,50		6,50 to 8,50	
	X30CrNi19-9	1.4310		X30CrNi19-9	0,06 to 0,15	<2,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	16,00 to 19,00		6,00 to 9,00	
	X5CrNi17-7	1.4319		X5CrNi17-7	<0,07	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,20	16,00 to 18,00		8,00 to 8,00	
	X5CrNi18-7	1.4318		X5CrNi18-7	<0,030	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	16,50 to 18,50		6,00 to 8,00	
	X8CrNi18-9	1.4305		X8CrNi18-9	<0,15	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	0,10 to 0,20	16,50 to 18,50		8,00 to 10,00	
	X8CrNi19-9	1.4301		X8CrNi19-9	<0,10	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,10	17,00 to 19,00		8,00 to 10,00	Ca:0,50 to 1,00
	X8CrNi19-10	1.4311		X8CrNi19-10	<0,030	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	17,50 to 19,50		8,00 to 11,50	
	X6CrNi18-10	1.4648		X6CrNi18-10	0,04 to 0,08	<1,00	<2,00	0,035	<0,015	0,12 to 0,22	17,50 to 19,50		8,00 to 11,00	
	X2CrNi19-11	1.4307		X2CrNi19-11	<0,030	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	17,00 to 19,00		8,00 to 10,50	
	X5CrNi19-11	1.4306		X5CrNi19-11	<0,030	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	17,50 to 19,50		10,00 to 12,00	
	X5CrNi19-9	1.4315		X5CrNi19-9	<0,06	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	0,12 to 0,22	18,00 to 20,00		8,00 to 11,00	
	X4CrNi18-12	1.4303		X4CrNi18-12	<0,06	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	17,00 to 19,00		11,00 to 13,00	
	X12CrNi20-12	1.4828		X12CrNi20-12	<0,20	1,50 to 2,50	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	19,00 to 21,00		11,00 to 13,00	
	X12CrNi23-13	1.4833		X12CrNi23-13	<0,15	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	22,00 to 24,00		12,00 to 14,00	
	X8CrNi25-21	1.4845		X8CrNi25-21	<0,10	<1,50	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	24,00 to 26,00		19,00 to 22,00	
	X8CrNi28-21	1.4841		X8CrNi28-21	<0,20	1,50 to 2,50	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	24,00 to 26,00		19,00 to 22,00	
X5CrNi17-12-2	1.4401		X5CrNi17-12-2	<0,07	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	16,50 to 18,50	2,00 to 2,50	10,00 to 13,00		
X5CrNi17-13-3	1.4436		X5CrNi17-13-3	<0,06	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	16,50 to 18,50	2,50 to 3,00	10,50 to 13,00		
X6CrNi17-13-3	316H		316H	0,04 to 0,10	<0,75	<2,00	0,045	<0,030	0,10 to 0,16	16,00 to 18,00	2,00 to 3,00	10,00 to 14,00		
X2CrNi17-12-2	1.4404		316L	<0,030	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	16,50 to 18,50	2,00 to 2,50	10,00 to 13,00		
X2CrNi18-14-3	1.4435		316L	<0,030	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	17,00 to 19,00	2,50 to 3,00	10,50 to 13,00		
X2CrNi17-12-3	1.4432		316L	<0,030	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	16,50 to 18,50	2,50 to 3,00	10,50 to 13,00		
X2CrNi17-11-2	1.4406		316 LN	<0,030	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	0,12 to 0,22	16,50 to 18,50	2,00 to 2,50	10,00 to 12,50		
X2CrNi17-13-3	1.4429		316 LN	<0,030	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	0,12 to 0,22	16,50 to 18,50	2,50 to 3,00	11,00 to 14,00		
X6CrNiTi17-12-2	1.4571		316 Ti	<0,08	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	16,50 to 18,50	2,00 to 2,50	10,50 to 13,50	Ti:5 x C to 0,70	
X6CrNiMo17-12-2	1.4530		316Cb	<0,08	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	16,50 to 18,50	2,00 to 2,50	10,50 to 13,50	Nb:10 x C to 1,00	
X2CrNi18-15-4	1.4438		317	<0,030	<0,75	<2,00	0,045	<0,030	<0,10	18,00 to 20,00	3,00 to 4,00	11,00 to 15,00		
X2CrNi18-12-4	1.4434		317L	<0,030	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	17,50 to 19,50	3,00 to 4,00	13,00 to 16,00		
X2CrNi17-13-5	1.4438		317 LN	<0,030	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	0,10 to 0,20	16,50 to 18,50	3,00 to 4,00	10,50 to 14,00		
X6CrNiTi18-10	1.4541		321	<0,08	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	0,12 to 0,22	16,50 to 18,50	4,00 to 5,00	12,50 to 14,50		
X6CrNiTi18-10	1.4878		321H	<0,10	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	17,00 to 19,00		9,00 to 12,00	Ti:5 x C to 0,80	
X6CrNi18-10	1.4550		347	<0,08	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	17,00 to 19,00		9,00 to 12,00	Nb:10 x C to 1,00	
X10CrNi25-21	1.4335		347H	0,04 to 0,10	<0,75	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	17,00 to 19,00		20,00 to 22,00	Nb:8 x C to 1,00	
X10CrNi25-2-2	1.4466		310	<0,020	<0,75	<2,00	0,025	<0,015	<0,10	0,10 to 0,16	24,00 to 26,00	<0,20	20,00 to 22,00	
X10CrNi18-15-4	1.4361		310	<0,020	<0,75	<2,00	0,025	<0,015	<0,10	0,10 to 0,16	24,00 to 26,00	2,00 to 2,50	21,00 to 23,00	
X10CrNi18-15-4	1.4563		310 MALN	<0,015	3,70 to 4,50	<2,00	0,025	<0,015	<0,11	16,50 to 18,50	<0,20	14,00 to 16,00		
X10CrNiC01-27-4	1.4563		310 MALN	<0,020	<0,75	<2,00	0,030	<0,015	<0,11	16,50 to 18,50	3,00 to 4,00	30,00 to 32,00	Cr:0,70 to 1,50	
X10CrNiC02-25-5	1.4537		310 MALN	<0,020	<0,75	<2,00	0,030	<0,015	<0,11	0,17 to 0,25	26,00 to 28,00	4,70 to 5,70	24,00 to 27,00	Cr:1,00 to 2,00
X10CrNiC02-20-5	1.4539		310 MALN	<0,020	<0,75	<2,00	0,030	<0,015	<0,11	19,00 to 21,00	4,00 to 5,00	24,00 to 26,00	Cr:1,20 to 2,00	
X10CrNiC02-18-7	1.4547		310 MALN	<0,020	<0,75	<2,00	0,030	<0,015	<0,11	0,18 to 0,25	19,50 to 20,50	6,00 to 7,00	17,50 to 18,50	Cr:0,50 to 1,00
X10CrNiC02-22-6	1.4652		310 MALN	<0,020	<0,75	<2,00	0,030	<0,015	<0,11	0,45 to 0,55	23,00 to 25,00	7,00 to 8,00	21,00 to 23,00	Cr:0,30 to 0,60
X10CrNiC02-22-6	1.4659		310 MALN	<0,020	<0,75	<2,00	0,030	<0,015	<0,11	0,35 to 0,50	23,00 to 25,00	5,50 to 6,50	21,00 to 23,00	Cr:0,30 to 0,60
X10CrNiC02-20-7	1.4529		310 MALN	<0,020	<0,75	<2,00	0,030	<0,015	<0,11	0,15 to 0,25	19,00 to 21,00	6,00 to 7,00	24,00 to 26,00	Cr:0,50 to 1,50
X10CrNiC02-18-6-6	1.4565		310 MALN	<0,030	<1,00	<2,00	0,030	<0,015	<0,11	0,30 to 0,60	24,00 to 26,00	4,00 to 5,00	16,00 to 19,00	Nb:9,15
X12CrNiC02-25-5	1.4864		330	<0,015	1,00 to 2,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	0,12 to 0,20	15,00 to 17,00	33,00 to 37,00	10,00 to 12,00	Cr:0,03 to 0,08
X8CrNiC02-11-2	1.4836		330	0,05 to 0,12	1,40 to 2,50	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	0,12 to 0,20	20,00 to 22,00	10,00 to 12,00	30,00 to 34,00	Al:0,15 to 0,60; Ti:0,15 to 0,60
X10CrNiC03-21	1.4877		330	<0,12	<1,00	<2,00	0,030	<0,015	<0,11	19,00 to 21,00	16,00 to 18,00	31,00 to 33,00	9,00 to 11,00	As:0,025; Cu:0,05 to 0,10; Nb:0,60 to 1,00
X8CrNiC01-9-10	1.4818		330	0,04 to 0,08	1,00 to 2,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	0,12 to 0,20	18,00 to 20,00	16,00 to 18,00	31,00 to 33,00	Cr:0,03 to 0,08
X8CrNiC03-25	1.4854		330	0,04 to 0,08	1,20 to 2,20	<2,00	0,040	<0,015	0,12 to 0,20	18,00 to 20,00	24,00 to 26,00	34,00 to 36,00	Cr:0,03 to 0,08	

Figura 4 – Composição química habitual dos diferentes tipos de aços inoxidáveis austeníticos (Fonte: www.euro-inox.org em 16.09.2012)

GRADES		Chemical composition (cast analysis) ⁽¹⁾⁽⁷⁾ of stainless steel flat products										
Name Designation EN	EN Number Designation	Designation AISI/ASTM	C	Si	Min	Pmax	S	N	Cr	Mo	Ni	Others
DUPEX												
X2CrNiMn22.5-3 ⁽⁸⁾	1.4462 ⁽⁸⁾	2205	≤0.030	≤1.00	≤2.00	0.035	≤0.015	0.10 to 0.22	21.00 to 23.00	2.50 to 3.50	4.50 to 6.50	
X2CrNiMn23.4 ⁽⁸⁾	1.4362 ⁽⁸⁾	2204	≤0.030	≤1.00	≤2.00	0.035	≤0.015	0.05 to 0.20	22.00 to 24.00	0.10 to 0.60	3.50 to 5.50	Cu: 0.10 to 0.60
X2CrNiMn23.4	1.4656		≤0.030	≤1.00	≤2.00	0.035	≤0.015	0.05 to 0.20	22.00 to 24.00	0.10 to 0.60	3.50 to 5.50	Cu: 1.00 to 3.00
X2CrNiMn25.7-4 ⁽⁸⁾	1.4410 ⁽⁸⁾	2607	≤0.030	≤1.00	≤2.00	0.035	≤0.015	0.24 to 0.35	24.00 to 26.00	3.00 to 4.50	6.00 to 8.00	
X2CrNiMn25.6-3	1.4607		≤0.030	≤1.00	≤2.00	0.035	≤0.015	0.20 to 0.30	24.00 to 26.00	3.00 to 4.00	6.00 to 8.00	Cu: 1.00 to 2.50
X2CrNiMn25.7-4	1.4601		≤0.030	≤1.00	≤1.00	0.035	≤0.015	0.20 to 0.30	24.00 to 26.00	3.00 to 4.00	6.00 to 8.00	Cu: 0.50 to 1.00; W: 0.50 to 1.00
X2CrNiMn18-5-3	1.4424		≤0.030	1.40 to 2.00	1.20 to 2.00	0.035	≤0.015	0.05 to 0.10	18.00 to 19.00	2.50 to 3.00	4.50 to 5.20	
X2CrNiMn29.7-2 ⁽⁸⁾	1.4477 ⁽⁸⁾		≤0.030	≤0.50	0.80 to 1.50	0.030	≤0.015	0.30 to 0.40	28.00 to 30.00	1.50 to 2.60	5.60 to 7.50	Cu: 0.80
X2CrNi12	1.4003		≤0.030	≤1.00	≤1.50	0.040	≤0.015 ²⁾	≤0.000	10.50 to 12.50		0.30 to 1.00	
X2CrTi12	1.4612	409	≤0.030	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015		10.50 to 12.50		0.50 to 1.50	T: 6% (C+N) to 0.65 Ti: 0.05 to 0.35
X2CrNiTi12	1.4616		≤0.06	≤0.70	≤1.50	0.040	≤0.015		10.50 to 12.50			
X6Cr13	1.4000	410S	≤0.08	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015 ²⁾		12.00 to 14.00			
X6CrNi13	1.4002	405	≤0.08	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015 ²⁾		12.00 to 14.00			Al: 0.10 to 0.30
X2CrNiMoTi15-2	1.4589		≤0.08	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015		13.50 to 15.50	0.20 to 1.20	1.00 to 2.50	Ti: 0.30 to 0.50
X1CrNi15	1.4596	429 ⁽⁸⁾	≤0.12	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.030	≤0.020	14.00 to 16.00			Nb: 0.20 to 0.60
X6Cr17	1.4016	430	≤0.08	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015 ²⁾		16.00 to 18.00			
X2CrTi17	1.4620		≤0.025	≤0.50	≤0.50	0.040	≤0.015	≤0.015	16.00 to 18.00			Ti: 0.30 to 0.60
X2CrNi17	1.4511		≤0.06	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015 ²⁾		16.00 to 18.00			Nb: 1.2% to 1.00
X2CrNiTi17	1.4017		≤0.08	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015		16.00 to 18.00		1.20 to 1.60	
X6CrNiTi17-1	1.4113	434	≤0.08	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015 ²⁾		16.00 to 18.00	0.90 to 1.40		
X2CrTi17	1.4610	438	≤0.06	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015 ²⁾		16.00 to 18.00			T: 4% (C+N), 1.5 to 0.80 ⁶⁾
X2CrMoTi17-1	1.4513		≤0.025	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015	≤0.020	16.00 to 18.00	0.80 to 1.40		Ti: 0.30 to 0.60
X2CrMoTi18-2	1.4621	444	≤0.025	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015	≤0.000	17.00 to 20.00	1.80 to 2.50		T: 4% (C+N), 1.5 to 0.80 ⁶⁾
X6CrMoNi17-1	1.4626	436	≤0.06	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015	≤0.040	16.00 to 18.00	0.80 to 1.40		Nb: 7% (C+N), 0.10 to 1.00
X2CrNiTi18	1.4609		≤0.030	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015		17.50 to 19.50			Nb: 3% to 0.30 to 1.00; Ti: 0.10 to 0.80
X2CrNiTi17	1.4690		≤0.030	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015		16.00 to 17.50			Nb: 0.35 to 0.55; Zr: 2.7% (C+N), 0.15
X1CrNi18	1.4749		0.15 to 0.20	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015	0.15 to 0.25	26.00 to 29.00			
X1CrNi18-2	1.4713		≤0.12	0.50 to 1.00	≤1.00	0.040	≤0.015		6.00 to 8.00			Al: 0.50 to 1.00
X1CrNi19	1.4724		≤0.12	0.70 to 1.40	≤1.00	0.040	≤0.015		12.00 to 14.00			Al: 0.70 to 1.20
X1CrNiSi25	1.4762		≤0.12	0.70 to 1.40	≤1.00	0.040	≤0.015		23.00 to 26.00			Al: 1.20 to 1.70
X2CrMoTi29-4	1.4692		≤0.025	≤1.00	≤1.00	0.030	≤0.010	≤0.045	28.00 to 30.00	3.50 to 4.50		T: 4% (C+N), 0.15 to 0.80 ⁶⁾
X1Cr13	1.4006	410	0.08 to 0.15	≤1.00	≤1.50	0.040	≤0.015 ²⁾		11.50 to 13.50		≤0.75	
X1Cr13	1.4024		0.12 to 0.17	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015 ²⁾		12.00 to 14.00			
X2Cr13	1.4021	420	0.18 to 0.25	≤1.00	≤1.50	0.040	≤0.015 ²⁾		12.00 to 14.00			
X3Cr13	1.4028	420	0.28 to 0.36	≤1.00	≤1.50	0.040	≤0.015 ²⁾		12.00 to 14.00			
X3Cr13	1.4031	420	0.36 to 0.42	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015 ²⁾		12.50 to 14.50			
X4Cr13	1.4034	420	0.43 to 0.50	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015 ²⁾		12.50 to 14.50			
X5CrNiMoV15	1.4116		0.46 to 0.56	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015 ²⁾		14.00 to 15.00	0.50 to 0.80		V: 0.10 to 0.20
X5CrNiMo14	1.4110		0.48 to 0.60	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015 ²⁾		13.00 to 15.00	0.50 to 0.80		V: 0.15
X3CrNiMo14	1.4419		0.38 to 0.42	≤1.00	≤1.00	0.040	≤0.015		13.00 to 14.50	0.60 to 1.00		
X3CrNiMo17-1	1.4122		0.33 to 0.45	≤1.00	≤1.50	0.040	≤0.015 ²⁾		15.50 to 17.50	0.60 to 1.30	≤1.00	
X3CrNiMo19-4	1.4313		≤0.06	≤0.70	≤1.50	0.040	≤0.015	≥0.020	12.00 to 14.00	0.30 to 0.70	3.50 to 4.50	
X4CrNiMo16-5-1	1.4418		≤0.06	≤0.70	≤1.50	0.040	≤0.015 ²⁾	≥0.020	15.00 to 17.00	0.80 to 1.50	4.00 to 6.00	
X1CrNiMoCu21-5-2	1.4422		≤0.020	≤0.50	≤2.00	0.040	≤0.003	≤0.020	11.00 to 13.00	1.30 to 1.80	4.00 to 5.00	Cu: 0.20 to 0.80
X1CrNiMoCu21-5-3	1.4423		≤0.020	≤0.50	≤2.00	0.040	≤0.003	≤0.020	11.00 to 13.00	2.30 to 2.80	6.00 to 7.00	Cu: 0.20 to 0.80
X5CrNiCuNb16-4	1.4542	630	≤0.07	≤0.70	≤1.50	0.040	≤0.015 ²⁾		15.00 to 17.00	≤0.60	3.00 to 5.00	Cu: 3.00 to 5.00; Nb: 5% to 0.45
X7CrNiAl17-7	1.4568	631	≤0.09	≤0.70	≤1.00	0.040	≤0.015		16.00 to 19.00		6.50 to 7.80 ⁴⁾	Al: 0.70 to 1.50

Figura 5 - Composição química habitual dos restantes tipos de aços inoxidáveis (Fonte: www.euro-inox.org em 16.09.2012)

2.1.1. Definição genérica das estruturas atômicas mais comuns nas ligas Fe-C

A cada estrutura corresponde um arranjo atômico diferente em cada célula unitária, o que irá contribuir para a definição das propriedades mecânicas de cada material. De seguida, e de uma forma muito breve, são passados em revista alguns conceitos teóricos genéricos correspondentes a cada uma das estruturas típicas que se podem encontrar nos aços inoxidáveis mais comuns.

- Austenítica (cúbica de faces centradas) - Os átomos dispõem-se nos vértices de um cubo e no centro das faces do cubo.

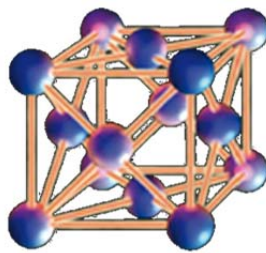


Figura 5 - Estrutura cúbica de faces centradas

- Ferrítica (cúbica de corpo centrado) - Os átomos dispõem-se nos vértices do cubo e no centro do cubo, tal como o ferro puro à temperatura ambiente.

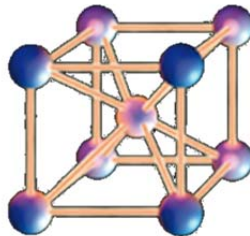


Figura 6 - Estrutura cúbica centrada

- Martensítica (hexagonal compacta) - Os átomos dispõem-se nos vértices de um prisma hexagonal, no centro das faces e entre as faces.

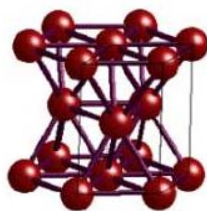


Figura 7 - Estrutura hexagonal compacta

Quando existe Carbono em quantidade suficiente numa liga Fe-C, pode-se fazer passar uma estrutura Austenítica a Martensítica, através de tratamento térmico adequado - a Têmpera – o qual se baseia essencialmente num arrefecimento brusco que irá impedir o reposicionamento dos átomos de carbono no local em que eles se encontravam à temperatura ambiente, antes de serem aquecidos, dando origem a uma estrutura acicular, provida de algumas tensões (que poderão ser parcialmente eliminadas por revenido), mas com uma dureza superior à patenteada pela estrutura austenítica. O ganho de dureza proporciona uma maior resistência ao desgaste mas, em contrapartida, perde-se normalmente ductilidade e tenacidade. O estabelecimento de um compromisso entre os ganhos e as perdas é extremamente importante, devendo ser estabelecido em função dos requisitos determinados para a peça ou componente em questão. É comum encontrarmos dois aços inoxidáveis diferentes num mesmo talher: enquanto a colher e o garfo precisam de resistência mecânica, ductilidade e tenacidade, para além da sempre importante resistência à corrosão, a faca necessita ainda de poder de corte e elevada resistência ao desgaste. Assim, os fabricantes optam geralmente por utilizar aços inoxidáveis austeníticos ou ferríticos no fabrico de garfos e colheres, enquanto para a faca é normalmente seleccionado um aço inoxidável martensítico, que é sujeito a uma têmpera após o processo de conformação a que é sujeito para lhe dar a forma principal.

A formação de estruturas diferentes deve-se essencialmente à composição química dos aços, sendo o crómio um estabilizante da ferrite, com estrutura cúbica de corpo centrado e o níquel um estabilizante de austenite, com estrutura cúbica de faces centradas.

2.1.2. Classificação dos aços inoxidáveis segundo a sua estrutura

Conforme já referido anteriormente, dependendo da composição química e da forma como a liga é arrefecida, poderão formar-se diferentes estruturas, as quais darão origem a ligas com comportamento mecânico, resistência à corrosão, ductilidade, soldabilidade, maquinabilidade e custos igualmente distintos. De seguida, e de uma forma mais elaborada, são caracterizadas as diferentes estruturas que se podem encontrar nos aços inoxidáveis.

2.1.2.1. Aços inoxidáveis ferríticos

Este tipo de aços inoxidáveis possui uma resistência mecânica relativamente limitada, devido ao facto de apresentarem teor em carbono relativamente baixo. A sua microestrutura, que pode ser observada na figura seguinte, mantém-se ferrítica a qualquer temperatura. Quando recozidos

precipitam carbonetos de cromo no interior dos grãos equiaxiais e, se aquecidos a temperaturas superiores a 800°C e arrefecidos bruscamente, podem formar alguma martensite. Quando a sua composição apresenta teores em cromo superiores a 20 %, os seus carbonetos são grosseiros e quase não formam martensite. Quando mantidos a temperaturas entre 400 e 540°C durante longo tempo precipitam uma fase rica em cromo (α') nas deslocações, a qual endurece e fragiliza o aço. Dado esta precipitação ser muito lenta, só coloca problemas em tempo real, não acarretando problemas no processamento do aço (soldadura e tratamento térmico). Aços com teor em cromo superior a 15% sofrem precipitação de fase σ se mantidos durante muito tempo a temperaturas entre 500 e 800°C - esta precipitação é muito lenta, tal como a do caso anterior. Estágios a temperaturas superiores a 950°C originam perda de resistência à corrosão e fragilização; supõe-se que tal tem a ver com precipitações de carbonetos e nitretos nas fronteiras de grão; este fenómeno só pode evitar-se com aços de muito baixo teor em carbono e azoto, elaborados em vazio.

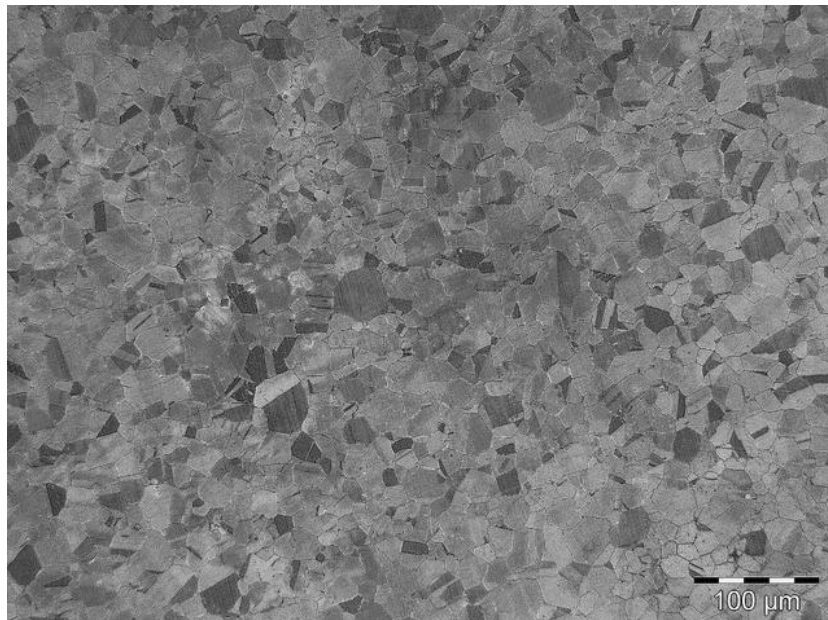


Figura 8 – Microestrutura típica do aço inoxidável ferrítico AISI 430
(www.flickr.com/ em 19.09.2012)

Nos aços inoxidáveis ferríticos o teor em Crómio varia geralmente entre 11 e 17%. Para 13% de Crómio, o teor em Carbono situa-se abaixo de 0,1% podendo, no entanto, subir até 0,2% para teores mais elevados em Crómio.

Estes aços não temperam dado o baixo teor em Carbono. No entanto, os aços com 13% de Crómio e com teores em Carbono de cerca de 0,1%, apresentam uma certa tendência para temperar, embora limitada. Esta tendência deve ser tomada em consideração sempre que se proceda a uma soldadura ou a trabalhos análogos (Núcleo Inox, 2009).

As propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis ferríticos variam dentro dos valores a seguir indicados:

**Tabela 1 – Propriedades Mecânicas dos Aços Inoxidáveis Ferríticos
(Fonte: Apontamentos de Aços Inoxidáveis da FEUP)**

Propriedade		Valores usuais
Tensão Limite Elástico	$R_{0.2}$	275 – 380 MPa
Tensão de Rotura	R_m	450 – 550 MPa
Alongamento	A	20 – 30%

Usam-se como aços de construção quando a resistência à corrosão ou à oxidação a quente é importante. A resistência à corrosão é inferior à dos aços inoxidáveis austeníticos, sendo, porém, consideravelmente mais económicos que estes por conterem teores de níquel muito baixos. Estes aços têm um custo, tenacidade, maleabilidade e resistência à corrosão moderados, quando comparados com os aços Austeníticos. Para além disso, as principais limitações deste grupo de aços são a baixa ductilidade, a elevada sensibilidade ao entalhe, a dificuldade de realizar soldaduras. Fabricam-se porém aços com muito baixo teor em carbono e azoto, com elevada ductilidade e aptidão à soldadura.

São largamente utilizados em talheres, bandejas e em utensílios domésticos, devido ao bom compromisso entre resistência à corrosão e custo baixo (Sarmiento, 2012)

Recentemente, devido ao forte incremento do preço do Níquel no mercado das matérias-primas, os aços inoxidáveis ferríticos passaram a ser encarados como uma solução para diversas aplicações importantes em termos de volume de produção. No entanto, tem-se verificado que este tipo de aço apresenta algumas limitações em termos de conformabilidade, principalmente quando sujeitos a embutidura profunda, deixando visíveis estrias correspondentes às bandas de *Lüders* nas zonas mais solicitadas, e chegando mesmo a romper em situações onde os aços inoxidáveis austeníticos não apresentam qualquer problema (Pinho et al, 2011).

2.1.2.2. Aços inoxidáveis martensíticos

Esta família de aços é muito semelhante à dos aços ao carbono e de baixa liga, possuindo uma microestrutura típica idêntica à apresentada na figura seguinte.

Esta estrutura confere ao aço uma maior dureza, maior condutibilidade térmica e maior fragilidade. No entanto, o aço fica com uma menor capacidade para conformar.

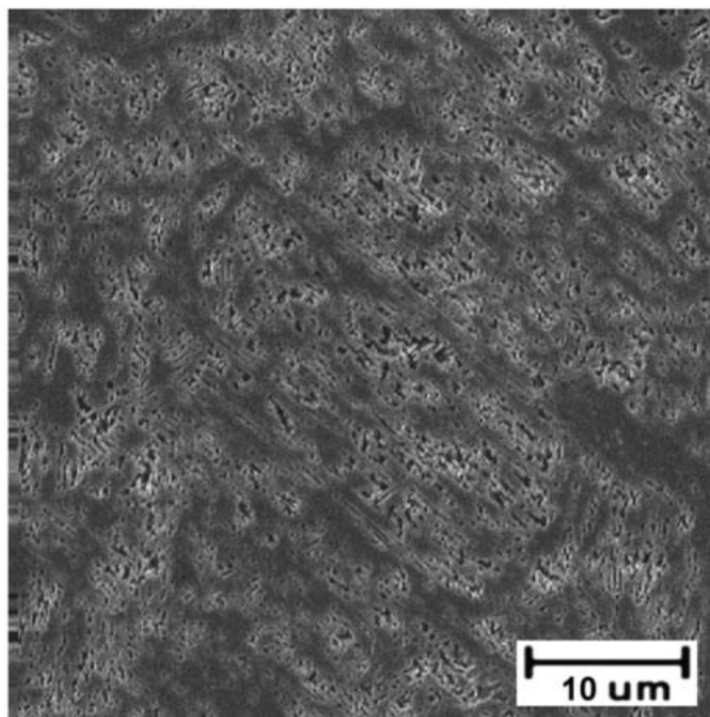


Figura 9 – Microestrutura típica do aço inoxidável martensítico AISI 410 (Toro, 2003)

Nos aços inoxidáveis martensíticos o teor em Carbono é ajustado em relação ao teor em Crómio de maneira a que a estrutura, tornada quase totalmente austenítica por aquecimento acima da temperatura crítica, se transforme em martensite após arrefecimento rápido. De um modo geral, o teor em Crómio varia entre 12 e 15% e o teor em Carbono entre 0.15 e 1.00%, ou mesmo um pouco mais. Portanto, estes aços temperam (Núcleo Inox, 2009). A sua resistência à corrosão tende a ser inferior à dos outros aços inoxidáveis. No entanto, ainda se pode considerar satisfatório em meios não muito agressivos.

A sua principal aplicação é em peças e componentes que exigem elevada dureza e resistência à abrasão ou erosão, por exemplo as lâminas de facas, discos de travagem dos motociclos, tesouras e equipamentos cirúrgicos (Sarmiento, 2012).

2.1.2.3. Aços inoxidáveis austeníticos

Esta família de aços é a maior em termos de número de ligas e de volume de utilização. A sua microestrutura poderá ser observada na figura seguinte. Tal como os ferríticos, estes não podem ser endurecidos por tratamento térmico.

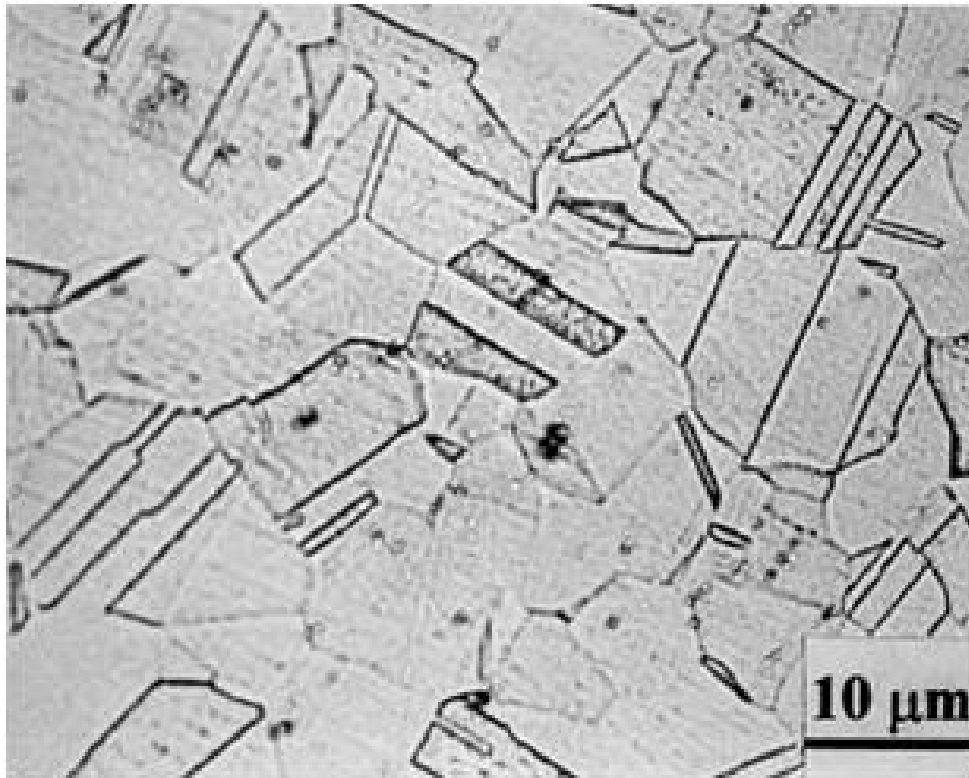


Figura 10 – Microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico
(Fonte: www.keytometals.com, em 18.09.2012)

A sua estrutura deve-se, principalmente, à adição de Níquel. Dependendo do teor de Níquel, estes aços têm uma maior resistência mecânica, quando sujeitos à forjagem a frio.

Esta estrutura confere ao aço maior resistência à corrosão, maior deformabilidade, maior capacidade de soldadura e maior dilatação térmica. No entanto, a sua tenacidade e condutibilidade térmica diminuem.

Estes aços apresentam elevado teor em Crômio (15 a 26%) e em Níquel (7 a 25%). Os teores destes elementos têm que ser equilibrados de forma a garantir uma estrutura completamente austenítica. São geralmente amagnéticos ou, em certos casos, ligeiramente magnéticos. Não temperam, utilizando-se no estado hipertemperado (estrutura austenítica). Frequentemente são adicionados outros elementos de liga, principalmente o Molibdênio, para lhes melhorar a resistência à corrosão em condições mais severas (Núcleo Inox, 2009).

Este material pode receber conformações bastante significativas e produzir peças complexas mesmo utilizando processos de deformação a frio, tais como a embutidura.

São largamente utilizados em equipamentos para a indústria alimentar, farmacêutica, papel, celulose e petroquímica. Também são utilizados frequentemente no fabrico de trens de cozinha e talheres (Sarmiento, 2012).

2.2. O caso particular dos aços inoxidáveis duplex

Os inoxidáveis duplex são uma família de aços com composições que aliam uma boa resistência à corrosão com uma elevada resistência mecânica, sendo fáceis de fabricar.

Esta família tem uma estrutura mista de Austenite e Ferrite, através de uma adequada mistura entre os elementos ferritizantes, nomeadamente o cromo e o molibdénio, e os elementos austenizantes, como sejam o níquel e o carbono (Potgieter, 1991).

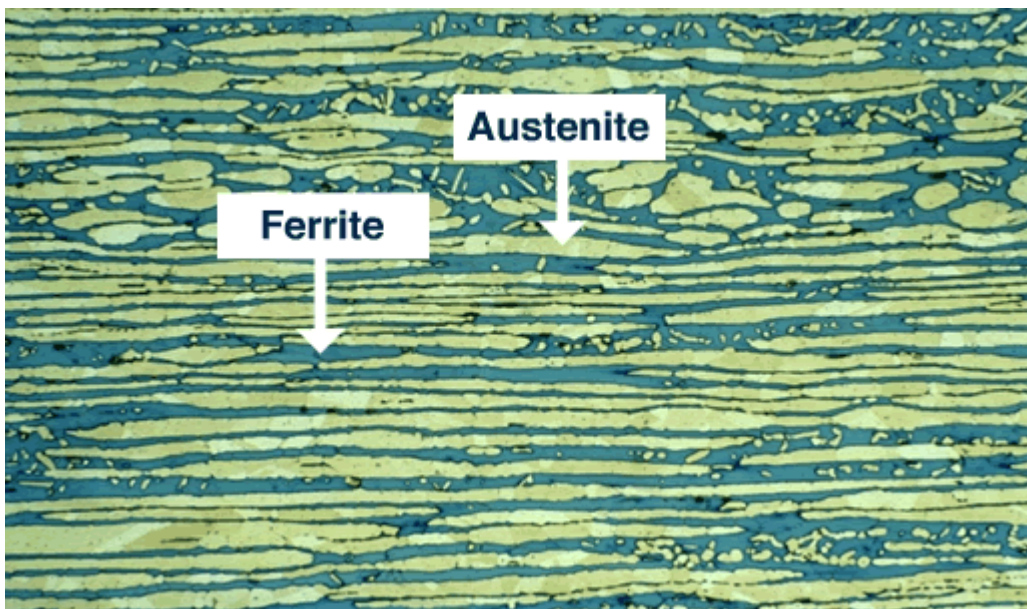


Figura 11 – Microestrutura típica de um aço inoxidável duplex (Fonte: http://www.imoa.info/moly_uses/moly_grade_stainless_steels/duplex_stainless_steel.php, em 20.09.2012)

Os primeiros aços inoxidáveis duplex apareceram na Suécia, no início dos anos 30, com a intenção de reduzir o problema de corrosão intergranular, existente nos aços à época (Liljas, 994).

Desde a sua produção na Suécia e na Finlândia, à patente registada em França em 1936, os aços inoxidáveis duplex foram usados em vários tipos de indústria, incluindo depósitos, permutadores de calor e bombas.

Os primeiros tinham boas características, mas eram limitados em termos de soldadura, sendo por isso utilizados em situações onde não fosse necessário soldar. Com a evolução registada no

fabrico dos aços inoxidáveis duplex, em 1968, utilizando a técnica AOD (*Argon Oxigen Decarburization*), aumentou a gama de aços existentes. Entre as várias vantagens deste processo, a adição de azoto como elemento de ligação foi a mais importante. Este elemento permite manter a zona termicamente afectada pela soldadura com tenacidade e resistência à corrosão idênticas ao material base.

No diagrama construídos por Schaeffler tendo por base os índices de Crómio Equivalente e Níquel Equivalente, é possível observar qual o posicionamento dos aços inoxidáveis duplex relativamente aos outros aços inoxidáveis, com estruturas ferríticas ou austeníticas. Este diagrama auxilia na previsão do tipo de estrutura a obter quando, na soldadura, são misturados dois aços inoxidáveis com diferentes composições químicas, possuindo ou não a mesma estrutura.

Equivalente em Níquel

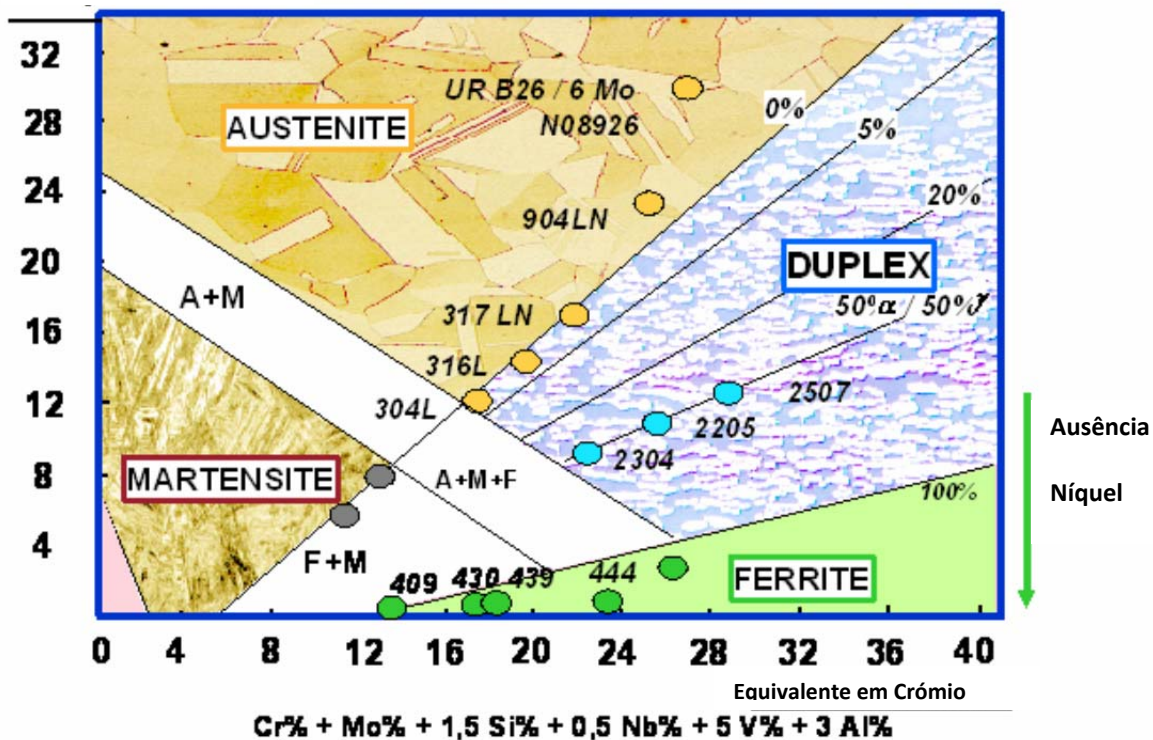


Figura 12 – Representação das diferentes estruturas dos aços inoxidáveis no Diagrama de Schaeffler (Fonte: www.flickr.com/photos/cambridgeuniversity.../4708632987/, em 20.09.2012)

Como consequência de uma estrutura repartida entre a austenite e a ferrite, têm características comuns a estes dois tipos de aços. A ferrite é responsável pelo aumento da resistência mecânica, enquanto a austenite garante a tenacidade e uma melhor resistência à corrosão (Dobrzanski, 2007). Em termos de resistência mecânica, os aços inoxidáveis duplex poderão atingir o dobro da conseguida pelos aços inoxidáveis austeníticos ou ferríticos regulares. No entanto, deverá ser referido que estes aços têm uma tenacidade superior aos ferríticos, mas não tão boa quanto a patenteada pelos austeníticos. A sua resistência à corrosão vai depender essencialmente dos elementos presentes na liga e respectivos teores: a sua resistência à corrosão pode ser similar à patenteada pelo AISI 304 ou AISI 316, dependendo do teor em Molibdénio presente. Contudo,

apresentam uma resistência à corrosão sob tensão muito boa, principalmente devido à presença da ferrite, o que pode ser um óptimo factor de selecção, já que os aços inoxidáveis austeníticos apresentam dificuldades de resistência à corrosão na presença conjunta de certos cloretos, humidade ou temperaturas elevada. Em termos de custo, devido ao facto de ter normalmente teores relativamente baixos dos elementos de liga mais caros (Níquel e Molibdénio), e ainda devido ao facto da sua resistência mecânica ser superior, o que permite alguma redução das secções a utilizar, poderá prever-se alguma redução global de custos com a aplicação deste tipo de aço inoxidável.

A sua composição típica é de: 22% de Crómio; 5% de Níquel; 3 % de Molibdénio e uma pequena percentagem de Azoto (IMOA, 2009).

Devido à sua elevada percentagem de Crómio, complementada pela presença de Molibdénio e Azoto, estes aços mostram elevada resistência à corrosão por picadas ('Pitting').

Usando a equação para o cálculo do teor Equivalente à Resistência por Picadas ('Pitting Resistance Equivalent') (PRE):

$$PRE = Cr + 3,3 \times (Mo + \frac{1}{2}W) + 1,6N \quad (1)$$

verifica-se que este tipo de aço inoxidável pode alcançar um valor de PRE na ordem dos 40, que é um valor normalmente atribuído à designação de aço inoxidável 'superduplex' (Liljas, 1994).

Estes aços são endurecíveis por tratamento térmico, sendo mais duros que os ferríticos e os austeníticos. Tal como os ferríticos, são magnéticos e possuem boa maleabilidade e soldabilidade, assim como os austeníticos.

Os aços inoxidáveis duplex apresentam um baixo teor de Carbono e, o aumento de Azoto na sua composição, faz com que tenham uma maior resistência mecânica, uma maior tenacidade e resistência à corrosão (Eckenrod, 1984).

Como possuem uma maior resistência mecânica, são necessários maiores esforços na conformação.

Os aços inoxidáveis duplex estão disponíveis no mercado há cerca de 80 anos e, no entanto, representavam apenas 1% do volume do aço inoxidável consumido no início dos anos 90. (Liljas, 1994).

Um possível exemplo da sua aplicação são as plataformas de extracção de petróleo, onde estão sujeitos à ação de agentes corrosivos do meio onde estão a ser utilizados, como por exemplo, a água do mar, onde cloretos, sulfetos e outras substâncias estão também presentes.

Nos últimos anos, a sua incomparável resistência à corrosão, tornou-se numa característica bastante atraente sob o ponto de vista ambiental, na medida em que, pelo facto de não apresentar corrosão acentuada, a libertação de iões metálicos para o ambiente circundante é consideravelmente mais baixa que entre outros tipos de aços.

Numa experiência realizada em Estocolmo, onde foram feitas comparações da libertação dos iões metálicos em painéis metálicos de coberturas expostas ao ambiente fabricados em Cobre, Zinco e aço inoxidável, foi constatado que, enquanto no Cobre e Zinco as taxas de libertação de iões foram de 1 e 3 g/m² anuais, respectivamente, a taxa combinada de Níquel e Crómio no painel de aço inoxidável foi inferior a 0,01 g/m², anualmente.

No Brasil um estudo demonstrou algumas das contribuições do aço inoxidável, no que respeita à sustentabilidade. Nesse estudo observou-se que o consumo de matérias-primas não renováveis, como sendo o minério de Ferro entre outros, para a fabricação de tubos de aço ao carbono era pelo menos oito vezes maior que o utilizado na produção de tubos de aço inoxidável. O mesmo acontece relativamente à emissão de poluentes.

Segundo a consultora do *Nickel Institute*, *Catherine Houska*, o aço inoxidável contribui para gerar e economizar energia, fornecer ar limpo, preservar água, evitar as substâncias químicas perigosas e limitar a contaminação metálica no meio ambiente e nos aterros sanitários (Núcleo Inox, 2009)

2.2.1. Importância dos elementos de liga

Convém salientar que os elementos de liga, quando usados em conjunto com outros, podem originar nos aços propriedades ligeiramente diferentes das que lhe dariam se utilizados isoladamente. Além disso, parece que os elementos de liga se tornam mais eficazes quando utilizados juntamente com outros (Soares, 1992). Seguidamente é realizada uma resenha das propriedades conferidas por cada um dos elementos de liga que podem ser utilizados na composição dos aços inoxidáveis duplex.

2.2.1.1. Crómio (Cr)

Como já foi referido, este elemento confere ao aço a capacidade de formar, na presença do Oxigénio, uma película de Óxido de Crómio que lhe permite aumentar a sua resistência à corrosão. Para que tal aconteça, é necessária uma percentagem mínima de 10,5% de Crómio. Aumentando a percentagem de Crómio, aumenta a resistência à corrosão do aço.

No entanto, para que se forme a estrutura dupla, característica dos aços duplex, aumentando a percentagem do Crómio, torna-se necessário aumentar a percentagem de Níquel (Ni).

Os aços inoxidáveis duplex têm na sua composição química, pelo menos 20% de Crómio (IMOA, 2009).

O Crómio também aumenta a resistência à oxidação a altas temperaturas e torna o aço apto a ser temperado no ar ou no óleo. Diminuindo a velocidade crítica de têmpera aumenta a penetração de têmpera enfraquecendo, no entanto, a resiliência (Soares, 1992).

É um estabilizador da ferrite.

2.2.1.2. Molibdénio (Mo)

Este elemento, juntamente com o Crómio, aumenta a resistência à corrosão por picadas (IMOA, 2009).

O Molibdénio diminui a velocidade crítica de têmpera, melhorando a temperabilidade do aço. Reduz a fragilidade por revenido nos aços CrNi e nos aços ao Manganês, contribuindo para um afinamento do grão. Aumenta o limite elástico, a resistência à tração e a resistência a quente (Soares, 1992).

É um estabilizador da ferrite.

2.2.1.3. Azoto (N)

A adição deste elemento, nas devidas proporções, confere aos aços inoxidáveis duplex maior resistência a certos tipos de corrosão e aumenta, proporcionalmente ao teor utilizado, a resistência mecânica e a ductilidade do aço.

A tendência ferrítica do Crómio e do Molibdénio são equilibradas pela austenítica do Níquel e do Azoto (IMOA, 2009).

Este elemento é um estabilizador da austenite (Tseng, 2003).

2.2.1.4. Níquel (Ni)

O Níquel é um estabilizador da austenite que permite a mudança de estrutura cúbica de corpo centrado para cúbica de faces centradas (IMOA, 2009).

O Níquel por si só possui excelente resistência à corrosão em diversos meios, e a sua estrutura cristalográfica e propriedades mecânicas, tornam-no adequado para ser utilizado como base de diversas ligas metálicas e com propriedades específicas para as aplicações desejadas.

Este elemento aumenta a penetração de têmpera e a tenacidade dos aços e diminui a condutibilidade térmica e eléctrica (Soares, 2002).

2.2.1.5. Manganês (Mn)

Este elemento não forma carbonetos, encontrando-se dissolvido na matriz à qual confere um aumento de resistência. O Manganês diminui consideravelmente a velocidade crítica de têmpera, facilitando assim bastante a penetração de têmpera. É responsável pelo incremento do limite elástico e da resistência à tração (Soares, 2002).

2.3. Caracterização dos aços inoxidáveis duplex

Com vista a explorar da melhor forma as propriedades deste tipo de materiais, foram desenvolvidas inúmeras formulações, correspondentes a outras tantas composições, que visam corresponder às mais diversas necessidades do mercado nas mais distintas áreas.

Previamente à selecção de um dado material para um determinado tipo de aplicação, o material necessita ser convenientemente caracterizado nas mais diversas vertentes, sendo estes ensaios tanto mais exaustivos quanto mais complexa e severa é a aplicação em causa. O factor custo é normalmente um dos factores mais preponderantes na selecção de um dado material. Sendo os aços inoxidáveis duplex um material relativamente dispendioso, só é ponderada a sua utilização quando o seu conjunto de propriedades satisfaz os requisitos de aplicação como nenhum outro material de custo inferior.

Nos aços inoxidáveis duplex, conforme já referido anteriormente, é extremamente valorizada a conjugação de uma óptima resistência mecânica com uma superior resistência à corrosão.

Nesta perspectiva, torna-se extremamente importante quantificar várias das propriedades mecânicas deste material, para as comparar com outros materiais concorrentes e para permitir uma abordagem ao cálculo de estruturas, tubagens, reservatórios ou simples painéis, com o rigor necessário a um correcto dimensionamento, que optimize a espessura ou geometria do material a aplicar, minimizando por esta via os custos e o impacto para com o ambiente.

Os fabricantes deste tipo de aços fornecem normalmente tabelas bastante completas de características, indicando também as aplicações mais características, tabelas essas normalmente designadas por '*datasheets*'. No entanto, para uma mesma designação de aço e tipo de propriedade, surge normalmente um intervalo no qual poderão estar contidos os valores característicos a obter para esse aço. Normalmente, entidades independentes procedem também à sua verificação, com vista a tornar mais credíveis os resultados obtidos pelo fabricante. No entanto, devido a alterações quase insignificantes na composição química, ou ao processo de fabrico e transformação dos aços, é impossível garantir propriedades que, quantitativamente, apresentem sempre o mesmo valor. Assim, é comum as próprias empresas consumidoras, que possuem dimensão e estrutura para tal, possuírem meios próprios de verificação das propriedades que são mais críticas para cada tipo de aplicação e, quando isso não acontece, recorrem frequentemente a organismos certificados para proceder a essa mesma verificação.

No caso dos aços inoxidáveis duplex, existem essencialmente três vertentes que normalmente são exploradas pelos clientes: as propriedades mecânicas, as propriedades de resistência à corrosão e as possíveis alterações estruturais provocadas pela soldadura (mais comuns) ou por tratamentos térmicos (mais raro).

Neste contexto, são seguidamente apresentadas algumas vias correntemente usadas para caracterizar os aços inoxidáveis duplex, tanto pelos fabricantes como pelos seus clientes.

2.3.1. Análise da Estrutura

A análise da estrutura é vital para se perceber de que forma os constituintes estão distribuídos. É normalmente realizada com recurso à Metalografia, tal como outro aço qualquer. O procedimento habitual passa por cortar uma pequena porção de material e efectuar uma montagem a quente ou a frio, conforme os meios disponíveis no laboratório usado. Seguidamente, a amostra é lixada e polida, sendo posteriormente atacada com ácidos próprios para criarem o respectivo contraste entre os diferentes constituintes. Em seguida, a amostra é analisada em microscópio (normalmente óptico), permitindo obter imagens idênticas às anteriormente mostradas.

2.3.2. Ensaio de Tracção

As propriedades mecânicas constituem as características mais importantes dos metais para a sua aplicação nos vários campos da engenharia, visto que o projecto e a execução das estruturas metálicas, quer fixas quer móveis, assim como os produtos metálicos, são projectados com base no seu conhecimento.

As propriedades mecânicas definem o comportamento de um material quando sujeito a esforços de natureza mecânica e correspondem às propriedades que, num determinado material, determinam a sua capacidade de transmitir e resistir aos esforços que lhe são aplicados, sem romper ou sem que se produzam deformações incontroláveis.

Os ensaios de tracção, sendo de uso universal, possuem a enorme vantagem de, com apenas um ensaio, permitirem o conhecimento de diversas grandezas, correspondentes a tantas outras propriedades. Para além disso, os corpos de prova (provetes) são de realização bastante simples, estando a sua geometria padronizada pelas respectivas normas: NP / EN 10002-1, DIN 50125, DIN 50145, DIN 50146, ASTM A370-E8, AFNOR NF A03-151 e AFNOR NF A03-160. Para além da geometria e dimensões dos provetes, estas normas estabelecem também regras para os procedimentos a adoptar na realização dos ensaios, assim como parâmetros para a realização dos mesmos. No que se refere à geometria, podem ser adoptados provetes cilíndricos quando a matéria-prima é fornecida em arame ou varão, ou planos quando é fornecida sob a forma de chapa.

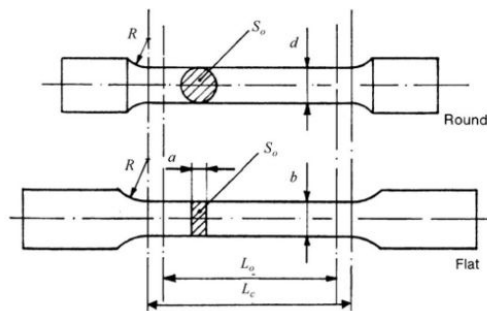


Figura 13 – Formatos de provetes normalmente usados para a realização de ensaios de tracção (http://www.professionaltesting.co.th/web_page/tensile-test, em 15.09.2012)

Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios de tracção poderão ser do tipo electromecânico ou electro-hidráulico. O preço dos primeiros é bastante mais acessível do que os segundos, no entanto, a versatilidade dos equipamentos electro-hidráulicos é bastante maior, já que permite tudo aquilo que os electromecânicos permitem, e ainda efectuar ciclos repetitivos de carga-descarga devidamente controlados, assim como uma aplicação da carga ainda mais precisa e lenta, o que permite estudar fenómenos de fadiga e de 'compliance' (mecânica da fractura) em provetes de diferentes materiais, devidamente preparados.

A título de exemplo de uma máquina universal de ensaios electromecânica, é apresentada na figura seguinte uma imagem deste tipo de equipamentos de uma reputada marca internacional.



**Figura 14 – Equipamento electromecânico para a realização de ensaios de tracção
(Fonte: INSTRON)**

O uso extremamente corrente deste tipo de ensaios está directamente relacionado com a elevada quantidade de informação extremamente útil que proporciona. Assim, e só a partir deste ensaio, se pode obter informações e quantificar propriedades nas seguintes vertentes:

- Limite elástico: através da sua Tensão de Cedência ou Tensão Limite Convencional de Proporcionalidade (expressas em MPa);
- Resistência mecânica: através da Tensão de Rotura (MPa);
- Rigidez: através do Módulo de Elasticidade, também designado por Módulo de Young (expresso normalmente em GPa para metais);
- Ductilidade: através da Extensão após Rotura (%) ou da Estricção (%);
- Relação entre a Deformação Transversal e a Deformação Longitudinal: Coeficiente de Poisson (adimensional);
- Encruamento: através do incremento registado na resistência após uma carga e descarga do provete;

O ensaio de tracção permite ainda avaliar, de modo não tão directo, outras propriedades, tais como a resiliência e a tenacidade (Davim, 1992). No mesmo equipamento em que se efectuam os ensaios de tracção, poderão ainda ser efectuados ensaios de compressão, que são úteis para a avaliação de outras propriedades, tais como a resistência à compressão e a maleabilidade do material.

A realização dos ensaios de tracção permite a elaboração de diagramas Força *versus* Deslocamento que, tendo depois em conta a secção do provete utilizado e a distância inicial entre pontos na secção útil do provete, se vai transformar numa curva Tensão *versus* Deformação, da qual se apresenta abaixo um exemplo. Estas curvas poderão ainda assumir duas vertentes: a curva convencional ou a curva real, consoante se considera constante a secção do provete ao longo do ensaio (situação irreal) ou se considera a redução progressiva da secção do provete ao longo do ensaio (correspondente a uma situação de massa constante ao longo do ensaio), respectivamente.

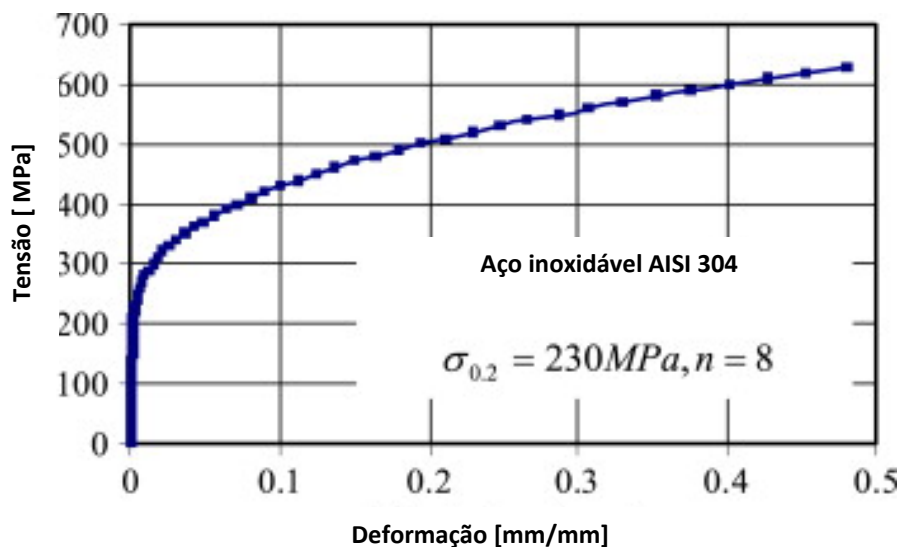


Figura 15 – Curva convencional Tensão x Deformação para um Aço Inoxidável AISI 304 (Hassanein, 2010)

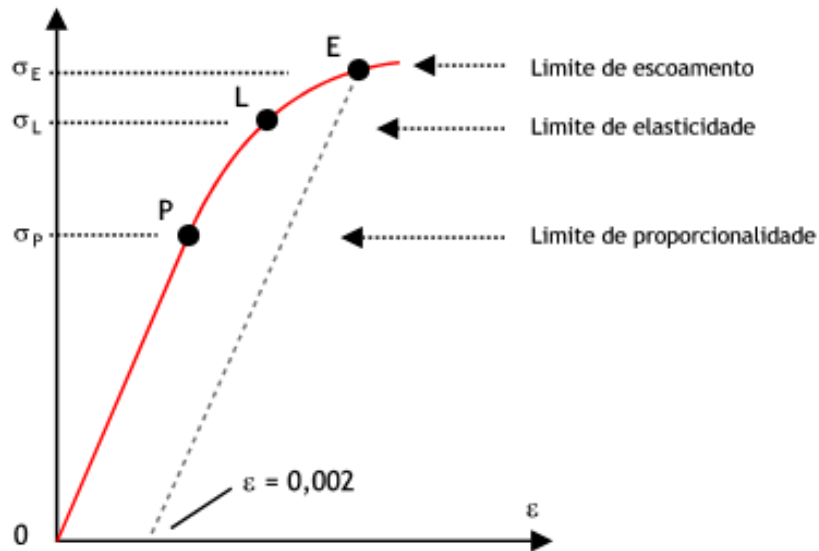


Figura 16 – Pormenor da zona inicial do diagrama Tensão x Deformação referente a um Ensaio de Tracção, correspondente à Zona Elástica e à passagem para a Zona Plástica (www.mspc.eng.br em 15.09.2012)

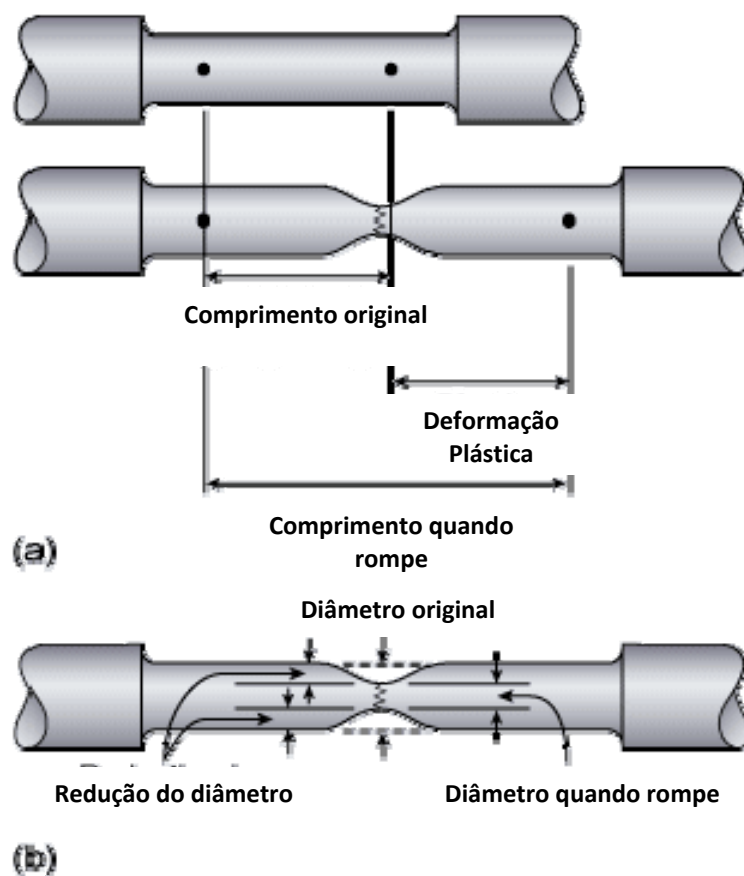


Figura 17 – Pormenor da deformação (a) longitudinal e (b) transversal do provete cilíndrico no fim de um ensaio de tracção (<http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/> consultado em 15.09.2012)

Com vista a caracterizar os materiais que têm disponíveis para fornecer, os fabricantes efectuem os respectivos ensaios e produzem as respectivas tabelas informativas, que permitem ao projectista efectuar os respectivos cálculos e verificar da aplicabilidade destes materiais e respectivas secções necessárias, em função das solicitações em jogo. O exemplo de duas dessas tabelas poderão ser vistas nas próximas duas figuras.

			Valores mínimos segundo EN 10088			Valores normais		
			P	H	C	P (15mm)	H (4mm)	C (1mm)
LDX 2101*								
Proof strength	R _{p0.2}	MPa	450	480	530	480	570	600
Tensile strength	R _m	MPa	650	680	700	700	770	800
Elongation	A ₅	%	30	30	30/20 ¹	38	38	35
Hardness	HB					225	230	230
2304								
Proof strength	R _{p0.2}	MPa	400	400	450	450	520	545
Tensile strength	R _m	MPa	630	650	650	670	685	745
Elongation	A ₅	%	25	20	20	40	35	35
Hardness	HB					210	220	225
LDX 2404™*								
Proof strength	R _{p0.2}	MPa	480	550	550	540	620	640
Tensile strength	R _m	MPa	680	750	750	750	800	850
Elongation	A ₅	%	25	25	25/20 ¹	33	32	30
Hardness	HB, max		290	290	290	230		
2205								
Proof strength	R _{p0.2}	MPa	460	460	500	510	620	635
Tensile strength	R _m	MPa	640	700	700	750	820	835
Elongation	A ₅	%	25	25	20	35	35	35
Hardness	HB					230	250	250
2507								
Proof strength	R _{p0.2}	MPa	530	530	550	550	590	665
Tensile strength	R _m	MPa	730	750	750	820	900	970
Elongation	A ₅	%	20	20	20	35	30	33
Hardness	HB					250	265	255

P=chapa laminada a quente. H=chapa plana laminada a quente. C=chapa plana laminada a frio

*Propriedades Mecânicas segundo AM 641

Figura 18 – Exemplo de uma ‘datasheet’ correspondente aos aços inoxidáveis duplex fabricados pela OUTOKUMPU, para ensaios efectuados à temperatura ambiente (Fonte: OUTOKUMPU)

	LDX 2101®	2304	2205	2507	4404
R _{p0.2}	478	446	497	565	280
R _m	696	689	767	802	578
Fatigue strength	500	450	510	550	274

Figura 19 – Exemplo de uma ‘datasheet’ correspondente aos aços inoxidáveis duplex fabricados pela OUTOKUMPU, para ensaios pulsados efectuados à temperatura ambiente (Fonte: OUTOKUMPU)

A realização destes ensaios implica forte sentido de responsabilidade, por forma a garantir uma uniformidade de procedimentos e o cabal cumprimento de todas as directivas emanadas pelas respectivas normas. O simples desalinhamento do provete ou um incorrecto aperto do mesmo nas garras da máquina, poderá conduzir a erros que dificultarão imenso a leitura e compreensão dos dados obtidos, para além de comprometer os resultados. Daí, em grande parte dos casos, estes ensaios serem efectuados em Laboratórios Certificados.

Em termos de investigação, este tipo de propriedades tem sido pouco explorada em artigos científicos, já que a maioria, ou mesmo a totalidade dos investigadores toma como fiáveis os resultados emanados pelos fabricantes deste tipo de ligas. No entanto, mesmo assim, é possível encontrar estudos mais elaborados relativos ao escoamento plástico, durante a deformação deste tipo de material (Reis, 1999). Os ensaios de tracção têm sido também utilizados por alguns autores para estudar a degradação das propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis em geral, e dos duplex em particular, no que respeita ao envelhecimento, principalmente quando sujeitos a baixas temperaturas (Bonnet, 1990; Chopra, 1988a,b, 1990, 1992).

2.3.3. Resistência ao impacto

À capacidade que o material tem de absorver energia no impacto a uma dada temperatura sem se partir, dá-se o nome de resiliência. Esta propriedade é essencial em muitas aplicações de engenharia, muito principalmente quando os materiais são sujeitos a grandes amplitudes térmicas, incluindo principalmente temperaturas negativas. Aliás, é principalmente na gama de temperaturas negativas que os materiais metálicos (e não só) apresentam maiores dificuldades em absorver energia, passando abruptamente de um comportamento dúctil para frágil.

Pode-se afirmar que os materiais metálicos apresentam dois tipos fundamentais de rupturas, dúctil e frágil, conforme possuem ou não, uma elevada deformação plástica, sendo que a ruptura frágil ocorre num intervalo de tempo reduzido.

É de notar que a ruptura frágil pode ocorrer mesmo num material com comportamento dúctil à temperatura ambiente (quando existem defeitos, por exemplo). Este imprevisto torna a fractura gravosa, tendo em contas as consequências. Com o intuito de garantir a segurança e reduzir a probabilidade do seu aparecimento, são efectuados ensaios, que podem seguir dois métodos, conforme o tipo de esforço a que o corpo está sujeito é de carácter dinâmico ou estático.

Se se trata de um esforço de carácter dinâmico, são efectuados ensaios de choque Charpy, *Izod*, ensaios de queda de massa, ensaios de *Batelle*, entre outros. Por outro lado, se os esforços são de carácter estático, incluem-se metodologias desenvolvidas no âmbito da mecânica da fractura, em que os ensaios se fundamentam na análise da propagação de uma fissura pré-existente em condições elásticas ou elásto-plásticas.

Os ensaios de choque medem a capacidade de absorção de energia de deformação no domínio plástico.

Os equipamentos disponíveis para realizar este tipo de ensaios, agrupam-se em duas áreas:

- Os que utilizam dispositivos pendulares;
- Os que utilizam dispositivos de queda de massa.



**Figura 20 – Equipamento electromecânico para a realização de ensaios de tracção
(Fonte: INSTRON)**

Os ensaios que utilizam dispositivos de queda de massa aplicam-se a todo o tipo de aços não-austeníticos com espessura igual ou superior a 15.9mm, sendo regidos pela Norma ASTM E-208. O uso das metodologias *Charpy* ou *Izod* está limitado a materiais com espessuras máximas de 10mm e são regidos pela Norma NP EN 10045-1.

Entre os ensaios *Charpy* e *Izod*, a diferença fundamental está no tipo de apoio: enquanto no ensaio *Charpy* se efectua um apoio duplo simples, em cada extremidade, no ensaio *Izod*, o provete é encastrado numa das extremidades, ficando com a outra extremidade livre. Os provetes são dotados de um entalhe, em U ou em V, por forma a criar um estado triaxial de tensões e a delimitar a zona onde poderá ocorrer a rotura depois do impacto.

Em Portugal, a legislação prevê configurações normalizadas para provetes conforme o entalhe é em U ou em V, que são discriminados na referida norma.

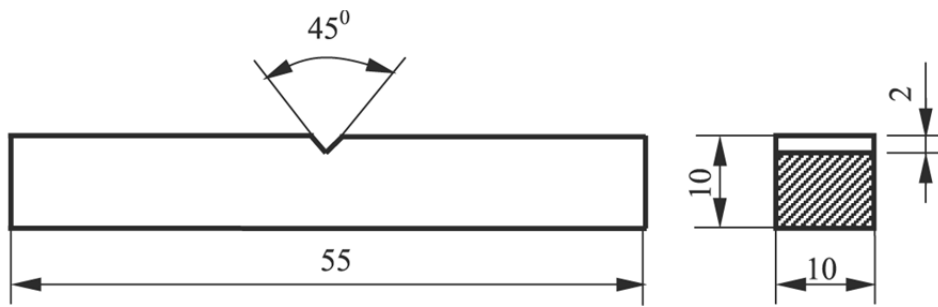


Figura 21 – Aspecto da geometria de um provete para ensaio Charpy com entalhe em V, Segundo a Norma NP EN 10045-1

Qualquer um destes provetes deve cumprir as tolerâncias estipuladas e referenciadas nas respectivas normas.

Com o auxílio do porta-provete, o provete é encostado convenientemente aos apoios, de forma a que o plano de simetria do entalhe não se afaste mais de 0,5mm do plano de simetria dos apoios assim como garantir que a aresta do martelo vai bater na face oposta ao entalhe produzido no provete.

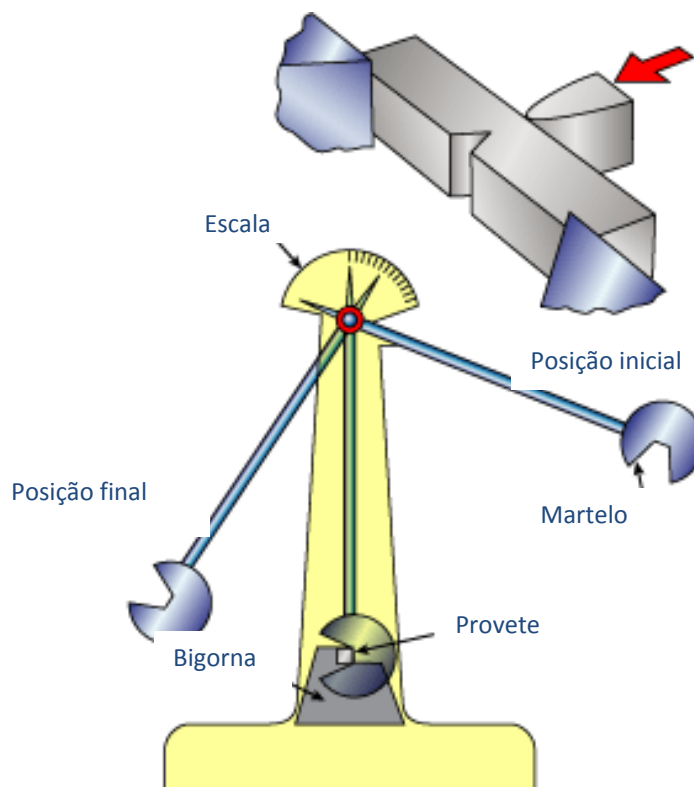


Figura 22 – Metodologia de ensaio *Charpy* com o respectivo posicionamento do provete, segundo a Norma NP EN 10045-1 (Fonte: AUTO entusiastas, 2012)

O método *Izod*, divulgado sobretudo nos Estados Unidos da América, é especificado pela Norma ASTM E 23, onde são admitidas 4 configurações para provetes entalhados, como se pode ver na figura seguinte.

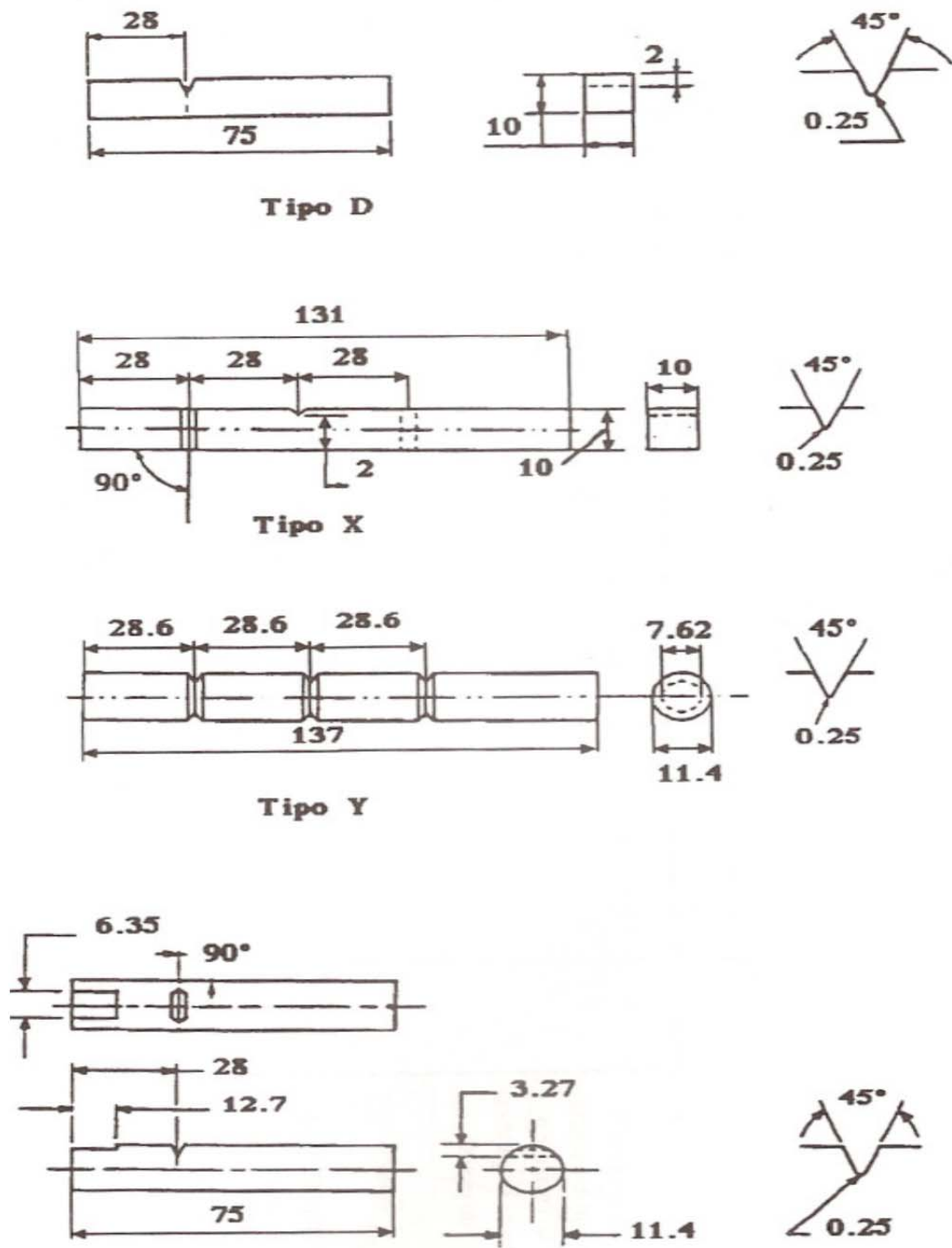


Figura 23 – Geometria dos provetes correspondentes à metodologia Izod (Davim,1992)

As máquinas de ensaios do tipo pendular, baseiam-se no princípio de que a energia mecânica se mantém constante. Essa energia é a soma da energia potencial, energia cinética e a totalidade da energia associadas a todas as perdas que acontecem, e que normalmente se considera desprezável. Deste modo, pode-se considerar que:

$$E_M = E_C + E_P \quad (2)$$

No início do ensaio, à posição inicial do pêndulo associa-se a energia potencial máxima, sendo a energia cinética nula. Quando se larga o pêndulo, a energia potencial transforma-se gradualmente em energia cinética até ao momento do impacto. Neste momento, a energia cinética é máxima, assumindo o valor correspondente à energia potencial inicial. No impacto é absorvida energia. Após o impacto, a energia cinética volta novamente a transformar-se gradualmente em energia potencial, à medida que o pêndulo volta a subir do lado contrário ao da descida. No entanto, como foi absorvida energia, o pêndulo irá subir a uma altura menor do que aquela da qual foi largado. A diferença entre a altura inicial e a altura final atingida será tanto maior quanto mais energia tiver sido absorvida no impacto. Os equipamentos estão normalmente já graduados em função da massa do pêndulo e altura de que são largados, por forma a indicarem de imediato a energia absorvida, que corresponderá a uma determinada altura perdida. Estes ensaios são efectuados a diferentes temperaturas, traçando-se um gráfico Energia absorvida versus Temperatura. Quando existe uma transição acentuada na energia absorvida, esta ocorre numa faixa de temperaturas relativamente pequenas (Davim, 1992) e está-se em presença da “Temperatura de Transição”, que corresponde a uma mudança de comportamento do material, passando de dúctil para frágil à medida que a temperatura de ensaio desce. Quanto mais baixa for esta temperatura de transição, mais confiança terão os projectistas em poder aplicar estes materiais em situações ou locais onde a temperatura de serviço possa atingir níveis relativamente baixos.

A mudança de comportamento origina normalmente superfícies de fractura bem diferenciadas, sendo que a fractura dúctil proporciona superfícies com aspecto baço e fibroso (irregular), enquanto um comportamento frágil origina superfícies lisas e relativamente brilhantes.

No ensaio *Charpy*, o valor da energia absorvida deve ser designado através de uma simbologia própria que caracteriza o tipo de entalhe do provete. Por exemplo, para entalhes em V, deve escrever-se KV=80J, o que significa uma energia absorvida de 80J por um provete com entalhe em V, durante um ensaio realizado numa máquina com 300J de energia nominal. Quando o provete não rompe durante o ensaio, deve ser indicado que o mesmo não rompeu para a energia nominal da máquina.

São três os factores fundamentais que concorrem para uma fractura frágil: temperaturas baixas, velocidades de deformação elevadas e estados triaxiais de tensão.

Relativamente ao primeiro factor, dependendo do tipo de estrutura que define o material metálico, assim a variação de temperatura pode ou não interferir com a sua resistência ao choque. Desta forma, os que cristalizam no sistema cúbico de corpo centrado, como o caso do crómio, dependem mais da temperatura, sendo possível identificar na energia absorvida um patamar superior e outro inferior, correspondentes a comportamentos dúcteis e frágeis, respectivamente. Já os que cristalizam no sistema cúbico de faces centradas, como o caso do níquel, ou hexagonal compacto, caso do magnésio, são insensíveis à variação de temperatura.

Mediante o traçado da curva de energia absorvida com a temperatura, são possíveis de definir vários critérios para a adopção de uma temperatura de transição dúctil-frágil.

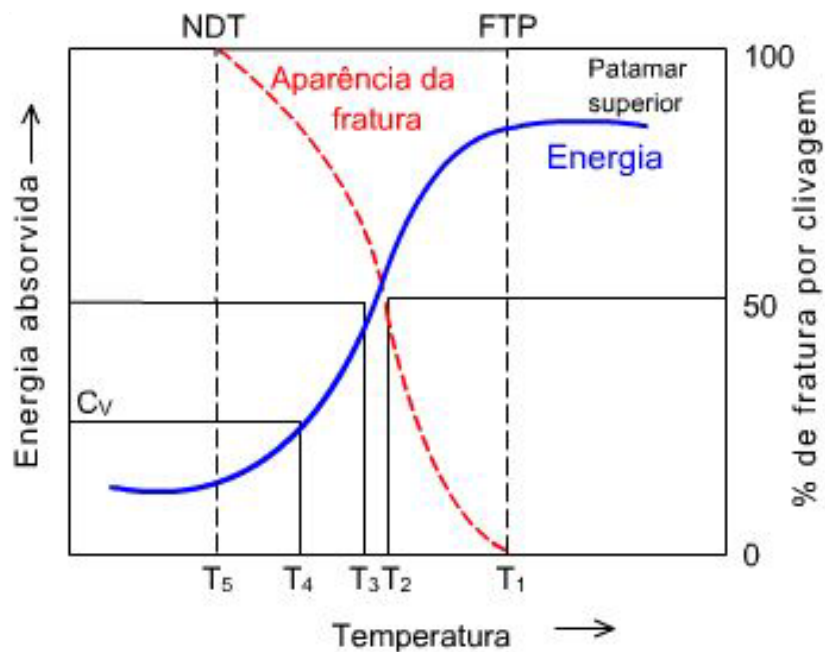


Figura 24 – Critérios para o estabelecimento da temperatura de transição
(Fonte: www.cimm.com.br/ em 29-09-2012)

T₁ - temperatura de transição para superfície 100% fibrosa

T₃ - temperatura de transição para 50% de fractura dúctil e 50% de fractura frágil

T₃ - temperatura correspondente ao ponto do gráfico onde o valor de energia absorvida é igual à média dos dois patamares

T₄ - temperatura associada a um valor arbitrário de energia para um dado material

T₅ - temperatura de ductilidade nula (temperatura abaixo da qual a fractura é 100% brilhante).

Relativamente ao segundo factor, sabe-se que a velocidade de deformação de um ensaio de choque é da ordem dos 10^3 s^{-1} . Esta velocidade é suficiente para que algumas propriedades mecânicas do material sofram alterações significativas. A diminuição do tempo de acomodação do material à solitação que lhe é aplicada traduz-se por uma diminuição da capacidade de deformação plástica e pode permitir a transição de um comportamento dúctil para um comportamento frágil (Davim, 1992).

Relativamente ao terceiro factor, a presença de um entalhe provoca uma redistribuição local de tensões que leva ao aparecimento de tensões transversais que, de outra forma, não apareceriam.

A maioria dos aços inoxidáveis tem uma óptima resiliência à temperatura ambiente, mas com a diminuição da mesma, a estrutura ferrítica torna-se progressivamente mais quebradiça, de maneira que os aços inoxidáveis com estrutura ferrítica não podem ser utilizados a temperaturas criogénicas.

Para que os resultados sejam comparáveis, é preciso que o ensaio seja realizado de acordo com essas mesmas normas, seguindo todos os parâmetros estabelecidos.

	LDX 2101®*	2304	2205	SAF 2507®
20°C	60	60	60	60
-40°C	27	40	40	40

Figura 25 - Exemplo de uma 'datasheet' correspondente aos aços inoxidáveis duplex fabricados pela OUTOKUMPU (Fonte: OUTOKUMPU)

Poderá verificar-se variação nas propriedades dos materiais, dependendo da dimensão e da forma como os provetes são retirados para os testes e ainda conforme a região do material de onde foi retirada a amostra, devido a fenómenos de anisotropia causada pela laminagem, a qual cria "fibras" de maior resistência ao longo da direcção de laminagem, mas debilitando o comportamento do material na direcção perpendicular.

Apesar da elevada resistência mecânica que os aços inoxidáveis duplex apresentam, possuem uma boa ductilidade e resiliência, comparativamente com o aço ao carbono ou aços inoxidáveis ferríticos. Dessa forma, a passagem de fractura dúctil para frágil é mais gradual.

Os aços inoxidáveis duplex, mantêm uma boa resiliência, mesmo a temperaturas criogénicas (IMOA, 2009).

2.3.4. Tenacidade

A tenacidade é uma propriedade extremamente importante no contexto do comportamento dos metais em geral e traduz a capacidade que um dado material oferece à progressão de uma fenda já existente, adiando a rotura de uma dada estrutura ou produto, mesmo depois de já ter sofrido um dano.

Normalmente, a tenacidade está fortemente ligada ao tamanho do grão do material, sendo tanto mais elevada quanto mais reduzido é o tamanho do grão. Conforme é do conhecimento geral, o tamanho do grão é fortemente condicionado pela composição química, modo de fabricação (menos influente) e eventuais tratamentos térmicos.

Em geral, os aços inoxidáveis duplex apresentam níveis de tenacidade elevados, em grande parte devido à sua composição química, onde determinados elementos, mesmo em teores quase insignificantes, promovem a contenção do crescimento do tamanho do grão, mesmo quando sujeitos a ciclos térmicos nefastos que poderiam ter tendência a fazer crescer o tamanho do grão.

As propriedades de tenacidade nos aços inoxidáveis duplex são reguladas principalmente pela fase austenítica e são satisfatórias se o material é tratado adequadamente (Sieurin, 2006).

No entanto, um envelhecimento na gama de temperatura 600-950 ° C pode rapidamente fazer diminuir a tenacidade, com o efeito mais grave a cerca de 900 ° C. A reduzida tenacidade fica a dever-se à formação de fases frágeis σ e χ (Sieurin, 2006).

Foi demonstrado por Thorvaldsson (Thorvaldsson, 1984) que ocorreu uma transição vincada de comportamento dúctil para frágil após um envelhecimento de cerca de 1 hora a 850 °C.

Outro factor que pode provocar uma diminuição da tenacidade é fragilização causada para tratamentos a 475 °C, que provoca a decomposição de ferrita em fases α e α' .

São ainda sugeridos por outros autores alguns factores que promovem a redução da tenacidade dos aços inoxidáveis duplex são conteúdos elevados de ferrite, oxigénio e/ou hidrogénio (Ekstrom, 1980), e temperatura máxima de serviço de 300 °C (Charles, 1995).

Nas chapas e tubos de aço inoxidável duplex que são comercializados, está presente uma significativa anisotropia, causando uma forte direccionalidade das propriedades mecânicas (Nicodemi, 1992, Nystrom, 1990). A anisotropia tende a aumentar com a quantidade de deformação na laminagem. Os aços duplex podem ser produzidos tanto por deformação a quente como a frio, embora as chapas sejam normalmente obtidas por laminagem a quente (Charles, 1997). A tenacidade é normalmente muito boa nestes aços (Deleu, 1997, Dhooge, 1987), mesmo depois de sofrer significativa deformação a frio (Johansson et al, 1984, Ericsson et al, 2003).

A tenacidade é mais elevada no sentido transversal do que no sentido longitudinal, considerando que a fissura está a crescer no sentido transversal, tendo que atravessar as fronteiras de fase da estrutura lamelar. A transição de dúctil para frágil desloca-se para temperaturas mais elevadas com o aumento da espessura da amostra.

2.3.5. Dureza

Para um metalúrgico, dureza significa a resistência à deformação plástica permanente. Um engenheiro mecânico define dureza como a resistência à penetração de um material duro no outro. Para um mineralogista, a dureza tem um significado diferente, ou seja, o de medir a resistência ao risco que um material pode fazer no outro.

Tendo em atenção que há uma diversidade de conceitos, o ensaio de dureza pode ser dividido em três tipos principais, que dependem da forma como o ensaio é conduzido. Assim sendo, pode-se efectuar ensaios com recurso à penetração, ao choque ou ao risco.

Os dois primeiros tipos são os mais usuais no ramo da metalurgia e da mecânica, sendo a dureza por penetração a mais utilizada. Dentro destes, pode-se ainda considerar a medição da dureza e da microdureza, consoante se está a analisar um volume de material ou apenas uma camada de revestimento. Relativamente aos ensaios de dureza por penetração, e apenas no campo dos materiais metálicos, podem-se considerar as metodologias *Brinell*, *Vickers* e *Rockwell*. No campo da microdureza, efectuam-se ensaios do tipo *Vickers*, mas com indentadores específicos do tipo *Knoop* ou *Berkovich* (já no campo da nano-análise).

Ensaio de dureza

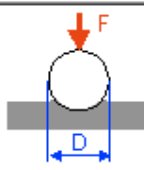
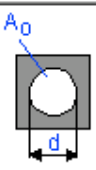
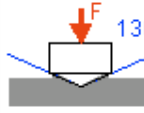

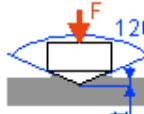
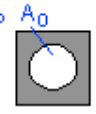
Ensaio	Indentador	Carga [Kg]	Vista lateral	Vista de cima
Brinell	Esfera com $\varnothing=10\text{mm}$ de aço temperado ou de metal duro	500 - 3000		
Vickers	Pirâmide de diamante	1 - 120		
Rockwell	Cone de diamante	60 - 150		

Figura 26 – Breve comparação entre as três principais metodologias de ensaio de dureza realizadas sobre materiais metálicos (www.kokch.kts.ru consultado em 15.09.2012)

Tanto a metodologia *Brinell* como *Vickers* são usadas essencialmente em ambiente laboratorial, dada a necessidade de uma conveniente preparação das superfícies a ensaiar, para que a medição através de sistemas ópticos, *à posteriori*, possa fazer-se com a precisão desejada. De referir que estes métodos se baseiam na medição da marca deixada na superfície pelo indentador, através da medição da calote esférica no caso da metodologia *Brinell*, ou na medição das duas diagonais deixadas pelo prisma na metodologia *Vickers*.

Já a metodologia *Rockwell* é usada essencialmente em ambiente industrial, não requerendo qualquer preparação prévia (eliminadas as irregularidades e sujidades da superfície através da aplicação da pré-carga), sendo a medição efectuada unicamente através da altura que o indentador consegue penetrar na superfície, quando sujeito ao conjunto da pré-carga e carga.

As aplicações destes ensaios incluem a avaliação da resistência mecânica e da ductilidade de um material, o controle de qualidade de tratamentos térmicos, o controle de qualidade em processos de conformação plástica e em processos de ligação (Davim, 1992).

O método *Brinell* consiste em fazer penetrar uma esfera de aço temperado ou de metal duro de um determinado diâmetro na superfície do metal a ensaiar, sob a acção de uma força, aplicada gradualmente e durante um intervalo de tempo estabelecido (Davim, 1992). Segundo a norma NP EN 10003-1:1996 a dureza *Brinell* é designada pelos símbolos: HBS no caso de o ensaio ter sido realizado com esfera de aço ou HBW no caso de o ensaio ter sido realizado com esfera de metal duro. Estes símbolos devem ser precedidos do valor da dureza *Brinell* obtido nos ensaios, seguido de indicações complementares sobre as condições em que o ensaio decorreu, de acordo com a seguinte ordem:

- Diâmetro da esfera
- Valor da força de ensaio
- Duração da aplicação da força.

A duração de aplicação da força, varia de forma a garantir uma calota esférica que realmente forneça uma indicação correta da verdadeira deformação plástica do metal. Está tudo bem definido nas normas que regem estes ensaios.

$$HB \cong 0,102 \frac{F}{\pi D h} = \frac{0,102}{\pi D} \frac{2F}{D - (D^2 - d^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

em que F representa a carga normal, expressa em kgf, D representa o diâmetro da esfera, em mm, h a profundidade de penetração, em mm, e d o diâmetro da calote esférica, em mm.

A dureza *Brinell* não é um conceito físico satisfatório, pois a expressão que determina o seu valor, não leva em consideração o valor médio da pressão sobre toda a superfície de impressão, que é o que realmente deveria ser observado (Sousa, 1974).

Sempre que é aplicada uma força na superfície do metal, esse é deformado plasticamente e ao ser retirada a carga, há sempre uma recuperação elástica, de modo que o diâmetro da impressão não é o mesmo quando a esfera está em contacto com o metal, havendo um aumento do raio de curvatura da impressão. Essa recuperação será tanto maior quanto mais duro for o metal, porque os metais muito duros possuem uma zona plástica reduzida, tendo pois, pouca deformação plástica. Portanto a recuperação elástica é uma fonte de erros na determinação da dureza. No entanto, o baixo custo dos aparelhos para a medição da dureza *Brinell*, favorece o largo emprego desse tipo de dureza nos laboratórios e industrias (Sousa, 1974).

No método de dureza *Rockwell* o número de dureza é relacionado de forma direta com a profundidade deixada no material pelo penetrador. Neste método, geralmente, cada unidade de variação corresponde a um deslocamento perpendicular à superfície de 0.002mm. Este método difere do método *Brinell* e *Vickers* pelo facto de utilizar duas forças de ensaio. Uma força inicial que garante a justaposição perfeita do penetrador à superfície a ensaiar, eliminando a interferência de pequenos defeitos de superfície e de defeitos mecânicos do próprio aparelho, a qual se designa por pré-carga. A segunda força adicional, maior que a inicial, é somada à força inicial originando a força total. Numa terceira fase de ensaio, após manter a força total um tempo considerado suficiente, retira-se a força adicional. Verifica-se então uma certa recuperação elástica do material: o penetrador sobe, após o que se lê, numa escala adequada, o número de dureza *Rockwell*.

A Norma NP EN 10109-1:1998 tem identificado as várias escalas obtidas através da combinação de diferentes forças com diferentes penetradores, onde se indicam também as suas características e aplicações. Destas escalas, as mais utilizadas são a *Rockwell-B* (HRB) e a *Rockwell- C* (HRC). O valor da dureza *Rockwell* é dado pela expressão seguinte:

$$HR = h - \frac{e}{0,002} \quad (4)$$

em que h representa uma constante dependente do tipo de penetrador utilizado e e a profundidade de penetração em mm. O número de dureza é sempre acompanhado de uma letra simbolizando a escala utilizada (Davim, 1992).

A superfície da amostra deve ser lixada, para eliminar alguma irregularidade que possa ocasionar erros.

A dureza *Vickers* é dada pelo quociente entre a carga e a área de impressão.

$$HV = \frac{1,8544 \cdot F}{d^2} \quad (5)$$

As vantagens do método *Vickers* são:

- Escala contínua;
- Impressões extremamente pequenas que nem sempre inutilizam a peça;
- Grande precisão de medida;
- Deformação nula do indentedor (diamante);
- Existência de apenas uma escala de dureza;
- Aplicações para toda a gama de dureza encontrada nos diversos materiais;
- Aplicação em qualquer espessura de material.

O indentedor é uma pirâmide de diamante de base quadrada, com um ângulo de 136° entre as faces opostas, como se pode verificar na figura 28.

Como o penetrador tem extremidade de diamante, é praticamente indeformável e, como todas as impressões são semelhantes entre si, não importa o seu tamanho: a dureza *Vickers* (HV) é independente da carga.

A área deve ser medida com precisão, e para esse fim, existe um microscópio incorporado no durómetro para determinação das diagonais.

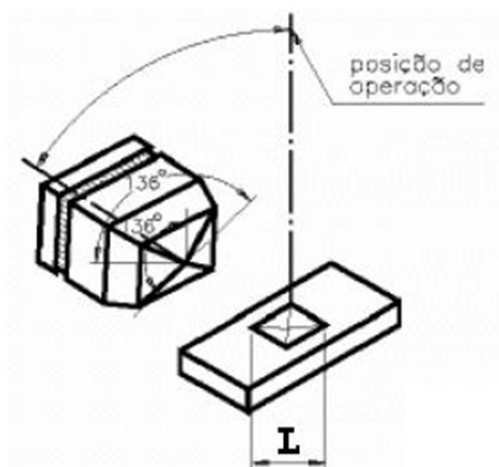


Figura 27 - Indentedor Vickers

Como no caso da dureza *Brinell*, as impressões *Vickers* podem ocasionar erros, quando as impressões não apresentam os seus lados retos. Se o metal for recozido dá-se o afundamento do metal em torno das faces do indentador, resultando num valor maior do que o real do comprimento da impressão e, como consequência, uma dureza inferior à real; se o metal for encruado, dá-se uma adesão deste em torno das faces do indentador, e portanto, obtém-se um valor inferior ao real na impressão, o que corresponde a uma dureza maior do que a apresentada pelo metal (Sousa, 1974).

2.3.6. Resistência ao desgaste

O desgaste dos materiais tem um custo elevadíssimo em todo o mundo. Tal como a corrosão, o desgaste é um processo que conduz à perda de eficiência das peças mecânicas onde ocorre, o que tem como consequência a necessidade de substituição ou reparação das mesmas. É comum definir-se como a “perda progressiva de material das superfícies em contacto com movimento relativo, devido a acções mecânicas ou químicas”.

O desgaste não é uma propriedade intrínseca dos materiais, mas sim uma característica dos tribossistemas, sendo caracterizado pela deterioração de componentes e estrutura devido à perda de material, danos por fadiga e aumento da rugosidade / atrito.

Existem diversas classificações para os processos de desgaste, que podem ser distinguidos de acordo com os mecanismos que atuam no processo. Assim distinguem-se quatro processos principais de desgaste (Andrade, 2008):

Adesivo: formação e quebra de ligações interfaciais adesivas.

Abrasivo: remoção do material, provocando um sulco.

Corrosivo: interacção química entre os elementos que resulta em reacções químicas.

Fadiga de superfície: formação de fissuras devido a ciclos de tensão.

Será abordado em pormenor o desgaste abrasivo, pois é o processo utilizado na fase experimental deste trabalho.

A Norma BS EN 1071-6:2007 estabelece as regras para os procedimentos a adoptar na realização dos ensaios efectuados neste trabalho.

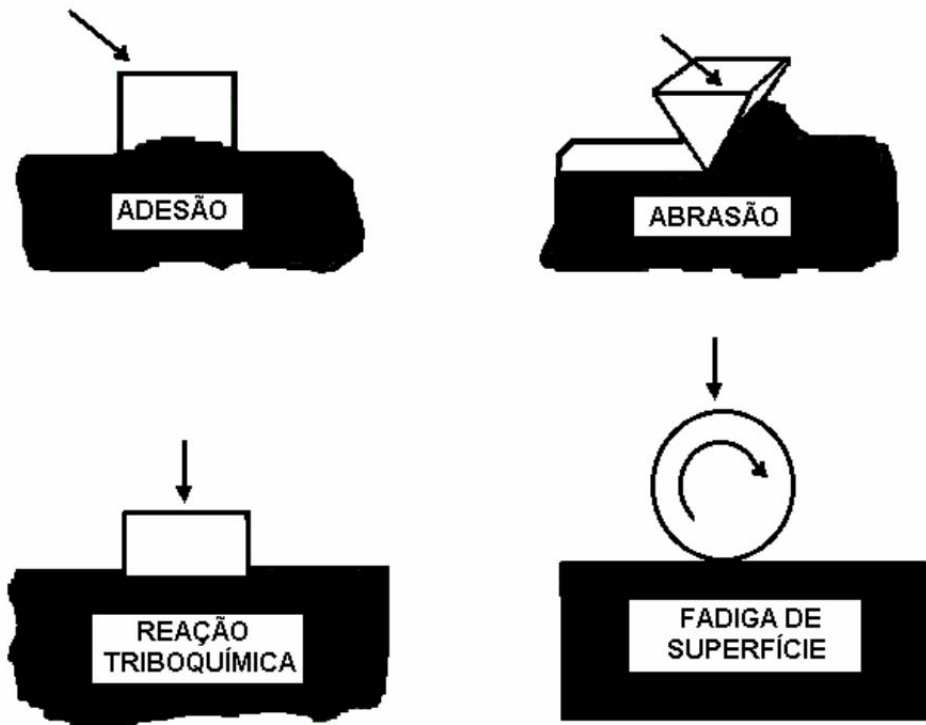


Figura 28 – Principais processos de desgaste (Zum-Gahr, 1987)

2.3.6.1. Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo pode ser definido como o deslocamento de material causado por partículas de elevada dureza, onde estas são forçadas contra, e ao longo de uma superfície sólida. Este desgaste pode ser caracterizado como ocorrendo a dois ou três corpos.

Na abrasão a dois corpos, as partículas abrasivas estão ligadas a um dos corpos e riscam o antagonista em relação à superfície do material, sendo formados marcas e riscos paralelamente à direcção do deslocamento destas partículas.

Na abrasão a três corpos, as partículas abrasivas agem como elementos de interface entre duas superfícies em movimento relativo. As partículas estão livres na interface, deformando plasticamente as superfícies de contacto (Andrade, 2008).

2.3.6.2. Variáveis que podem influenciar os mecanismos de desgaste por abrasão

A taxa de desgaste abrasivo e os mecanismos de desgaste podem ser influenciados por vários fatores, tais como:

- O tamanho do grão;
- A carga aplicada;
- A dureza dos materiais utilizados;
- Tenacidade à fractura.

Assim, verifica-se que existe uma grande variedade de parâmetros a influenciar os mecanismos de desgaste no geral, sendo que os principais são:

- Parâmetros do material: composição, tamanho do grão, módulo de elasticidade, etc.;
- Parâmetros de projecto: forma, tipo de solitação, tipo de movimento, etc.;
- Parâmetros do meio ambiente: temperatura, contaminação, humidade, etc.;
- Presença ou ausência de desgaste interno.

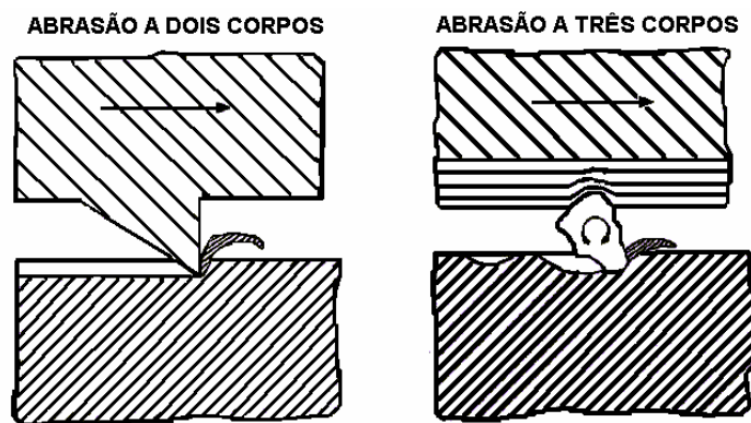


Figura 29 – Esquema de desgaste a dois e três corpos (Zum-Gahr, 1987)

Embora se diga que a taxa de desgaste depende do tamanho do grão abrasivo, existe um valor crítico de tamanho de grão acima do qual a taxa de desgaste se torna independente do mesmo. Também as diferenças de dureza entre os dois corpos em contacto influenciam directamente este tamanho crítico do grão abrasivo (Mondal, 1998).

2.3.6.3. Efeito da dimensão do grão abrasivo

O tamanho do grão abrasivo tem uma influência directa nos mecanismos associados ao desgaste, que pode ser caracterizada pela relação w/r , onde “ w ” é a espessura do sulco e “ r ” o raio esférico do topo da partícula. Dependendo desta relação, a partícula de grão abrasivo irá deformar plasticamente ou cortar a superfície. Como as partículas desgastadas se tornam menos agressivas ou o tamanho da partícula diminui, o mecanismo de desgaste exhibe uma transição do corte para o desgaste por delaminação.

Para ambos os tipos de desgaste abrasivo, pode observar-se um tamanho crítico da partícula abrasiva. O desgaste volumétrico aumenta com o tamanho do grão abrasivo até uma dimensão crítica. Nesta dimensão crítica, existirá a máxima acção abrasiva em termos do volume de desgaste produzido.

Acima deste valor crítico, a taxa de desgaste é amplamente independente do tamanho do grão abrasivo. A forte diferença entre a dureza das partículas abrasivas e do material a ser desgastado influencia esta dimensão crítica do grão.

No desgaste abrasivo a três corpos, a taxa de desgaste é tendencialmente menor que no desgaste abrasivo a dois corpos, dada a liberdade de rotação das partículas abrasivas (Andrade, 2008).

2.3.6.4. Variáveis que podem influenciar os mecanismos de desgaste por abrasão

A avaliação do desgaste dos materiais pode ser efectuada por vários métodos, os quais se podem agrupar em ensaios de deslizamento, de abrasão, de fadiga de rolamento e simulações laboratoriais (Holmberg e Matthews 1994). Entre estes, o tipo de ensaio a efectuar, deve ser seleccionado de modo que este reflecta, da forma mais aproximada possível, as condições reais a que a superfície vai estar sujeita. Neste ponto vai ser feita uma breve abordagem ao ensaio de micro-abrasão por esfera rotativa, dado ser o usado na parte experimental deste trabalho.

Conforme representado na figura 31, a superfície de uma amostra plana é pressionada contra uma esfera de aço animada de movimento de rotação e a velocidade constante, sendo introduzida na zona de contacto, de modo contínuo, uma solução composta por partículas abrasivas. De acordo com a norma BS EN 1071-6:2007, esta solução deve ser composta de partículas de SiC ou outros abrasivos em suspensão em água, cuja granulometria indicada é a F 1200, em que a dimensão das partículas não deve exceder os 5 μm . De acordo com a FEPA (Federation of European Producers of Abrasives) Standard 42-2:2006 / ISO 8486-2:2007, o tamanho médio de cada partícula deste abrasivo é de $3.0 \pm 0.5 \mu\text{m}$. O movimento da esfera vai promover o arrastamento das partículas abrasivas que caem sobre a mesma, através do movimento de rotação. Algumas partículas passam pela parte lateral do contacto, mas outra parte passa através do contacto, promovendo a micro-abrasão.

No final dos ensaios, a observação por microscopia óptica ou electrónica de varrimento destas depressões, permite a observação dos mecanismos de desgaste, a medição das crateras efectuadas pela micro-abrasão e o coeficiente de desgaste.

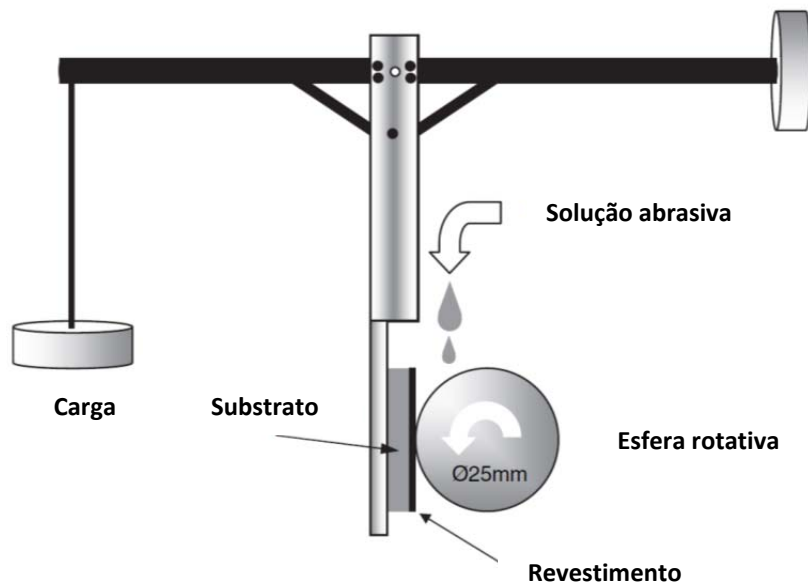


Figura 30 – Representação esquemática de um tribómetro para ensaios de desgaste por micro-abrasão através de esfera rotativa (Silva, 2009)

A Figura 32 representa de forma esquemática a geometria das crateras de desgaste formadas num processo de micro-abrasão efectuada por uma esfera de raio R num bloco de material, onde produz uma cratera de diâmetro b , ambos expressos em milímetros.

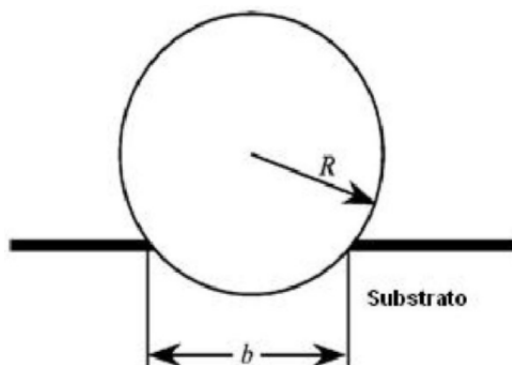


Figura 31 – Representação esquemática de um tribómetro para ensaios de desgaste por micro-abrasão através de esfera rotativa (Silva, 2009)

De acordo com a norma BS EN 1071-6:2007, o volume de material removido para amostras não revestidas é dado pela expressão seguinte:

$$V = \pi \frac{b^4}{64R} \quad (6)$$

em que V representa o volume de material removido, em mm^3 , b representa o diâmetro da cratera de desgaste, em mm e R o raio da esfera, também em mm.

Para materiais com estrutura homogénea (substratos) ou para amostras revestidas antes de o filme ser perfurado, o coeficiente de desgaste (k) é dado a relação pela equação de Archard:

$$k = \frac{V}{S \times N} \quad (7)$$

em que S representa a distância de deslizamento, em *metros*, correspondente ao produto do perímetro da esfera pelo número de rotações efectuadas, e N a carga normal aplicada, em N .

2.3.7. Resistência à corrosão

A corrosão é definida como sendo a dissolução do material perante a reacção com o meio ambiente (Sandvik, 1999). A corrosão, além de provocar a falha directa dos materiais em serviço, torna-os susceptíveis de romper por qualquer outro mecanismo (Chiaverini, 1978).

A corrosão generalizada é caracterizada por um ataque uniforme na superfície do material quando exposto a um meio corrosivo.

É possível definir a grandeza da corrosão, normalmente dada a conhecer pela perda de massa por unidade de área ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$), ou a perda de material pela unidade de tempo (mm/ano) (Sandvik, 1999).

O metal quando é extraído do minério fica num estado metastável que se pode alterar facilmente na presença de um meio corrosivo. No entanto, a reacção espontânea do metal depende da produção ou da necessidade de energia. Um metal no estado metastável pode formar um filme de óxidos à superfície, na presença de um meio oxidante, que evite a progressão da reacção por separação de um metal do meio. Neste caso, o metal encontra-se no estado passivo protegido do meio corrosivo. No entanto, quando o meio é demasiado oxidante, o metal fica no estado transpassivo e, consequentemente, desprotegido do meio corrosivo. Quando não existe a formação de filme de óxidos à superfície, o metal encontra-se no estado ativo e, portanto, ocorre corrosão (Davim, 1992).

Os ambientes mais comuns onde ocorre a corrosão são em soluções fortemente alcalinas ou ácidas.

A especificação da composição do meio ambiente é crucial para a corrosão e pode ser drasticamente alterada conforme os componentes que se adicionam.

A forma como o aço se comporta pode variar consideravelmente no mesmo ambiente, mas com diferentes aditivos. É pois muito importante que o ambiente onde o aço vai trabalhar seja correctamente caracterizado. Quando esta análise é feita, torna-se mais fácil escolher a composição do aço a utilizar.

A correta escolha da composição do aço inoxidável traz muitas vantagens e economia no custo do ciclo de vida dos produtos (Sandvik, 1999).

Tal como foi referido anteriormente, a adição de cromo permite ao aço, em contacto com o oxigénio, formar uma película de óxido de cromo (Cr_2O_3) que aumenta a sua resistência à corrosão. Por norma, quanto maior a quantidade de cromo, maior é a resistência à corrosão.

Esta descoberta foi feita há cerca de um século, quando ainda alguns aços possuíam níquel na sua composição. A adição de molibdénio e níquel, e a elevação do teor de cromo, aumentam a resistência à corrosão.

O níquel, quando adicionado aos aços, confere-lhes uma estrutura austenítica estabilizada à temperatura ambiente. O magnésio foi o primeiro a ser adicionado aos aços inoxidáveis na década de 30. Na década de 50, quando o preço do níquel estava particularmente elevado, foram criados aços de baixo teor em níquel, mantendo a estrutura austenítica.

Chegou-se à conclusão que a redução de níquel não pode ser totalmente substituída pelo magnésio e azoto, pois para manter a estrutura austenítica, o teor de cromo também tem de diminuir e desta forma diminuir a resistência à corrosão, comparativamente aos aços com quantidades de níquel superiores. Na medida em que a quantidade de elementos com estrutura austenítica diminui, a estrutura muda para uma mistura de austenite e ferrite (cúbica de corpo centrado). Estes são os aços inoxidáveis duplex.

Os ensaios que avaliam os materiais quanto à sua resistência à corrosão, são regidos pelas Normas ASTM A262; ASTM G48, ASTM G31; ISO 3651-2; ISO 9227.

Seguidamente, é realizada uma breve revisão sobre os diferentes tipos de corrosão.

2.3.7.1. – Corrosão Uniforme

Este tipo de corrosão é caracterizado pela dissolução quase uniforme de todos os pontos constituintes da superfície do material que são atacados sensivelmente à mesma velocidade no meio corrosivo. A consequência deste tipo de corrosão é a diminuição regular da espessura.

2.3.7.2. – Corrosão Localizada – Por Picadas

Aparece em zonas limitadas da superfície do material, sendo que, a restante superfície se encontra protegida pela capa passiva. Pode ocorrer a perfuração da peça em causa e acontece em meios ricos em cloro.

2.3.7.3. – Corrosão Intersticial

Depois de um período de incubação durante o qual não se observa nenhuma alteração do material, este começa a corroer rapidamente no interior do seu interstício, passando ao período de propagação, onde a corrosão se vai propagar até à entrada do interstício.

2.3.7.4. – Corrosão Intergranular

O fenómeno de sensitização consiste na precipitação nas juntas de grão, de compostos ricos em crómio, o que empobrece o material deste elemento, até que a sua percentagem seja inferior a 11%, valor reconhecido como sendo o mínimo para provocar a capa passiva.

2.3.7.5. – Corrosão Sob Tensão

Indica a formação de fissuras devido a determinados meios corrosivos. Depois de um período de incubação, geralmente bastante grande, as fissuras podem propagar-se rapidamente e conduzem à destruição do material. Este fenómeno fica a dever-se à acção simultânea da presença de um meio corrosivo e de um estado de tensão.

2.3.7.6. – Corrosão Galvânica

Quando o material está imerso numa solução electrolítica, pode medir-se o seu potencial de dissolução e, em cada meio, pode estabelecer-se uma série galvânica. Sempre que acontece uma ligação eléctrica entre metais de ligação diferentes, estabelece-se uma corrente eléctrica entre eles, que é consequência directa da sua diferença de potencial. Este fenómeno manifesta-se num meio condutor eléctrico.

2.3.7.7. – Corrosão por Fadiga

Este processo de fissuração acontece quando se verifica simultaneamente o aparecimento de tensões repetidas num meio corrosivo. Geralmente essas fissuras aumentam e desenvolvem-se aquando níveis de tensões inferiores ao limite elástico do material em causa.

2.3.7.8. – Alteração da superfície a altas temperaturas

Não está definida a partir da qual se poderá considerar que o aço inoxidável pode ser afectado pela mesma. No entanto, admite-se que na maior parte dos casos, a partir de 500°C, a exposição de um aço inoxidável a altas temperaturas em atmosferas agressivas, possa induzir uma alteração homogénea da sua superfície (Cunat, 2002).

2.3.8. Experiências com o material enterrado

Do exposto anteriormente, poderá depreender-se que a corrosão de um metal resulta na deterioração do mesmo, em consequência de acções químicas, electroquímicas ou físico-químicas – quando há combinação com esforços mecânicos – desencadeadas pelo meio-ambiente sobre esse material, causando, conseqüente, perda de características e qualidades.

A grande aplicação dos aços inoxidáveis em solos é na forma de tubos para o transporte de diferentes líquidos, nomeadamente químicos. Outra aplicação é nos pilares das fundações em substituição do aço ao carbono. A grande limitação do seu uso, reside em problemas de corrosão que possam surgir. No entanto, os aços inoxidáveis duplex possuem propriedades que fazem deles uma excelente escolha.

No caso de equipamentos metálicos enterrados, como sejam condutas, reservatórios ou elementos construtivos, a corrosão induzida pelo solo pode levar a alterações das propriedades, tais que sejam causadores de danos que prejudiquem ou mesmo inviabilizem a função destes elementos enterrados. Neste contexto, a necessidade de avaliação da maior ou menor agressividade ou poder de corrosão de diferentes tipos de solos reveste-se de enorme pertinência.

A actuação do solo enquanto agente corrosivo, sendo largamente determinada pelo tipo e características (composição) do solo em questão, pode em qualquer dos casos ser minorada através da utilização de revestimentos que evitem o contacto directo entre o metal e o solo.

A maior ou menor agressividade do solo é função das diversas características físico-químicas do mesmo, das quais se destacam o *pH*, o oxigénio, a quantidade e tipo de sais dissolvidos, a resistividade, a acidez, o potencial *redox* e a presença de voláteis (Robinson, 1993). A humidade e a presença de bactérias são igualmente parâmetros propiciadores do processo de corrosão.

A maior ou menor condutividade eléctrica de um solo depende da quantidade e natureza dos seus sais, combinado com o teor em água. Desta forma, solos com alto teor em matéria orgânica são propícios à acumulação de sais e, conseqüentemente, correspondem a solos de baixa resistividade. Por oposição, os solos mais estéreis apresentam elevadas resistividades.

2.3.8.1. Humidade, granulometria e matéria orgânica

Os solos mais arenosos, com maior índice de vazios e, conseqüentemente, com melhor drenagem e areação do que os solos mais finos e com maior teor de matéria orgânica na sua composição têm, regra geral, um comportamento corrosivo menos agressivo uma vez que possuem um potencial corrosivo mais aproximado ao da atmosfera envolvente.

Por oposição, os solos argilosos e os solos com maiores teores de matéria orgânica, normalmente caracterizados por uma textura mais fina, possuem uma maior capacidade de retenção de água, dificultando quer a drenagem quer a areação, promovendo, desta forma um maior potencial corrosivo sobre os elementos enterrados. Acresce que a presença de matéria orgânica constitui, em si, um factor propiciador da corrosão. Estes ambientes favorecem o desenvolvimento de bactérias anaeróbias redutoras de sulfato, que actuam como despolarizadoras das reacções catódicas, potenciando a corrosão.

2.3.8.2. Acidez e alcalinidade

A classificação de um solo enquanto ácido ou alcalino resulta da medida de concentração de iões H^+ e é expressa pelo valor de *pH*, sendo uma das medidas mais comuns e importantes na análise do padrão de um solo. Ao expressar a actividade dos iões de hidrogénio na solução do solo, permite aferir da disponibilidade de nutrientes minerais.

2.3.8.3. Salinidade e resistividade

A presença de sais dissolvidos é um factor que induz corrosão, na medida em que gera alta condutividade ou, por oposição, baixa resistividade. Por resistividade eléctrica entende-se como sendo a oposição que um dado material impõe ao fluxo de corrente eléctrica. Quando se aplica uma diferença de potencial (ddp) aos extremos desse obstáculo – resistência – que condiciona o fluxo de corrente eléctrica, a medida da intensidade da corrente (i) permite determinar a resistividade eléctrica (R), como sendo o quociente entre diferença de potencial (U) e essa intensidade de corrente:

$$R = \frac{U}{i} \quad (8)$$

A determinação da resistividade do solo reverte-se de primordial importância pois é um dos critérios mais simples de avaliação da corrosividade do meio. Variáveis como a quantidade e o tipo de sais dissolvidos, a humidade, a temperatura e mesmo o índice de vazios são determinantes no estabelecimento da resistividade de um solo.

A quantificação deste parâmetro torna-se fundamental nos casos específicos das condutas – quer em termos de valor absoluto quer em termos de variação ao longo dos diferentes trechos – uma vez que atravessam diferentes tipos de solos, o que origina a formação de uma célula de corrosão entre as áreas de alta e baixa resistividade, sendo que a fracção da conduta localizada em solo de baixa resistividade se tornará anódica em relação à restante enterrada em solo de mais elevada resistividade.

A tabela 2 estabelece uma relação entre o valor da resistividade e o potencial de corrosividade de um solo.

Tabela 2- Relação entre a resistividade a a corrosividade (adaptado de Robinson, 1993)

Relação entre a resistividade de um solo e a sua corrosividade	
Resistividade ($\Omega.m$)	Corrosividade
0 - 5	extremamente corrosivo
5 - 10	muito corrosivo
10 - 30	corrosivo
30 - 100	moderadamente corrosivo
100 - 250	levemente corrosivo
> 250	não corrosivo

2.3.8.4. Avaliação da corrosão no solo

A forma mais evidente de avaliação do grau de corrosividade de um solo baseia-se na observação directa do efeito da corrosão sobre um elemento, neste caso metálico, que tenha estado enterrado ao longo de um dado período de tempo, suficiente para que haja alterações da sua estrutura. Poder-se-á quantificar parâmetros como a perda de massa e as profundidades média e máxima do ataque, relativamente ao tempo de exposição ao meio agressor.

Existem vários critérios de avaliação da corrosividade de um solo, a partir do conhecimento das suas propriedades, nomeadamente:

- Critério de *Starkey e Wigth*, que relaciona o potencial *redox* com a corrosividade do solo;
- Critério de *Booth*, que analisa a resistividade, potencial *redox* e humidade do solo;
- Critério de *Girard*, que estuda a humidade de saturação, resistividade do extrato aquoso e acidez total;
- Critério de *Gotlieb e Vieira*, que utiliza os parâmetros de resistividade, sais solúveis, acidez total e coeficiente de despolarização;
- Índice de *Steinrath*, que é um dos mais completos critérios de avaliação da corrosividade e que se baseia na determinação dos parâmetros de resistividade, potencial *redox*, *pH*, teor de humidade, iões cloreto, iões sulfato e iões sulfeto, como se pode verificar na figura 33.

Parâmetros do Solo	Índice Parcial	Parâmetros do Solo	Índice Parcial
Resistividade / (ohm.cm)	---	Potencial redox / (mV/NHE)	---
> 12,000	0	> 400	+ 2
12,000 – 5,000	- 1	400 – 200	0
5,000 – 2,000	- 2	200 – 0	- 2
< 2,000	- 4	< 0	- 4
pH	---	Sulfato / (mg/Kg)	---
> 5	0	< 200	0
< 5	- 1	200 – 300	- 1
Umidade / (%)	---	>300	- 2
< 20	0	Sulfeto / (mg/Kg)	---
> 20	- 1	ausente	0
Cloreto / (mg/Kg)	---	< 0,5	- 2
< 100	0	> 0,5	- 4
100 – 1000	- 1	---	---
> 1000	- 4	---	---

Figura 32 - Parâmetros relacionados por Steinrath para avaliação da corrosividade do solo (Loureiro et al, 2007)

A corrosividade do solo pode ser definida como sendo a apetência do solo para desenvolver o processo de corrosão. As propriedades do solo exercem uma influência particular na corrosão eletroquímica, modificando as condições dos processos anódicos e catódicos.

Uma das propriedades que influencia a corrosividade de um solo é o potencial *Redox*. Este potencial corresponde ao potencial de oxidação e redução de um ambiente. Através desse parâmetro é possível estimar se o solo é aeróbico ou anaeróbico bem como, se compostos químicos foram reduzidos ou ainda se encontram na sua forma oxidada (Loureiro et al., 2007).

Outra propriedade é o *Potencial de Hidrogénio*, correntemente conhecida pelo *pH*. Solos com *pH* inferior a 5 podem contribuir para uma corrosão severa e uma rápida deterioração dos metais expostos. Solos com *pH* compreendido entre 6.5 e 7.5, em condições de ausência de oxigénio e que possuam bactérias redutoras de sulfato, promovem corrosão microbiológica nos metais. Solos com *pH* acima de 8, alcalinos ou calcários, contêm altas concentrações de sais dissolvidos resultando numa baixa resistividade. Solos alcalinos têm elevados teores de sódio e potássio, enquanto os solos calcários possuem cálcio e magnésio (Loureiro et al., 2007).

Muitos ensaios de corrosão têm sido feitos no decorrer dos anos, conduzidos por países tais como Estados Unidos da América, Japão, Suécia; França e Finlândia. Na Suécia e na França, foram colocados aços inoxidáveis em solos do interior e da costa, durante um período de tempo compreendido entre 2 a 7 anos, cujos resultados se encontram na figura 34.

Características dos solos	Tipos de aço inoxidáveis expostos					
	4307	4404	LDX 2101®	2304	2205	2507
Solos suecos (argila)						
Marina muito agressiva	●▲□	-	○	●▲□*	○*	-
Medianamente agressiva	□□	-	□○	□□	□□	-
Areia muito agressiva	-	●	●	●	○	○
Solos Franceses (areia)						
Marina muito agressiva	●▲□	●▲□	●▲□	●▲□	▲□	□□
Medianamente agressiva	-	□□	-	○	□□	□□

*=corrosão por picadas; □= descoloração; ○= sem corrosão; -= não testado; ▲=corrosão intersticial

Tempo de exposição de 6 a 7 anos

ao

Figura 33 - Resultados dos testes subterrâneos com aços inoxidáveis, durante 2-7 anos (Fonte: Outokumpu)

Uma maior corrosão foi observada nas amostras que se encontram junto ao Mar Mediterrâneo, enquanto apenas foi observada corrosão em algumas amostras que se encontravam na costa da Suécia (Outokumpu, 2009).

Dependendo do seu comportamento em função das solicitações a que está sujeito, o conhecimento da resistência à corrosão deste tipo de material é de extrema importância, na medida em que, com um bom planeamento, pode economizar-se em material e manutenção.

Este tipo de material é um dos privilegiados na construção de equipamentos de dessalinização na Arábia Saudita, o grande produtor de água dessalinizada a nível mundial, de acordo com a “*Saline Water Conversion Corporation*” (SWCC). As razões são óbvias: adequada resistência á corrosão e poucos problemas com o processo de fabrico.

O processo de obtenção de água potável removendo o sal à água do mar envolve muitas etapas, para as quais são exigidas diferentes características nos materiais de construção. “*Multi Stage Flash*” (MSF) é a designação atribuída à construção necessária para o efeito, que pode ser observada na figura 35.

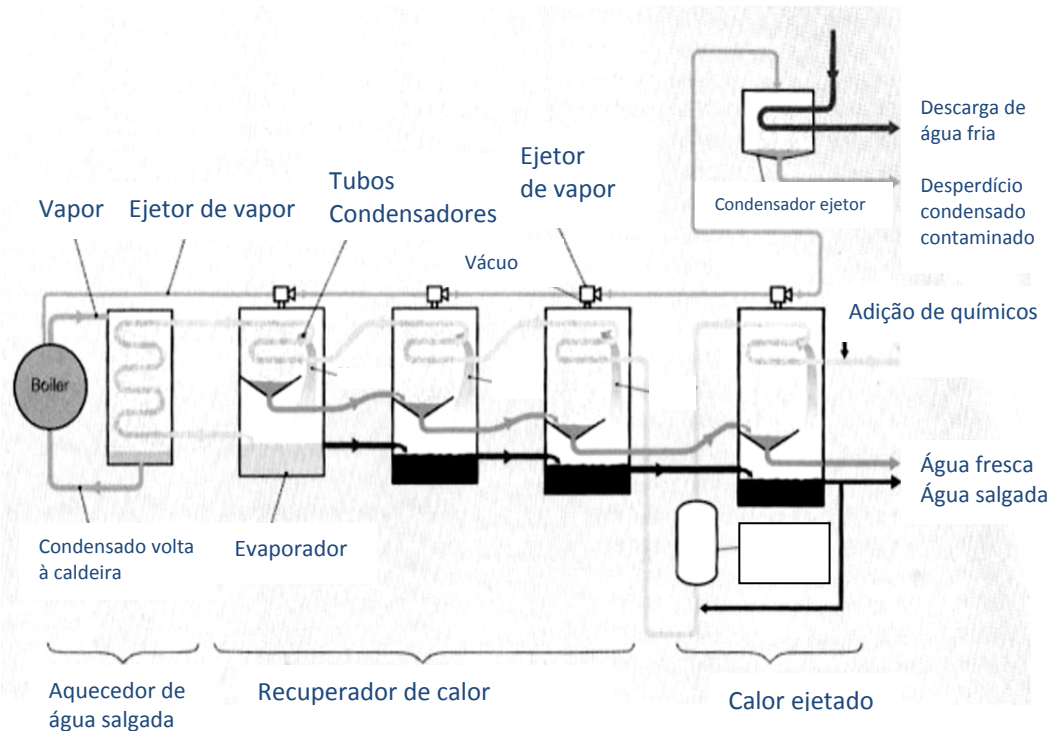


Figura 34 - Diagrama simplificado de uma MSF (Fonte Outokumpu)

Para ajudar à seleção de materiais, foram testadas várias amostras durante um período de 858 dias, no primeiro estágio da MSF, com as condições ambientais identificadas na figura 36.

Cl	20 200 mg/l
pH	7.0-8.2
O ₂	<8 mg/l
Cl ₂	<0.2 mg/l
Temp.	99°C

Figura 35-Condições ambientais para o teste do primeiro estágio da MSF (Fonte: Outokumpu)

Os resultados obtidos podem ser observados na figura seguinte:

Corrosão intersticial							
Tipos de aços	ASTM/UNS	Entrada A	Picadas	Entrada A	Picadas	Saída B	Picadas
4436	316	26/40, 0.14 ¹	w, haz, b, 0.03 ²	40/40, 0.07	w, b, 0.08	33/40, 0.10	w, 0.04
4439	S31726	14/40, 0.09	w, haz, b, 0.02	35/40, 0.14	w, 0.05	27/40, 0.09	w, 0.06
2205	S31803	No	w, haz, b, 0.06	No	w, 0.03	25/40, 0.04	w, 0.03
254 SMO®	S31254	No	No	No	No	2/40, 0.04	No
654 SMO®	S32654	No	No	No	No	No	No

1 - 26 de 40 fendas atacadas, profundidade máxima 0.14mm
2- Picadas superficiais na solda (w) e/ou na zona quente afetada (HAZ) e/ou no material base (b), profundidade máxima medida 0.03mm
No= Sem ataque

Figura 36 - Resultados dos testes de corrosão após 858 dias de exposição, de uma câmara de evaporação de uma MSF no primeiro estágio. (Fonte: Outokumpu)

2.4. Outras propriedades dos aços inoxidáveis duplex

Devido à presença da fase ferrítica, os aços inoxidáveis duplex possuem um menor coeficiente de expansão térmica que os austeníticos, fazendo com que estas ligas apresentem um comportamento próximo ao dos aços ao carbono.

Os aços inoxidáveis austeníticos são facilmente trabalháveis por extrusão, permitindo com relativa facilidade a obtenção de tubagens, sendo esta uma das suas principais aplicações, na área da produção de produtos químicos e na petroquímica. Estes aços prestam-se a, com relativa facilidade, serem conformados pelos processos mais usuais, tanto em massa, como a laminagem, por exemplo, ou também peça a peça, como nos casos da quinagem e embutidura.

No aspecto da sua soldabilidade, estes materiais são facilmente soldáveis quando a espessura é relativamente baixa. Espessuras consideráveis também poderão ser soldadas, mas requerem cuidados especiais. Depois de soldados, os aços inoxidáveis duplex conservam igualmente a sua elevada tenacidade [IMOA, 2009].

No que toca à maquinagem, estes aços podem facilmente apresentar resistência mecânica na ordem do dobro da apresentada pelos aços inoxidáveis austeníticos mais comuns, Isto traz inconvenientes óbvios para a maquinagem, requerendo o uso de ferramentas mais resistentes e de máquinas mais potentes.

2.5. Aplicações características

A área de aplicação deste material é alargada, sendo a conjugação de uma óptima resistência à corrosão com excelentes propriedades mecânicas as características que mais cativam para a sua utilização.

Em função dos seus maiores limites de escoamento e limite de ruptura, a sua aplicação permite redução de espessura em projetos de tanques de pressão, com reduções potenciais de até 30% (em volume) (Outokumpu, 2006).

São também conhecidas aplicações em equipamentos da indústria do papel e celulose, em equipamentos da indústria alimentar, na indústria dos transportes, em contentores, na indústria petroquímica, em tubos e permutadores de calor, bem como na construção civil, em pontes, aquecedores domésticos e fins estruturais.

Na América do Norte, os aços inoxidáveis Duplex têm sido muito usados na construção de sistemas de redução de SO₂, denominados normalmente de sistemas FGD - *Flue Gas Desulfurization*. Trata-se de um método cujo objetivo é baixar as emissões de dióxido de enxofre em cerca de 90%.

Na Europa e na Ásia, o duplex 2205 foi usado para aplicações FGD, devido ao seu baixo preço e à sua boa resistência à corrosão comparado com um aço austenítico (IMOA, 2009).

É também usado em estações de dessalinização. Este é um processo que requer material com elevada resistência à corrosão aliado a um preço de custo aceitável para viabilizar o processo.

Os aços inoxidáveis duplex, para além das características anteriormente referidas, permitem a utilização de chapas com menor espessura, sendo necessário menor quantidade de material e, como consequência menor quantidade de material de adição na soldadura, isto acontece devido à sua elevada resistência mecânica. Obtém-se, desta forma, estruturas mais leves e fáceis de manobrar e com menor impacto no ambiente (IMOA, 2009).

3. Trabalho prático

3.1. Objetivos do trabalho prático

A família dos aços inoxidáveis é enorme, sendo a sua utilidade muito vasta e diversificada.

Por se tratar de um material de fabricação relativamente fácil, cuja composição se pode alterar conforme as características que se pretendem, de acordo com o fim a que se destinam, a sua importância é muito considerável no mundo empresarial.

Os aços inoxidáveis, em especial os Duplex, apresentam ótima resistência à corrosão, sendo por isso largamente utilizados na indústria química e petrolífera.

Pretende-se com este trabalho comparar três tipos de aços inoxidáveis Duplex, conhecidos comercialmente por LDX2101, SAF2507 e SAF2205 e, além disso, verificar o seu comportamento quando enterrados em dois tipos de solos com diferentes condições de agressividade, no que toca à corrosão.

3.2. Planeamento dos trabalhos Experimentais

Depois de selecionados os tipos de aço para se fazer o estudo e escolhidas as propriedades a comparar, procedeu-se à procura das normas necessárias para o efeito.

Na posse das amostras, gentilmente cedidas pela OUTOKUMPU, foram cortadas e convenientemente tratadas, conforme o ensaio a que se destinavam, seguindo as indicações estipuladas pelas respetivas normas. Foram reunidas as condições necessárias à execução dos ensaios, através da aquisição dos meios específicos necessários a cada ensaio. Finalmente, foram realizados os ensaios previamente estipulados e efectuadas as observações necessárias.

Na posse dos resultados dos ensaios, deu-se início à análise crítica dos resultados e consequente elaboração das conclusões.

3.3. Caracterização dos aços inoxidáveis duplex

Um dos grandes problemas que os engenheiros de projeto e investigadores enfrentam no momento de decidir qual o material a utilizar para um trabalho em concreto, é definir qual a liga que melhor se adapta às condições de operação. Existem inúmeros aspetos a considerar no momento de decidir o tipo de liga, atendendo não só às especificações mas também como já foi referido, às

condições de operação e de segurança a que se destina, de forma a que a liga escolhida seja a melhor opção técnica e comercial.

Sob o ponto de vista técnico, é bom lembrar que as ligas existentes no mercado foram desenvolvidas para resolver determinadas situações específicas que envolvem problemas de corrosão, resistência mecânica e processos de fabricação.

Conhecendo a técnica de fabrico e as consequências das combinações dos vários elementos de liga que constituem o aço inoxidável duplex, este é um material cuja relação custo-benefício é muito vantajosa e de produção relativamente fácil.

Os aços inoxidáveis duplex utilizados neste trabalho foram gentilmente cedidos pela OUTOKUMPU, possuindo a composição química indicada na tabela 3.

	LDX2101	SAF2205	SAF2507
C	0.019	0.016	0.021
Si	0.65	0.39	0.3
Mn	4.77	1.43	0.75
P	0.02	0.022	0.023
S	0.001	0.001	0.001
Cr	21.27	22.39	24.8
Ni	1.57	5.7	6.84
Mo	0.23	3.19	3.8
Cu	---	0.2	0.16
N	0.212	0.178	0.271
Ti	0.001	0.001	0.003
Ce	0.002	0.002	0.001

Tabela 3 - Composição química dos aços inoxidáveis duplex em estudo

3.3.1 Caracterização metalográfica dos aços inoxidáveis Duplex

Os ensaios metalográficos foram efectuados essencialmente para verificar se a distribuição das diferentes fases nos materiais em análise estava em consonância com o referido pelo fabricante. É sabido e referido pelos diferentes distribuidores de produtos siderúrgicos que um mesmo aço – portanto, com a mesma composição química -, pode apresentar diferentes propriedades em função do seu histórico de produção e de tratamentos a que foi sujeito. Ora, esses tratamentos deixam normalmente rasto nas propriedades mecânicas e na forma como as diferentes fases estão distribuídas no material. Foi precisamente com vista a estudar esta situação que se procedeu à análise metalográfica das diferentes ligas em estudo.

Os ensaios metalográficos podem ser macrográficos ou micrográficos. Neste trabalho será feito o exame micrográfico.

A fase mais importante deste estudo é a observação ao microscópio dos detalhes estruturais mais grosseiros do material em estudo. Mediante esta observação podem-se definir características estruturais como sendo: o tamanho do grão, o tamanho e distribuição das fases que compõem as ligas, assim como a presença de segregações e outra heterogeneidades, que podem alterar profundamente as propriedades mecânicas e o comportamento geral do material em estudo. Quando o exame microscópio permite visualizar essas características, é possível prever com alguma segurança o comportamento do material quando se utiliza para um fim específico. Com algumas limitações, o estudo estrutural do metal também permite supor os tratamentos mecânicos e térmicos que o mesmo possa ter sofrido.

A experiência demonstra que, pouco ou nada se pode obter do exame microscópico, sem antes se preparar convenientemente a amostra, para que se obtenha uma superfície satisfatória, recorrendo a normas mais ou menos rígidas e precisas.

Uma preparação defeituosa da amostra pode retirar todas as inclusões interessantes, destruir os grãos, em suma originar uma estrutura, pelo menos à superfície, que não tem nenhuma relação com a verdadeira estrutura representativa do metal em estudo (Kehl, 1939). Sob o ponto de vista prático, em determinados trabalhos em que é requerida soldadura, o conhecimento metalográfico do material é essencial para que se possa garantir que a soldadura esteja nas proporções pedidas em termos de Ferrite e Austenite.

3.3.1.1 Caracterização do equipamento utilizado

Com vista à realização dos ensaios metalográficos, foram efectuados os diversos passos necessários à preparação das amostras. Para tal, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Máquina de corte de amostras STRUERS DISCOTON 2 (figura 38);
- Máquina de montagem de amostras STRUERS PREDOPRESS (figura 39);
- Lixadoras e Polidoras STRUERS ROTOPOL 25 (figura 40);
- Hotte química (figura 41);
- Microscópio óptico EPI Iluminador Universal M provido de um sistema de captação de imagem digital (figura 42).



Figura 37 - Cortadora de amostras STRUERS DISCOTOM 2



Figura 38 – Máquina de montagem de amostras a quente STRUERS PREDOPRESS

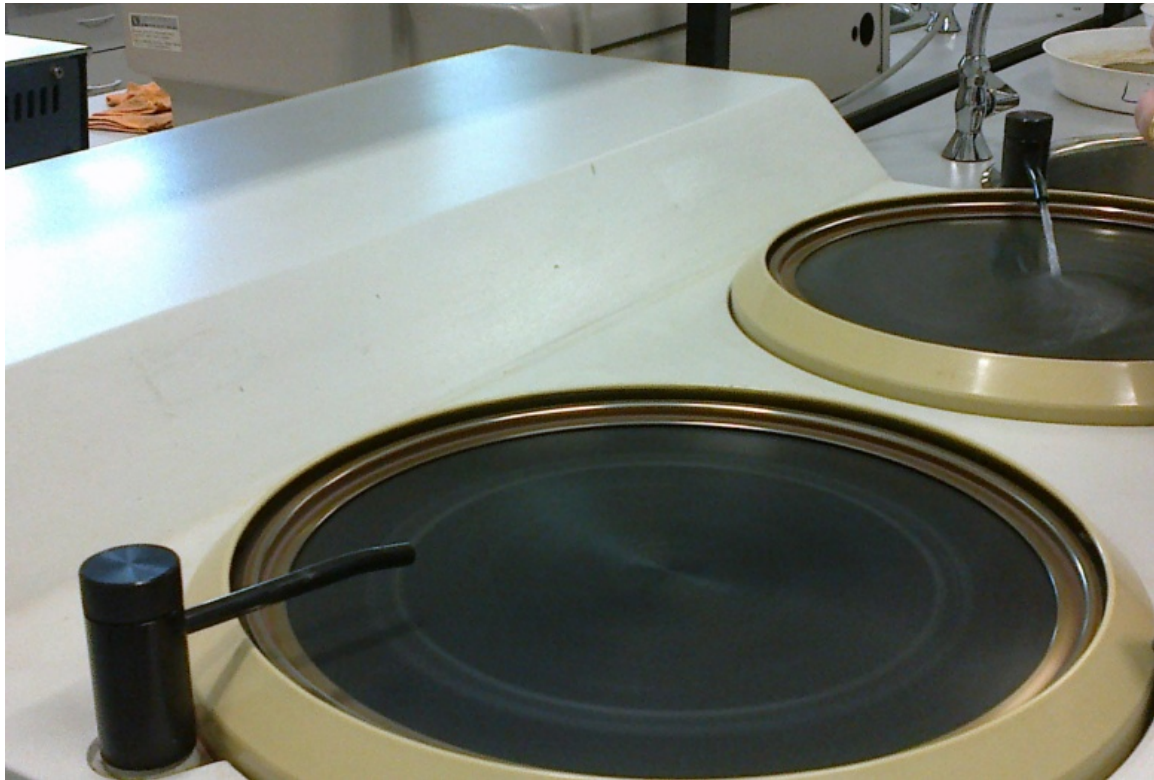


Figura 39 – Máquinas de Lixagem e Polimento STRUERS ROTOPOL 25



Figura 40 – Hotte química



Figura 41 - Microscópio EPI- Iluminador Universal M e respectivo sistema de captação de imagem digital

3.3.1.2. Metodologia seguida nos ensaios metalográficos

Como foi referido anteriormente, o tratamento da amostra é essencial para que a estrutura principal do aço não seja alterada. No âmbito do estudo microestrutural, foram cortadas pequenas amostras quadradas que foram tratadas seguindo todas as instruções e cuidados devidos para o efeito, segundo a norma NP 1467-1977.

O corte foi efectuado na máquina de corte de amostras STRUERS DISCOTOM 2 utilizando arrefecimento da amostra para que o calor desenvolvido no corte não alterasse as propriedades dos materiais em análise.

Seguidamente, foi efectuada a montagem a quente das amostras numa resina termoendurecível (baquelite) para facilitar o manuseamento das mesmas.

Com as amostras já montadas, facilitando o manuseamento, procedeu-se à lixagem das amostras, utilizando discos abrasivos de partículas de carboneto de silício (SiC) de granulometria decrescente, começando pela lixa de 220 *mesh*, evoluindo para a lixa de 500 *mesh* e acabando na lixa de 1200 *mesh*.

Durante esta fase foram tomadas as devidas providências, a assinalar:

- usar água corrente, para eliminar as partículas que fossem sendo libertadas;
- evitar o aquecimento excessivo da amostra;
- manter as lixas em rotação, estando a amostra parada;
- garantir que a lixagem efectuada por uma lixa elimina os riscos deixados pela anterior;

- lavar a amostra convenientemente sempre que se muda de lixa.

No final deste procedimento, as amostras foram lavadas em água corrente, passadas por álcool e secas com ar comprimido.

Por fim, as amostras sofreram polimento, utilizando para o efeito pasta abrasiva de diamante, de granulometrias 3µm e 1 µm, respetivamente.

Nesta fase foram tidos em consideração os seguintes cuidados:

- as amostras foram movimentadas continuamente no pano humedecido com o abrasivo selecionado e o lubrificante, para não se formarem estruturas distorcidas bem como defeitos de polimento;
- a pressão sobre as amostras foi moderada, para evitar o aparecimento de deformações na camada superficial e distorções na estrutura do material.

No final a amostra foi cuidadosamente limpa com água, álcool e seca com ar comprimido.

Com a finalidade de se efectuar uma observação conveniente da estrutura em estudo, a superfície polida das amostras foi devidamente tratada, para que fosse possível aumentar ou diminuir os contrastes ópticos entre as várias fases. De notar que o reagente tem que possuir a capacidade de efetuar um ataque parcial e desgaste de um constituinte, enquanto que o outro permanece sem ser atacado. Desta forma, alguns constituintes assumem diferentes colorações, permitindo a sua diferenciação no microscópio. As partes não atacadas aparecem com cores mais claras, enquanto as outras assumem tonalidades mais escuras.

De entre os diferentes reagentes indicados para este tipo de ligas, foi seleccionada a solução *BERAHA's tint etch*, que apresenta a seguinte composição: 20ml de ácido clorídrico (HCl), 80ml de água destilada (H₂O) e 0.3gr de metabissulfito de potássio (K₂S₂O₅).

O metabissulfito foi adicionado na altura do ataque para não perder as suas propriedades.

De referir que o ataque foi realizado na Hotte química, por razões de saúde e segurança.

As amostras foram imersas na solução, sendo que os aços duplex LDX2101 e o SAF2507 foram atacados durante 5 segundos e o aço duplex SAF2205 necessitou de um ataque de 25 segundos. Terminado o ataque, as amostras foram lavadas com álcool, secas com ar comprimido para finalmente serem observadas ao microscópio.

3.3.1.3 Resultados da observação metalográfica

As imagens correspondentes às observações realizadas no microscópio óptico poderão ser analisadas nas figuras seguintes.

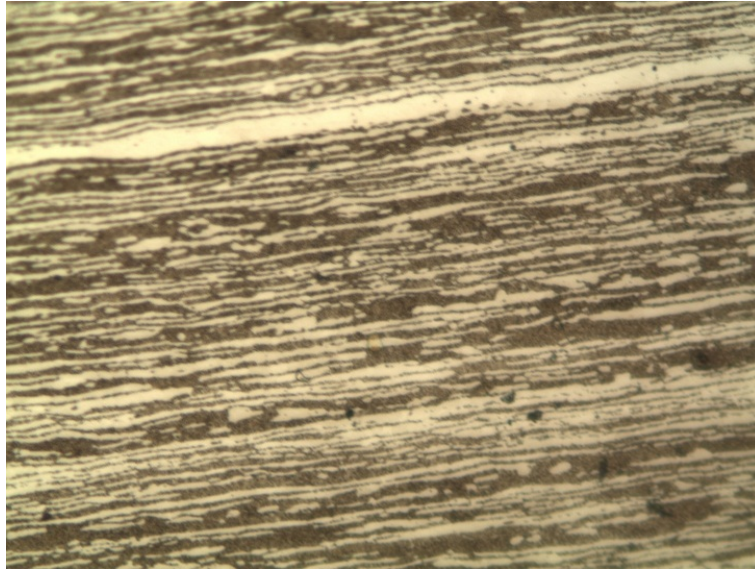


Figura 42 - Estrutura metalográfica do aço inoxidável duplex LDX2101 (x200)

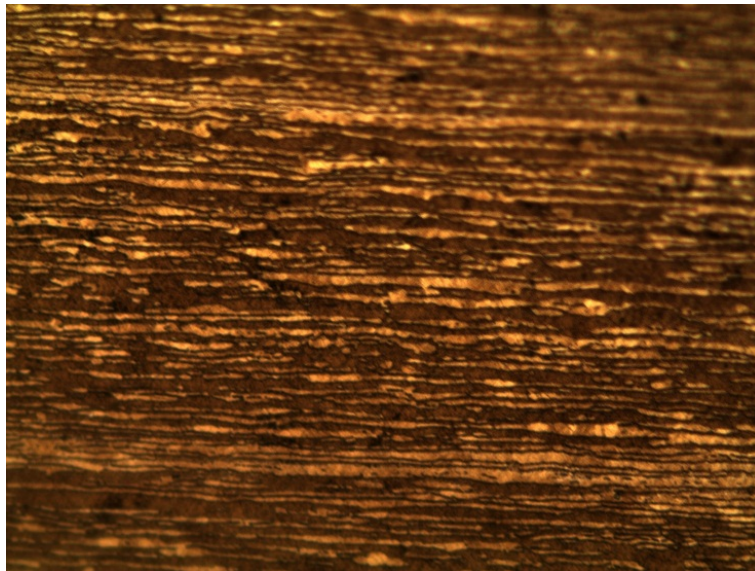


Figura 43 - Estrutura metalográfica do aço inoxidável duplex SAF 2205 (x200)

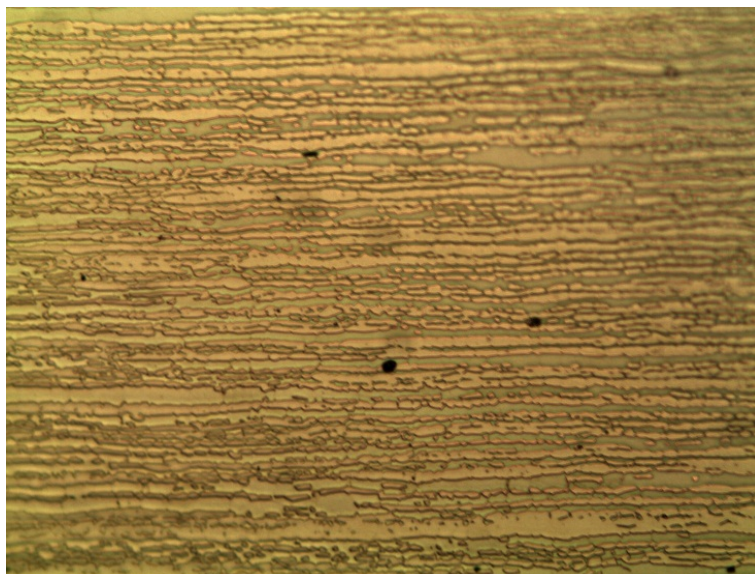


Figura 44 - Estrutura Metalográfica do aço inoxidável duplex SAF 2507 (x200)

3.3.1.4 Análise crítica dos resultados da observação metalográfica

Tratando-se de amostras recolhidas a partir de chapas laminadas, é perfeitamente perceptível uma orientação preferencial do grão na direcção da laminagem, indicando que o material terá certamente um comportamento anisotrópico.

Para além disso, as imagens estão em linha com outras efectuadas por outros investigadores utilizando o mesmo reagente ou reagentes similares, mostrando a austenite com coloração mais escura e a ferrite em tons mais claros, numa proporção muito idêntica. Como seria de esperar, as diferenças entre as estruturas não são significativas, mostrando no entanto que o aço inoxidável duplex SAF 2507 apresenta grão ligeiramente mais pequeno, o que se ficará a dever certamente à sua composição química mais elaborada. Esta estrutura de grão mais pequeno conduzirá certamente a melhores propriedades mecânicas, nomeadamente a uma maior tenacidade.

3.3.2 Caracterização da dureza dos aços inoxidáveis duplex

Conforme referido anteriormente, a caracterização da dureza é extremamente importante para, de uma forma indirecta, avaliarmos a resistência ao desgaste do material. No caso dos aços inoxidáveis duplex, esta propriedade começa a ganhar relevância com a utilização deste tipo de material em determinadas aplicações mais específicas. Inicialmente, a dureza não era uma propriedade tão relevante nestes materiais, já que a sua aplicabilidade se resumia a aplicações muito exigentes em termos de resistência à corrosão e necessidades moderadas de resistência mecânica e rigidez. Mais recentemente, com a utilização de polímeros quimicamente mais agressivos, os aços inoxidáveis duplex passaram a ser uma alternativa viável aos aços para ferramentas mais comuns nos moldes para injeção de plásticos, já que prolongam significativamente a vida destes, devido ao facto de não se deixarem atacar pelos gases agressivos gerados durante a injeção de polímeros técnicos.

Neste caso, a resistência ao desgaste assume outra importância, já que esses plásticos poderão ser injectados com uma percentagem relativamente elevada de reforços (fibras de vidro), os quais são extremamente abrasivos para a superfície interior do molde, exigindo assim que o material possua uma elevada resistência à abrasão (Martinho, 2009).

Neste contexto, foram efectuados ensaios de dureza aos aços inoxidáveis duplex em estudo neste trabalho. Em termos industriais, são normalmente utilizados os ensaios de dureza seguindo a metodologia *Rockwell*, já que não necessita de preparação prévia, tornando-se muito mais versátil em ambiente fabril. Neste trabalho, optou-se por utilizar a metodologia *Vickers*, por se tratar de um trabalho laboratorial e pelo facto dos resultados serem mais fidedignos e poderem ser facilmente transponíveis e comparáveis com outras escalas.

3.3.2.1 Caracterização do equipamento e parâmetros utilizados

A dureza foi avaliada com o material conforme recebido, e ainda depois de ter sido dobrado, com vista a avaliar o possível incremento da dureza e resistência mecânica provocada pelo trabalho mecânico de dobragem. Para o efeito foi utilizado um Durómetro EMCO, modelo M4U, provido de um indentador de diamante tipo Vickers, com a geometria piramidal mostrada anteriormente.

Este equipamento está instalado no Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEM do ISEP.



Figura 45 - Durómetro EMCO M4U

3.3.2.2 Metodologia do ensaio seguida

Os testes foram efetuados seguindo a norma ISO 6507-1:2005 à temperatura ambiente.

A carga máxima utilizada nestes ensaios foi de 30kgf, a qual foi mantida constante sobre as amostras durante um período de 5 segundos.

As amostras tinham a dimensão de 200mm × 20mm × 3mm. Foram efetuados 13 medições na face plana de uma amostra de cada aço inoxidável duplex em estudo, em três amostras de cada aço.

Posteriormente, as amostras sofreram dobragem e foram feitas outras 13 medições, desta vez ao longo da superfície lateral das mesmas, com vista à traçagem do perfil de dureza, permitindo assim avaliar possíveis diferenças nos valores obtidos no material sujeito e não sujeito a trabalho mecânico.

3.3.2.3 Resultados dos ensaios de dureza

Os resultados obtidos nas amostras planas foram os indicados no gráfico mostrado na figura 47.

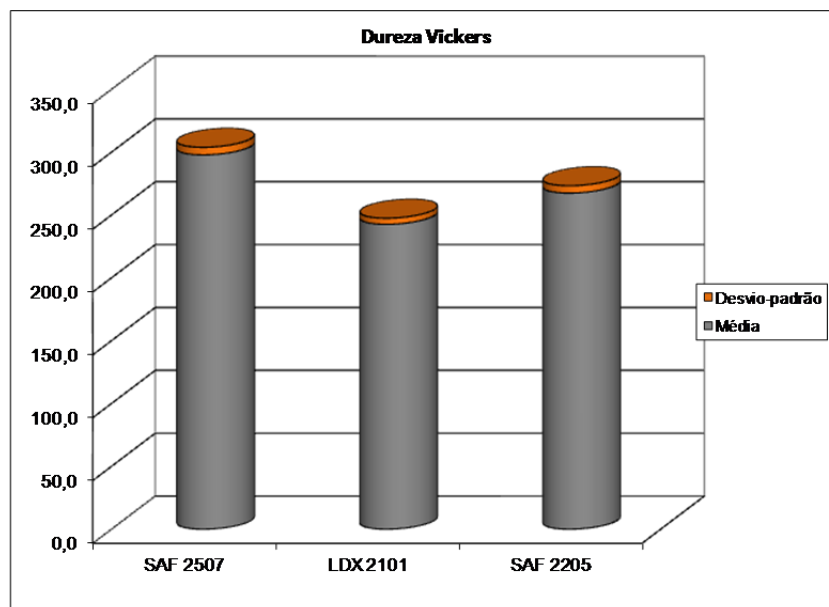


Figura 46 – Resultados da Dureza Vickers

Os resultados obtidos nas amostras que sofreram dobragem estão representados nas figuras 48, 49 e 50, conforme o aço em estudo.

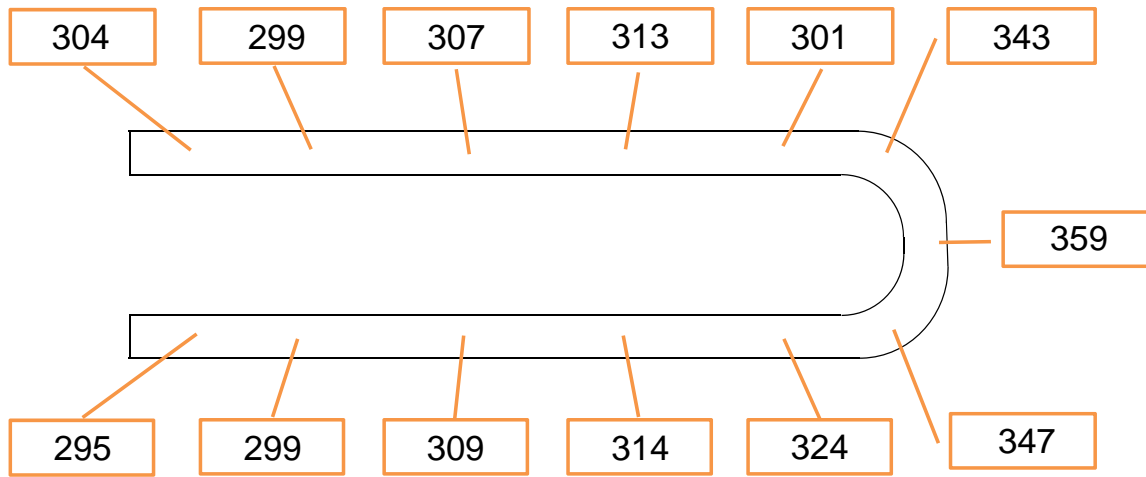


Figura 47- Dureza após dobragem em U (HV30) do aço inoxidável duplex SAF 2507

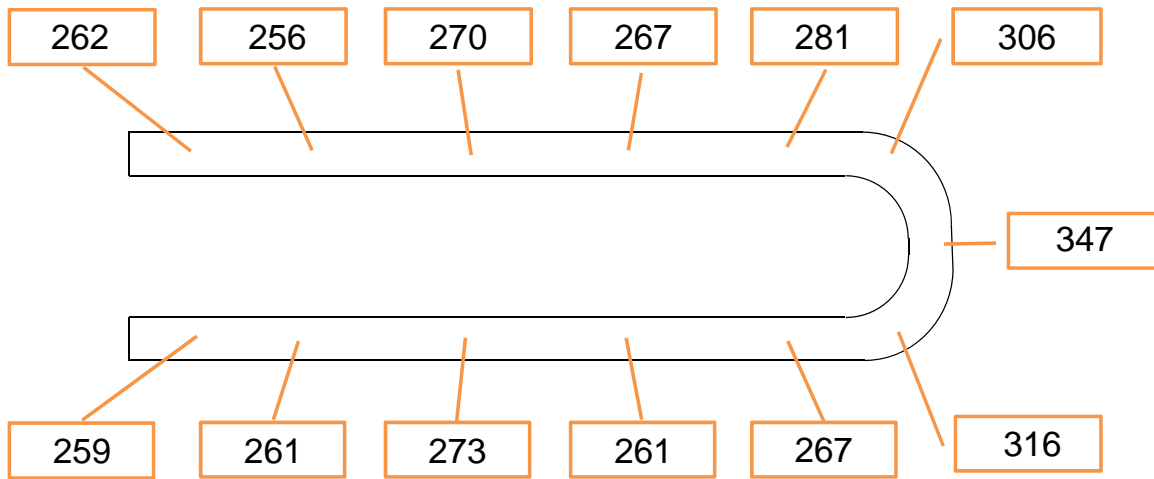


Figura 48- Dureza após dobragem em U (HV30) do aço inoxidável duplex LDX2101

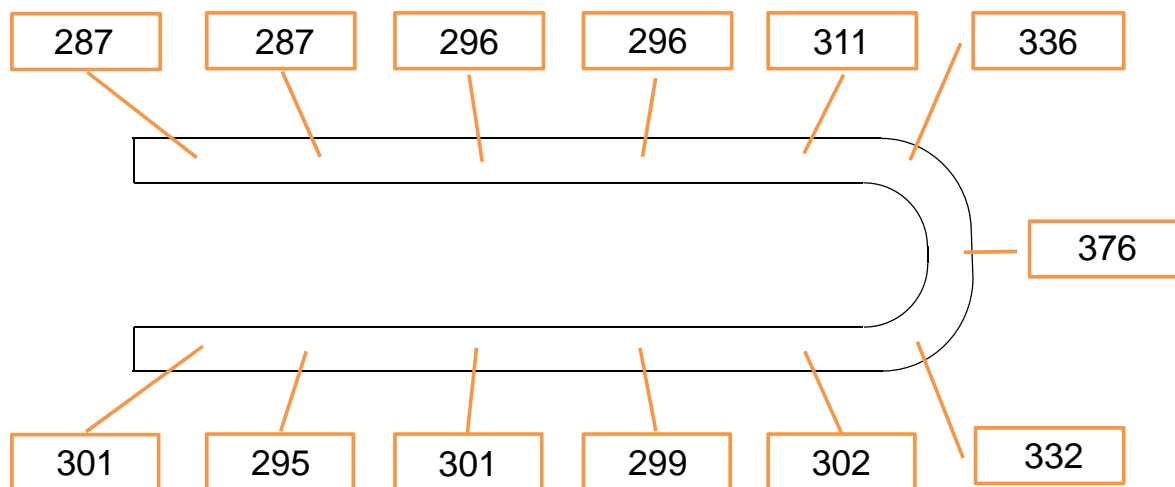


Figura 49- Dureza após dobragem em U (HV30) do aço inoxidável SAF 2205

3.3.2.4 Análise crítica dos resultados

Do gráfico da figura 47 facilmente se poderá constatar que o aço inoxidável duplex com a referência SAF 2507 é aquele que apresenta maior dureza, seguido de perto pelo SAF 2205, enquanto o aço com a referência LDX 2101 é aquele que apresenta uma menor dureza. Constata-se assim que uma maior presença dos elementos de liga principais, com destaque principal para o cromo, leva a que haja um ligeiro incremento na dureza apresentada pela liga.

No que toca ao perfil de dureza de cada aço após uma dobragem acentuada, exercendo trabalho mecânico sobre o material num único ciclo, poderá constatar-se que existe encruamento em todos os aços testados, sendo o aço LDX 2101 aquele que apresenta maior variação entre a zona não deformada e a deformada, com um incremento na dureza de cerca de 85HV, correspondentes a um incremento percentual de 33%. O aço SAF 2205 apresenta igualmente susceptibilidade ao encruamento, com uma variação percentual de 25%. O aço SAF 2705 é aquele que, apresentando igualmente encruamento, sofre um incremento de dureza menor, na ordem dos 20%. Atendendo a que este tipo de aços é frequentemente utilizado em aplicações sujeitas a conformação plástica, é facilmente perceptível que, se se pretender aumentar a resistência mecânica – e consequentemente a dureza – pela via da conformação/trabalho mecânico, a melhor opção será a aplicação do aço LDX 2101. Por outro lado, se houver a necessidade imperiosa de efectuar conformações, mas não se pretender que o material encrue e, consequentemente, dificulte operações de conformação posteriores, a melhor opção será o uso do aço SAF 2705.

3.3.3 Caracterização da resistência mecânica dos aços inoxidáveis Duplex

A resistência mecânica é a propriedade que os corpos possuem, que lhes permite resistirem a esforços lentos e progressivos, sem se deteriorarem.

Esses esforços podem ser de diferentes tipos, nomeadamente:

- Tracção
- Compressão
- Flexão
- Torção
- Cisalhamento/Corte, como se pode observar na figura 51.

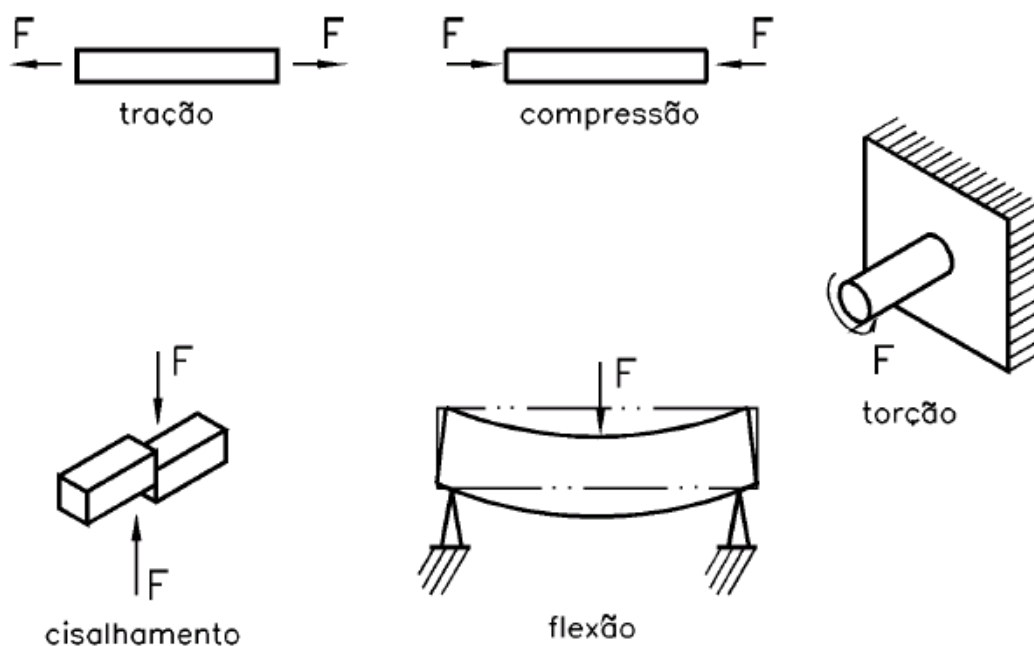


Figura 50 - Tipos de esforços a que os corpos podem estar sujeitos

Neste trabalho será analisado o comportamento dos aços em estudo, quando sujeitos a esforços de tração, já que este ensaio permite igualmente obter outras informações importantes acerca destes materiais, tais como o limite elástico (extremamente importante para efeitos de dimensionamento), a ductilidade (através do alongamento após ruptura), entre outros.

O conhecimento destas propriedades é de extrema importância sob o ponto de vista de projeto, pois a melhor escolha do material depende, da sua resistência tendo em vista o fim a que se destina, bem como as condições de trabalho a que vai estar sujeito.

3.3.3.1 Caracterização do equipamento utilizado nos ensaios de tração

Para a realização dos ensaios de tração, foi utilizada uma máquina universal SHIMADZU Autograph AG-X, de 100 kN, provida de um extensómetro com comprimento base de $l_0=50\text{mm}$, usado apenas na fase inicial de cada ensaio, e de outro extensómetro preparado para medir a contração lateral dos provetes por forma a avaliar o Coeficiente de Poisson de cada material.

Este equipamento de ensaio, que se encontra no laboratório de ensaios mecânicos do DEM do ISEP, está provido de uma aplicação informática denominada TRAPEZIUM X que permite a recolha e o tratamento da informação enviada pelos extensómetros e sensores resultantes do ensaio, permitindo a obtenção de um ficheiro MS Excel® com todos os dados e um relatório final.

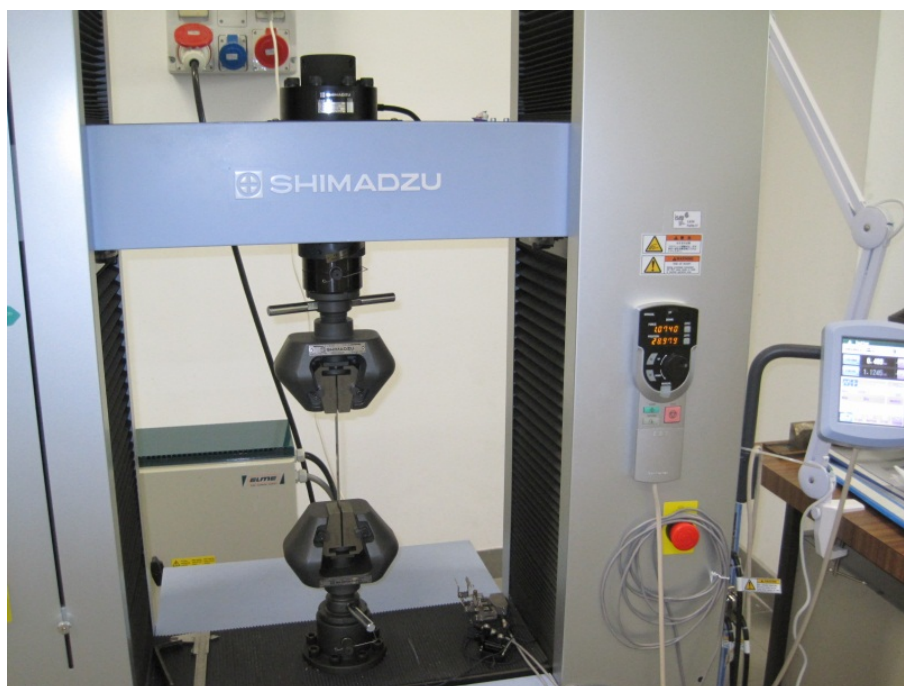


Figura 51 - Máquina Universal Shimadzu Autograph AG-X

3.3.3.2 Metodologia seguida no ensaio de tracção

Os ensaios foram realizados seguindo a Norma NP EN 10002 – 1:2006 à temperatura ambiente e a uma velocidade de 2mm/min. As amostras eram constituídas por provetes planos e possuíam as dimensões de 200mm x 20mm x 3mm.

Trata-se de um ensaio de fácil execução, que consiste em submeter o material a um esforço de tracção. A amostra é fixada na máquina de ensaio, que aplica forças crescentes na sua direcção axial, sendo medidas as deformações correspondentes por intermédio de extensómetros. Os esforços são medidos através de uma célula de carga adequada aos esforços a aplicar até à ruptura do provete. A uniformidade da deformação permite ainda obter medições precisas da variação dessa deformação em função das tensões aplicadas. Esta uniformidade termina no momento em que é atingida a carga máxima suportada pelo material, quando começa a aparecer o fenómeno de estricção, ou diminuição localizada da secção da amostra. A rotura dá-se sempre na região do provete onde se verificou a estricção.

A amostra deve estar bem alinhada na máquina para que a carga seja efetivamente aplicada na direcção do seu eixo longitudinal.

Estes ensaios permitem traçar as respectivas curvas Carga-Deslocamento, possibilitando assim a obtenção das propriedades mecânicas desejadas: Módulo de Elasticidade, tensão limite de elasticidade, tensão de ruptura, alongamento após ruptura e *Coefficiente de Poisson*, assim como a estricção e a força máxima.

3.3.3.3 Metodologia utilizada nos ensaios Carga-Descarga

O mesmo equipamento foi utilizado para efetuar ensaios de carga e descarga, por forma a avaliar o possível efeito de encruamento como consequência do trabalho mecânico nos materiais em estudo.

Estes ensaios foram efetuados nas mesmas condições de ensaio utilizadas para a realização dos ensaios de tração. O equipamento de ensaio permite uma regulação do ponto de descarga em função da carga ou do deslocamento. Atendendo à diferente resistência mecânica patenteada pelos materiais em análise, foi decidido considerar como variável despoletadora da descarga o deslocamento. Assim, o equipamento foi programado para proceder à descarga ao fim de 3mm de deslocamento, voltando novamente a carregar o provete a partir do início, sendo este ciclo repetido três vezes. Seguidamente, os gráficos Força-Deslocamento foram analisados, com vista a verificar qualquer possível alteração da força necessária à obtenção da mesma deformação no provete.

3.3.3.4 Resultados dos ensaios de tracção

Os ensaios à tração permitiram obter, desde logo, um vasto conjunto de informações sobre os aços inoxidáveis duplex em estudo, nem sempre disponibilizadas pelos fabricantes. O resumo dessa informação pode ser observado na tabela 4.

	LDX 2101	SAF 2507	SAF 2205
Tensão Limite Elástico [MPa]	618.49	421.55	502.14
Tensão de Rotura [MPa]	807.22	885.24	732.92
Força Máxima [N]	48439.4	53114.5	43974.9
Alongamento (%)	40.6	38.6	38.8
Módulo de Elasticidade [GPa]	216.97	223.7	204.7
Coefficiente de Poisson	0.28	0.26	0.25
Estricção [%]	23.5	34.1	25.47

Tabela 4 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios à tracção

Como já foi referido, da realização destes ensaios resultou um gráfico, que relaciona a Força com o Deslocamento, que podem ser observados nas figuras 53, 54 e 55, conforme o material em estudo.

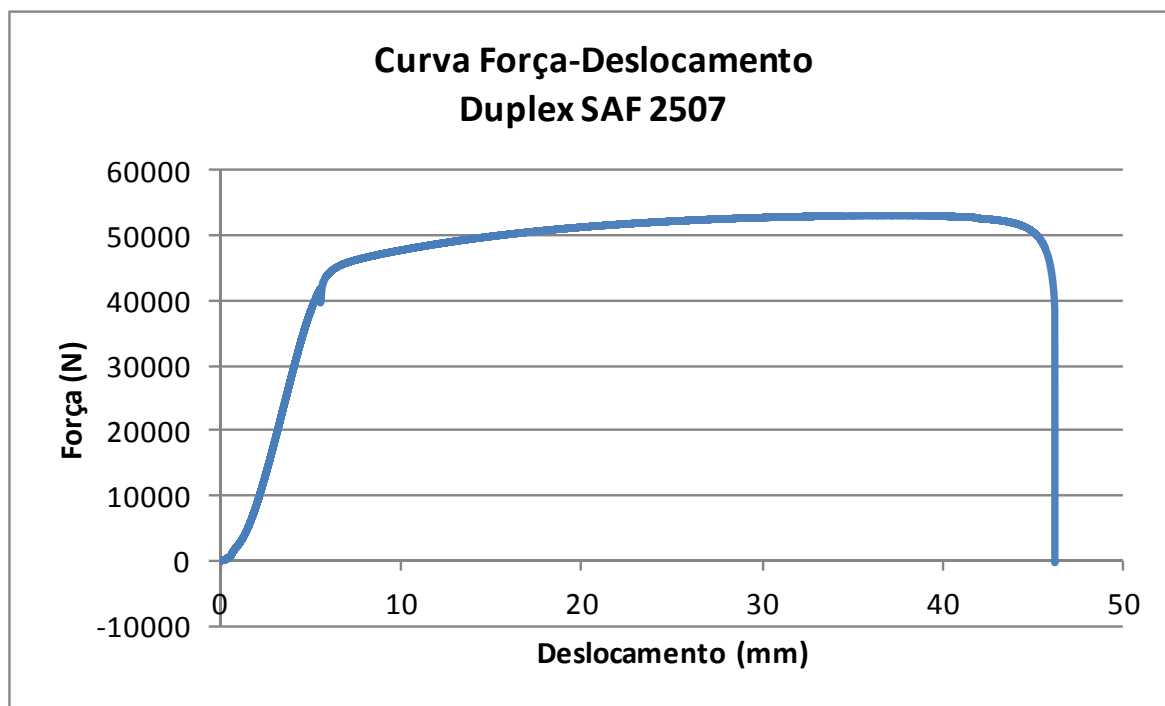


Figura 52 – Curva Força x Deslocamento para o aço SAF 2507

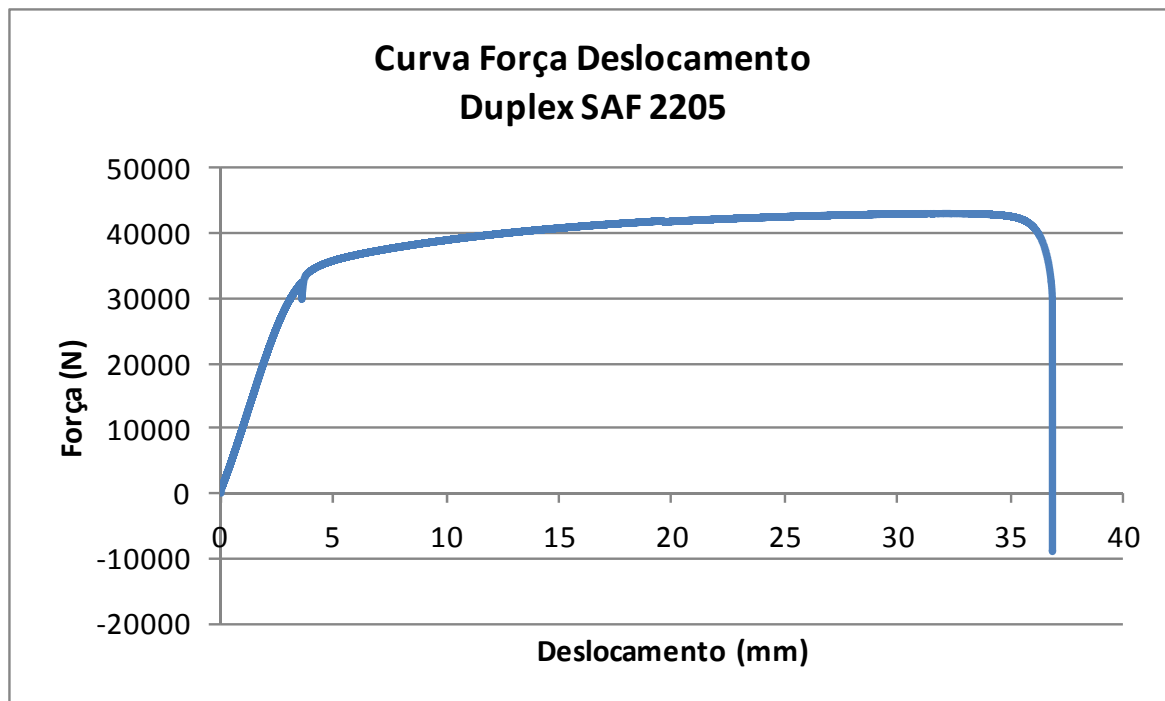


Figura 53 – Curva Força x Deslocamento para o aço SAF 2205

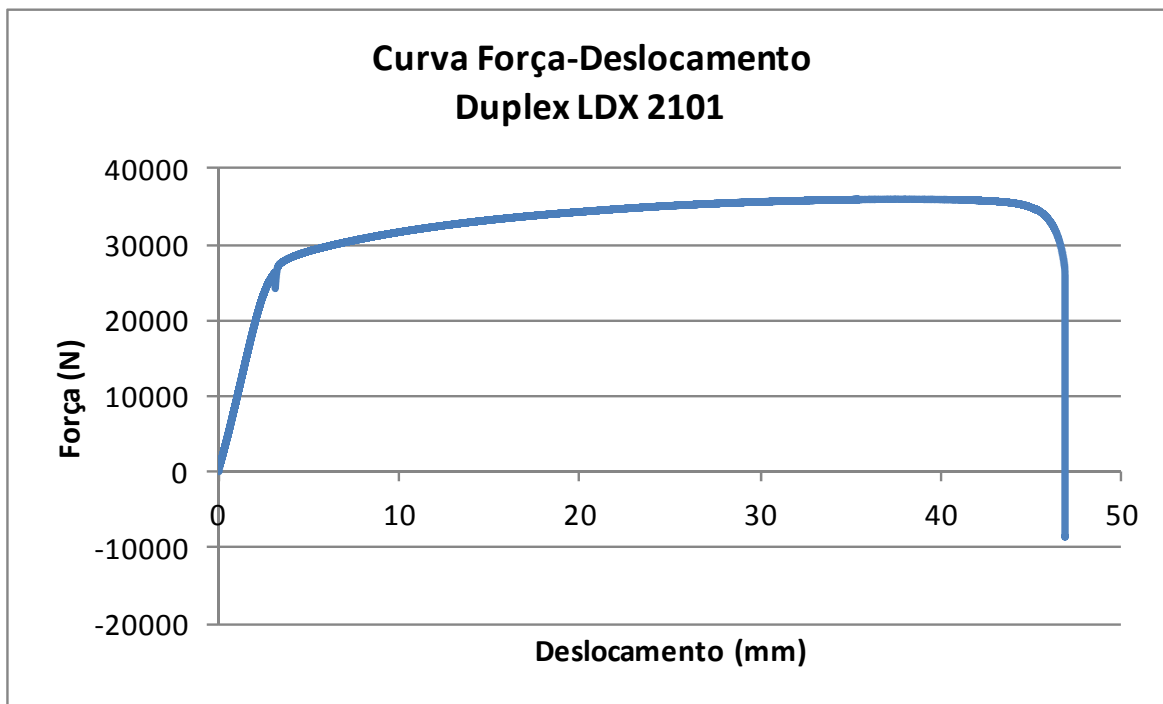


Figura 54 – Curva Força x Deslocamento para o aço LDX 2101

Relativamente aos ensaios com três ciclos de carga e descarga, foram obtidos os gráficos que podem ser observados nas figuras 56, 57 e 58.

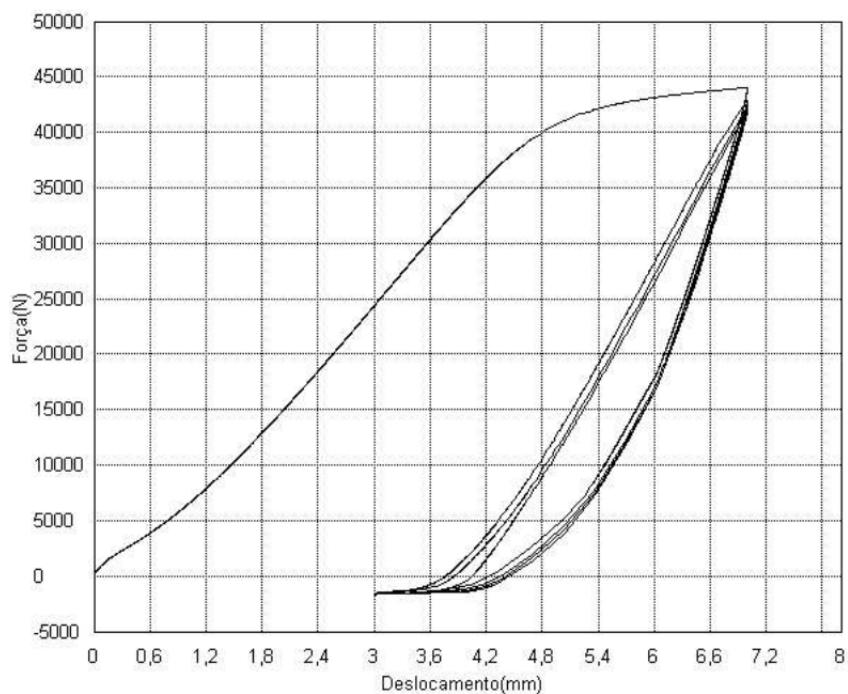


Figura 55 – Curva Força x Deslocamento para três ciclos de carga e descarga no aço SAF 2507

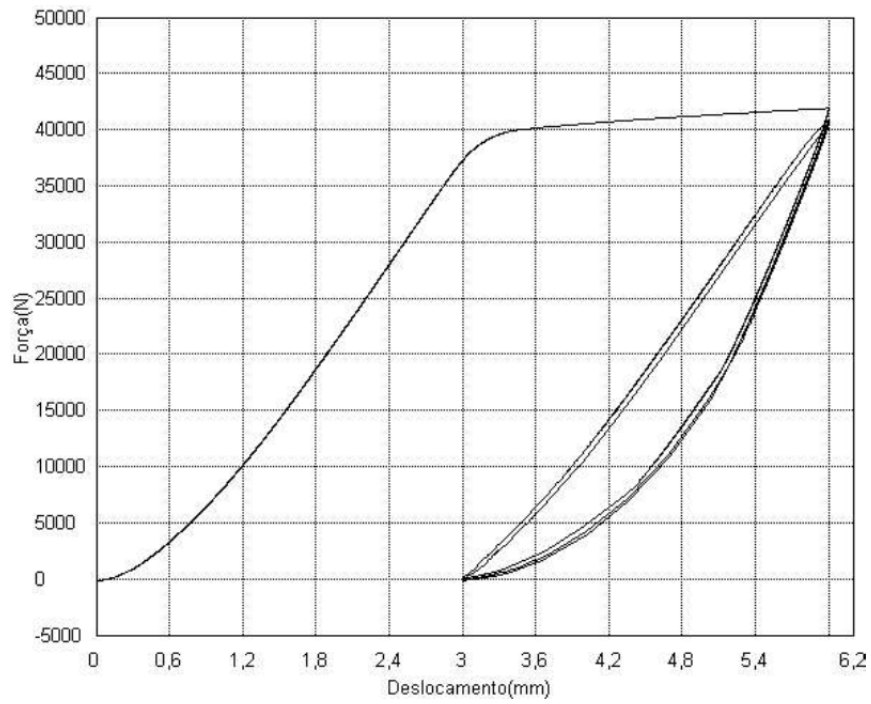


Figura 56 – Curva Força x Deslocamento para três ciclos de carga e descarga no aço SAF 2205

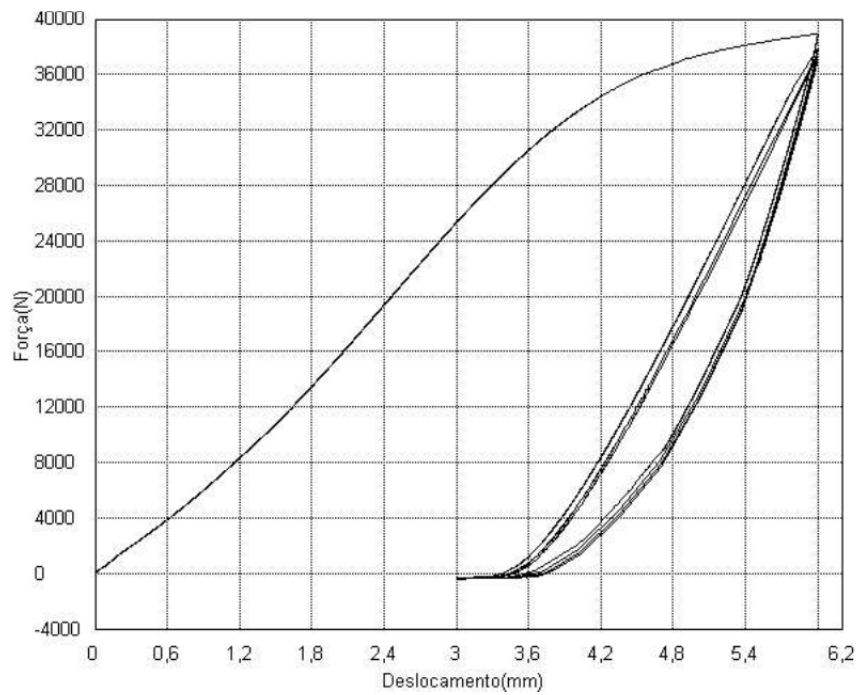


Figura 57 – Curva Força x Deslocamento para três ciclos de carga e descarga no aço LDX 2101

3.3.3.5 Análise crítica dos resultados

Atendendo aos ensaios de tracção efectuados normalmente, e pela observação dos gráficos das figuras 53, 54 e 55, e ainda pela análise dos valores presentes na tabela 4, resultantes dos relatórios emanados pelo programa informático acoplado ao equipamento de ensaio, pode-se constatar o seguinte:

- O aço inoxidável duplex que apresenta maior força máxima é o SAF 2507, enquanto aquele que apresenta a força máxima mais baixa é o SAF 2205. O aço LDX 2101 apresenta resultados intermédios;
- A tensão de rotura, como seria de esperar, segue exactamente a mesma tendência, já que a secção dos provetes era a mesma;
- O aço inoxidável duplex LDX 2101 é aquele que apresente maior tensão-limite elástico, seguida do aço SAF 2205. O aço que apresenta menor tensão-limite elástico é o SAF 2507, ficando-se por cerca de $2/3$ da tensão-limite elástico apresentada pelo LDX 2101;
- O alongamento após ruptura destes aços é notável, sendo muito similar entre todos os materiais em análise. Aquele que apresentou melhores resultados foi o LDX 2101, sendo seguido de muito perto pelos outros dois materiais testados. Os valores obtidos demonstram que estes materiais possuem uma óptima ductilidade, atendendo à sua elevada resistência mecânica, permitindo assim ser transformados facilmente por conformação plástica;
- O Módulo de Elasticidade, também designado por Módulo de Young, está em consonância com os valores esperados, estando situado no intervalo entre 205 e 225GPa, ou seja, apresentam a rigidez esperada;
- A estricção é mais elevada no aço SAF 2507, que se destaca francamente dos outros dois aços em análise, que apresentam um comportamento muito idêntico a este nível;
- O *Coefficiente de Poisson* está compreendido entre 0.25 e 0.28, valores que se podem considerar em linha com o esperado para este tipo de materiais, traduzindo um valor usual entre a deformação transversal e longitudinal.

Atendendo aos ensaios efectuados com três ciclos de carga-descarga, e tendo em atenção os gráficos das figuras 56, 57 e 58, é possível concluir que, apesar do trabalho mecânico efectuado, não foram sentidas alterações significativas na resistência mecânica do material, o que contradiz a constatação verificada nos ensaios de dureza. Isto poderá significar que o nível de deformação/alongamento seleccionado não foi suficiente para produzir no material o encruamento que foi sentido na dobragem efectuada para os ensaios de dureza. Assim, poderá constatar-se que estes aços são passíveis de encruamento apenas quando sujeitos a trabalho mecânico intenso.

3.3.4. Caracterização da Resiliência dos aços inoxidáveis Duplex

Com vista a estudar a resiliência dos materiais, foram efetuados ensaios de impacto em corpos de prova providos de um entalhe em “V”.

O provete de ensaio é padronizado com vista a produzir um estado triaxial de tensões, quando é submetido a uma flexão por impacto provocada pelo martelo pendular do equipamento (Souza, Sérgio, 1977).

A energia que o corpo de prova absorve, para se deformar e romper, é medida pela diferença entre a altura atingida pelo martelo antes e após do impacto, multiplicada pelo peso do martelo. No fundo, o sistema assenta no princípio da conservação da energia, conforme já explicado anteriormente. Quanto menor for a energia absorvida, mais frágil será o comportamento do material naquela solitação dinâmica.

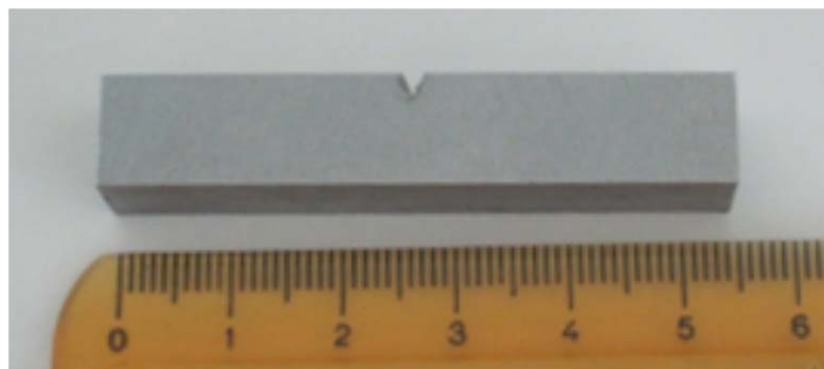


Figura 58 - Provete do tipo Charpy

O entalhe produz um estado triaxial de tensões, suficiente para provocar uma rotura de carácter frágil, mas apesar disso, não se pode medir satisfatoriamente os componentes das tensões existentes, que podem mesmo variar conforme o metal usado ou conforme a estrutura interna que o material apresente. Deste modo o ensaio é útil apenas para comparação de materiais ensaiados nas mesmas condições. No entanto, estes ensaios são ainda utilizados para a obtenção de informação relativamente rigorosa sobre a temperatura que corresponde à passagem de um comportamento dúctil para um comportamento frágil, o que é vital para os projectistas determinarem a apetência de um dado material para trabalhar em condições de temperatura adversas. O aspecto das superfícies de fractura dos provetes permitem ainda tirar ilações sobre o tipo de comportamento apresentado, através da área fibrosa da superfície.

Sob o ponto de vista prático, quando o material vai trabalhar em condições de grande amplitude térmica, a informação resultante deste ensaio é extremamente importante, para garantir a fiabilidade e durabilidade do equipamento.

3.3.4.1 Caracterização do equipamento utilizado

Para a realização destes ensaios foi utilizado um Pêndulo CHARPY de 300J da marca HOYTOM, que se encontra instalado no Laboratório de Materiais da ESEIG em Vila do conde e está representado na figura 60.

Utilizando as mesmas instalações e o mesmo equipamento, foram realizados ensaios a baixas temperaturas com azoto líquido.



Figura 59 - Pêndulo CHARPY de 300J da marca HOYTOM

3.3.4.2 Metodologia seguida no ensaio de impacto

Os ensaios foram executados segundo a norma NP EN 10045-1: 1990.

Os provetes do tipo Charpy, são livremente apoiados na máquina de ensaio com as dimensões de 55mm x 10mm x 10mm, e providos de um entalhe em V a 45 ° com 2mm de profundidade a meio do seu comprimento. Com o auxílio de um porta-provetes, a amostra é colocada convenientemente nos apoios, de forma a que o plano de simetria do entalhe não se afaste mais de 0.5mm do plano de simetria dos apoios, assegurando ainda que a aresta do martelo venha bater na face oposta ao entalhe do provete.

Depois de romper o corpo de prova, o martelo sobe até uma altura que é inversamente proporcional à energia absorvida para deformar e romper o corpo de prova. Assim, quanto menor for a altura atingida pelo martelo, mais energia o corpo de prova absorveu. Essa energia é lida diretamente na máquina de ensaio e caracteriza a resistência ao choque do material ensaiado.

Também foram realizados ensaios a temperaturas criogénicas, utilizando para o efeito Azoto líquido. Para tal, os provetes foram colocados em Azoto líquido durante um período mínimo de 10 minutos, para garantir o arrefecimento homogéneo, sendo a rotura efetuada nos 5 segundos imediatos ao momento em que o provete é retirado do meio de arrefecimento. Dada a impossibilidade de medir a temperatura abaixo de -40°C, foram estipuladas diferentes durações dos ensaios.

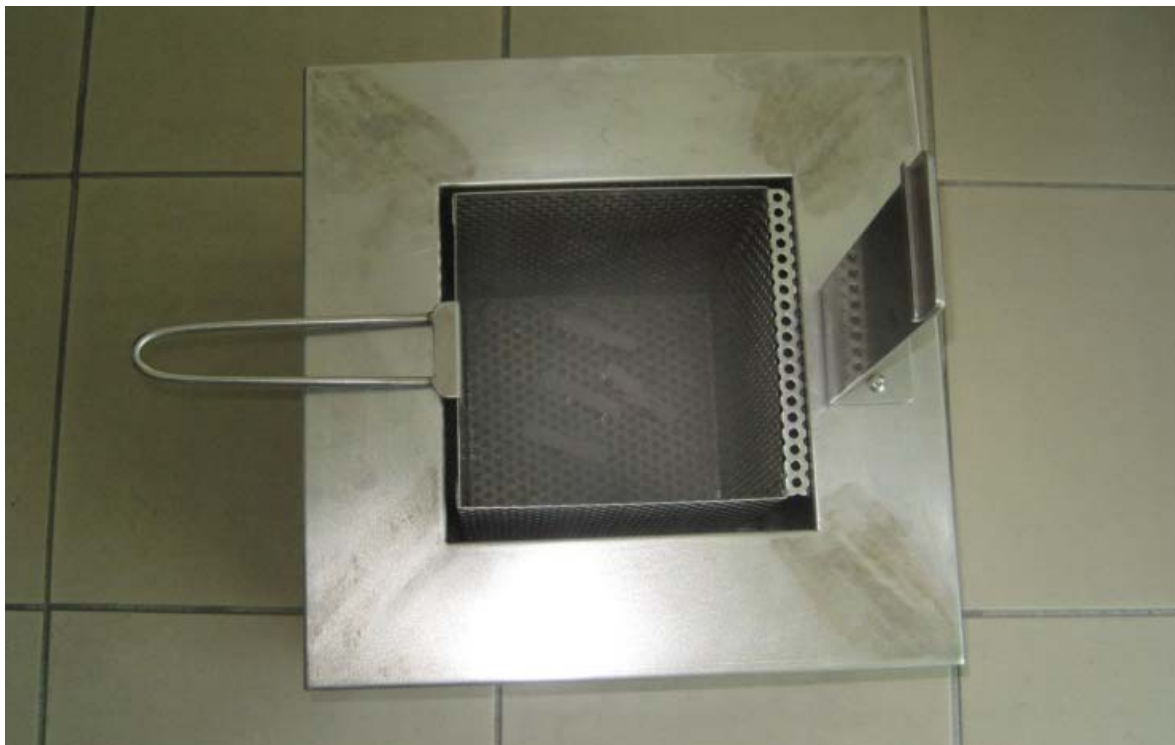


Figura 60 - Provetes no líquido criogénico

3.3.4.3 Resultados dos ensaios de impacto

Os resultados obtidos, podem ser analisados na tabela 5.

AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX	Temperatura Ambiente	10' em Azoto líquido	30' em Azoto líquido	60' em Azoto líquido
SAF 2205	Não Fracturou	Não Fracturou	Não Fracturou	Não Fracturou
SAF 2507	Não Fracturou	Não Fracturou	Não Fracturou	49 J
LDX 2101	Não Fracturou	29.5 J	21 J	6.5 J

Tabela 5 - Valores da energia absorvida nos ensaios de impacto CHARPY com entalhe em V

3.3.4.4 Análise crítica dos resultados

Da análise da tabela 5, facilmente se pode constatar que, à temperatura ambiente, nenhum dos materiais em análise apresentou fractura, o que, desde logo, indicia uma óptima resiliência. Quando arrefecidos durante 10 minutos, as amostras de inoxidável duplex mostraram igualmente um óptimo comportamento, mas o aço LDX 2101 fracturou, absorvendo um nível de energia relativamente baixo, demonstrando claramente que este aço não possui uma resiliência tão eficaz quanto os restantes.

Arrefecendo as amostras durante 30 minutos, os resultados são sensivelmente iguais, embora o aço LDX 2101 passe ainda a absorver menos energia no choque.

Quando os provetes foram arrefecidos no Azoto Líquido durante 60 minutos, o único aço a resistir ao impacto passou a ser o SAF 2205. Nestas condições, o aço LDX 2101 passa a absorver muito pouca energia (comportamento quase frágil), enquanto a aço SAF 2507 apresenta uma energia absorvida bastante interessante. Henrik Sieurin (Sieurin, 2006), em estudos de tenacidade efectuados sobre os aços LDX 2101 e SAF 2205 tinha chegado à conclusão que este último apresentava, efectivamente, um melhor comportamento do que o LDX 2101.

A melhoria do comportamento ao choque dos diferentes aços em estudo poderá revelar que o Níquel tem alguma influência nestes resultados mas que o incremento do teor de Níquel na liga não conduz a um efeito proporcional. Efectivamente, no que toca à resiliência, o compromisso Cr/Ni e o respectivo balanço com os outros elementos de liga torna-se mais favorável para o aço inoxidável duplex SAF 2205.

3.3.5 Caracterização da resistência à Corrosão dos aços inoxidáveis Duplex

Os aços inoxidáveis duplex possuem uma elevada resistência à corrosão, independentemente do meio ambiente onde se encontram. O fenómeno de passividade tem uma grande importância, uma vez que constitui a base dos mecanismos de resistência à corrosão dos aços inoxidáveis. A capa passiva, fortemente unida ao substrato metálico, impede ou dificulta o contacto entre a liga em causa e os agentes mais ou menos agressivos do meio ambiente.

Quando o material vai ser utilizado em condições específicas, em presença de ambientes ou soluções corrosivas, o conhecimento prévio do seu comportamento perante essas situações torna-se fundamental, para que o projetista possa garantir a segurança e a durabilidade do equipamento.

Considerando que o material, em determinadas aplicações, poderá estar enterrado e na proximidade de ambientes corrosivos, entendeu-se por pertinente estudar a resistência à corrosão. Para tal, foi seguida a Norma ISO 3651-2 que indica a metodologia de ensaio.

3.3.5.1 Caracterização do equipamento utilizado nos ensaios de corrosão

Numa primeira fase as amostras estiveram numa solução fervente durante 24 horas, depois de retiradas e convenientemente lavadas, sofreram um processo de dobragem a 90° para posteriormente serem observadas à lupa, com o intuito de verificar se existem fissuras na zona de dobragem.

Todo o processo, exceto a visualização à lupa que foi feito no DEM do ISEP, foi realizado nas instalações de empresa metalomecânica ARSOPI, S.A., que gentilmente cedeu o equipamento e a ajuda de pessoal competente para a realização do ensaio.

Na figura 62 poderá observar-se as amostras dentro dos balões de Herlenmeyer na solução adequada, pois, tratando-se de tipos diferentes de aços inoxidáveis duplex, tornou-se necessária a utilização de soluções igualmente distintas.

Após o estágio de 24 horas nas soluções atrás referidas, as amostras foram sujeitas a uma dobragem a 90°, utilizando para o efeito uma quinadora. Na figura 63, poderá visualizar-se a quinadora onde as amostras foram dobradas com a inclinação na norma atrás referida. Esta quinagem visa essencialmente proceder a um estiramento de uma das superfícies da chapa (lado exterior da quinagem), facilitando o acesso, através de lupa metalográfica ou microscópio óptico a uma eventual corrosão intergranular que possa ter ocorrido.



Figura 61 - Amostras na solução fervente



Figura 62 – Quinadora utilizada na dobragem das amostras que sofreram ensaio de corrosão

Seguidamente, as amostras foram observadas na lupa metalográfica representada na figura 64, tendo as observações sido efectuadas no laboratório de Metalografia do DEM do ISEP.

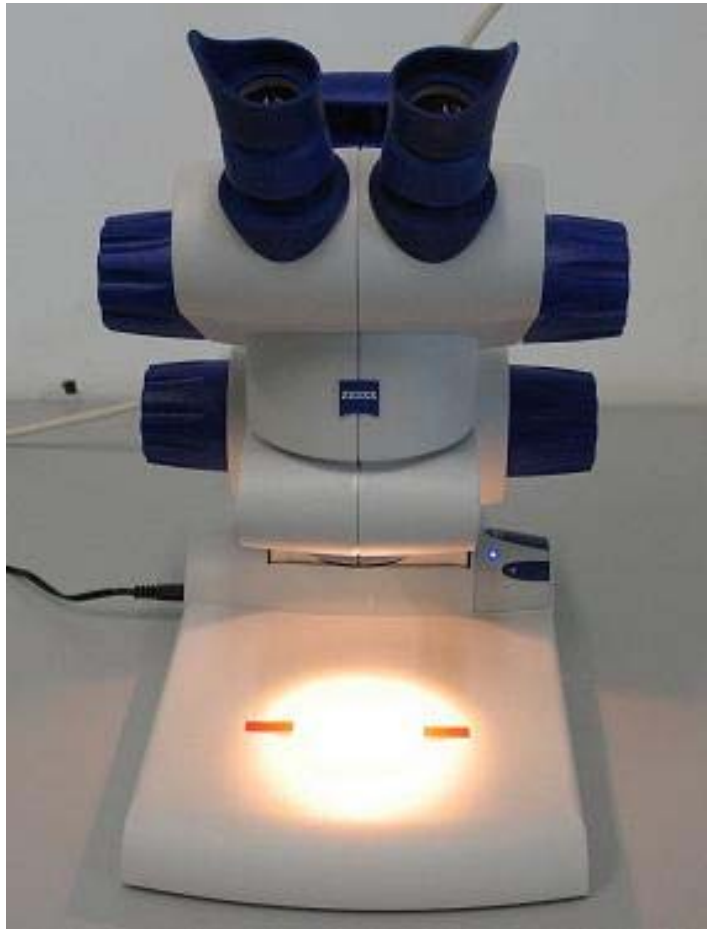


Figura 63 - Lupa metalográfica ZEISS instalada no LMet do DEM/ISEP

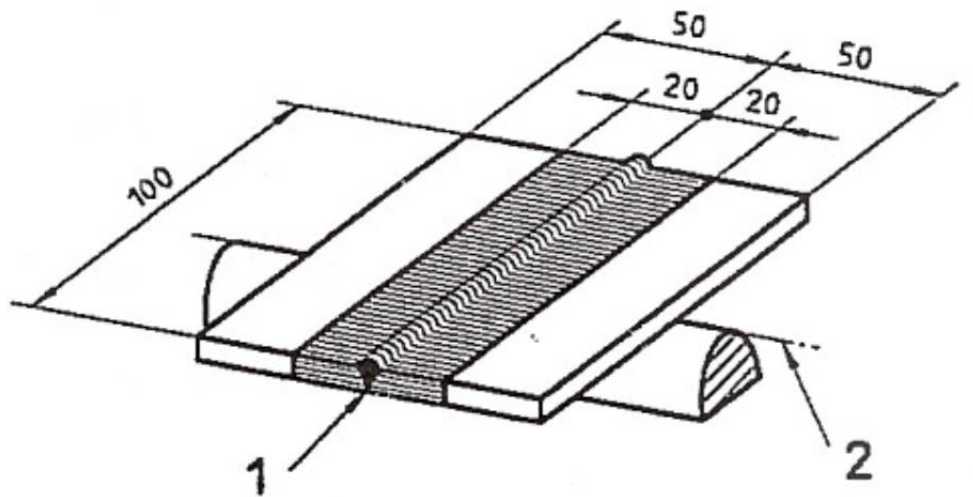
3.3.5.2 Metodologia seguida nos ensaios de resistência à corrosão

Todo o procedimento de ensaio foi conduzido segundo as indicações da norma ISO 3651-2.

Numa primeira fase foram cortadas amostras com as dimensões de 100mm x 50mm x 6mm.

Sendo este tipo de material usado frequentemente em aplicações sujeitas a soldadura, optou-se por sensibilizar as amostras através de soldadura. Assim, as amostras foram soldadas duas a duas para posteriormente serem cortadas.

Tendo em atenção a composição química do material em estudo, foram executadas as duas metodologias de ensaio indicadas na norma: a metodologia A para o aço inoxidável duplex LDX 2101 e a metodologia B para os aços inoxidáveis duplex SAF 2507 e SAF 2205.



**Figura 64 - Aspecto da amostra do ensaio à corrosão segundo a norma ISO3561-2
(1 – Cordão de Soldadura, 2 – Eixo de Dobragem)**

A solução utilizada para concretizar o ensaio segundo a metodologia A tinha a seguinte composição:

- 100g de pentasulfato de cobre hidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$);
- 700ml de água destilada;
- 100ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4),
- Adição de água destilada até perfazer os 1000ml;
- Base de cobre: pelo menos 50g/l de solução.

O volume da solução deve garantir pelo menos $8\text{ml}/\text{cm}^2$ de área da amostra.

A solução utilizada para levar a cabo a metodologia B tinha a composição seguinte:

- 250ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4);
- 750ml de água destilada,
- 110g de pentasulfato de cobre hidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)- que foi dissolvido na solução anterior já quente;
- base de cobre com pelo menos 50g/l de solução.

O volume da solução deve garantir pelo menos $10\text{ml}/\text{cm}^2$ de área da amostra imersa. Em cada ensaio podem estar mais do que uma amostra, desde que não exista contacto entre elas.

As amostras foram colocadas na solução em frio. Deu-se início à contagem do tempo a partir do momento em que a solução começou a ferver homogeneamente e assim ficou durante 24 horas. Ao fim do tempo referido na norma, as amostras foram retiradas convenientemente lavadas e dobradas.



Figura 65 - Amostras a serem retiradas da solução fervente ao fim de 24h



Figura 66 - Dobragem das amostras que sofreram ensaio à corrosão

Na figura 68 pode observar-se uma das amostras pronta para ser observada à lupa.



Figura 67 - Aspeto final da amostra que sofreu ensaio à corrosão

3.3.5.3 Resultados dos ensaios de resistência à corrosão

Após realização das dobragens, as amostras foram observadas na zona externa da dobragem, onde a solicitação (tracção) foi mais intensa. O objectivo passava por encontrar vestígios de fissuras com corrosão intergranular que pudesse ser visível com este tipo de ampliação. Após observação de todas as amostras utilizadas nestes ensaios, verificou-se que não existiam quaisquer vestígios de corrosão, como se pode constatar pela análise das figuras 69, 70 e 71.

3.3.5.4 Análise crítica dos resultados relativos aos ensaios de resistência à corrosão

Pelos resultados obtidos e registados nas figuras 69, 70 e 71, poderá verificar-se que a resistência à corrosão, testada através de método, é altíssima, não deixando quaisquer vestígios de corrosão em qualquer uma das amostras, quando observada a parte imersa e depois traccionada através do ensaio de dobragem a 90°.

Poderá assim afirmar-se que, nestas condições, qualquer um dos materiais em análise apresenta uma elevada resistência à corrosão.

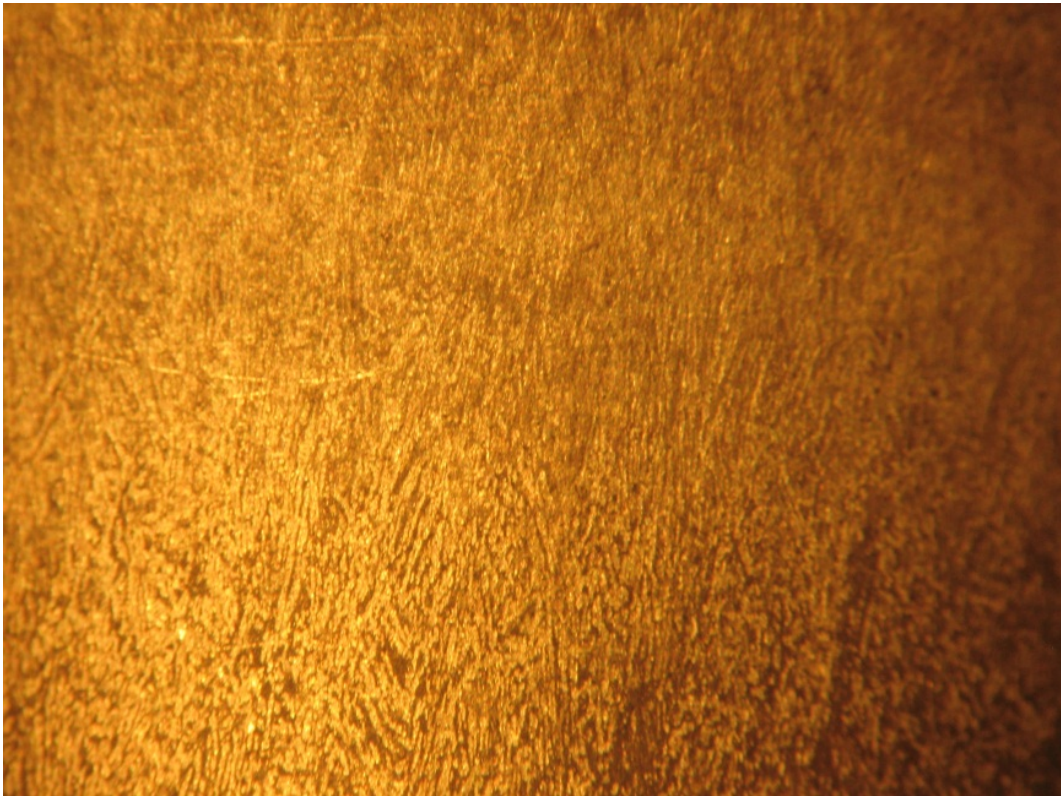


Figura 68 - Aspeto da dobra do aço inoxidável duplex LDX 2101, após sofrer ensaio à corrosão

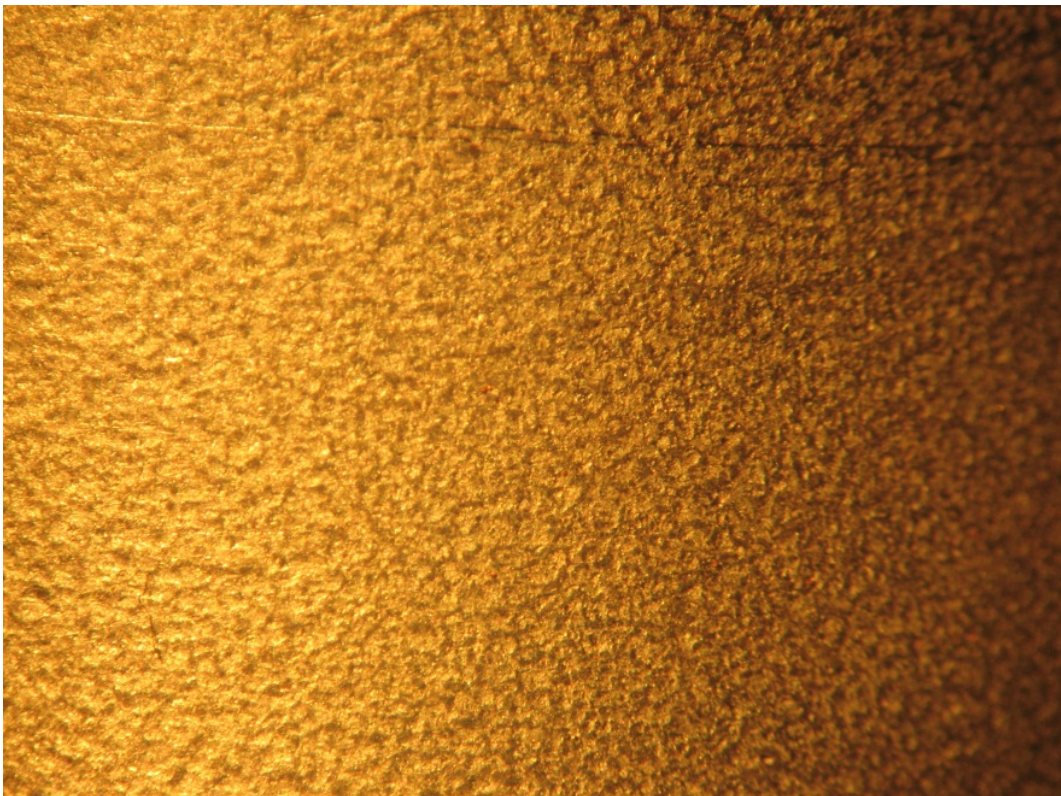


Figura 69 - Aspeto da dobra do aço inoxidável duplex SAF 2205, após sofrer ensaio à corrosão

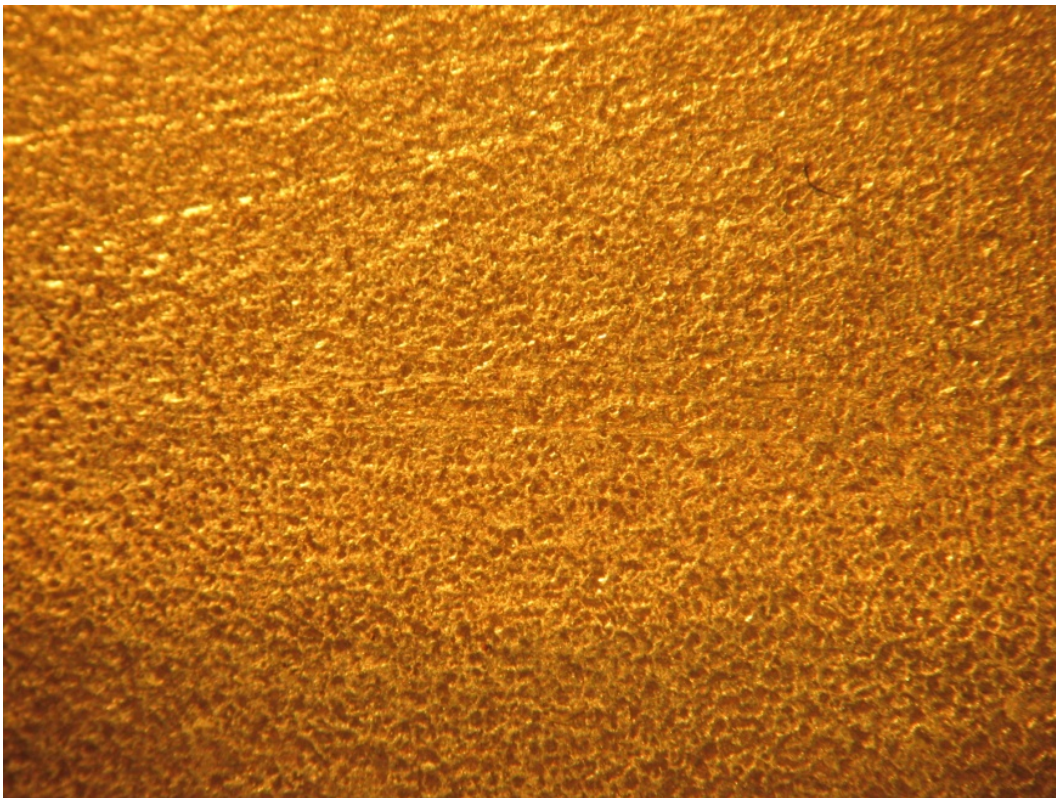


Figura 70 - Aspeto da dobra do Aço inoxidável duplex SAF 2507, após sofrer ensaio à corrosão

3.3.6 Caracterização do desgaste por micro-abrasão dos aços inoxidáveis Duplex

O conhecimento do desgaste que qualquer material possa ter em determinadas condições de trabalho, é de extrema importância sob o ponto de vista prático, na medida em que essa informação permite ao projetista fazer o seu trabalho, garantindo a segurança de todos os envolvidos, assim como, diminuir os custos de manutenção associados ao desgaste das peças que, estando em contacto, possuem movimento relativo entre si.

A tribologia é a ciência que estuda a interação entre superfícies em movimento relativo e os problemas relacionados com esse movimento, nomeadamente a fricção, o desgaste e a lubrificação. O desgaste é a maior causa da perda de rendimento mecânico dos materiais. A maioria das máquinas diminui a sua eficácia, bem como a sua fiabilidade devido a esse factor.

3.3.6.1 Caracterização do equipamento utilizado nos ensaios de micro-abrasão

Para se analisar a resistência ao desgaste dos materiais em estudo, foi utilizado um tribómetro baseado no princípio de micro-abrasão por esfera rotativa.

O equipamento tem a referência TE 66 MICRO-SCALE ABRASION TESTER e foi fabricado pela firma PLINT & PARTNERS (UK), sob licença. Na figura 72 pode ser observada uma imagem do aspeto geral deste equipamento que está instalado no laboratório do CETRIB, na FEUP.



Figura 71 - Tribómetro de micro-abrasão por esfera rotativa da marca PLINT, modelo TE 66

Foi ainda utilizado um agitador magnético de partículas, com vista a homogeneizar a solução constituída pela água destilada e pelas partículas abrasivas de Carboneto de Silício.

A observação e medição das crateras de desgaste foi efetuada nas instalações da ESEIG, utilizando um microscópio ótico marca OLYMPUS, modelo BX51M, provido de uma câmara fotográfica OLYMPUS DP-70 de 12.5 megapixéis e de uma ferramenta informática de análise e registo de imagem ANALYSIS DOC. Esse equipamento poderá ser observado na figura 73.



Figura 72 - Microscópio Óptico Olympus BX51M

3.3.6.2 Metodologia seguida nos ensaios de micro-abrasão

Os ensaios foram realizados seguindo as indicações da norma BS EN 1071-6:2007, sendo estabelecidos os seguintes parâmetros para o efeito:

- Concentração abrasiva: 6.4g de diamante em pó ($3\mu\text{m}$) para 100ml de água destilada;
- Amostras com dimensões: $30\text{mm} \times 20\text{mm} \times 3\text{mm}$, que sofreram um leve polimento, para uma melhor definição dos bordos das crateras do desgaste;
- Material e dimensões da esfera rotativa: aço AISI 52100 com 25mm de diâmetro;
- Velocidade de rotação da esfera: 80rpm;
- Força normal nominal: 0.2N;
- Níveis de duração estipulados para os ensaios: 100, 200, 400, 800 e 1500 ciclos.

Em cada amostra foram efectuados três ensaios, para cada duração de ensaio estipulado, com vista a estabelecer a média e a analisar possíveis variações.

Com o objectivo de melhorar o transporte das partículas abrasivas pela esfera, a mesma foi atacada em Nital (4%) durante 30 segundos, por forma a retirar-lhe o polimento característico das esferas compradas no mercado.

A função do tribómetro é provocar um desgaste por abrasão acelerado na amostra, com o auxílio da solução constituída por água e pó abrasivo, estudando posteriormente a cratera de desgaste deixada na amostra.

Neste equipamento, a esfera é submetida a um movimento de rotação exercido pelo veio motor, girando solidariamente com este a uma velocidade previamente regulada no controlador. O movimento promove o arrastamento das partículas abrasivas da solução, que vão sendo introduzidas no contacto com o auxílio de uma bomba, caindo gota a gota sobre o contacto.

O contacto entre a esfera e a superfície plana da amostra é do tipo não-conforme.

A pressão de contacto entre a esfera e a superfície da amostra foi regulada em 0.2N, através da colocação de uma massa num suporte suspenso de um braço apropriado.

Na realização dos ensaios, foram tidas em consideração algumas práticas, no sentido de minimizar possíveis fatores que influíssem na repetibilidade dos ensaios. Assim foram adotados os seguintes procedimentos:

- No final de cada ensaio, a esfera utilizada foi reposicionada, por forma a que o trilho correspondente ao ensaio anterior não fosse novamente utilizado;
- O fluxo de partículas abrasivas foi cuidadosamente monitorizado, sendo sistematicamente analisado o funcionamento da bomba, agitador e tubagem de alimentação;
- A velocidade de rotação da esfera foi monitorizada e ajustada periodicamente.

Em alguns ensaios, verificaram-se alguns problemas de fluxo das partículas abrasivas, assim como problemas do movimento do motor para o suporte oposto, originando diferenças na velocidade do tribómetro. Estes problemas ocorreram apenas no início do procedimento e ficaram a dever-se à falta de experiência e prática na operação do sistema. A limpeza dos tubos mostrou ser um fator importante no fim de cada sessão de trabalhos. Sempre que se registaram problemas de alguma natureza, os ensaios foram considerados nulos.

Após a realização dos ensaios, as amostras foram cuidadosamente observadas ao microscópio óptico, sendo possível medir os diâmetros das crateras, relativos aos vários ensaios efetuados.



Figura 73 - Aspecto de ensaio de micro-abrasão

3.3.6.3 Resultados dos ensaios de micro-abrasão

A tabela 6 ilustra os resultados obtidos na medição das diferentes crateras realizadas.

Tabela 6 - Resultado médio do diâmetro das crateras deixada sobre as amostras, após a realização dos ensaios de micro-abrasão

Material	N.º de Ciclos	Diâmetro das Crateras (μm)			Média (μm)
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	
SAF 2507	100	769.43	800.52	830.52	800.16
	200	880.83	844.56	891.19	872.19
	400	1018.13	979.27	927.16	974.85
	800	1000	1090.67	1075.13	1055.27
	1500	1033.68	1113.99	1202.07	1116.58
SAF 2205	100	782.38	746.11	772.02	766.84
	200	867.88	784.97	886.01	846.29
	400	896.37	987.05	919.69	934.37
	800	683.94	826.42	1051.81	854.06
	1500	917.1	937.82	1126.94	993.95
LDX 2101	100	870.47	813.47	829.02	837.65
	200	914.51	748.7	642.46	768.57
	400	963.73	958.55	904.15	942.14
	800	1051.81	924.87	945.6	974.10
	1500	1085.49	917.1	1106.22	1036.27

Tabela 7 - Resultado dos ensaios de micro-abrasão no aço SAF 2507

Aço	b [μm]	h [μm]	V [μm^3]	N [N]	Z [rot]	S [mm]	k _c [mm^2/N]
SAF2507	769,43	5,92	1376373,66	0,2	100	7853,98	8,76E-07
	880,83	7,76	2363895,55	0,2	200	15707,96	7,52E-07
	1018,13	10,37	4219615,02	0,2	400	31415,93	6,72E-07
	1000,00	10,00	3926990,88	0,2	800	62831,85	3,13E-07
	1033,68	10,68	4483367,57	0,2	1500	117809,72	1,90E-07
	800,52	6,41	1612681,63	0,2	100	7853,98	1,03E-06
	844,56	7,13	1997937,63	0,2	200	15707,96	6,36E-07
	979,27	9,59	3611350,93	0,2	400	31415,93	5,75E-07
	1090,67	11,90	5556909,99	0,2	800	62831,85	4,42E-07
	1113,99	12,41	6047627,89	0,2	1500	117809,72	2,57E-07
	830,52	6,90	1868358,76	0,2	100	7853,98	1,19E-06
	891,19	7,94	2477086,15	0,2	200	15707,96	7,88E-07
	927,16	8,60	2901874,59	0,2	400	31415,93	4,62E-07
	1075,13	11,56	5246912,40	0,2	800	62831,85	4,18E-07
1202,07	14,45	8199340,59	0,2	1500	117809,72	3,48E-07	

Tabela 8 - Resultado dos ensaios de micro-abrasão no aço SAF 2205

Amostra	b [μm]	h [μm]	V [μm^3]	N [N]	Z [rot]	S [mm]	k [mm^2/N]
SAF 2205	782,38	6,12	1471400,34	0,2	100	7853,98	9,37E-07
	867,88	7,53	2227914,98	0,2	200	15707,96	7,09E-07
	896,37	8,03	2535182,01	0,2	400	31415,93	4,03E-07
	683,94	4,68	859274,47	0,2	800	62831,85	6,84E-08
	917,10	8,41	2777964,34	0,2	1500	117809,72	1,18E-07
	746,11	5,57	1216946,08	0,2	100	7853,98	7,75E-07
	784,97	6,16	1490981,07	0,2	200	15707,96	4,75E-07
	987,05	9,74	3727490,14	0,2	400	31415,93	5,93E-07
	826,42	6,83	1831737,21	0,2	800	62831,85	1,46E-07
	937,82	8,80	3037650,84	0,2	1500	117809,72	1,29E-07
	772,02	5,96	1394999,65	0,2	100	7853,98	8,88E-07
	886,01	7,85	2419994,54	0,2	200	15707,96	7,70E-07
	919,69	8,46	2809478,74	0,2	400	31415,93	4,47E-07
	1051,81	11,06	4806280,07	0,2	800	62831,85	3,82E-07
1126,94	12,70	6333781,38	0,2	1500	117809,72	2,69E-07	

Tabela 9 - Resultado dos ensaios de micro-abrasão no aço LDX 2101

Aço	b [μm]	h [μm]	V [μm^3]	N [N]	Z [rot]	S [mm]	k _c [mm^2/N]
LDX 2101	870,47	7,58	2254629,19	0,2	100	7853,98	1,44E-06
	914,51	8,36	2746715,81	0,2	200	15707,96	8,74E-07
	963,73	9,29	3387516,39	0,2	400	31415,93	5,39E-07
	1051,81	11,06	4806280,07	0,2	800	62831,85	3,82E-07
	1085,49	11,78	5452092,30	0,2	1500	117809,72	2,31E-07
	813,47	6,62	1719594,54	0,2	100	7853,98	1,09E-06
	748,70	5,61	1233931,99	0,2	200	15707,96	3,93E-07
	958,55	9,19	3315270,57	0,2	400	31415,93	5,28E-07
	924,87	8,55	2873311,18	0,2	800	62831,85	2,29E-07
	917,10	8,41	2777964,34	0,2	1500	117809,72	1,18E-07
	829,02	6,87	1854897,53	0,2	100	7853,98	1,18E-06
	642,49	4,13	669152,93	0,2	200	15707,96	2,13E-07
	904,15	8,17	2624350,51	0,2	400	31415,93	4,18E-07
	945,60	8,94	3139711,52	0,2	800	62831,85	2,50E-07
1106,22	12,24	5880657,91	0,2	1500	117809,72	2,50E-07	

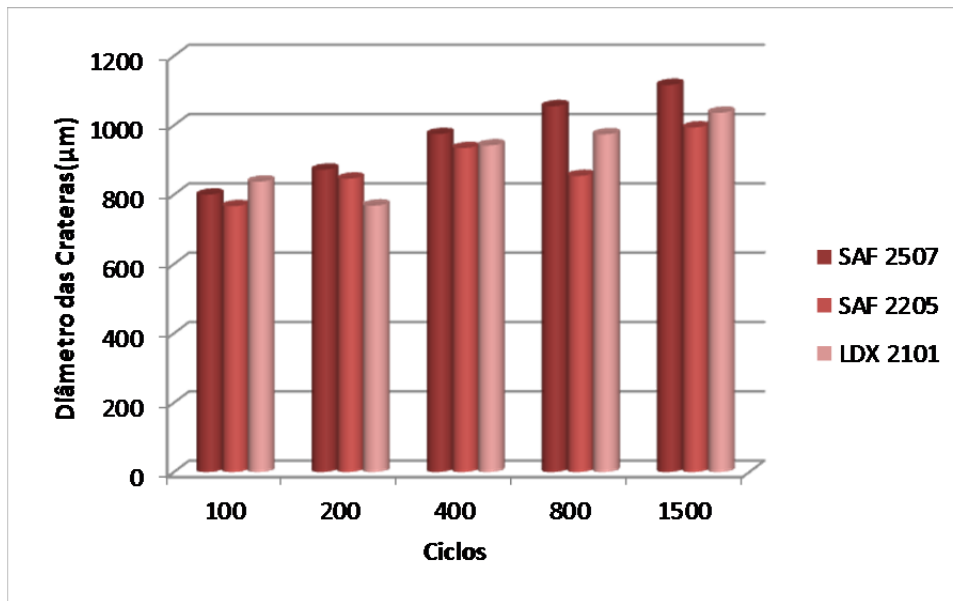


Figura 74 - Diâmetro das crateras dos três tipos de aços inoxidáveis Duplex

3.3.6.4 Análise crítica dos resultados

Conforme se poderá observar a partir da análise das tabelas 6, 7, 8 e 9, o comportamento dos aços é muito idêntico, o que está ainda em concordância com a relativa proximidade, em termos de dureza, que foi anunciada num capítulo anterior. No entanto, e apesar de ser bastante ténue a diferença, verifica-se que existe alguma incoerência no comportamento, ou seja, o aço que apresenta uma dureza ligeiramente maior – SAF 2507 -, é aquele que apresenta um comportamento ao desgaste mais fraco, embora as diferenças sejam muito moderadas. De facto, uma maior presença de crómio na liga, deveria contribuir para um acréscimo da dureza e da resistência ao desgaste. Se a primeira condição se verifica, a segunda já não, verificando-se pelo gráfico da figura 75 que, para qualquer número de ciclos do ensaio de micro-abrasão acima de 100, o aço SAF 2507 é aquele que apresenta pior comportamento. Por outro lado, o aço SAF 2205, com um menor teor de crómio (menos cerca de 5% na liga), apresenta o melhor comportamento ao desgaste em 80% das situações testadas.

Com base nestes resultados, e limitando a selecção aos aços testados neste trabalho, o aço inoxidável duplex SAF 2205 parece ser aquele que apresenta melhores condições para poder ser aplicado em situações onde o desgaste possa ser um factor a ter em linha de conta na selecção do material a utilizar.

O resultado da medição do diâmetro das crateras, quando transposto para os valores do coeficiente de desgaste através das expressões (6) e (7), permite constatar igualmente que o aço SAF 2507 é aquele que patenteia, em geral, os valores mais elevados do coeficiente de desgaste, em qualquer uma das situações de ensaio.

Atendendo à agressividade destes ensaios, patenteada pela elevada dureza das partículas de Diamante e pela sua geometria (ver figura 76), poderá afirmar-se que estes aços apresentam uma elevada resistência ao desgaste (inversamente proporcional ao coeficiente de desgaste), podendo ser aplicados em situações onde se verifique abrasão não muito severa.

De notar que a utilização de polímeros técnicos cada vez mais elaborados na injeção de plásticos, leva à produção de gases corrosivos, que têm provocado inúmeros problemas de corrosão nos moldes, passando os aços inoxidáveis duplex a ser uma alternativa viável.

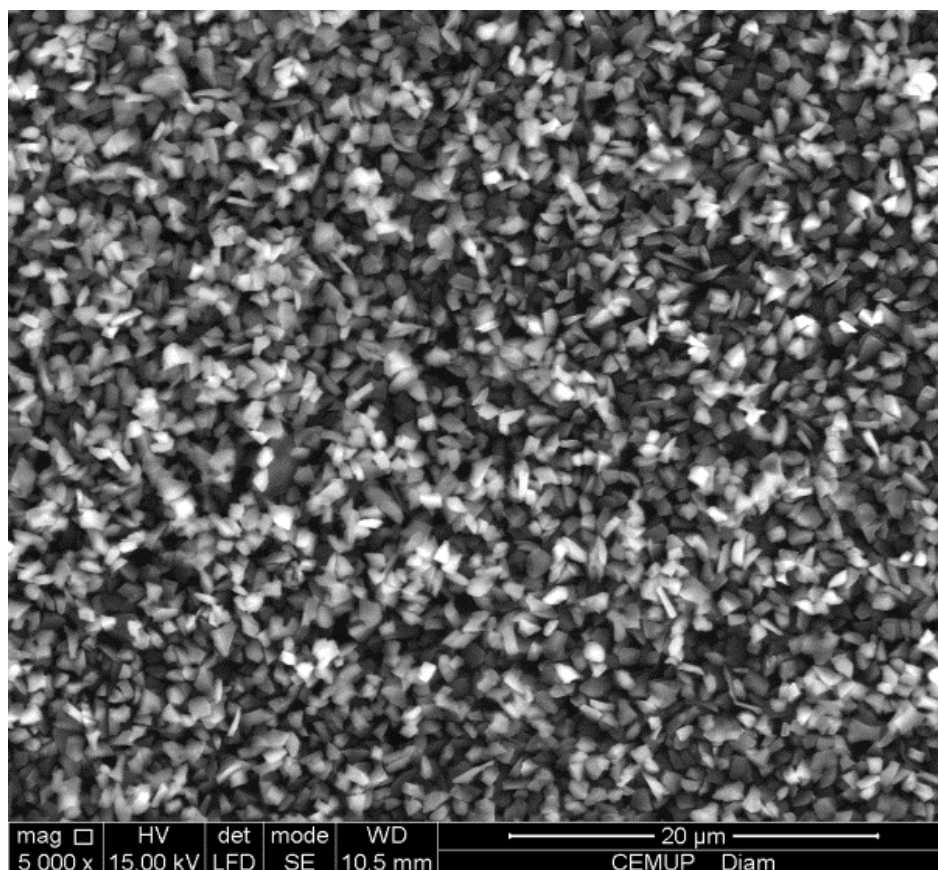


Figura 75 - Aspeto das partículas de Diamante (3µm) utilizadas nos ensaios de micro-abrasão

Como alguns desses polímeros são injectados com reforços curtos de fibra de vidro, a abrasão provocada por estes reforços requer cuidados especiais nos materiais aplicados no molde, não só em termos de resistência à corrosão, mas também em termos de resistência à abrasão.

3.3.7 Ensaios em Geotecnia

Tendo como principal objetivo avaliar o comportamento dos três tipos de aços inoxidáveis duplex em estudo relativamente à corrosão, quando enterrados em solos diferentes e em condições adversas, efetuou-se a experiência que a seguir se retrata.

Na falta de normas que estabeleçam os procedimentos a seguir para o efeito pretendido, a experiência foi idealizada pelos orientadores deste trabalho.

3.3.7.1 Metodologia do ensaio

Previamente ao estabelecimento dos procedimentos experimentais, tomou-se em consideração a existência de 3 tipos diferentes de aços inoxidáveis duplex cuja análise comparativa em termos de comportamento evolutivo relativamente à corrosão presidiu ao estabelecimento dos critérios que estiveram na base do desenho da parte experimental. Nesse sentido, decidiu-se que todos os 3 tipos de aço deveriam ser sujeitos a idênticas condições, o que, como se verificará adiante, se traduziu na necessidade de utilização de 72 amostras (figura 77).

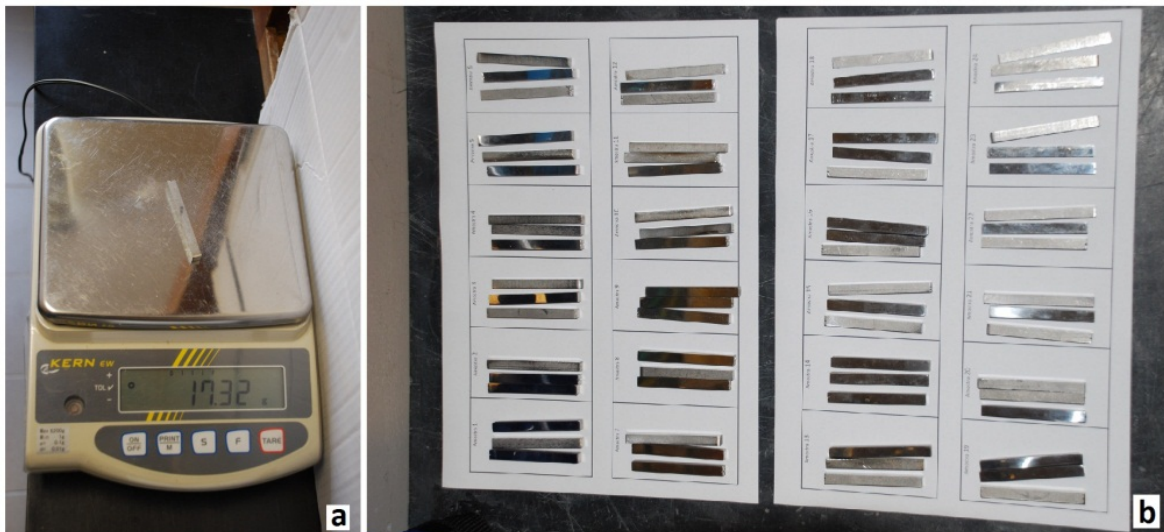


Figura 76 - Aspectos da preparação das amostras: a) pesagem, b) organização

Cada amostra de aço inoxidável duplex tinha as seguintes dimensões: $60\text{mm} \times 5\text{mm} \times 5\text{mm}$

Como base de partida optou-se por seleccionar dois tipos de solo, cujas características fossem significativamente distintas. Assim, os solos escolhidos foram rotulados como solo1: solo vegetal, rico em matéria orgânica e solo2: solo arenoso, pobre em matéria orgânica (figura 78).



Figura 77 - Os dois tipos de solo testados, antes da junção de qualquer aditivo. a) *solo1*; b) *solo2*

Para cada um dos 3 tipos de aços inoxidáveis duplex e para cada um dos 2 tipos de solo, foram estabelecidos 24 diferentes ambientes, sendo que em qualquer deles se decidiu manter a saturação permanente do solo. Os 3 cenários de partida foram:

- a) Provetes completamente enterrados em solo saturado;
- b) Provetes parcialmente enterrados solo em saturado;
- c) Provetes totalmente enterrados em solo, alternando saturação a cada 7 dias.

Os princípios que presidiram ao estabelecimento destes 3 distintos ambientes foram os de aproximar cada um deles a um tipo potencial de situação real. No caso “c” pretendeu-se simular variações de marés e/ou caudais e níveis freáticos.

Assim, em cada um destes 3 ambientes, e para cada tipo de solo, colocou-se outros tantos provetes, o que fez inicialmente 18 provetes.

Seguidamente, decidiu-se fazer variar alguns parâmetros de forma equivalente para ambos os tipos de solo e em cada um dos 3 ambientes referidos anteriormente. Começou-se por aumentar a salinidade através da adição de Cloreto de Sódio (NaCl). Posteriormente, enquanto numas amostras se aumentou a acidez, através da adição de enxofre moído (S), noutras aumentou-se a alcalinidade, por via da adição de óxido de cálcio (CaO), vulgarmente conhecido por cal viva.

No final, a parte experimental ficou montada com 24 diferentes amostras de par ambiente/tipo de solo (figura 79), sendo que em cada uma delas se enterrou 3 distintos tipos de aço inoxidável duplex, o que se traduziu num total de 72 provetes.

No contexto em que foi montada a parte experimental, em instalações do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do ISEP (LGMC|ISEP), num gabinete anexo ao laboratório, assumiu-se que não seria possível fazer o controlo nem mesmo a monitorização da temperatura ambiente.



Figura 78 - Os 24 diferentes pares *ambiente/tipo de solo*, com 3 tipos de aço em cada par

No que respeita à saturação das amostras, ela foi garantida diariamente, através de rega, sempre que a inspeção visual apontava nesse sentido.

A alternância de ambiente saturado/não saturado das amostras enterradas nos copos 17 a 24 (tabuleiro da direita na figura 79) foi conseguida da seguinte forma: existia um copo exterior e um interior, este último contendo o solo e furado na base (com uma rede no fundo, para impedir a saída de solo), e que a cada 7 dias era alternadamente emerso e imerso. A operação de emersão consistia em elevar o copo interior e colocá-lo a escorrer numa rede metálica suspensa sobre o copo exterior (figura 80), assim permanecendo durante 7 dias, após o que seria retirada a rede e o copo interior novamente imerso no copo exterior (cenário c).



Figura 79- Aspecto do processo de emersão

3.3.7.2. Ensaio de caracterização dos solos

Para caracterização, quer dos solos (solo1 e solo2) que serviram como base à experiência, quer de cada uma das amostras após preparação, foram previamente realizados ensaios com vista à quantificação de parâmetros que se considerou serem propiciadores do processo de corrosão.

3.3.7.2.1. Análise granulométrica dos solos

A composição granulométrica de um solo é a distribuição de percentagem ponderal (isto é: em percentagem do peso total) das partículas do solo de acordo com as suas dimensões (Fernandes, 1994). A análise granulométrica (figura 81) foi realizada apenas nas amostras iniciais (solo1 e solo2), seguindo-se os procedimentos estabelecidos pela Especificação LNEC – E 239-1970, referentes ao ensaio por peneiração húmida.

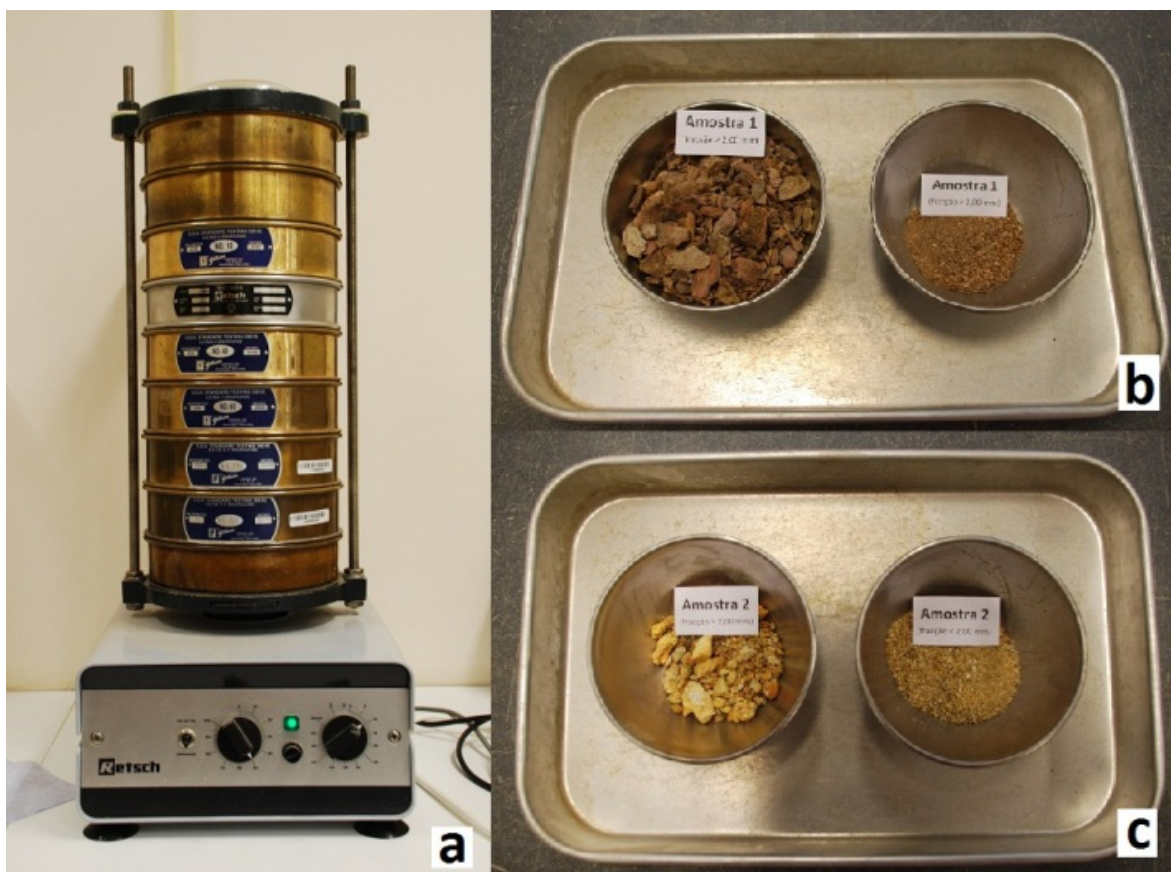


Figura 80 - Aspectos relativos ao ensaio granulométrico: a) peneiração; b) *solo1* (fracções > 2.00 mm e < 2.00 mm, respectivamente, após lavagem); c) *solo2* (fracções > 2mm e < 2mm, respectivamente, após lavagem)

O objectivo é o de determinar quantitativamente a distribuição por tamanhos das partículas de um solo retido no peneiro de 0.074 mm (nº 200 – ASTM (American Society for Testing and Materials)) e a percentagem de material passado nesse peneiro. Foi utilizada uma série de peneiros ASTM, de malha quadrada, com as seguintes aberturas: 76.10 mm, 50.80 mm, 38.10 mm, 25.40 mm, 19.00 mm, 9.51 mm, 4.76 mm (nº 4), 2.00 mm (nº 10), 0.841 mm (nº 20), 0.420 mm (nº 60), 0.105 mm (nº 140) e 0.074 mm (nº 200).

Os procedimentos consistem no cumprimento ordenado de um conjunto de tarefas detalhadas em seguida:

- Recolha da amostra;
- Espalhamento do solo, para arejamento e secagem;
- Desagregação dos torrões e esquartelamos até se obter a massa necessária para o provete de ensaio;
- Passagem do provete pelo peneiro de 2.00 mm (nº 10);
- Nova desagregação do material retido no peneiro 2.00 mm com o almofariz e o pilão e nova a passagem no peneiro 2.00 mm;
- O material que ficou retido nesta segunda peneiração lava-se e é colocado na estufa para secagem (105°C a 110°C);
- O material passado na primeira peneiração é igualmente levado à estufa para secagem;
- Após seco procede-se a um novo esquartelamento até se obter aproximadamente 100g de material;
- Essa quantidade de material é colocada num copo de precipitação com 250cm³ de água onde já tinham sido dissolvidos previamente 5g de hexametáfosfato de sódio;
- Mexe-se bem com uma vareta de vidro e deixa-se repousar durante 1 hora;
- O que estava no copo de precipitação coloca-se no peneiro 2.00 mm e lava-se a amostra (o que passou no peneiro é desprezado);
- Depois de lavada a amostra coloca-se num tabuleiro e vai à estufa para secagem (105°C a 110°C);
- Retira-se as amostras da estufa (finos e grossos) e procede-se à análise granulométrica destes;

- A análise granulométrica dos finos consiste em passá-los nos peneiros abaixo de 2.00mm, enquanto a análise granulométrica dos grossos consiste em passá-los nos peneiros acima de 2.00 mm;
- Em ambas as análises granulométricas, procede-se às pesagens das fracções retidas em cada peneiro.

Nas figuras 82 e 83, são apresentadas as curvas granulométricas obtidas, sendo que uma análise mais detalhada pode ser consultada nos anexos do presente documento.

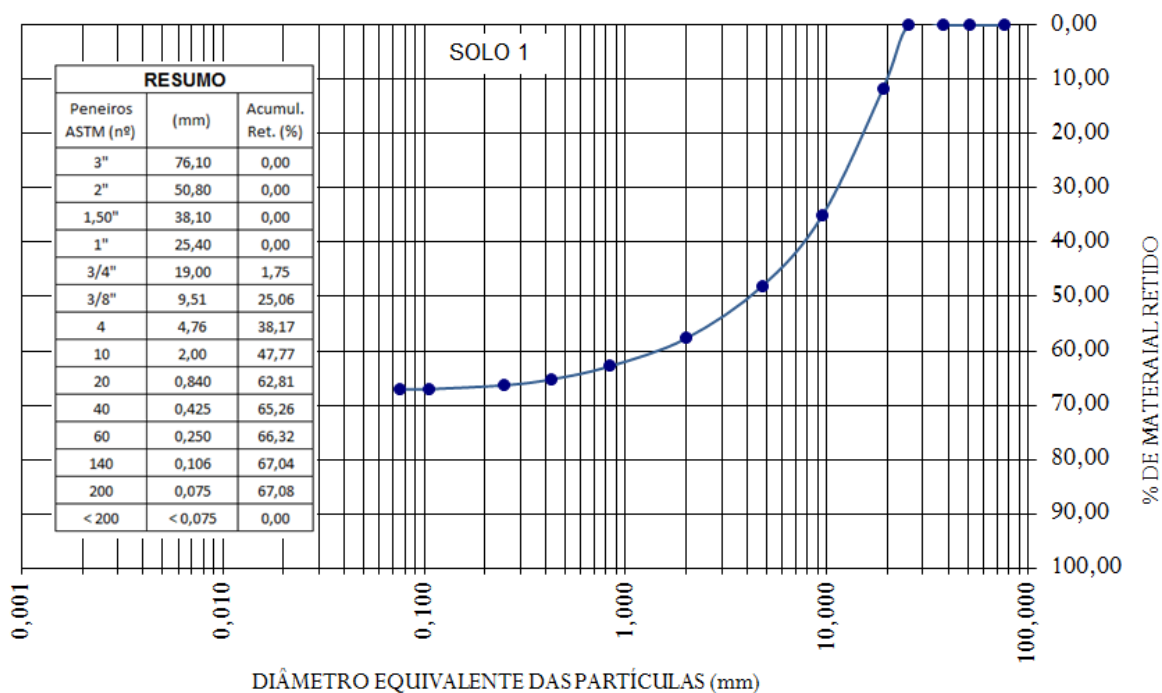


Figura 81 - Curva granulométrica correspondente ao Solo 1

3.3.7.2.2. Avaliação do teor de matéria orgânica nos solos

A determinação da matéria orgânica (totalidade de materiais orgânicos de origem vegetal e animal, quer não decompostos quer total ou parcialmente decompostos) presente num solo, pode ser calculada através da determinação do valor de carbono (%C) presente na matéria orgânica.

Para determinação do valor de carbono foi utilizado um aparelho TOC-Vcsn Shimadzu, que tem a capacidade de leitura do carbono total (TC) e do carbono inorgânico (IC). Para se proceder à determinação do teor de matéria orgânica foi necessário proceder à preparação das amostras, que consiste apenas na pesagem de 50mg de solo numa barqueta de cerâmica.

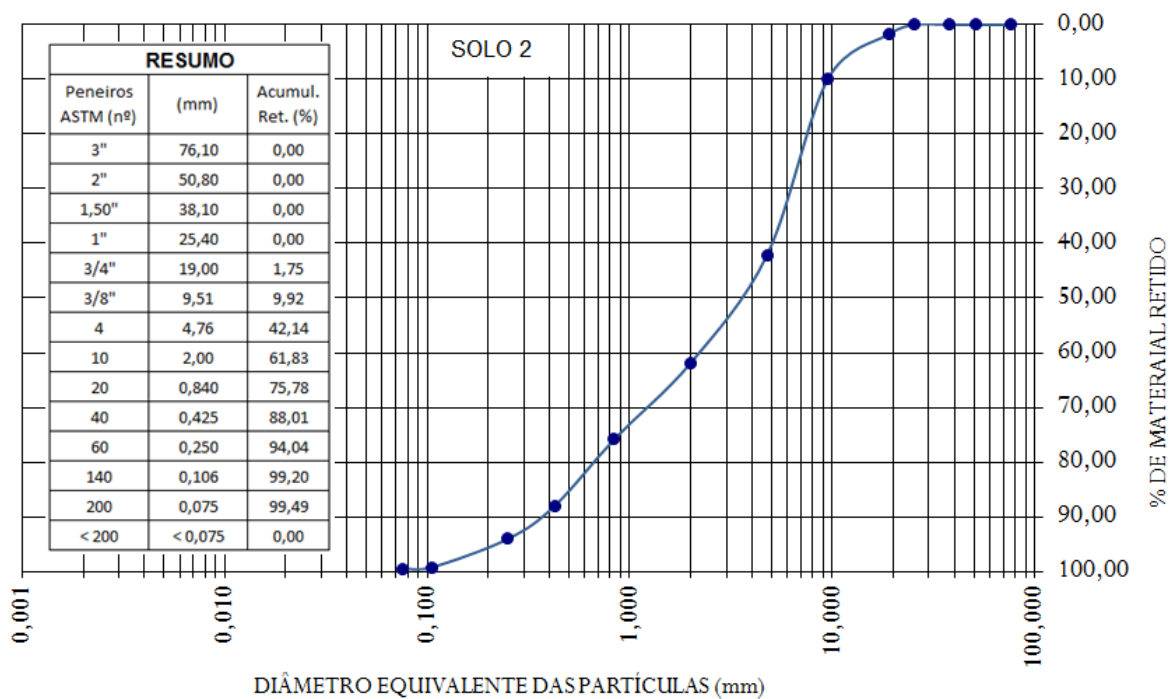


Figura 82 - Curva granulométrica correspondente ao solo 2



Figura 83 - Equipamento TOC-VCSN Shimadzu, com módulo de leitura do lado esquerdo e com os dois módulos de determinação de TC e IC do lado direito.

Seguidamente procede-se à calibração do equipamento, que segue as etapas seguidamente descritas:

- Abertura da garrafa de oxigénio, ajustada para 3.4bar. **Nota:** para se dar início ao teste, a temperatura da parte do equipamento relativamente ao TC tem que atingir os 900°C e para IC deverá atingir os 200°C;
- Calibração da parte do TC, utilizando quatro amostras de glicose ($C_6H_{12}O_6$), que resultaram numa curva linear – indicativo de calibração adequada;
- Calibração da parte do IC, utilizando cinco amostras de bicarbonato de sódio (reacção com 4-5ml de H_3PO_4), que também resultaram numa curva linear.

O equipamento ficou, assim, com as curvas de calibração memorizadas, o que permitiu passar à fase de determinação do carbono total (TC), de acordo com os seguintes passos:

- Abertura da garrafa de oxigénio;
- Confirmação de que a temperatura tenha atingido os 900°C;
- Transferência da amostra da barqueta para o equipamento (TOC), com uma pinça;
- Deslizamento da amostra para o interior do forno do TC;
- Leitura do valor, após aviso sonoro (ao fim de cerca de 5min), e retirada da amostra.

A determinação do carbono inorgânico (IC), segue exactamente os mesmos procedimentos descritos para a determinação do TC, à excepção de que se utiliza a componente do equipamento relativa ao IC.



Figura 84 - Colocação da barqueta cerâmica no TOC-VCSN Shimadzu, para determinação do IC

Tabela 10 - Teor de matéria orgânica dos solos em ensaio

TIPO DE SOLO	Teor de Matéria Orgânica
SOLO 1	16.27
SOLO2	0.13

3.3.7.2.3. Avaliação da Salinidade (condutividade eléctrica)

Esta avaliação, seguiu as indicações de procedimentos dadas pela Canadian Society of Soil Science.

A avaliação do teor de sais solúveis no solo pressupõe uma preparação prévia das amostras e subsequente determinação da condutividade eléctrica. Na preparação das amostras seguiram-se os seguintes passos:

- Calibração dos sensores de flutuação do dispositivo de medição;
- Preparação de copos de vidro de 100ml, previamente limpos com água desionizada;
- Medição de 10ml de amostra de solo, num cilindro graduado de plástico e colocação num copo;
- Adição de 20ml de água desmineralizada e agitação da solução com espátula de aço, durante 30min;
- Repouso da solução, após agitação, durante 60min.

Após o período de repouso, de 60min, a medição da condutividade eléctrica tem que ser efectuada nas 2 horas subsequentes, seguindo-se as seguintes etapas:

- Cuidadoso mergulho do detector no interior do copo contendo a solução de amostra, de modo a que não entre em contacto com a fracção de solo depositada na parte inferior da garrafa;

Nota: o detector de condutividade dispõe de um detector de fluxo, de modo que é necessário evitar qualquer tipo de perturbação física em redor do detector, bem como no frasco.

- Anotação do valor medido, que entretanto deverá aparecer no mostrador;

Após limpeza do detector, com água desmineralizada, repete-se o procedimento para todas as amostras.



Figura 85 - Aspectos relativos à preparação das amostras, para determinação de salinidade e pH.

3.3.7.2.4. Medição do *pH*

A determinação do *pH* nos solos em estudo seguiu um rigoroso protocolo, tendo-se começado pela preparação das amostras, de acordo com a seguinte hierarquização de procedimentos, para cada uma das amostras, seguindo as indicações estipuladas pela Canadian Society of Soil Science:

- Preparação da mistura solo/água desmineralizada, em frascos de vidro graduados, previamente limpos com água desionizada;
- Pesagem de 2g de solo e sua colocação no frasco graduado;
- Medição de 20ml de água desmineralizada e sua adição ao solo previamente pesado;

- Agitação da solução solo/água, com vareta de vidro, durante 30min;
- Repouso da solução, após agitação, durante 60min.

Após a preparação das amostras seguiu-se a determinação do *pH*, de acordo com os seguintes procedimentos:

- Calibração do equipamento, com *pH* 4.01 e 7.01, em solução;
- Ligação do aparelho medidor de *pH* e cuidadoso mergulho do detector no interior do frasco contendo a amostra;
- Pressão do botão de determinação e espera até que o dispositivo de leitura estabilize e forneça o resultado do *pH*.

Na tabela 11 pode observar-se resumidamente, as características dos solos em causa, bem como a distribuição das amostras e as condições em que decorreu a experiência.

Tabela 11 - Quadro resumo com dados dos solos utilizados na experiência

Ensaio		Saturação	Solo		Salinidade			pH				
nº	solo (g)		tipo	teor mat. org.	cond. elect.(mS/cm)	sal (g)	sal (%)	pH	enxofre (g)	%	cal (g)	%
1	500,26	total	1	16,27	51,20	50,00	8,69	4,22	25,01	4,35	-	-
2	500,06	"	"	"	42,00	50,06	8,70	11,90	-	-	25,06	4,36
3	500,5	"	"	"	0,0001453	-	-	4,89	25,01	4,76	-	-
4	500,17	"	"	"	0,0001196	-	-	11,73	-	-	25,02	4,76
5	1000,01	"	2	0,13	51,60	100,00	8,70	5,92	50,00	4,35	-	-
6	500,03	"	"	"	30,40	50,02	8,70	11,77	-	-	25,22	4,38
7	500,02	"	"	"	0,0001374	-	-	7,22	25,00	4,76	-	-
8	500,18	"	"	"	5,45	-	-	11,77	-	-	25,05	4,77
9	500,26	parcial	1	16,27	51,20	50,00	8,69	4,22	25,01	4,35	-	-
10	500,06	"	"	"	42,00	50,06	8,70	11,90	-	-	25,06	4,36
11	500,5	"	"	"	0,0001453	-	-	4,89	25,01	4,76	-	-
12	500,17	"	"	"	0,0001196	-	-	11,73	-	-	25,02	4,76
13	1000,01	"	2	0,13	51,60	100,00	8,70	5,92	50,00	4,35	-	-
14	500,03	"	"	"	30,40	50,02	8,70	11,77	-	-	25,22	4,38
15	500,02	"	"	"	0,0001374	-	-	7,22	25,00	4,76	-	-
16	500,18	"	"	"	5,45	-	-	11,77	-	-	25,05	4,77
17	500,26	alternada	1	16,27	51,20	50,00	8,69	4,22	25,01	4,35	-	-
18	500,06	"	"	"	42,00	50,06	8,70	11,90	-	-	25,06	4,36
19	500,5	"	"	"	0,0001453	-	-	4,89	25,01	4,76	-	-
20	500,17	"	"	"	0,0001196	-	-	11,73	-	-	25,02	4,76
21	1000,01	"	2	0,13	51,60	100,00	8,70	5,92	50,00	4,35	-	-
22	500,03	"	"	"	30,40	50,02	8,70	11,77	-	-	25,22	4,38
23	500,02	"	"	"	0,0001374	-	-	7,22	25,00	4,76	-	-
24	500,18	"	"	"	5,45	-	-	11,77	-	-	25,05	4,77

A experiência teve início a 21 de Novembro de 2011 e deu-se por terminada a 20 de Agosto de 2012.

3.3.7.3. Resultados dos ensaios geotécnicos

Procedeu-se à pesagem das amostras no início e no fim da experiência, sendo os resultados observáveis na tabela 12.

Tabela 12 - Quadro resumo das pesagens efectuadas às amostras antes e após os ensaios

Ensaio		Provetes - antes ensaio (g)			Provetes - após ensaio (g)			Provetes - diferença (g)		
nº	solo (g)	2205	2507	LDX2101	2205	2507	LDX2101	2205	2507	LDX2101
1	500,26	16,60	16,55	16,67	16,63	16,56	16,67	0,03	0,01	0,00
2	500,06	16,51	16,42	16,82	16,53	16,41	16,81	0,02	-0,01	-0,01
3	500,5	16,31	17,20	15,89	16,33	17,20	15,88	0,02	0,00	-0,01
4	500,17	16,74	16,78	16,65	16,77	16,79	16,65	0,03	0,01	0,00
5	1000,01	16,53	17,02	15,90	16,53	17,02	15,88	0,00	0,00	-0,02
6	500,03	16,75	16,47	16,24	16,76	16,45	16,22	0,01	-0,02	-0,02
7	500,02	16,71	17,02	16,53	16,73	17,03	16,53	0,02	0,01	0,00
8	500,18	16,69	17,03	16,62	16,72	17,03	16,62	0,03	0,00	0,00
9	500,26	16,40	16,51	16,40	16,42	16,51	16,35	0,02	0,00	-0,05
10	500,06	16,30	15,89	16,56	16,32	15,88	16,56	0,02	-0,01	0,00
11	500,5	16,55	16,47	16,57	16,58	16,47	16,58	0,03	0,00	0,01
12	500,17	16,21	16,49	16,53	16,24	16,50	16,52	0,03	0,01	-0,01
13	1000,01	16,62	16,78	16,67	16,64	16,79	16,65	0,02	0,01	-0,02
14	500,03	16,55	16,52	16,23	16,59	16,53	16,23	0,04	0,01	0,00
15	500,02	16,70	16,52	16,88	16,69	16,52	16,89	-0,01	0,00	0,01
16	500,18	16,76	16,21	16,47	16,76	16,21	16,47	0,00	0,00	0,00
17	500,26	16,74	17,31	16,29	16,74	17,33	16,29	0,00	0,02	0,00
18	500,06	16,68	17,28	16,19	16,69	17,30	16,20	0,01	0,02	0,01
19	500,5	16,53	17,25	14,85	16,53	17,26	14,84	0,00	0,01	-0,01
20	500,17	16,48	17,22	16,58	16,48	17,23	16,59	0,00	0,01	0,01
21	1000,01	16,65	17,32	16,42	16,65	17,33	16,42	0,00	0,01	0,00
22	500,03	16,59	17,29	16,83	16,59	17,31	16,84	0,00	0,02	0,01
23	500,02	16,59	17,31	16,19	16,60	17,32	16,19	0,01	0,01	0,00
24	500,18	16,27	17,32	16,75	16,27	17,33	16,77	0,00	0,01	0,02

Recorrendo ao microscópio situado nas instalações do ESEIG, em Vila do Conde, as amostras foram fotografadas com uma ampliação de 200x, tendo-se então elaborado os quadros que seguidamente são mostrados, onde se podem visualizar a superfície das amostras, tendo em conta as condições em que se encontravam.

Nos quadros das figuras seguintes são visíveis as superfícies das amostras relativas aos ensaios efectuados, segundo diferentes condições de solo e ambiente, correspondentes aos pares ambiente/tipo de solo anteriormente identificados e mostrados na figura 79.

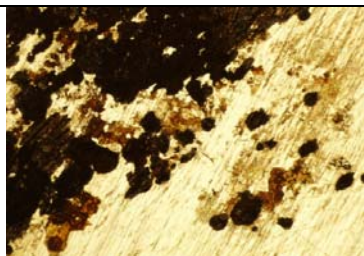
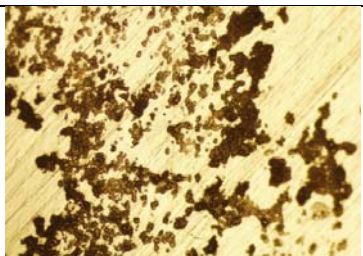

LDX2101	SAF 2507	SAF 2205
Ensaio 1	Ensaio 4	Ensaio 2
		
Corrosão generalizada intensa	Corrosão generalizada média	Vestígios de início de corrosão

Figura 86 - Aspecto das superfícies das amostras totalmente enterradas, do solo 1

LDX2101	SAF 2507	SAF 2205
Ensaio 5	Ensaio 7	Ensaio 6
		
Vestígios iniciais de corrosão	Sem vestígios de corrosão	Corrosão pontual

Figura 87 - Aspecto das superfícies das amostras totalmente enterradas, do solo 2

LDX2101	SAF 2507	SAF 2205
Ensaio 10	Ensaio 11	Ensaio 11
		
Mudança pontual de tonalidade	Vestígios iniciais de corrosão	Sem vestígios de corrosão

Figura 88 - Aspecto das superfícies das amostras enterradas parcialmente, do solo 1


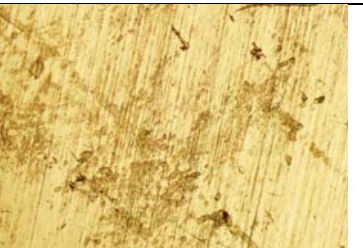

LDX2101	SAF 2507	SAF 2205
Ensaio 15	Ensaio 13	Ensaio 14
		
Sem vestígios de corrosão	Mudança pontual de tonalidade	Sinais concretos de corrosão

Figura 89 - Aspecto das superfícies das amostras enterradas parcialmente, do solo 2

LDX2101	SAF 2507	SAF 2205
Ensaio 17	Ensaio 17	Ensaio 17
		
Mudança pontual de tonalidade	Sem vestígios de corrosão	Vestígios de "Pitting"

Figura 90 - Aspecto das superfícies das amostras enterradas em regime alternado, do solo 1




LDX2101	SAF 2507	SAF 2205
Ensaio 22	Ensaio 22	Ensaio 22
		
Vestígios de "Pitting"	Vestígios de "Pitting"	Vestígios de "Pitting"

Figura 91 - Aspecto das superfícies das amostras enterradas em regime alternado, do solo 2

3.3.7.4. Análise crítica dos resultados

No processo de preparação dos ensaios, as expectativas de se obterem vestígios de corrosão eram bastante baixas. O tempo disponível para manter as amostras soterradas não parecia suficiente para que se produzissem resultados que permitissem qualquer constatação. Por isso, a composição dos solos foi planeada com vista a incrementar de forma significativa a sua agressividade, diversificando ainda as condições de imersão, alternando-as, em determinados casos com a emersão.

Analisando os resultados acima descritos, poderá constatar-se que o tempo, a agressividade dos solos e as condições gerais dos ensaios não foram suficientes para que se produzissem perdas de massa ou ganhos por agregação de óxidos superiores a 0.05g. A perda de massa mais significativa verificou-se na amostra A9 (aço LDX2101), no cenário b) (protege parcialmente enterrado) no solo 1 (solo rico em matéria orgânica), atingindo as 0.05g de massa perdida. Por outro lado, a amostra que agregou mais óxidos e experimentou um maior incremento na sua massa foi a amostra 14 (aço SAF 2205), enterrada em regime parcial no solo do tipo 2 (solo pobre em matéria orgânica), conforme se poderá analisar na figura 90, imagem da direita.

Em termos gerais, a variação de massa acaba por ser pouco expressiva, estando situada sempre na casa das centésimas de grama. Atendendo a que o volume de material enterrado era de aproximadamente 750 mm^3 , a variação percentual é verdadeiramente insignificante.

De todas as condições de solo impostas, aquela que mostrou ser mais agressiva para os aços inoxidáveis duplex foi o solo do tipo 1 em regime saturado. Nestas condições, tanto o aço LDX 2101 como o SAF 2507 mostraram sérias dificuldades em resistir à corrosão, enquanto o aço SAF 2205 permaneceu quase incólume. No entanto, este aço foi o que apresentou pior comportamento quando enterrado no solo do tipo 2 em regime saturado, ao contrário dos outros dois, que apresentaram uma óptima resistência. Este mesmo aço (SAF 2205) revelou outra vez sinais preocupantes quando enterrado no solo do tipo 2 em regime parcial, mostrando sinais concretos de início de corrosão, enquanto os outros dois aços mostraram um comportamento bastante bom nestas condições. Quando exposto em regime alternado no solo do tipo 1, o aço SAF 2205 mostrou novamente algumas fragilidades, apresentando sinais muito pontuais, mas, mesmo assim preocupantes, de corrosão por picadas (*"pitting"*). Foi o único a demonstrar fragilidades deste tipo neste meio. Já quando expostos ao solo do tipo 2 em regime alternado, todos os aços mostraram dificuldades (maiores no caso do LDX 2101), apresentando todos sinais mais ou menos evidentes de corrosão por picadas. Aliás, estas demonstraram ser as condições de ensaio mais gravosas para qualquer uma das amostras.

Do atrás exposto, pode-se verificar que a resistência dos aços inoxidáveis duplex varia bastante de aço para aço, dependendo igualmente muito do tipo de meio em que estão inseridos e da forma contínua ou alternada como estão expostos a esse meio.

Este é um estudo que, apesar de conclusivo, poderá e deverá ser alvo de futuras investigações, no sentido de aprofundar esta matéria.

4. Conclusões

Os trabalhos de caracterização de materiais são sempre ingratos, necessitando de um conjunto o mais alargado possível de amostras para que eventuais desvios nos procedimentos de ensaio ou heterogeneidades dos materiais possam ser mais facilmente dissipados nos resultados finais. Atendendo à exiguidade de meios existente, este trabalho foi conduzido de forma a tentar maximizar o aproveitamento dos meios existentes e minimizar os riscos de influência de más práticas laboratoriais ou defeitos pontuais dos materiais.

Depois de levados a cabo todos os procedimentos de caracterização atrás referidos, pode-se concluir que:

- Qualquer um dos materiais testados apresenta uma estrutura com o grão perfeitamente orientado, como resultado do processo de laminagem a que foi sujeito durante o seu processo de fabrico. Assim, será de esperar que o material tenha um comportamento algo anisotrópico, apresentando maior resistência na direcção da laminagem;
- Do ensaio metalográfico dá ainda para perceber que há uma boa homogeneidade entre a ferrite e a austenite, como seria aliás de esperar;
- O aço que apresentou maior dureza foi o SAF 2507, seguido de perto pelo SAF 2205, verificando-se que o LDX 2101 era o mais macio. De qualquer das formas, as diferenças não são significativas;
- No estabelecimento dos perfis de dureza após dobragem intensa dos materiais, verificou-se que qualquer deles apresenta encruamento, sendo esse efeito mais significativo no aço LDX 2101. O aço que apresenta menor susceptibilidade ao encruamento é o SAF 2507, muito provavelmente devido à sua composição química;
- Em termos de resistência mecânica, e em linha com os resultados apresentados pelo fabricante, o aço SAF 2507 é o mais resistente, enquanto o SAF 2205 é aquele que apresenta menor resistência. O aço LDX 2101 apresenta resultados intermédios;
- Curiosamente, o limite elástico não segue a mesma tendência, sendo superior no aço LDX 2101 e significativamente inferior no aço SAF 2507. O aço SAF 2205 apresenta resultados ligeiramente inferiores ao aço LDX 2101;

- No que toca ao alongamento após ruptura, que traduz a ductilidade do material, o comportamento foi muito similar entre os materiais em análise, demonstrando boas aptidões a serem conformados plasticamente;
- Os ensaios de tracção com operações de carga e descarga não revelaram indícios de encruamento no material, o que leva a constatar que, para haver encruamento, o trabalho mecânico a efectuar no material tem que ser mesmo severo;
- Quanto à Resiliência, o aço que revelou melhores propriedades nesta matéria foi o SAF 2205 que, mesmo depois de arrefecido em Azoto Líquido uma hora, não fracturou quando sujeito ao impacto do pêndulo Charpy. Neste capítulo, o aço LDX 2101 revelou um comportamento decepcionante, fracturando em todas as situações, excepto à temperatura ambiente, e absorvendo sempre níveis de energia consideravelmente baixos para uma liga desta natureza;
- Relativamente aos ensaios de corrosão efectuados segundo a Norma ISO 3561-2, nenhuma das amostras em análise demonstrou quaisquer sinais de ser susceptível a este fenómeno;
- No que toca ao desgaste por micro-abrasão, o comportamento dos materiais em análise foi bastante similar, mas registou-se uma tendência moderada para um maior desgaste sentido pelo aço SAF 2507. Efectivamente, para 80% das durações de ensaio/distâncias de deslizamento testadas, este material foi sempre aquele que registou calotes esféricas de desgaste mais acentuadas. Os outros dois materiais apresentaram comportamento bastante similar;
- Nos ensaios de geotecnia, que não seguiram qualquer norma específica por não existir publicada, foram testadas diferentes combinações de solos e níveis de saturação, assim como uma exposição permanente ou alternada das amostras a essas condições. O solo 1 em regime saturado e o solo 2 em regime alternado demonstraram ser os meios mais nefastos para os aços LDX 2101 e SAF 2507. Já no caso do aço SAF 2205, as condições que se mostraram mais gravosas em termos de corrosão foram o solo do tipo 1 em regime alternado, ou o solo do tipo 2 parcial ou totalmente saturado. No caso do solo 1 em regime alternado, a corrosão não é intensa, mas é preocupante (picadas).

Assim, não se pode afirmar categoricamente que qualquer um dos aços em análise seja melhor em todos a todos os níveis que qualquer um dos outros, mas este estudo permitiu verificar que, para cada caso, existem diferenças de comportamento a considerar e a ter em consideração no respectivo processo de selecção de materiais.

5. Proposta de trabalhos futuros

Atendendo a que a caracterização mecânica é normalmente realizada pelo próprio fabricante, e que a margem de erro dessa caracterização é normalmente suficiente para se considerar uma correcta selecção do material a aplicar, este trabalho parece deixar claro que existem ainda lacunas na caracterização da resistência à corrosão destes materiais em condições de imersão francamente adversas. Assim, é proposto que o trabalho aqui realizado neste âmbito venha a ser alargado em tempo e em meios, permitindo o desejável alargamento do conhecimento científico nesta matéria.

6. Bibliografia e outras fontes de informação

Andrade, F.(2008). “Análise da Morfologia e da Resistência ao desgaste de revestimentos TiAlSiN efectuados por PVD”. Universidade do Porto. (Tese de mestrado em Engenharia Mecânica).

Bonnet, S., Bourgoin, J., Champredonde, J., Guttman, D. and Guttman, M. (1990). “Relationship between Evolution of Mechanical Properties of Various Cast Duplex Stainless Steels and Metallurgical and Aging Parameters: An Outline of Current EDF Programmes,” Mater. Sci. Technol., 6 , pp.221–229 .

Caprio, G.(1999). “Los Aceros Inoxidables”, 2ª Edição. Grupinox.

Charles, J.(1995). “Composition and properties of duplex stainless steels”, Weld. World (UK), 36, pp. 43-54

Charles J.(1997). “Why and where duplex stainless steels”, Duplex Stainless Steels '97, Maastricht, The Netherlands, 1, pp. 29-42.

Chiaverini, V.(1978). “Tecnologia Mecânica- Estrutura e Propriedades dos Metais e ligas- Processos de Fabricação”, Editora McGraw-Hill, Brasil.

Chopra, O. K., Chung, H. M.(1988a). “Aging Degradation of Cast Stainless Steels: Effects on Mechanical Properties”, in: Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems–Water Reactors, G. J. Theus and J. R. Weeks (Eds.), The Metallurgical Society, Warrendale, PA, pp. 737–748 .

Chopra, O. K., Chung, H. M.(1988b). “Effect of Low–Temperature Aging on the Mechanical Properties of Cast Stainless Steels,” in Properties of Stainless Steels in Elevated–Temperature Service, M. Prager, (Eds.), MPC Vol. 26, PVP Vol. 132, ASME, New York, pp. 79–105 .

Chopra, O. K.(1990). "Thermal Aging of Cast Stainless Steels: Mechanisms and Predictions", in: Fatigue, Degradation, and Fracture – 1990, W. H. Bamford, C. Becht, S. Bhandari, J. D. Gilman, L. A. James, and M. Prager (Eds.), MPC Vol. 30, PVP Vol. 195, ASME, New York, pp. 193-214 .

Chopra, O. K.(1992). "Thermal Aging of Cast Stainless Steels in LWR Systems: Estimation of Mechanical Properties," in Nuclear Plant Systems/Components Aging Management and Life Extension, I. T. Kisisel, J. Sinnappan, R. W. Carlson, and W. H. Lake (Eds.), PVP Vol. 228, ASME, New York, pp. 79–92 .

Cunat J.-P.(2002). "Manual de Aceros Inoxidables de Euro-Inox", Serie Materiales y sus Aplicaciones, Volumen 1, The European Stainless Steel Development Association.

Cutler C. P., Coates, G. E., Jenkinson, D. C.(2008). "Nickel in Stainless Steels", 6th Edition, European Stainless Steel Conference, Science and Market, Helsinki, Finland.

Davim, J. P., Magalhães, A. G.(1992). "Ensaio Mecânicos e Tecnológicos", Estante Editora, Aveiro

Deleu, E., Dhooge, A.(1987). "Fracture toughness of welded thick walled duplex stainless steels", Duplex Stainless Steels '97, Maastricht, Netherlands, 1, pp. 387-394.

Dhooge A., Deleu E.(1987). "Low temperature fracture toughness of thick duplex and superduplex stainless steel weldments", Weld. World (UK), 39, pp. 47-52.

Dobrzanski, L.A., Brytan, Z., Grande, M. A., Rosso, M.(2007). "Corrosion resistance of sintered duplex stainless steels in the salt fog spray test", Journal of Materials Processing Technology 192-193, pp. 443-448

Eckenrod, J. J.; Pinnow, K. E.(1984). "Effects of chemical composition and thermal history on the properties of alloy 2205 duplex stainless steel", In: New developments in stainless steel technology, Detroit.

Ekström U., Olsson K.(1980). "The influence of ferrite and oxygen contents on weld metal mechanical properties of submerged-arc welded stainless steels", Weld pool chemistry and metallurgy, London, UK, pp. 323-334.

Ericsson, C., Sandström, R., Sieurin, H., Lagerqvist, O., Eisele, U., Sciedermaier, J., Ruiz R. L. (2003). Background document 3.5, EcoPress, European research 5th framework

Hassanein, M. F. (2010). "Imperfection analysis of austenitic stainless steel plate girders failing by shear", *Engineering Structures*, Volume 32, Issue 3, pp. 704–713

Holmberg, K., Matthews A. (1994). "Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques in Surface Engineering, Volume 10, ELSEVIER, The Netherlands

IMOA (International Molybdenum Association). (2009). "Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steel", Second Edition, London.

Johansson R. E., Nilsson J.-O.(1984). "Fracture Toughness of Austenitic and Duplex Stainless", *Stainless Steel '84*, Göteborg, Sweden, pp. 446-451.

Kehl G. L. (1939). "The principles of Metallographic laboratory practice", McGraw-Hill Publishing Co, Ltd.

Liljas, O. M., Dupouiron, S. F. (1994). "Presentation at NACE Corrosion/94", Paper no. 395P, *Stainless Steel Europe*, June 1990.

Loureiro, A., S. Brasil, L. Yokoyama.(2007). "Estudo da corrosividade de solo contaminado por substâncias químicas através de ensaios de perda de massa e índice de Steinrath".*Corros. Prot. Mater.*, Vol.26 N^o4.

Martinho, R. P. (2009). "Comportamento de revestimentos PVD mono e multicamada em insertos para moldes de injeção de plásticos", Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto

Mondal, D.P., Das, S.J., Yesgneswaran, A.K.(1998). "Abrasive wear of alloy Al₂O₃ particle composite: a study on the combined effect of a load size of abrasive", *Wear Abrasive*, 223.

Neveux, M.(1968). "La Corrosion des Conduites d'Eau et de Gás – Causes et Remèdes", Ed. Eyrolles, Paris, pp. 169-170.

Nicodemi, W., Roberti, R., La Vecchia, G. M. (1992). "Duplex Stainless Steel Microstructure and Toughness", *Applications of Stainless Steel '92*, Stockholm, Sweden, 1, pp. 270-279.

Núcleo Inox. (2009). Publicação do Núcleo de Desenvolvimento Técnico Mercadológico do Aço Inoxidável, Nº 32. Maio/ Agosto de 2009.

Nyström, M., Karlsson, B., Wasén, J. (1990). "The Mechanical Properties of a Duplex Stainless Steel", Nordic Symposium on Mechanical Properties of Stainless Steels, Sigtuna, Sweden, pp. 70-87.

Outokumpu. (2009). "Corrosion Handbook", Outokumpu, Tenth Edition.

Outokumpu. (2006). "Acero Inoxidable", Outokumpu Stainless Steel.

Pinho, E.M. ; Andrade, M.F.; Silva, F.J.S.; Meixedo: J.P. (2011). "Estudo do Comportamento do Aço Inoxidável Ferrítico AISI441", CIBEM 10, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Setembro de 2011, Porto.

Potgieter, J. H.; Cortie, M.B. (1991). "Determination of microstructure and alloy elements distribution in experimental duplex stainless steel". Materials characterization, vol.6.

Reis, G. S. (1999). "Influência da microestrutura e das condições de deformação nas curvas de escoamento plástico de aços inoxidáveis duplex no ensaio de torção a quente", Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos.

Robinson, W.C. (1993). "Testing Soil for Corrosiveness", In: Materials Performance, Tacoma.

Romanoff, M. (1957). "Underground Corrosion". NBS Circular = 579, National Bureau of Standards. April 1957.

Sandvik. (1999). "Corrosion Handbook for stainless steels". Sandvik Steel, Sweden.

Sarmiento, J. P. (2012). "Aços Inoxidáveis Planos". Editora Unisonos.

Serra, E. T. (1982). "Corrosão pelo solo: agentes avaliação e soluções", In: Eletricidade Moderna.

Sieurin, H. (2006). "Fracture toughness properties of duplex stainless steels", PhD Thesis, Department of Materials Science and Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden

Silva, F. G., Neto, M. A., Fernandes, A. J. S., Costa, F. M., Oliveira, F. J., Silva, R. F. (2009). "Adhesion and Wear Behaviour of NCD Coatings on Si₃N₄ by Micro-Abrasion Tests", Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 9, pp 3938 - 3943

Soares, P. (1992). "Aços - Características tratamentos", 5ª Edição, Livraria Livroluz, Porto.

Souza, S. (1977). "Ensaio mecânicos de materiais metálicos", 3ª Edição, Editora Edgard Blucher Ltda.

Thorvaldsson T., Eriksson H., Kutka J., Salwén A. (1984). "Influence of microstructure on mechanical properties of a duplex stainless steel", Stainless Steel '84, Göteborg, Sweden, 1 , pp. 101-105.

Toro, A., Misiolek, W. Z., Tschiptschin, A. P. (2003). "Correlations between microstructure and surface properties in a high nitrogen martensitic stainless steel", Acta Materialia 51, pp. 3363–3374

Tseng, C.-M., Liou, H.-Y., Tsai, W.-T. (2003). "The influence of nitrogen content on corrosion fatigue crack growth behavior of duplex stainless steel", Materials Science and Engineering A344, pp. 190-200.

Zum-Gahr, K. H. (1987). "Microstructure and Wear of Materials", Elsevier, Amsterdam.

Normas ou Regulamentos

AFNOR- Association Française de Normalisation. (1978). NF A03-151: Iron and Steel Tensile Test on Steel.

AFNOR- Association Française de Normalisation. (1978). NF A03-160 : Iron and steel Tensile Test on Steel Sheet and strip under 3mm thick from and including 0.5mm up to but excluding 3mm.

ASTM- American Society for Testing and Materials. (2002). ASTM A262: Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels.

ASTM- American Society for Testing and Materials. (2008). ASTM A370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.

ASTM- American Society for Testing and Materials. (1996). ASTM E8: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.

ASTM- American Society for Testing and Materials. (1996). ASTM E23: Standard test methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.

ASTM- American Society for Testing and Materials. (1995). ASTM E 208: Standard Test Method for conducting Drop-Weight Test to determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels.

ASTM- American Society for Testing and Materials. (2004). ASTM G31: Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing.

ASTM- American Society for Testing and Materials. (2009). ASTM G48: Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by use of Ferric Chloride Solution.

BSi - British Standards. (2007). BS EN 1071-6: Advances technical ceramics- Methods of test for ceramic coating. Part 6: Determination of the abrasion resistance of coatings by a micro-abrasion wear test.

Canadian Society of Soil Science - Soil Sampling and Methods of Analysis. (1993). M. R. Carter (Editor), Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, pp. 141-145

DIN- Deutsches Institut Für Normung (German Institute for Standardization). (2009). DIN 50125: Testing of Metallic Materials Tensile test pieces (Foreign Standard).

DIN- Deutsches Institut Für Normung (German Institute for Standardization). (1975). DIN 50145: Testing of Metallic Materials: Tensile Test.

DIN- Deutsches Institut Für Normung (German Institute for Standardization). (1975). DIN 50146: Testing of Metallic Materials: Tensile Test without thin stretches measurements.

EN- European Norm. (2005). EN 10088-1: Stainless Steels –Part 1. List of Stainless Steels.

FEPA- Federation of European Producers of Abrasives. (2006). FEPA-Standard 42-2: Grains of fused aluminum oxide, silicon carbide and other abrasive materials for bonded abrasives and for general industrial applications Microgrits F230 to F2000.

ISO - International Organization for Standardization. (1997). ISO 6507-1: Metallic materials- vickers hardness test- part 1: Test method.

ISO - International Organization for Standardization. (1998). ISO 3651-2: Determination of resistance to intergranular corrosion of stainless steels- part 2 : ferritic, austenitic and ferritic-austenitic - duplex) stainless steels- Corrosion test im media containing sulfuric acid.

ISO - International Organization for Standardization. (2007). ISO 8486-2: Bonded Abrasives- Determination and Designation of Grain Size Distribution- Part2: Microgrits F230 to F2000.

ISO - International Organization for Standardization. (2012). ISO 9227: Corrosion Tests in Artificial Atmosphere Salt Spray Tests.

IPQ - Instituto Português da Qualidade. (1990). NP EN 10045-1: Ensaio de choque em provete entalhado Charpy. 1ª parte: método de ensaio.

IPQ - Instituto Português da Qualidade. (1996). NP EN 10003-1: Materiais Metálicos, Ensaio de Dureza Brinell. Parte 1: Método de ensaio.

IPQ - Instituto Português da Qualidade. (1998). NP EN 10109-1: Materiais Metálicos, ensaio de Dureza. Parte 1: Ensaio Rockwell (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, k) e ensaio Rockwell superficial (escalas 15N, 30N, 45N, 15T, 30T e 45T).

IPQ - Instituto Português da Qualidade. (2006). NP EN 10002-1 : Materiais Metálicos, Ensaio de Tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente.

Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis, J. Benton Jones, Jr., GroSystems, Inc., Anderson, South Carolina, USA 2001, CRC Press (pp150-154)

LNEC, Especificação LNEC – E 239-1970, Solos – Análise Granulométrica por peneiração húmida.

NP 1467-1977: Aços e Ferros fundidos. Preparação de provetes para Metalografia.

Páginas da Internet

AUTO entusiastas. In: <http://autoentusiastas.blogspot.pt/2012/04/nemesis-da-engenharia-e-o-titanic.html> (consultado em 27 de Agosto de 2012)

BraSteel. <http://www.brasteelacosemetais.com.br/html/aco-inox.htm> (Consultado em 16.09.2012)

Núcleo Inox – Coletânea de Informações Técnicas- Aço Inoxidável. In: <http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/Tipos%20de%20A%E7os%20Inoxidaveis.pdf> (consultado em 11 de Abril de 2011)

http://www.mspc.eng.br/ciemat/im01/cie_mat108.gif, consultado em 15.09.2012

TWI, In: <http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/job-knowledge/job-knowledge-69-mechanical-testing-tensile-testing-part-1/> consultado em 15.09.2012

http://www.professionaltesting.co.th/web_page/tensile-test, consultado em 15.09.2012

CIMM, http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6580-temperatura-de-transicao consultado em 29-09-2012

<http://www.kokch.kts.ru/me/t3/index.html> consultado em 15.09.2012

Key to Metals, <http://www.keytometals.com> consultado em 18.09.2012

ANEXO I

Análises Granulométricas dos Solos



Laboratório de Geotecnia e de Materiais de Construção

Rua Dr. António Bernardino de Almeida, P - 4200 - 071 Porto

Telefone: 228 340 547

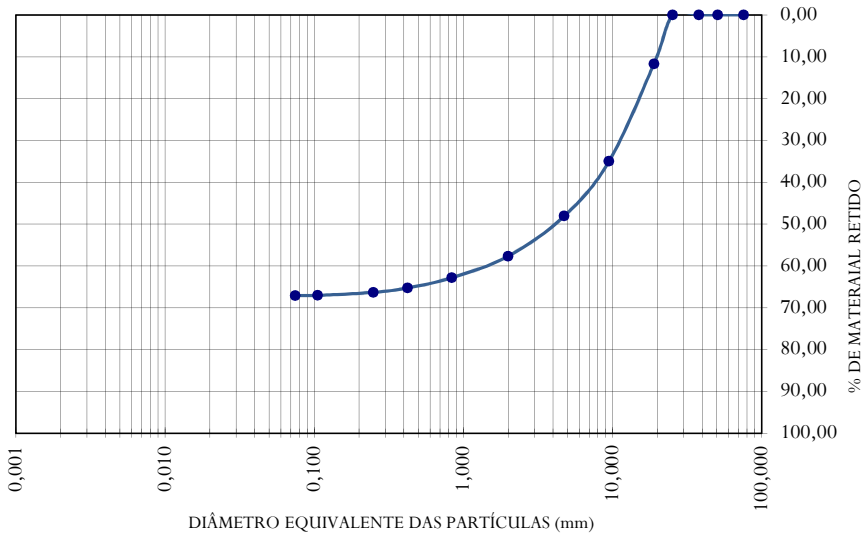
Fax: 228 321 159

E-mail: lgmc.isep@isep.ipp.pt



	Análise Granulométrica E - 239	Amostra: SOLO 1
--	---------------------------------------	------------------------

PENEIROS ASTM	ABERTURA mm Nº	0,075	0,106	0,250	0,425	0,840	2,000	4,760	9,510	19,00	25,40	38,10	50,80	76,10
		200	140	60	40	20	10	4	3/8"	3/4"	1"	1,50"	2"	3"



RESUMO		
Peneiros ASTM (nº)	(mm)	Acumul. Ret. (%)
3"	76,10	0,00
2"	50,80	0,00
1,50"	38,10	0,00
1"	25,40	0,00
3/4"	19,00	11,67
3/8"	9,51	34,98
4	4,76	48,09
10	2,00	57,69
20	0,840	62,81
40	0,425	65,26
60	0,250	66,32
140	0,106	67,04
200	0,075	67,08
< 200	< 0,075	0,00

Entidade:		Obra:	
Ensaiou:	Calculou:	Verificou:	



Laboratório de Geotecnia e de Materiais de Construção

Rua Dr. António Bernardino de Almeida, P - 4200 - 071 Porto

Telefone: 228 340 547

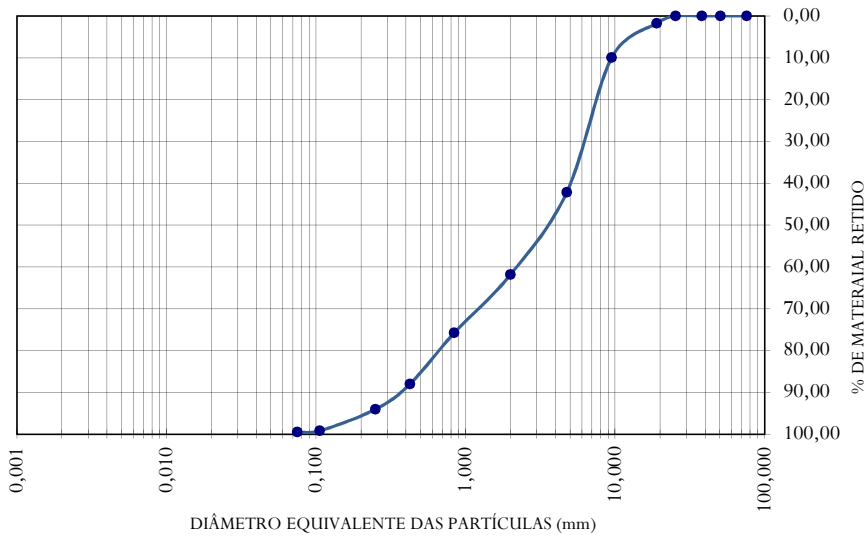
Fax: 228 321 159

E-mail: lgmc.issep@isep.ipp.pt



Data	Análise Granulométrica E - 239	Amostra: SOLO 2
-------------	---------------------------------------	------------------------

PENEIROS	ABERTURA													
ASTM	mm	Nº												
	200	0,075												
	140	0,106												
	60	0,250												
	40	0,425												
	20	0,840												
	10	2,000												
	4	4,760												
	3/8"	9,510												
	3/4"	19,00												
	1"	25,40												
	1,50"	38,10												
	2"	50,80												
	3"	76,10												



RESUMO		
Peneiros ASTM (nº)	(mm)	Acumul. Ret. (%)
3"	76,10	0,00
2"	50,80	0,00
1,50"	38,10	0,00
1"	25,40	0,00
3/4"	19,00	1,75
3/8"	9,51	9,92
4	4,76	42,14
10	2,00	61,83
20	0,840	75,78
40	0,425	88,01
60	0,250	94,04
140	0,106	99,20
200	0,075	99,49
< 200	< 0,075	0,00

Entidade:		Obra:	
Ensaiou:	Calculou:	Verificou:	