



Rui Pedro Graça Caracterização de Aços para Embutimento
Pacheco



**Rui Pedro Graça
Pacheco**

Caracterização de Aços para Embutimento

Relatório de Estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica do Doutor Filipe Oliveira, investigador auxiliar do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro.

"A sabedoria é a forma mais dura e mais condensada do ardor, a parcela de ouro nascida do fogo e não da cinza." Yourcenar, Marguerite

o júri

Prof. Doutor Augusto Luis Barros Lopes
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Doutor Joaquim Manuel da Graça Sacramento
Equiparado a professor coordenador sem agregação da Universidade de Aveiro

Doutor Filipe José Alves de Oliveira
Equiparado a investigador auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Quero revelar um especial agradecimento ao Dr. Filipe Oliveira, meu orientador pela parte do DEMaC-UA, por todas as sugestões e orientações dadas durante o desenvolvimento do presente trabalho, ao Engº António Homem, meu orientador por parte da entidade DURIT, todo o acompanhamento prestado ao longo do período de estágio e por me ajudar a desenvolver como profissional.

Um reconhecido agradecimento ao Engº Manuel Valente e Dr. Flausino Silva por me permitirem realizar o estágio na DURIT.

Um reconhecido agradecimento, também, para os meus colegas colaboradores da entidade na qual realizei o estágio, pelo apoio e acolhimento que me prestaram.

Um agradecimento especial a todos os técnicos(as) de laboratório do DEMaC por todo o apoio prestado durante a realização dos ensaios.

Um agradecimento à empresa F. Ramada, nomeadamente ao Engº Paulo Oliveira e Engº Paulo Duarte bem como ao meu colega de licenciatura Rui Silva.

Não podia deixar passar a oportunidade de agradecer à minha namorada, Cláudia Oliveira e à minha família pelo incansável apoio, o qual me permitiu realizar este trabalho.

palavras-chave

Embutimento; Tratamento Térmico; Trabalho a frio; Trabalho a quente; Aperto; Interferência;

resumo

A crescente necessidade de otimizar os processos e ferramentas de precisão já existentes no mercado, implica uma melhoria e aperfeiçoamento contínuo dos materiais utilizados. Para tal torna-se imperativo conhecer as suas propriedades mecânicas e estruturais quando submetidos a diversas condições.

Geralmente as ferramentas de precisão são constituídas por Metal Duro e Aço, sendo o embutimento o método mais usual para unir estes materiais. Devido à imensa diversidade de aços existentes no mercado, para este trabalho escolheram-se dois devido à sua importância económica para a DURIT: um típico para trabalho a frio, com a designação 1.2379 (AISI D2) e outro para trabalho a quente, designado por 1.2344 (AISI H13)

Estes aços foram sujeitos a tratamentos térmicos de têmpera e revenido para diferentes níveis de dureza (48,6HRC e 52HRC para o aço 1.2344 e 59,4HRC e 61,4HRC para o aço 1.2379) e foram caracterizados quanto ao seu comportamento mecânico (testes de dureza, ensaios de tração e determinação de resistência ao impacto). As microscopias óptica e eletrónica de varrimento foram usadas para caracterizar microestruturalmente os aços e permitiram compreender os resultados obtidos.

Após tratamento térmico, os valores da tensão de cedência sobem para mais do dobro relativamente ao estado recozido, para ambos os aços, sendo tanto maior quanto maior é a dureza. O valor máximo de tensão de cedência medido foi de 1827MPa para o aço 1.2344 e de 2145MPa para o aço 1.2379. A presença de carbonetos numa matriz martensítica revenida e razão microestrutural para a maior resistência mecânica do aço 1.2379. A maior ductilidade do aço 1.2344 revelou-se também na sua maior capacidade de absorção de energia ao impacto, enquanto que o aço 1.2379 após tratamento térmico se comporta como um material com fratura tipicamente cerâmica.

Compilaram-se ainda dados na forma de gráficos que permitem identificar rapidamente a tensão de cedência de um dado aço em função da sua dureza Rockwell C, que permitem determinar a tensão de tração máxima na superfície interna de uma carcaça de aço em função da sua geometria, para os embutimentos a quente e a frio e ainda determinar a temperatura mínima para se fazer o embutimento a quente.

keywords

Assembly Fit; Heat Treatment; Cold Work; Hot Work; Interference; Shrink Fit;

abstract

The growing need to optimize processes and precision tools already on the market implies a continuous improvement and refinement of the materials used. To this end it is imperative to know their mechanical and structural properties when subjected to various conditions.

Precision tools are usually made by parts of hardmetal and steel and are assembled by shrink or press fitting, depending on the materials used and applications envisaged. For this work two of the most economically relevant steels for DURIT were selected: a cold work steel termed 1.2379 (AISI D2) and a hot work steel named 1.2344 (AISI H13). These steels were mechanically characterized (hardness tests, tensile tests and fracture energy determination) in the as received, normalized state, and after quench and temper heat treatments to increase their hardness (48,6HRC and 52HRC for 1.2344 steel and 59,4HRC and 61,4HRC for steel 1.2379). Optical and electronic microscopies were used to characterize the steels microstructurally and help understanding the results of the mechanical tests.

After heat treating, the yield stress values are at least the double for both steels and increase with the hardness of the steels. The highest yield stress values obtained were of 1827MPa for 1.2344 steel and 2145MPa for steel 1.2379. The existence of carbides in a tempered martensitic matrix where the grain boundaries also contain fine carbides, are the microstructural features ensuring the higher mechanical strength of the 1.2379 steel. The larger ductility of the 1.2344 steel is also reflected in its higher impact resistance, while 1.2379 steel have a fracture typically like a ceramic material, especially after heat treating.

The data obtained and graphically depicted will allow: to determine the yield stress of steels, given their Rockwell hardness; to calculate the maximum tensile stresses on the steel shell after fitting the hardmetal as a function of geometry for both shrink and press fitting; and to identify the minimum temperature for shrink fitting for the 1.2344 steel.

Índice

Índice de Figuras.....	iii
Índice de Tabelas.....	vi
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. DURIT - Metalurgia Portuguesa do Tungsténio	3
1.2. Metal Duro	5
1.3. Aços para Matrizes.....	7
1.4. Matrizes.....	12
1.5. Embutimento	14
Capítulo 2 - Caracterização de dois aços utilizados no embutimento.....	25
2.1. Definição dos aços a utilizar.....	27
Capítulo 3 - Procedimento Experimental.....	39
3.1. Análise Microestrutural	41
3.2. Ensaio de Dureza	41
3.3. Ensaio de tração.....	43
3.4. Ensaio de tenacidade (Charpy).....	46
Capítulo 4 - Resultados e Discussão.....	49
4.1. Aço 1.2344	50
4.1.1. Análise Microestrutural	50
4.1.2. Ensaio de Dureza	51
4.1.3. Ensaio de Tração	51
4.1.4. Ensaio de tenacidade (Charpy).....	57
4.2. Aço 1.2379	58

4.2.1.	Análise Microestrutural	58
4.2.2.	Ensaio de Dureza	59
4.2.3.	Ensaio de tração	59
4.2.4.	Ensaio de tenacidade (Charpy)	65
4.3.	Simulação de um embutimento	66
Capítulo 5 - Conclusões.....		73
Referências Bibliográficas.....		77
Anexos I.....		79
Anexos II.....		83

Índice de Figuras

Figura 1 – Vista exterior do Pavilhão II da empresa DURIT em Albergaria a Velha [1].	3
Figura 2 - Organograma da empresa [1].	4
Figura 3 - Sequência do processamento do metal duro na DURIT [1].	6
Figura 4 - Exemplo de uma matriz produzida na DURIT [1].	12
Figura 5 - Exemplo de uma matriz para estampagem.	13
Figura 6 - Exemplo de uma matriz de prensagem.	13
Figura 7 – Esquema representativo do processo produtivo de uma matriz na DURIT [9].	14
Figura 8 - Exemplificação do conceito de interferência [11].	15
Figura 9 - Ciclo de embutimento a quente do aço 1.2344 [10].	17
Figura 10 - Forno de aquecimento dos anéis de aço para embutimento a quente.	18
Figura 11 – Variação da dureza Rockwell C do aço 1.2344 com a temperatura de revenido [12].	18
Figura 12 – Variação da dureza Rockwell C do aço 1.2379 com a temperatura de revenido [12].	19
Figura 13 - Prensa para executar o embutimento a frio.	20
Figura 14 – Etapas do ciclo de embutimento a frio.	20
Figura 15 - Ciclo de embutimento a frio.	20
Figura 16 - Esquema exemplificativo do embutimento a frio.	21
Figura 17 - Parâmetros para a equação de Lamé [13].	22
Figura 18 – a) Matriz fissurada na carcaça de aço devido a aperto excessivo; b) Matriz fissurada no núcleo de MD devido a aperto excessivo.	23
Figura 19 - Diagrama TTT para o aço 1.2344 com uma temperatura de austenitização de 1020°C [12] on “P” é Perlite, “B” Bainite e “M” Martensite.	29
Figura 20 - Diagrama CCT para o aço 1.2344 com uma temperatura de austenitização de 1020°C [12].	30
Figura 21 - Diagrama TTT para o aço 1.2379 com uma temperatura de austenitização de 1030°C [12].	30

Figura 22 - Diagrama CCT para o aço 1.2379 com uma temperatura de austenitização de 1030°C [12].	31
Figura 23 - Ciclo de térmico de têmpera para o aço 1.2344 [17].	32
Figura 24 – Ciclo térmico de revenido para o aço 1.2344 com 46-49HRC [17].	32
Figura 25 – Ciclo térmico de revenido para o aço 1.2344 com 50-52HRC [17].	33
Figura 26 - Ciclo térmico de têmpera para o aço 1.2379 [17].	34
Figura 27 – Ciclo térmico de revenido para o aço 1.2379 com 60-62HRC [17].	35
Figura 28 – Ciclo térmico de revenido para o aço 1.2379 com 56-58HRC [17].	35
Figura 29 - Princípio de funcionamento do ensaio de dureza Rockwell C [26].	42
Figura 30 – Aspeto de um provete do aço 1.2344 após o ensaio de dureza Rockwell C.	43
Figura 31 - Equipamento utilizado para o ensaio de dureza.	43
Figura 32 - Provette para ensaio de tração uniaxial.	44
Figura 33- Equipamento utilizado para o ensaio de tração uniaxial.	45
Figura 34 – Dimensões do provete utilizado para o ensaio de Charpy.	46
Figura 35 – Pormenor do posicionamento do provete utilizado no ensaio de Charpy.	47
Figura 36 - Equipamento utilizado no ensaio de Charpy.	47
Figura 37 – Imagens obtidas por microscopia óptica do aço 1.2344 a) recozido; b) 46-49HRC; c) 50-52HRC	50
Figura 38 - Curvas tensão vs extensão nominais do aço 1.2344	52
Figura 39 - Curvas tensão vs extensão real do aço 1.2344.	52
Figura 40 – Provette do aço 1.2344 48,6HRC após o ensaio e tração.	53
Figura 41 – Imagens obtidas por MEV do aço 1.2344 recozido: a) vista geral; b, d) detalhes da zona exterior estriada; c, e) detalhes da zona exterior com maior ampliação.	54
Figura 42 – Imagens obtidas por MEV do aço 1.2344 com dureza 48,6HRC: a) vista geral; b, d) detalhes da zona exterior estriada; c, e) detalhes da zona interior com maior ampliação.	55
Figura 43 – Imagens obtidas por MEV do aço 1.2344 com dureza 52HRC: a) vista geral; b, d) detalhes da zona exterior estriada; c, e) detalhes da zona interior com maior ampliação	56

Figura 44 – Imagens obtidas por microscopia óptica do aço 1.2379 a) Recozido; b) 56-58HRC; c) 60-62HRC.	58
Figura 45 - Curvas tensão vs extensão nominais do aço 1.2379.	60
Figura 46 - Curvas tensão vs extensão reais do aço 1.2379.	61
Figura 47 - Provete do aço 1.2379 61,4HRC após o ensaio de tração.	62
Figura 48 – Imagens obtidas por MEV do aço 1.2379 recozido, com dureza 22,4HRC: a) vista geral; b c) detalhe da superfície de fratura com maior ampliação.....	62
Figura 49 – Imagens obtidas por MEV do aço 1.2379 59,4HRC: a) vista geral b, c) detalhe da zona de rotura.	63
Figura 50 – Imagens obtidas por MEV do aço 1.2379 com dureza 61,4HRC: a) vista geral mostrando o ponto de início de fratura; b, c) detalhes da superfície de fratura com maior ampliação.	64
Figura 51 - Imagem obtida a partir da simulação de um embutimento com mapeamento de tensões na interface entre os dois materiais.	67
Figura 52 - Valores de extensão obtidos na simulação de elementos finitos.	68
Figura 53 - Dependência entre a tensão máxima e a interferência, para duas geometrias. \square é o valor da interferência.....	69
Figura 54 – Curvas dilatométricas do aço 1.2344 tratado termicamente.	70
Figura 55 – Temperaturas para embutimento a quente do aço 1.2344 em função da interferência .	71
Figura 56 - Relação ente a tensão de cedência e a dureza Rockwell C dos aços 1.2344 e 1.2379...	72

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Efeito dos elementos de liga nos aços [6].	9
Tabela 2 - Quadro resumo de aços utilizados para embutimento [14].	24
Tabela 3 - Nomenclatura dos aços utilizados [12].	27
Tabela 4 - Composição química nominal dos aços a utilizar [12].	28
Tabela 5 - Durezas pretendidas dos aços para os diversos ensaios.	28
Tabela 6- Valores de dureza Rockwell C.	51
Tabela 7 - Valores obtidos no ensaio de tração do aço 1.2344. A deformação real indicada (ϵ) é a correspondente à tensão nominal máxima.	53
Tabela 8 - Valores obtidos no ensaio Charpy e capacidade de absorção de energia para o aço 1.2344.	57
Tabela 9- Valores obtidos após o ensaio de dureza.	59
Tabela 10 - Valores obtidos no ensaio de tração. A deformação real indicada (ϵ) é a correspondente à tensão nominal máxima.	61
Tabela 11 - Valores obtidos no ensaio Charpy e capacidade de absorção de energia para o aço 1.2379.	65

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Capítulo 1 - Introdução

1.1. DURIT - Metalurgia Portuguesa do Tungsténio

A **DURIT** – Metalurgia Portuguesa do Tungsténio, é uma empresa que fabrica produtos à base de metal duro, o nome atribuído a WC sinterizado com cobalto (Co) e/ou níquel (Ni). Situa-se na zona industrial de Albergaria-a-Velha, (Figura 1). De momento é constituída por três pavilhões operacionais e um destinado ao depósito de resíduos (Pavilhão IV). Os três pavilhões operacionais encontram-se divididos segundo a especificidade do trabalho. Assim o Pavilhão I destina-se a maquinar peças em aço e metal duro (MD) ou apenas aço. O Pavilhão II é ocupado pelas secções de Metalurgia e Recursos Humanos. A Metalurgia é a secção de processamento de pós por moagem, secagem, granulação e também zona de conformação por prensagem e maquinagem de produtos prensados ou pré-sinterizados. O Pavilhão III destina-se à produção de peças em MD por retificação (cilíndrica, plana), polimento e controlo dimensional da superfície. O nome DURIT estende-se internacionalmente a países como a Espanha, Alemanha e Brasil, onde, neste último existe uma empresa que se dedica à produção, sendo os restantes apenas gabinetes comerciais. Existem também outras empresas do grupo noutras zonas do País e nos arredores de Albergaria-a-Velha: Helitene, TEandM, Moldit, Duomin, Vitricer, DURITCast e DURITSteel [1].



Figura 1 – Vista exterior do Pavilhão II da empresa DURIT em Albergaria a Velha [1].

A DURIT encontra-se organizada em 4 níveis funcionais: gerência, direções, departamentos e secções. A sua estrutura pode ser observada no organograma da Figura 2.

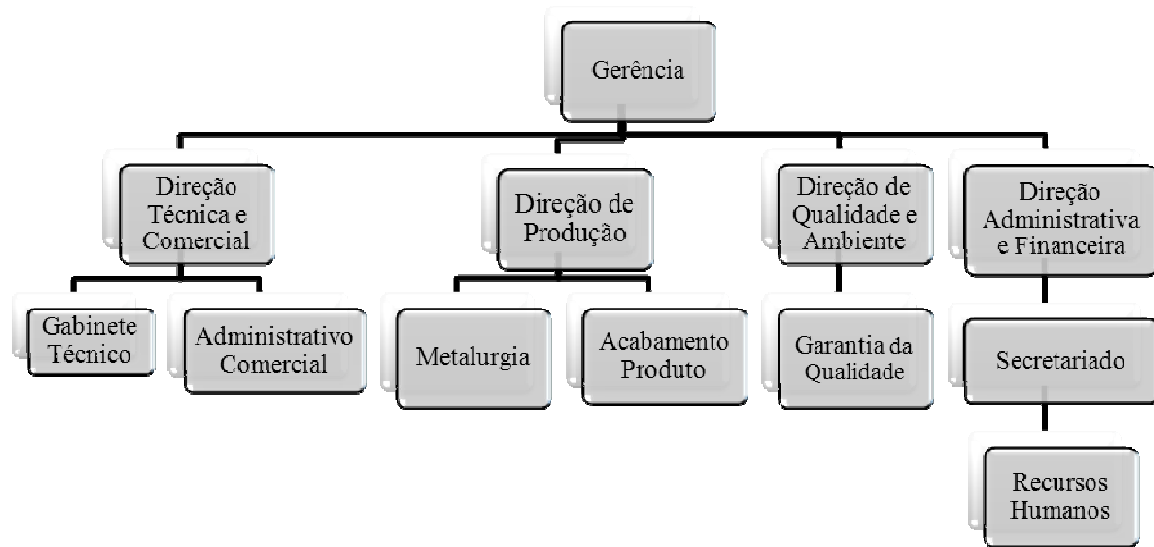


Figura 2 - Organograma da empresa [1].

O mercado principal da DURIT é o Alemão, porém o domínio de vendas conta para além deste outros países, como: Portugal, Espanha, Brasil, Reino Unido, Israel, entre outros. Os produtos fabricados na DURIT podem ser encontrados em operação numa extensa diversidade de indústrias: automóvel, química, petroquímica e do petróleo, siderúrgica, cerâmica, embalagem metálica, na medicina, na indústria metalo-mecânica, entre muitas outras áreas.

O aperfeiçoamento contínuo dos materiais e processos produtivos, a formação contínua dos colaboradores e a flexibilidade na resposta aos requisitos dos seus clientes são os principais fatores que fazem da DURIT uma empresa credível na utilização do metal duro [1]. Para além do que foi supra referido, é uma empresa que alia a qualidade dos seus produtos com a preocupação ambiental, pois encontra-se certificada segundo as normas NP EN ISO 9001:2008 e NP EN ISO 14001:2004 respetivamente, pela empresa certificadora Bureau Veritas.

Outro ponto forte da DURIT prende-se com o facto de executar peças e ferramentas com grande rigor dimensional e geométrico. Para além de trabalhar com o carboneto de tungsténio, produz peças de diversos tipos de aço com o intuito de combinar as propriedades dos dois materiais, tornando a ferramenta/peça mais duradoura, eficaz e

economicamente viável. Uma das principais formas de produtos fabricados pela empresa que utiliza esta técnica são as matrizes. Estas são constituídas por um núcleo de metal duro e uma carcaça de aço. A união entre os dois materiais pode ser realizada de diversas formas: brasagem, fixação mecânica, colagem e embutimento. Neste trabalho só se dará enfoque ao processo de embutimento, por ser o objetivo deste estudo.

O trabalho de estágio desenvolvido na DURIT visou aprofundar conhecimentos relativamente a dois aços utilizados na empresa, de modo a perceber a influência e comportamento destes nas operações de embutimento. Outro objetivo que se pretende alcançar é o de catalogar e compreender os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de modo a evitar que se cometam erros durante a conformação por embutimento e posterior utilização das peças realizadas pela empresa. A otimização do processo de embutimento só será possível conhecendo o comportamento técnico e mecânico do tipo de aço usado.

1.2. Metal duro

Metal duro é o nome dado a um composto de carboneto de tungsténio e cobalto desenvolvido na Alemanha em 1923 por Karl Schröter, numa altura em que havia uma grande necessidade de materiais com alta resistência ao desgaste [2]. Este composto de matriz metálica tem grande importância devido às suas propriedades mecânicas, aliando elevadas tensão de rotura e dureza com grande tenacidade que lhe conferem grande resistência ao desgaste e permitem o seu uso sem concorrência em muitas aplicações. O metal duro (WC-Co) é composto por duas fases, uma frágil (carboneto tungsténio - WC) e uma fase metálica ligante (cobalto - Co). As partículas de WC oferecem elevada dureza enquanto que o Co confere elevada tenacidade [2]. As suas propriedades tornam este material muito utilizado na indústria, especificamente em ferramentas de corte (brocas, pastilhas corte), matrizes de conformação, matrizes de estampagem, fieiras, entre muitas outras aplicações [2].

Este material é fabricado pelo processo de metalurgia de pós (técnica metalúrgica que consiste em transformar pós de metais, de ligas metálicas e de substâncias não metálicas em peças densas, sem se recorrer à fusão completa, utilizando pressão e temperatura) que resulta da mistura de cerca de 70-97% do peso total de WC com o ligante

metálico, geralmente cobalto ou níquel [3]. A sequência de fabricação do metal duro utilizada na DURIT pode ser observada na Figura 3.

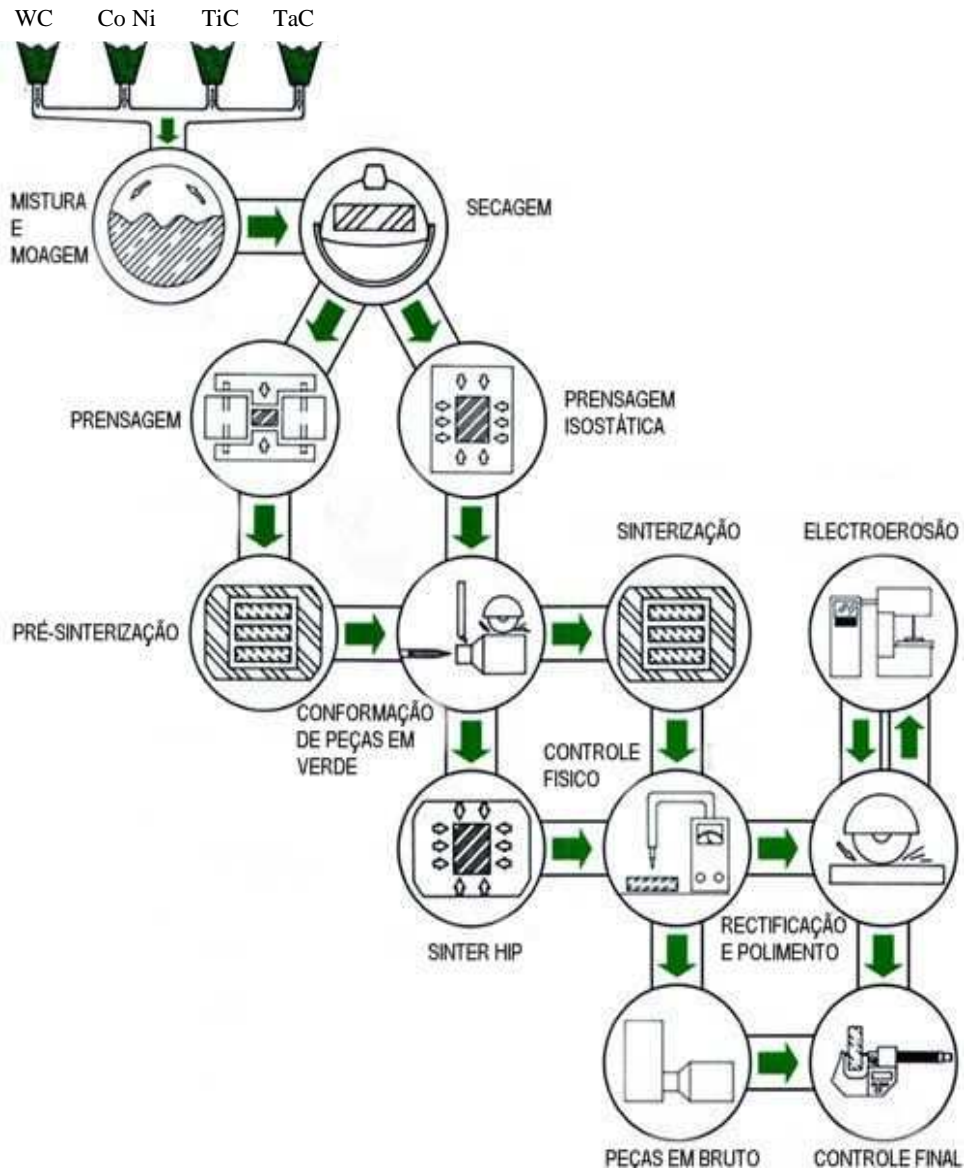


Figura 3 - Sequência do processamento do metal duro na DURIT [1].

Após prensagem do pó, o composto apresenta consistência suficiente para ser maquinado na forma desejada, próxima do aspeto final. Em seguida ocorre o processo de sinterização, que consiste num aquecimento a uma temperatura suficiente (pode variar entre os 1280 e os 1460°C dependendo do grau do metal duro) para fundir o aglomerante e preencher os vazios entre os grãos dos carbonetos, durante o qual há a dissolução parcial

do WC no Co mas que reprecipita durante o arrefecimento. Durante esta etapa é fundamental exercer um bom controlo para evitar o crescimento de grão excessivo do WC. O resultado é um material de dureza elevada, normalmente entre 1000-2400HV, dependendo do teor de ligante metálico. As durezas mais elevadas são conseguidas com baixos teores de aglomerante (<5%/peso) e tamanho de grão reduzido (que pode variar entre 0,4 μ m a 10 μ m) [4]. Por outro lado, obtém-se maior tenacidade, aumentando o teor de aglomerante (até 35%/peso) e/ou aumentando o tamanho de grão. Após as etapas supra referidas, o produto pode ser entregue ao cliente em bruto, após sinterização para acabamento nas suas instalações ou como produto acabado (após ser efetuado o controlo dimensional do material) [1].

1.3. Aços para matrizes

Não obstante a intensa competição que se tem vindo a observar ao longo das últimas décadas, o aço continua a ser um dos materiais mais importantes em construção mecânica e tem conseguido manter-se como o material com maior número de aplicações na atualidade, em virtude da sua grande versatilidade [5]. Trata-se da mais importante liga metálica sendo empregue de forma intensiva em numerosas aplicações tais como máquinas, ferramentas, materiais de construção, etc. Apesar de existirem alternativas para colmatar desvantagens como a elevada densidade, a baixa resistência ao fogo e à corrosão, ainda se utiliza o aço devido às vantagens económicas [5]. Existem numerosos jazigos de minerais de ferro suficientemente ricos e, fáceis de explorar que garantem ainda a competitividade económica dos aços face a outras alternativas, em muitos sectores.

O extraordinário leque de propriedades exibidas pelos diversos tipos de aço é conseguido através de simples variações de composição ou por intermédio de processamentos térmicos ou mecânicos. Os aços são ligas cuja definição não é simples, sendo considerados sistemas relativamente complexos principalmente quando se tem ainda em conta que os aços comerciais não são ligas binárias. Além dos seus principais elementos de liga, (ferro e carbono), eles contêm sempre outros elementos secundários presentes devido aos processos de fabrico. Assim, podemos definir o aço como sendo uma liga ferro-carbono (Fe-C) contendo geralmente de 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono (em peso), para além de outros elementos secundários como: o silício (Si), o

manganês (Mn), o fósforo (P) e o enxofre (S) [5]. As propriedades mais relevantes destes aços binários, são a dureza ou resistência à tração e a ductilidade. Normalmente, a dureza aumenta com a concentração de carbono e a ductilidade aumenta se a percentagem deste for diminuída [6].

Na produção de ferramentas/peças de precisão, a escolha do aço representa um fator extremamente importante devido às diferentes exigências, quer sejam do cliente, quer do tipo de propriedades mecânicas (dureza, tenacidade, resistência à abrasão, etc) que cada peça deve ter para garantir o tempo de vida mínimo exigido pela aplicação.

Os aços podem ser classificados de diversas formas, sendo as principais [7]:

1. Composição química

Segundo este processo de classificação, os aços podem ser divididos em duas classes:

- ✓ Aços não ligados – São aqueles que apenas contêm carbono como elemento de liga do ferro. Podem ainda aparecer outros elementos como o Si, Mn, Al, Ti e Cu, porém a sua percentagem é apenas residual devido a contaminações provenientes do processo de fabrico.

- ✓ Aços ligados

Fortemente ligados – São aqueles cujo teor total dos elementos de liga é superior a 5%.

Fracamente ligados – São aqueles cujo teor total dos elementos de liga é inferior a 5%.

Na Tabela 1 encontram-se reunidos alguns elementos de liga e a sua influência nas propriedades dos aços.

Capítulo 1 – Introdução

Tabela 1 - Efeito dos elementos de liga nos aços [6].

Carbono (C)	Define e estabelece as propriedades do aço, quanto à dureza e resistência mecânica;
Manganês (Mn)	Melhora a resistência mecânica;
Níquel (Ni)	Melhora as propriedades mecânicas bem como a resistência à corrosão;
Cobre (Cu)	Melhora a resistência à corrosão;
Crômio (Cr)	Melhora a resistência mecânica, quando se apresenta em valores baixos; em elevada concentração melhora a resistência ao desgaste por formar carbonetos. Adiciona-se juntamente com o Ni e o Cu;
Molibdênio (Mo)	Apresenta o mesmo efeito do Ni, Cu e Mn, com a vantagem de melhorar as propriedades mecânicas, mesmo a temperaturas mais elevadas;
Chumbo (Pb)	Melhora a maquinação e acabamento;
Boro (B)	Melhora a temperabilidade do aço;
Zircônio (Zr)	É desoxidante e aumenta a tenacidade;
Selênio (Se)	Facilita a maquinação;
Silício (Si)	É um desoxidante, melhora a resistência à corrosão e resistência mecânica;
Fósforo (P)	Endurece, aumenta a resistência e melhora a maquinabilidade;
Enxofre (S)	Fragiliza o material em teores acima de 0,12 %;
Vanádio (V)	Endurecedor, aumenta a temperatura de crescimento da austenite;
Tungstênio (W)	Melhora a resistência ao desgaste e, pode aumentar a dureza até 6%

Todos os elementos de liga se comportam de forma diferente podendo formar [8]:

- Carbonetos simples ou mistos, incorporados na cementite (e.g. Cr, W, Mo, V);
- Inclusões não-metálicas devido à formação de óxidos (CaO, SiO₂), sulfuretos (MnS), silicatos ((Fe, Mg)₂SiO₄), etc;
- Compostos e partículas intermetálicos (e.g. Ni₃Al);
- Solução sólida na ferrite (e.g. Cr, Mo) e estabilização de austenite (aços inoxidáveis austeníticos (e.g. Ni, Mn).

É de referir que existem elementos de liga que não formam carbonetos, ou se os formam são muito instáveis o que torna a sua decomposição fácil. Estes designam-se por não carburígenos, sendo eles o Cu, Ni e Co. Outros elementos de liga formam carbonetos relativamente estáveis sendo designados por elementos carburígenos. Esses elementos são Cr, W, Mo, V, Ti, e o Zr [8].

A adição de elementos de liga também influencia a microestrutura final do material. Assim os elementos podem ser classificados como: gamagéneos e alfa-géneos. Os gamagéneos são os elementos estabilizadores da austenite, fazem parte deste lote o Ni e o Mn, podendo estes acima de certos valores estender o domínio de estabilidade da austenite até à temperatura ambiente. Os alfa-géneos são os elementos estabilizadores da ferrite e são o Cr; Mo; V e Ti. No entanto existem outros elementos como o C e o N que expandem o domínio austenítico mas não o conseguem estabilizar até à temperatura ambiente [8].

2. Aplicação

Este critério é utilizado quando se pretende definir um aço para cumprir uma determinada função. Através deste critério é possível dividir os aços em três grandes grupos:

I. Os **aços de construção**, ligados ou não ligados, são utilizados na construção de peças que irão ser utilizadas individualmente ou fazendo parte de máquinas. Geralmente são trabalhados ou utilizados no estado de fornecimento (normalmente no estado recozido). No entanto, podem sofrer tratamento durante o processo de fabrico de uma dada peça.

II. Os **aços para ferramentas**, fortemente ou fracamente ligados, destinam-se ao fabrico de ferramentas de qualquer tipo. Regra geral são fornecidos no estado recozido, sofrem operações de maquinagem e retificação seguidas de tratamento térmico de modo a melhorar as suas propriedades mecânicas para os níveis pretendidos.

III. Os **aços especiais** possuem um teor elevado em elementos de liga. Neste grupo estão incluídos os aços refratários, inoxidáveis, resistentes aos ácidos, entre outros [7].

O tipo de aço mais importante para este estudo e, conseqüentemente a que deve merecer mais atenção, são os **aços para ferramentas**. Neste grupo podem encontrar-se:

Capítulo 1 – Introdução

1. Aços rápidos – atribui-se esta designação aos aços temperáveis, cuja composição química permite apresentar uma elevada resistência ao revenido até cerca de 600°C, sendo utilizados no fabrico de ferramentas para maquinação com elevados rendimentos, mesmo a grandes velocidades de corte. Este tipo de aço caracteriza-se pela sua dureza elevada e uma máxima resistência ao desgaste. Os elementos de liga que estão presentes neste tipo de aço, normalmente são: C, W, Mo, Co, V e Cr, portanto serão aços de matriz martensítica ricos em carbonetos.

2. Aços para trabalho a quente – estes aços devem apresentar propriedades que permitam suportar as exigências de um trabalho a temperaturas elevadas. As características principais que estes aços devem possuir são: reduzida sensibilidade aos choques térmicos (resistência a variações bruscas de temperatura); boa condutividade térmica (pois facilita o escoamento de calor e evita o aquecimento exagerado da ferramenta); boa resistência a quente (capacidade de operar a velocidades e avanços mais elevados do que os restantes aços) e grande resistência ao desgaste a quente. Os elementos de liga que fornecem estas características aos aços são o Cr, Mo, W e V.

3. Aços resistentes ao choque – estes aços são utilizados quando se pretende uma grande resistência à fadiga e como esta depende da tenacidade, o teor de carbono é inferior ao de outros aços, uma vez que esta diminuição provoca uma diminuição da dureza e um aumento da tenacidade. Os elementos mais influentes que fazem parte da sua constituição são o Si, W, Cr e V.

4. Aços para trabalho a frio – estes aços caracterizam-se por uma elevada temperabilidade e tenacidade que permitem que as ferramentas possam ser sujeitas a esforços elevados de choque e compressão a frio. A temperabilidade deve-se ao elevado teor em Ni e Cr [7].

Para a produção específica de cada ferramenta, a escolha do aço representa um fator extremamente importante. Uma vez que cada tipologia de aço exhibe propriedades próprias, são fatores de decisão para a sua escolha os seguintes:

- Tensão de cedência;

- Dureza;
- Resistência à tração;
- Resistência ao choque;
- Tenacidade;
- Resistência ao desgaste.

1.4. Matrizes

Uma matriz é geralmente constituída por um núcleo de metal duro e uma carcaça de aço, podendo, no entanto ser fabricada apenas com o primeiro destes materiais. Na Figura 4 mostra-se o esquema em corte de uma matriz com núcleo de metal duro e carcaça de aço. As matrizes são utilizadas em diversas aplicações, por exemplo: para conformação a frio e a quente de ligas metálicas e outros materiais (ex: trefilagem e fabrico de parafusos), matrizes de prensagem (ex: pós cerâmicos, metálicos ou na indústria farmacêutica), matrizes de corte (indústria de embalagem). Na Figura 5 é possível observar o esquema de uma matriz de estampagem e na Figura 6 o de uma matriz de prensagem.



Figura 4 - Exemplo de uma matriz produzida na DURIT [1].

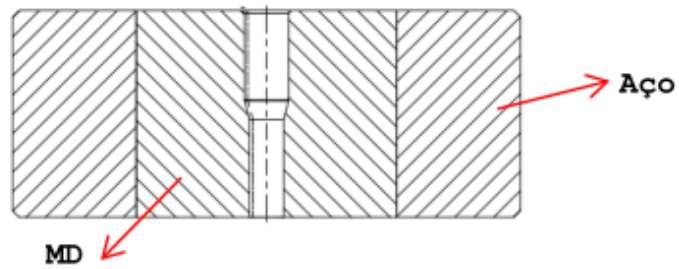


Figura 5 - Exemplo de uma matriz para estampagem.

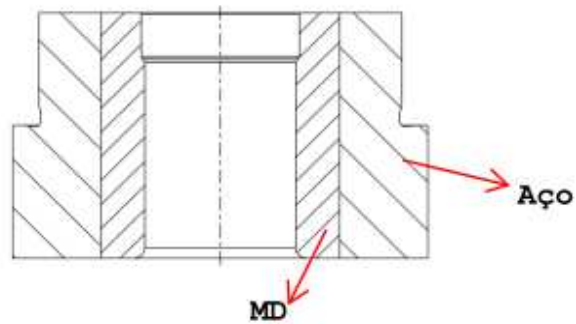


Figura 6 - Exemplo de uma matriz de prensagem.

O processo produtivo de uma matriz na DURIT envolve os clientes, os fornecedores de aços e empresas fornecedoras de serviços de tratamentos térmicos, encontrando-se representado esquematicamente na Figura 7.

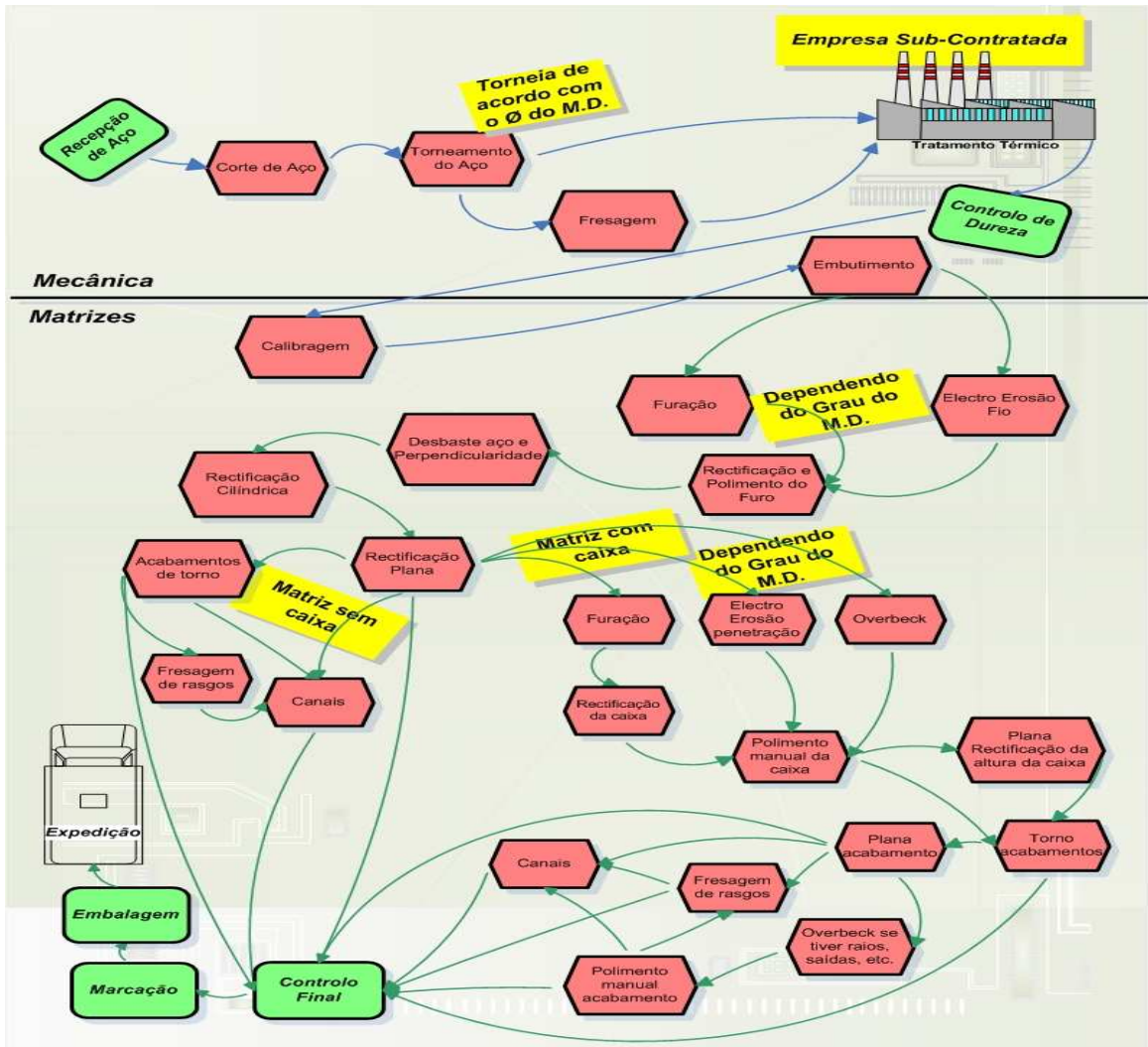


Figura 7 – Esquema representativo do processo produtivo de uma matriz na DURIT [9].

1.5. Embutimento

O embutimento é um método muito utilizado na união/montagem de componentes de secções redondas de metal duro no interior de peças em aço. É o processo ideal para a ligação de peças concêntricas. Os aços para embutimento deverão ter uma tenacidade elevada de forma a permitir uma boa “deformabilidade” sem rotura para a aplicação desejada [10].

Antes de se iniciar a explicação sobre os processos e etapas do embutimento é importante conhecer e diferenciar dois conceitos: *aperto* e *interferência*. Entende-se por

interferência a quantidade de sobreposição entre o núcleo de metal duro (MD) e o diâmetro interior da carcaça de aço [10], como se mostra esquematicamente com a Figura 8. Define-se aperto ou fator de interferência, como um valor empírico atribuído ao aço que permita que este resista aos esforços necessários para uma determinada aplicação. De uma forma mais simples o aperto é dado pelo rácio entre a interferência e o diâmetro exterior do MD. Assim se este for sujeito a pressões de trabalho baixas o valor do aperto dado é consequentemente baixo, <0,2%. Por outro lado se o MD estiver sujeito a pressões internas decorrentes da aplicação, o aperto deve ser mais elevado de forma a garantir que os esforços de tensão e torção não movam o núcleo de MD e assim não prejudiquem o funcionamento da ferramenta.

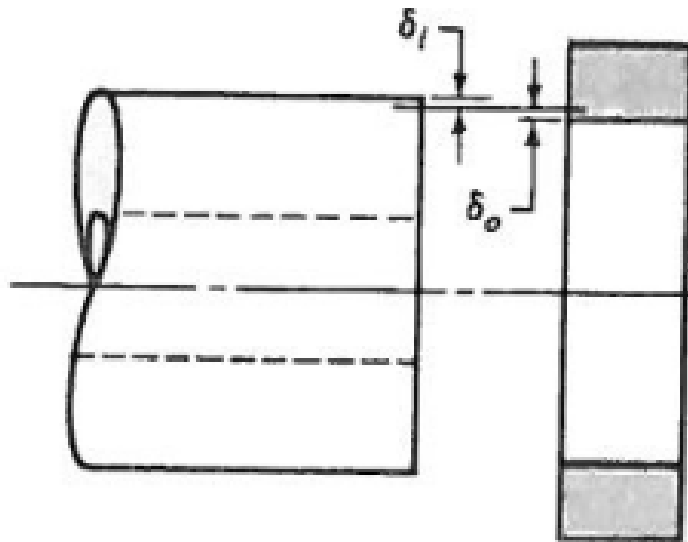


Figura 8 - Exemplificação do conceito de interferência [11].

Existem inúmeros aços ferramenta que podem ser utilizados em matrizes. Os aços designados pelos números 1.2344 e 1.2379 (norma EN 10025), são os de maior importância económica para a DURIT. O aço com o número 1.2344 é utilizado para aplicações de embutimento a quente, quando o esforço do metal duro durante a conformação dos componentes metálicos, na sua utilização é mais elevado. A funcionalidade das peças é garantida promovendo uma interferência elevada, pelo que é necessário utilizar um aço com elevada tenacidade e elevada tensão de cedência. Por outro lado quando o esforço transmitido pelo metal duro ao aço é reduzido e o desgaste do aço é

Capítulo 1 – Introdução

considerável utiliza-se o aço com o número 1.2379, precisamente por, de acordo com o fabricante do mesmo, garantir elevada resistência ao desgaste.

Na aplicação específica de embutimento de peças em metal duro podem ser utilizados dois tipos de operação na junção do aço ao metal duro: a frio (temperatura ambiente) ou a quente. Estas operações na DURIT são rotineiras, utilizando-se valores médios para o coeficiente de expansão térmica (CET) do aço e em que se definem apertos sem se conhecer a tensão de cedência do aço.

No embutimento a quente, o corpo de aço das matrizes é aquecido em forno a cerca de 500°C, para que a interferência definida desapareça com a expansão do aço, seguindo-se a montagem do corpo de metal duro no seu interior [1]. Antes de se fazer o embutimento de uma dada peça é necessário definir o aperto consoante a aplicação final. Assim, para uma matriz de prensagem o aperto mais usual é de 0,3%. Uma vez definido o aperto calcula-se a interferência a partir do diâmetro exterior do MD. Na Figura 9 encontram-se exemplificadas as etapas do ciclo de embutimento para os dados seguidamente apresentados:

- Diâmetro exterior do aço – 200mm;
- Diâmetro interior do aço – 100mm;
- Diâmetro exterior do MD – 100,3mm;
- Diâmetro interior MD – 30mm;

Com estes dados podemos calcular o valor da interferência como sendo:

$$\textit{Interferência} = \textit{aperto} \cdot \varnothing_{\textit{ext}} \textit{MD} \qquad \text{Equação 1}$$

onde o \varnothing_{ext} é considerado o diâmetro exterior

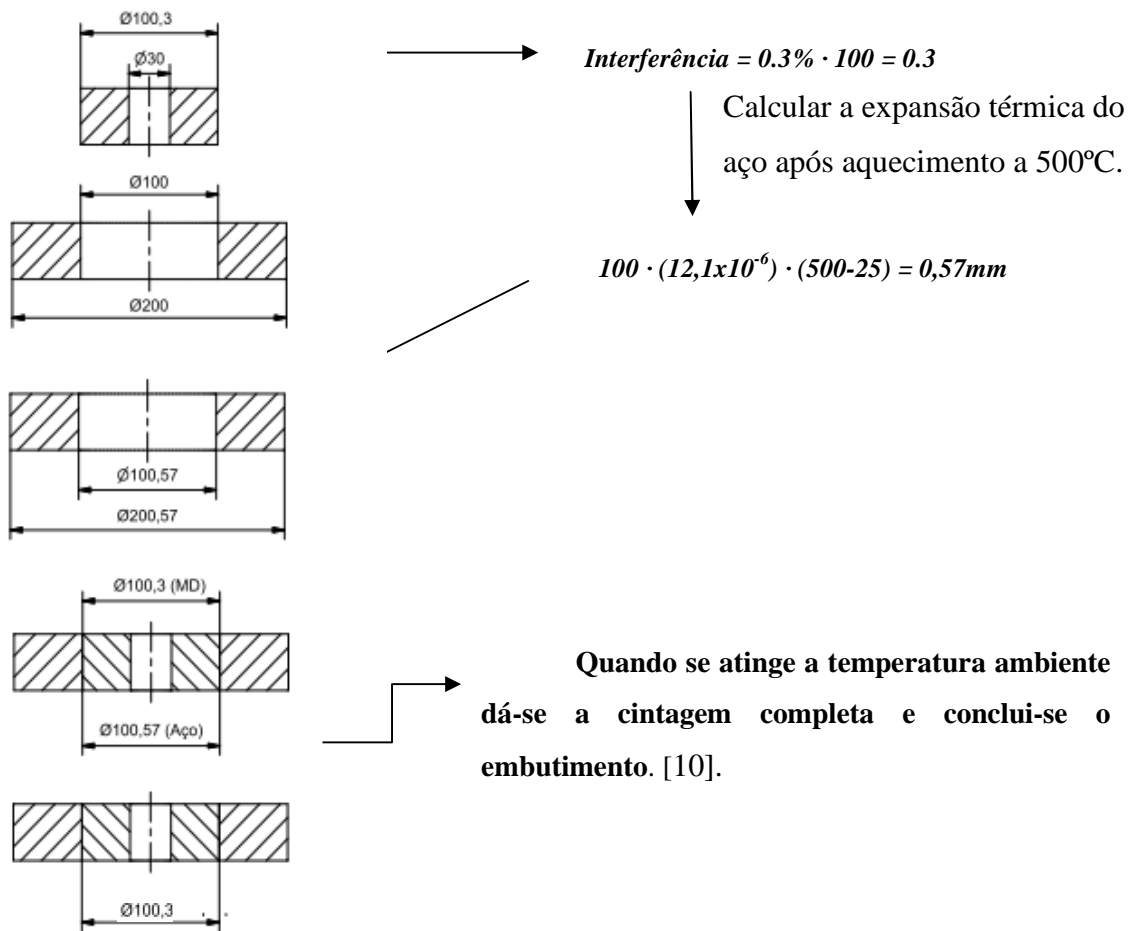


Figura 9 - Ciclo de embutimento a quente do aço 1.2344 [10].

Numa primeira instância é impossível inserir o núcleo de MD na carcaça de aço, devido ao diâmetro exterior do núcleo de MD ser superior ao diâmetro interior da peça de aço, impostas pela interferência/aperto estabelecidos previamente. Em seguida o aço é aquecido num forno (Figura 10) a uma temperatura fixa de 500°C, (sempre inferior à temperatura de revenido) durante 2h, para permitir a expansão do aço. Para prever a expansão que o aço vai sofrer é necessário ter em conta vários fatores, sendo eles: coeficiente de expansão térmica (CET), diâmetro do núcleo de MD e variação de temperatura. O CET nominal do aço 1.2344 no intervalo 20-500°C é de $12,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [12].



Figura 10 - Forno de aquecimento dos anéis de aço para embutimento a quente.

Uma das precauções a ter em conta antes de se iniciar o embutimento a quente é a curva de revenido do aço, de forma a não cometer erros, principalmente perda de dureza durante o aquecimento. Na Figura 11 pode observar-se a curva de revenido do aço 1.2344, curva essa que relaciona a dureza (em Rockwell C), com a temperatura deste tratamento térmico.

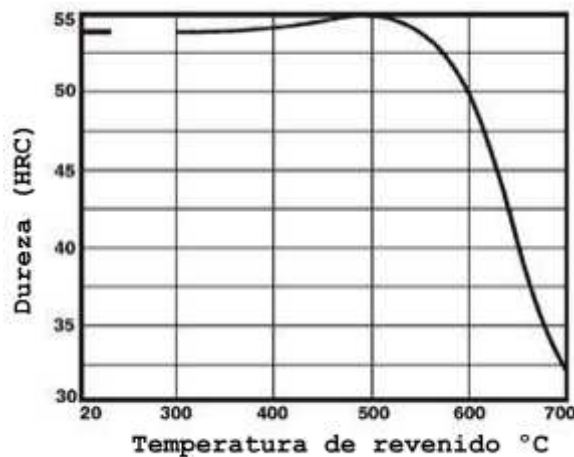


Figura 11 – Variação da dureza Rockwell C do aço 1.2344 com a temperatura de revenido [12].

Como é possível constatar pela Figura 11, o revenido deste aço começa a uma temperatura que ronda os 500°C, a partir da qual é possível ajustar a dureza para o valor desejado, através de uma diminuição do seu valor máximo conseguido por têmpera. Esta curva de revenido explica também o motivo pelo qual a DURIT fixou a temperatura máxima do forno para aquecimento do aço em 500°C.

O segundo tipo de embutimento que se pode realizar é a frio, à temperatura ambiente. Este é colocado em prática quando as propriedades do aço, nomeadamente a tensão de cedência ou dureza, se alteram significativamente com a temperatura de embutimento. Este é o principal motivo pelo qual o aço 1.2379 é embutido a frio, como se pode deduzir pela análise da sua curva de revenido, Figura 12.

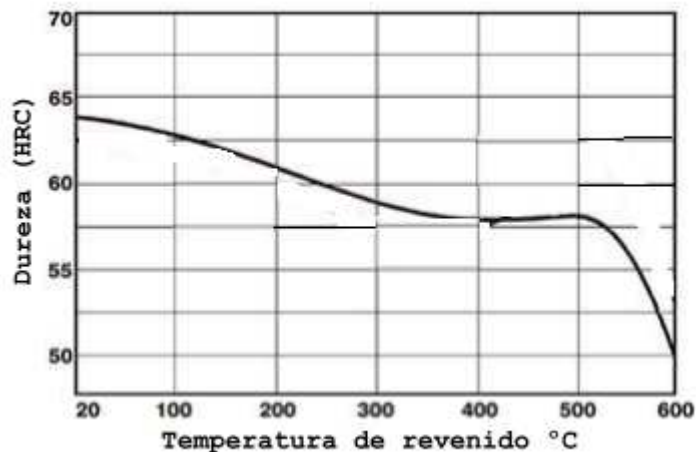


Figura 12 – Variação da dureza Rockwell C do aço 1.2379 com a temperatura de revenido [12].

Quando se aquece este aço acima da temperatura ambiente há diminuição de dureza, pelo que o embutimento a frio é a opção lógica. Para se proceder ao embutimento a frio é necessário seguir certas etapas de alguma forma semelhantes ao embutimento a quente. Assim inicialmente deve definir-se o aperto que é obrigatoriamente inferior ao definido para o embutimento a quente. Numa segunda etapa coloca-se tanto a carcaça de aço como o núcleo de MD numa prensa (Figura 13) e apenas recorrendo ao uso de pressão o núcleo de MD entra na carcaça de aço provocando uma expansão deste devido à interferência entre ambos, como se mostra visualmente com as fotografias da Figura 14.



Figura 13 - Prensa para executar o embutimento a frio.

De modo a exemplificar o processo de embutimento a frio, encontra-se representado na Figura 15 um esquema sequencial onde estão identificadas as principais etapas desse processo, que é esquematicamente apresentado com um exemplo na Figura 16.



Figura 14 – Etapas do ciclo de embutimento a frio.

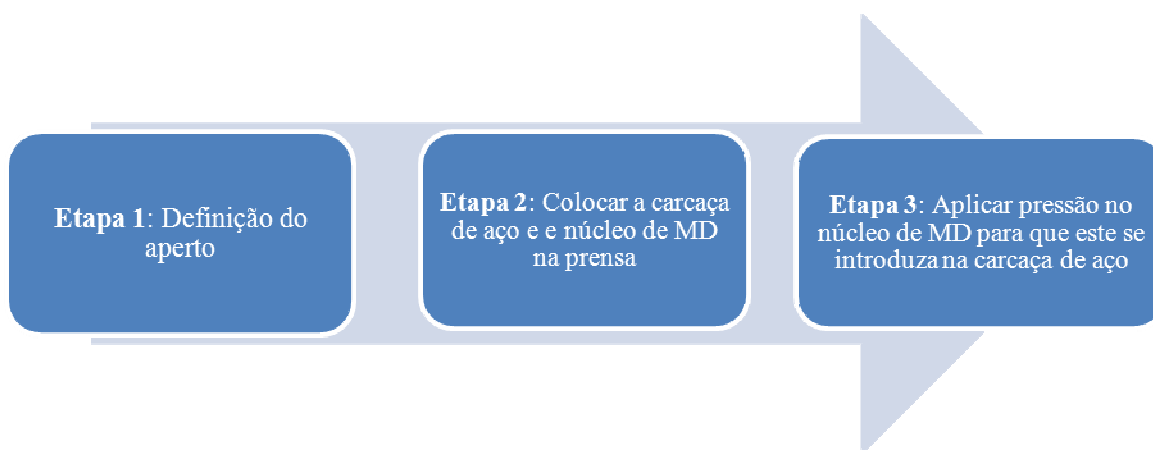


Figura 15 - Ciclo de embutimento a frio.

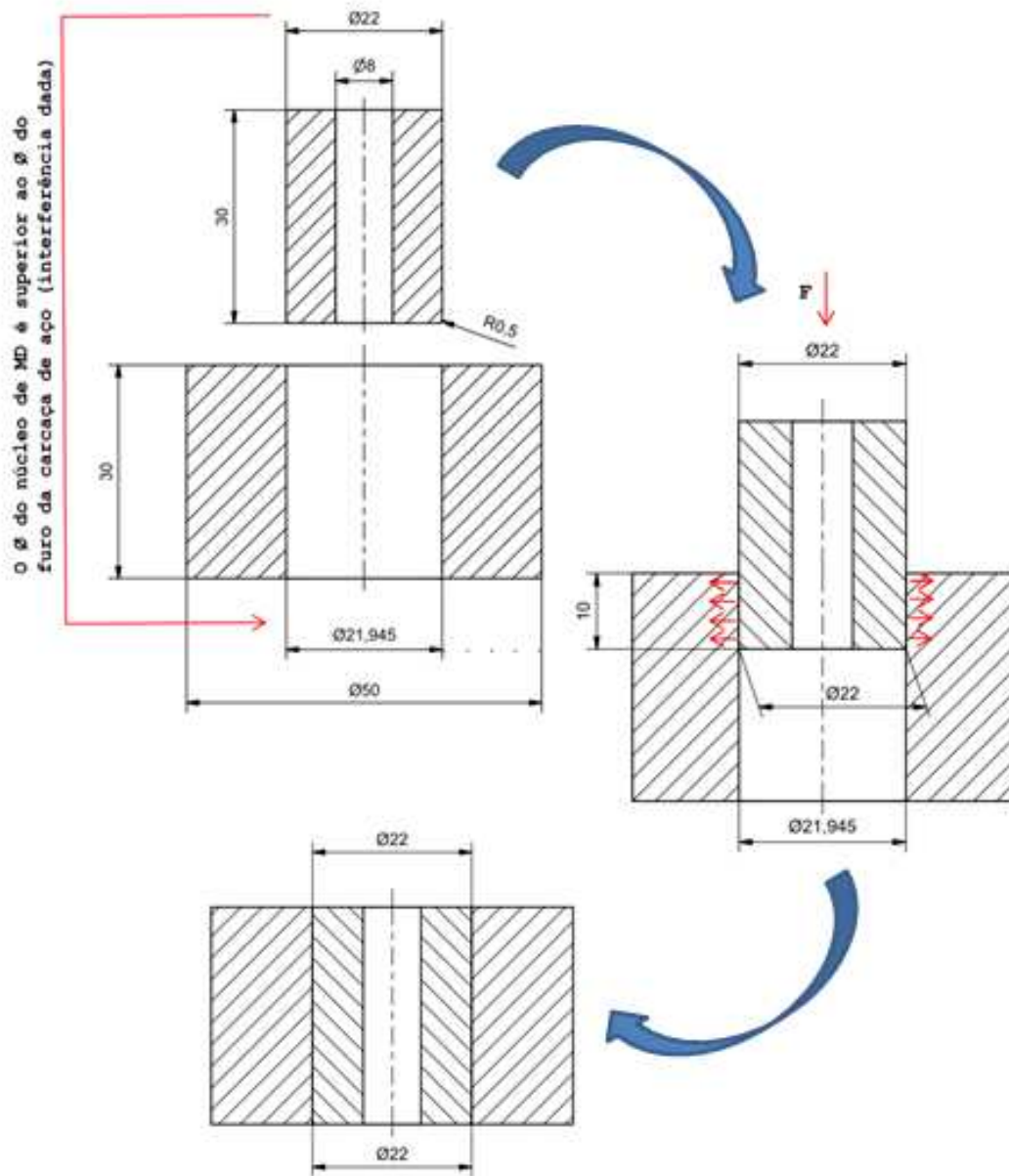


Figura 16 - Esquema exemplificativo do embutimento a frio.

A decisão pelo tipo de embutimento, a quente ou a frio, é condicionada por alguns fatores, nomeadamente:

- Especificação do cliente;
- Tipo de aço que se pretende utilizar;

- Temperatura de utilização da peça;
- Revestimento ou não da ferramenta;

De acordo com a literatura o cálculo da interferência no embutimento a frio para se obter uma dada pressão de contacto pode ser efectuado tendo por base a equação de Lamé [13].

$$\delta = \frac{bP}{E_s} \left(\frac{b^2 + c^2}{c^2 - b^2} + \mu_s \right) + \frac{bP}{E_c} \left(\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} - \mu_c \right) \quad \text{Equação 2}$$

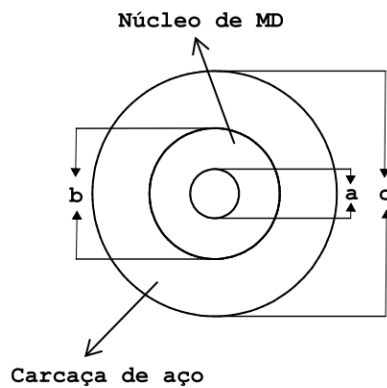


Figura 17 - Parâmetros para a equação de Lamé [13].

Onde: δ – Interferência entre diâmetros; P – pressão entre cilindros; μ_s – coeficiente de Poisson do aço; μ_c – coeficiente de Poisson do MD; E_s Módulo de Young do aço; E_c Módulo de Young do MD estando identificados os restantes parâmetros na Figura 17.

a – diâmetro do furo de MD; b – diâmetro exterior do MD; c – diâmetro exterior do aço;

Para o caso do núcleo de MD não ter furo, a tensão tangencial na peça de aço é dada por:

$$\sigma_t = \frac{P(b^2 + c^2)}{c^2 - b^2} \quad \text{Equação 3}$$

A força compressiva existente no interior do MD pode ser calculada pela equação:

$$\sigma_t = \frac{-zPb^2}{b^2 - a^2} \quad \text{Equação 4}$$

Como todas as operações que exigem rigor, o embutimento acarreta alguns cuidados que se devem levar em conta de modo a evitar erros. Os principais erros que podem ocorrer são:

- a falta de aperto, o que leva a que o núcleo de MD não fique bem fixo e se desprenda durante a utilização da peça;
- o aperto exagerado que pode provocar uma possível rotura do núcleo de MD devido à força compressiva excessiva exercida pelo aço;
- fratura da carcaça de aço caso o aperto seja excessivo.

Na Figura 18 podem ser observadas fotografias de peças que falharam devido a erros de embutimento. O aperto de uma peça deve ser muito bem definido para não causar danos irreparáveis na peça final, mas sobretudo é necessário conhecer o comportamento mecânico dos aços, nomeadamente a sua tensão de cedência e resistência à tração para que os fatores de segurança do material sejam bem definidos.



Figura 18 – a) Matriz fissurada na carcaça de aço devido a aperto excessivo; b) Matriz fissurada no núcleo de MD devido a aperto excessivo

Capítulo 1 – Introdução

Para além dos aços mencionados anteriormente, existe uma diversidade de outros que podem ser utilizados para o embutimento, quer seja a frio ou a quente. A Tabela 2 enumera alguns desses aços usados pela DURIT. A menor utilização destes ou a sua não utilização prende-se com diversos fatores, nomeadamente o custo, a dificuldade de maquinação, as propriedades que estes oferecem, a não solicitação pelo cliente.

Tabela 2 - Quadro resumo de aços utilizados para embutimento [14].

Aços para trabalho a quente	Aços para trabalho a frio
1.2311	1.2080
1.2714	1.2210
1.2738	1.2510
1.7225	

**CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO
DE DOIS AÇOS UTILIZADOS NO
EMBUTIMENTO**

Capítulo 2 – Caracterização de dois aços utilizados no embutimento

Como se percebe da descrição da operação de embutimento, a DURIT utiliza condições estabelecidas empiricamente para os apertos/interferência, não se tendo noção dos valores das tensões de cedência dos aços nos diversos estados de dureza definidos.

Este trabalho tem como objetivo aprofundar conhecimentos no domínio técnico dos produtos fabricados pela empresa, nomeadamente no que toca a matrizes. Em particular o estudo incidirá sobre os produtos mais relevantes, pretendendo-se perceber como a microestrutura e propriedades mecânicas (tensão de cedência, dureza, tenacidade), podem afetar o comportamento das matrizes durante a operação de fabrico.

2.1 Definição dos aços a utilizar

Os aços escolhidos para este trabalho foram os aços números 1.2344 e o 1.2379, uma vez que apresentam propriedades nominais distintas a nível de resistência às diferenças de temperatura, tenacidade e ductilidade, que fazem destes os mais utilizados para embutimento na DURIT. Estes aços podem ter diversas designações consoante a norma utilizada. Na Tabela 3 é possível comparar-se as várias designações, mediante a norma. Ambos os aços, de marca Bohler, foram adquiridos à empresa *Universal Afir*. A composição química nominal destes aços deve estar compreendida em entre os valores apresentados nas Tabela 4.

Tabela 3 - Nomenclatura dos aços utilizados [12].

Material	Euronorm	AISI	DIN
1.2344	X40CrMoV5-1-1	H13	X40CrMoV5-1
1.2379	X160CrMoV12-1	D2	X155CrVMo12-1

Tabela 4 - Composição química nominal dos aços a utilizar [12].

	Elemento Químico (%peso)	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
1.2344	Máximo	0.43	1.20	0.50	5.50	1.50	1.10	0.03	0.03
	Mínimo	0.37	0.90	0.30	4.80	1.20	0.90	-	-
1.2379	Máximo	1.65	0.40	0.50	13.00	0.90	1.00	0.03	0.03
	Mínimo	1.45	0.10	0.15	11.00	0.60	0.70	-	-

Conforme se pode observar na Tabela 4 o aço 1.2379 apresenta uma quantidade de carbono e de elementos carburígenos superiores ao 1.2344 o que permite obter tensões de cedência mais elevadas após tratamento térmico de têmpera devido essencialmente à presença de carbono e carbonetos. Todavia esse aumento de dureza torna o material mais frágil, pelo que é necessário ter este fator em atenção aquando do embutimento, no desenho dos fatores de segurança, tanto em termos de tensão como de deformação total admissível.

A análise das propriedades mecânicas dos aços em estudo será realizada tendo por base diferentes durezas a serem garantidas pelo fornecedor responsável pelos tratamentos térmicos. Estes valores são pré-selecionados por clientes e especificados pela DURIT, estando identificados na Tabela 5 os valores de dureza Rockwell de utilização mais comum, incluindo-se neste estudo os aços no estado recozido para comparação.

Tabela 5 - Durezas pretendidas dos aços para os diversos ensaios.

1.2344	Recozido	46-49HRC	50-52HRC
1.2379	Recozido	56-58HRC	60-62HRC

A correta transformação de fases durante o tratamento térmico de têmpera acarreta alguns cuidados na temperatura de austenitização, sua duração, na velocidade de aquecimento e sobretudo na velocidade de arrefecimento. Assim é importante ter em atenção as curvas TTT (time-temperature-transformation) e CCT (continuous cooling

transformation) de ambos os aços que mapeiam as velocidades que permitem as transformações de fases adequadas durante a têmpera e assim a dureza máxima a partir da qual se fará a operação de revenido para a as durezas pretendidas.

A transformação da austenite em martensite é a responsável pelo aumento de dureza durante o tratamento térmico de têmpera. De acordo com o fabricante dos aços, a Bohler, os diagramas TTT e CCT para o aço 1.2344 podem ser consultado nas Figuras 19 e 20 respetivamente e, para o aço 1.2379 nas Figuras 21 e 22. De modo a obter a estrutura bem como a dureza pretendida, a têmpera é realizada aquecendo o aço até ao campo austenítico, seguindo-se o arrefecimento rápido, devendo esse ultrapassar sempre a linha Ms, para que a estrutura se torne a martensítica.

Com o objetivo de se reduzirem as tensões internas decorrentes da têmpera e ajustar a dureza e portanto a tensão de cedência do aço para os valores pretendidos, são realizados um ou mais revenidos. Deste modo obtém-se uma estrutura de martensite revenida que tem como vantagem tensões internas mais reduzidas o que implica uma maior estabilidade dimensional, originando assim menores erros devido a fratura e/ou falhas decorrentes do tratamento térmico [15].

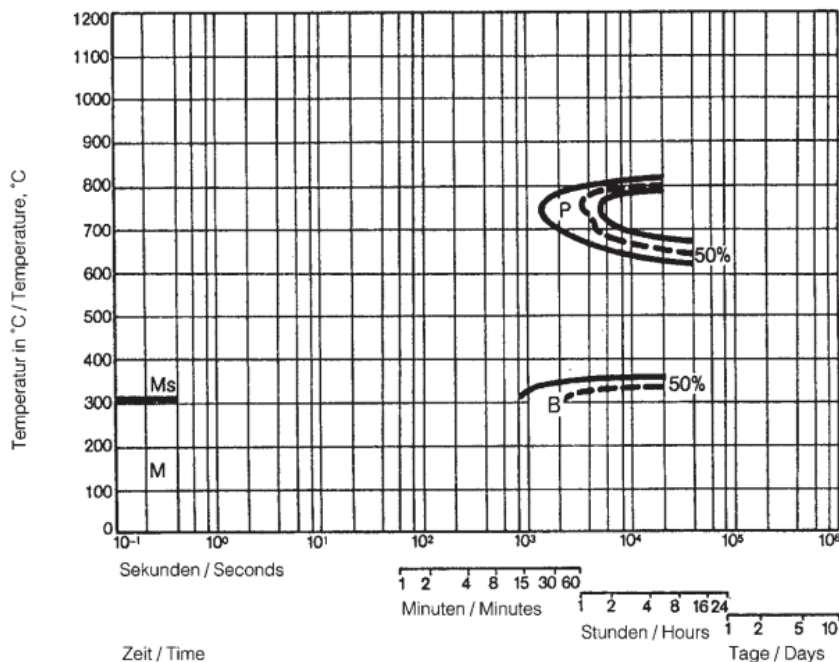


Figura 19 - Diagrama TTT para o aço 1.2344 com uma temperatura de austenitização de 1020°C [12] onde “P” é Perlite, “B” Bainite e “M” Martensite.

Capítulo 2 – Caracterização de dois aços utilizados no embutimento

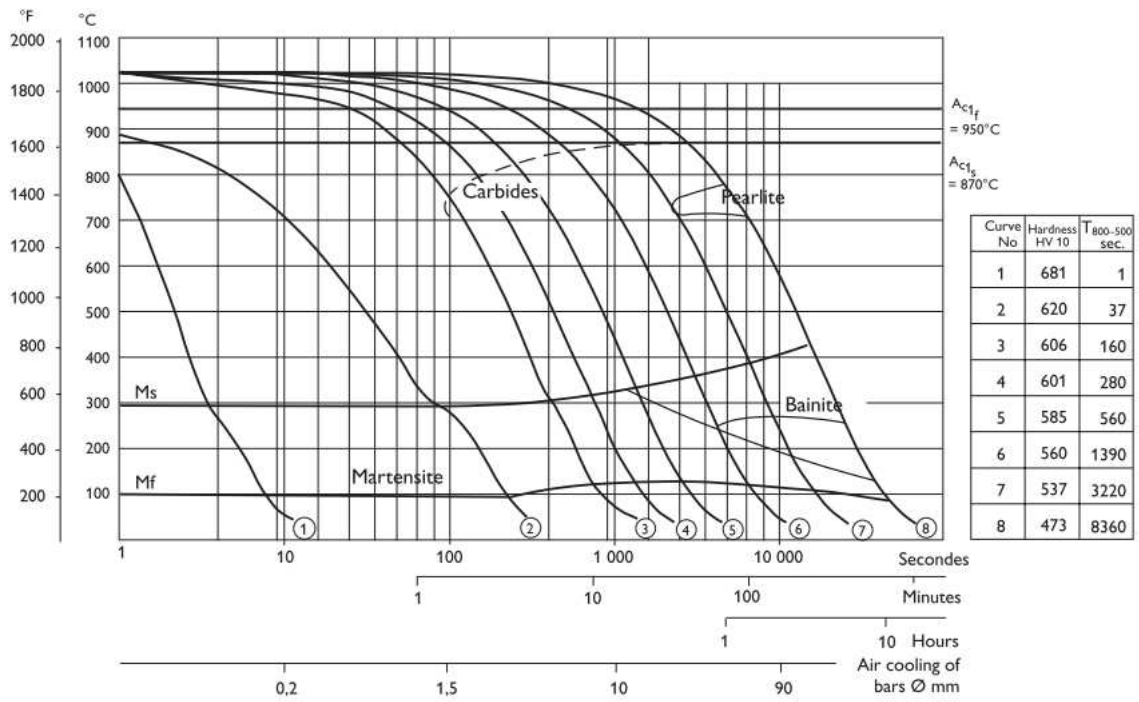


Figura 20 - Diagrama CCT para o aço 1.2344 com uma temperatura de austenitização de 1020°C [12].

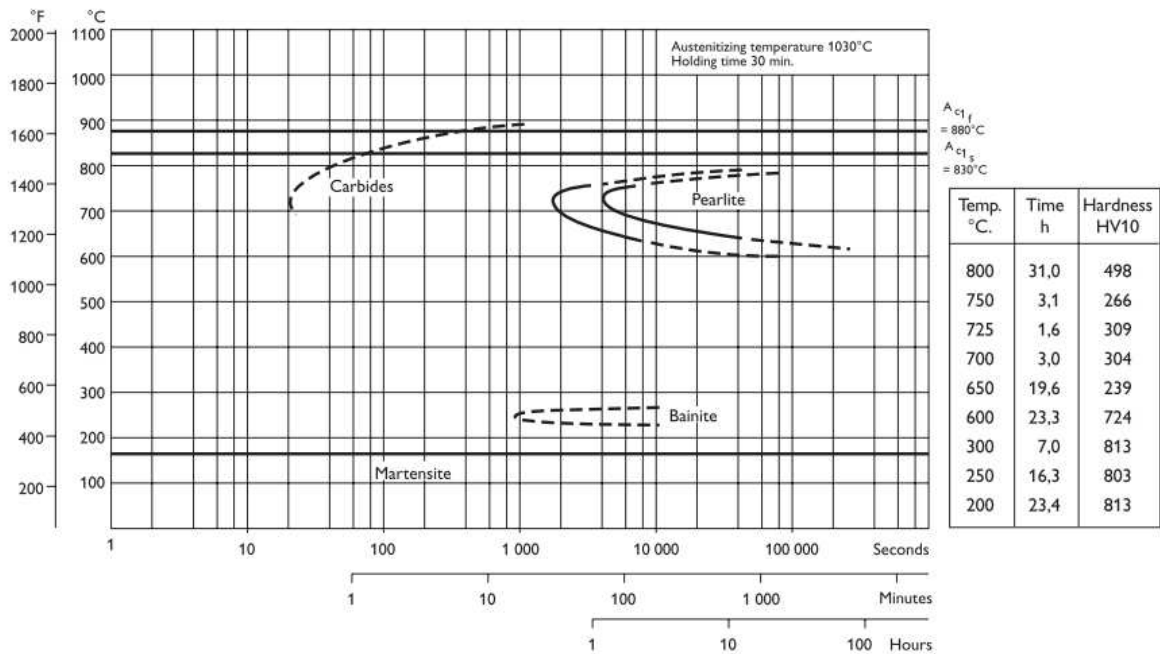


Figura 21 - Diagrama TTT para o aço 1.2379 com uma temperatura de austenitização de 1030°C [12].

Capítulo 2 – Caracterização de dois aços utilizados no embutimento

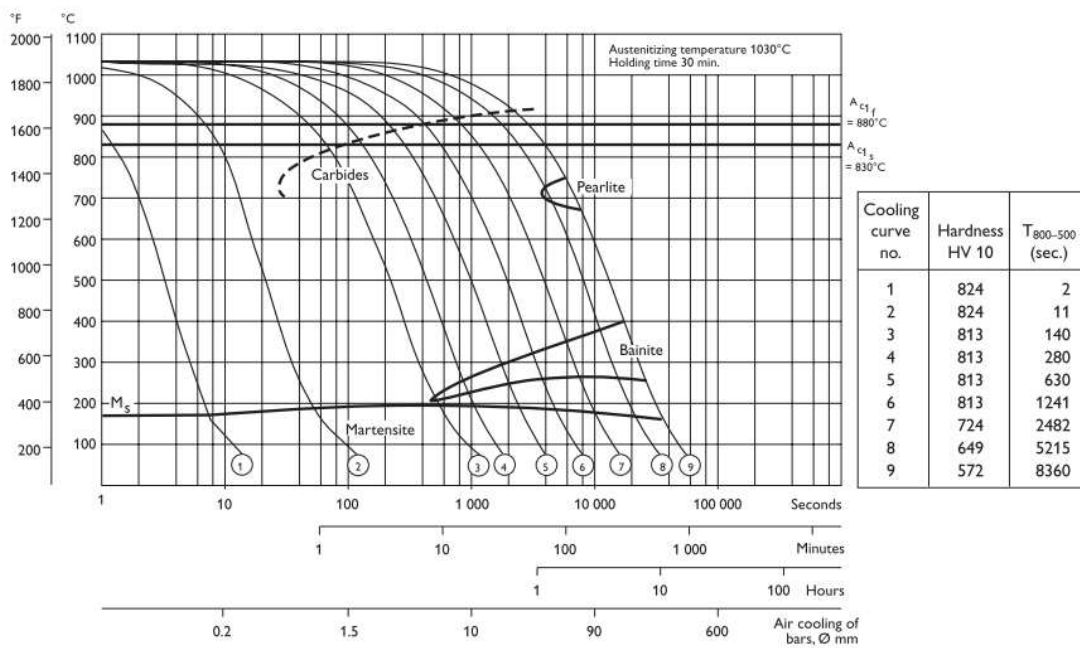


Figura 22 - Diagrama CCT para o aço 1.2379 com uma temperatura de austenitização de 1030°C [12].

Para além da interpretação dos diagramas CCT e TTT e de modo a explicar mais facilmente os tratamentos térmicos de ambos os aços para se obter as durezas pretendidas, explica-se de seguida os perfis térmicos desses aços. Na Figura 23, encontra-se o ciclo de tratamento de têmpera para o aço 1.2344. O aquecimento foi realizado em atmosfera controlada de azoto e realizaram-se dois patamares de temperatura para permitir uma boa homogeneização térmica de toda a peça a tratar. Com o aquecimento, o aço atinge a temperatura de austenitização (1020°C, acima de A_{c1f} , Figura 20), sendo então mantido durante o tempo necessário para obtenção de uma estrutura totalmente austenítica, neste caso cerca de 40min. Durante a austenitização a matriz ferrítica converte-se numa matriz austenítica promovendo que os carbonetos mais finos e a cementite existentes dissolvem-se.

Para se temperar o aço e após a definição da temperatura de austenitização é necessário definir o arrefecimento. O objetivo primordial é arrefecer o aço o mais lentamente possível, mas sempre tendo em conta que as curvas de perlite e bainite não sejam atravessadas [16]. Neste caso em específico esse arrefecimento foi realizado em azoto com uma pressão de 3bar.

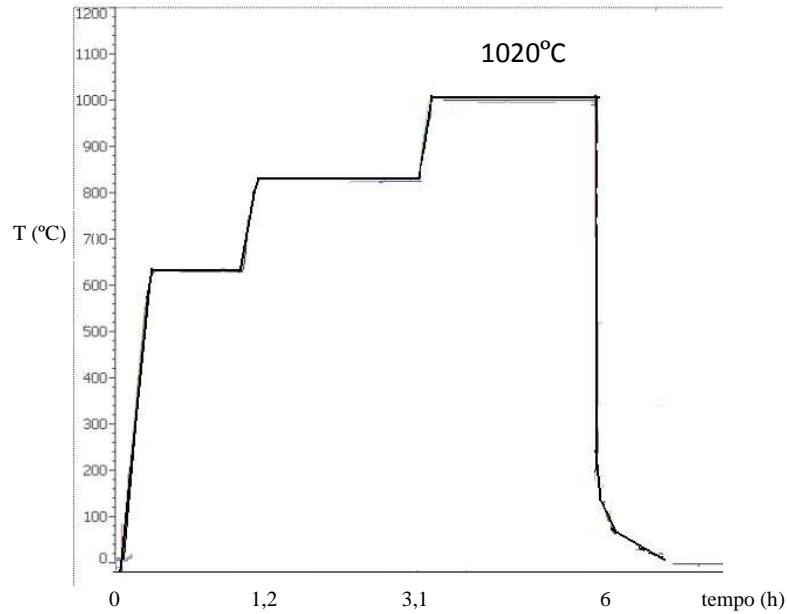


Figura 23 - Ciclo de térmico de têmpera para o aço 1.2344 [17].

Como se pretendia caracterizar este aço com níveis de durezas diferentes, efetuaram-se dois revenidos para cada nível de dureza a temperaturas distintas. O revenido serve para aliviar tensões decorrentes da têmpera, acertar a dureza pretendida, diminuir a fragilidade e aumentar conseqüentemente a plasticidade e a resistência ao impacto. Na Figura 24 encontra-se o diagrama de revenido para o nível de dureza 46-49HRC e na Figura 25 para o nível de dureza entre 50-52HRC.

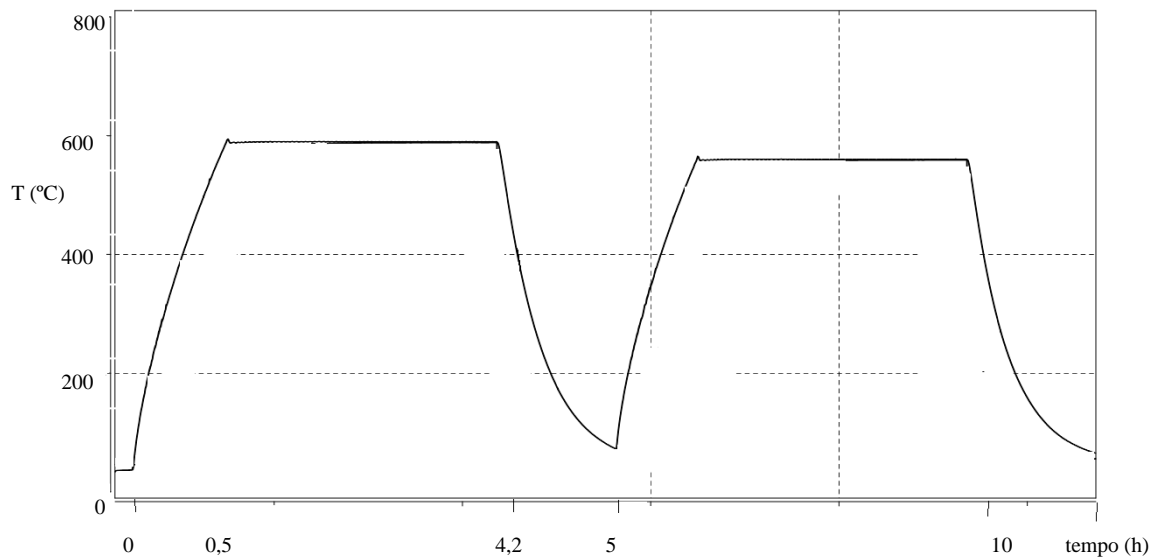


Figura 24 – Ciclo térmico de revenido para o aço 1.2344 com 46-49HRC [17].

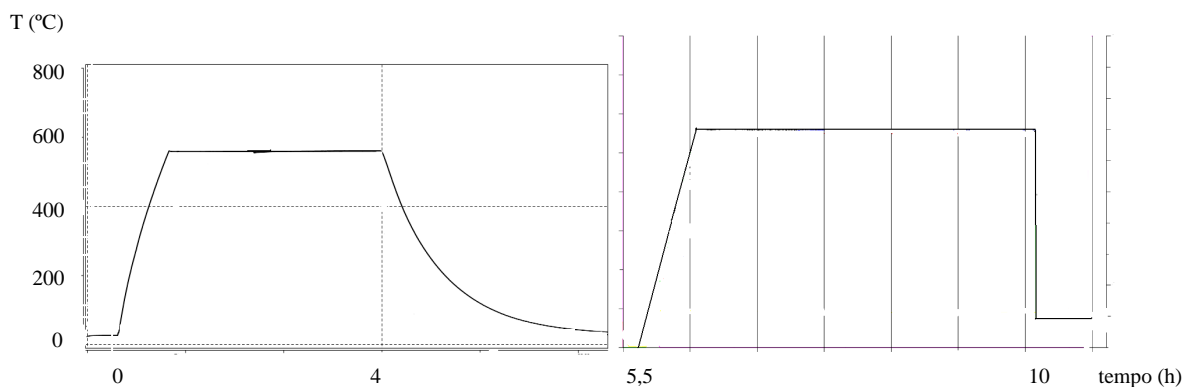


Figura 25 – Ciclo térmico de revenido para o aço 1.2344 com 50-52HRC [17].

É de salientar as diferenças, ainda que não muito acentuadas, entre as temperaturas de revenido deste aço para se obterem materiais com durezas distintas. Assim temos:

- 1.2344 para 50-52HRC - revenidos a 560°C e 570°C, com duração de 10 horas;
- 1.2344 para 46-49HRC - revenidos a 590° e 560°, com duração de 10 horas.

A relação entre a temperatura de revenido e a dureza que se pretende obter pode ser observada na Figura 11, comprovando que as temperaturas escolhidas garantirão as durezas pretendidas.

Relativamente ao aço 1.2379 e à sua curva de tratamento térmico (Figura 26), é de referir que a temperatura de austenização foi de 1050°C. Como sucedeu com o aço 1.2344, para este aço também foi necessário realizarem-se dois patamares antes de se atingir a temperatura de têmpera de forma a uniformizar a temperatura do corpo a tratar. O estágio a temperatura de têmpera foram semelhantes ao anterior diferindo apenas pressão aplicada para o arrefecimento, neste caso 4bar, o que permite velocidades de arrefecimento mais elevadas.

Este aço é utilizado sobretudo para trabalho a frio tendo a temperatura de revenido substancialmente inferior à do aço 1.2344, como se pode confirmar pela comparação das Figuras 11 e 12. Assim o ciclo térmico de revenido utilizou as seguintes temperaturas:

- 1.2379 para 60-62HRC - revenidos a 510°C e 200°C (Figura 27);
- 1.2379 para 56-58HRC - revenidos a 530°C e 200°C (Figura 28).

Capítulo 2 – Caracterização de dois aços utilizados no embutimento

O segundo revenido a 200°C garante a minimização de problemas de fragilização normalmente associadas a este aço quando sujeito a tratamentos térmicos entre 230°C e 360°C. O segundo revenido é realizado a uma temperatura mais baixa para evitar o crescimento de grão excessivo. Para este aço, ambos os ciclos de revenido tiveram a duração de 8 horas.

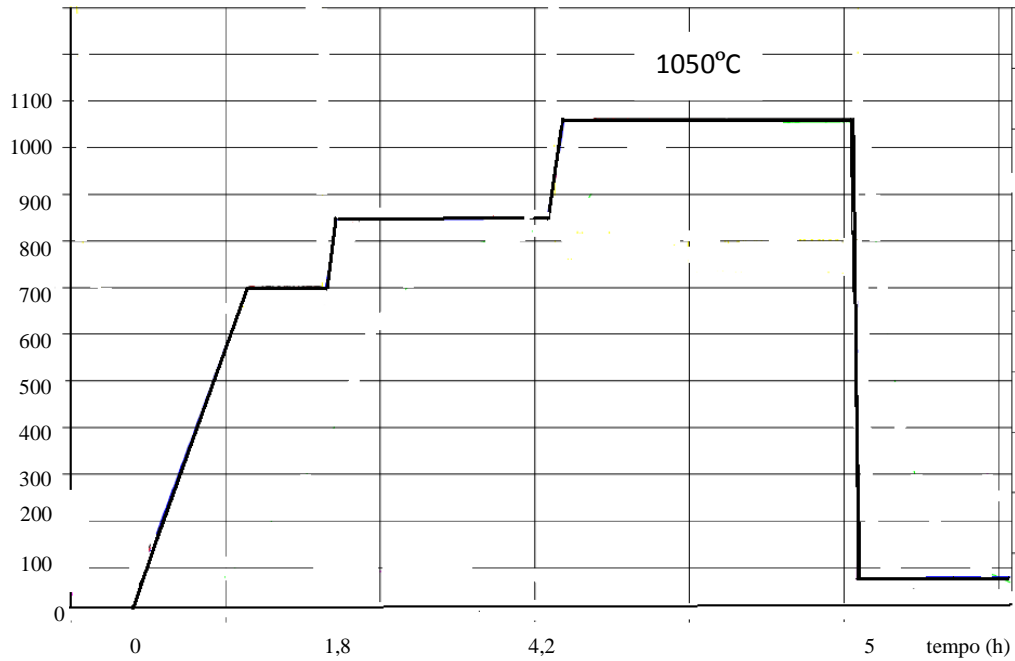


Figura 26 - Ciclo térmico de têmpera para o aço 1.2379 [17].

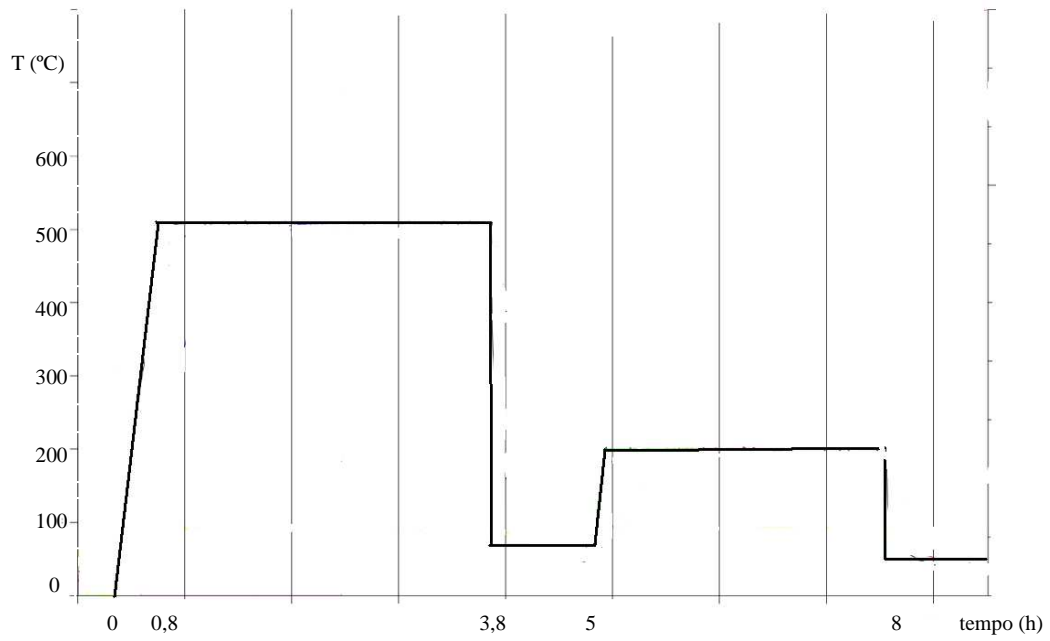


Figura 27 – Ciclo térmico de revenido para o aço 1.2379 com 60-62HRC [17].

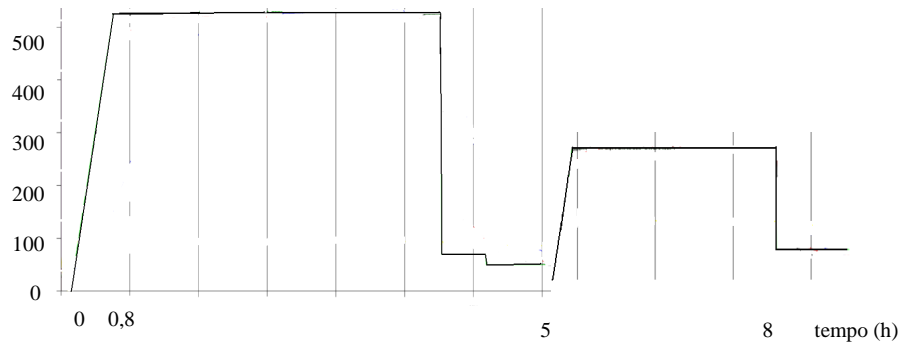


Figura 28 – Ciclo térmico de revenido para o aço 1.2379 com 56-58HRC [17].

Apesar de existirem já há vários anos e de os tratamentos térmicos serem aparentemente canônicos, a importância destes aços ferramenta nos dias que correm é fundamental e pode ser constatada pelos vários trabalhos que têm vindo a ser publicados e em particular sobre estes dois materiais [18-21]. Estes trabalhos visam essencialmente novas formas de otimizar a utilização destes aços através de alterações no tratamento térmico, quer seja na temperatura de austenização, número de revenidos, tempo de estágios. Estes estudos visam nomeadamente novas formas de tratamento térmico e o modo como estes alteram propriedades como resistência ao desgaste, à corrosão, tenacidade à fratura e tensão de cedência, etc. No caso do aço 1.2344, os estudos incidem sobre tratamentos térmicos alternativos, como o tratamento sub zero (tratamento criogénico superficial e profundo), uma vez que este propicia uma transformação da austenite residual após têmpera. Este tratamento realiza-se a temperaturas entre -60°C e -80°C , dependendo do material e parâmetros de têmpera [18]. Assim com este método conseguiu-se estabelecer que este tratamento é mais eficaz que o tratamento de têmpera mais convencional, pois permitiu obter peças com maior tensão de cedência e elevada resistência ao desgaste [19] e poderá ser uma alternativa a estudar num futuro próximo na DURIT.

Não só o aço 1.2344 tem sido alvo de estudo mas o 1.2379, para trabalho a frio, tem sido analisado a fundo precisamente para avaliar alternativas que permitam a melhoria das suas propriedades mecânicas. A avaliação de parâmetros microestruturais torna possível analisar se as propriedades do aço são melhoradas. Os estudos incidem na tentativa de reduzir a austenite retida o que provocará o endurecimento do material pois esta iria transformar-se em martensite [20-21]. Para além dos estudos envolvendo tratamentos térmicos alternativos, a influência do revenido bem como o efeito que este provoca na precipitação de carbonetos secundários tem sido investigada por meio de simulações com base numa descrição termodinâmica juntamente com parâmetros cinéticos através de multicomponentes de nucleação e modelos de crescimento [22]. As simulações pretendiam reproduzir os efeitos da composição do aço sobre a precipitação de carbonetos secundários. O Si e o V aumentam a fração de volume de carbonetos finos secundários precipitados durante a têmpera, desde que a temperatura austenitização seja ajustada para dar a mesma fração de carbonetos primários retidos. O efeito mais importante de Si em aços com 5% Cr

Capítulo 2 – Caracterização de dois aços utilizados no embutimento

é a influência que este promove sobre a estabilidade de carbonetos primários a temperaturas de austenitização. Contudo aumentando o conteúdo em V, ocorre um forte efeito sobre a fração de carbonetos secundários, sem aumentar o tamanho podendo-se, assim, melhorar o seu rendimento.

Capítulo 2 – Caracterização de dois aços utilizados no embutimento

CAPÍTULO 3 – PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Capítulo 3 – Procedimento Experimental

3.1 Análise Microestrutural

Quando um material é sujeito a tratamentos térmicos como a têmpera, recozimento, normalização e revenido, a análise microestrutural permite acompanhar as transformações estruturais de forma qualitativa, identificar as fases formadas, a presença de defeitos e o tamanho de grão. Uma das técnicas mais simples e eficazes para a caracterização de materiais é a análise microestrutural, tanto por meio de microscopia ótica, como por meio de microscopia eletrônica de varrimento. O recurso a este método é fundamental quando se pretende relacionar adequadamente as propriedades mecânicas dos aços com as suas microestruturas [23].

Antes de se observarem os provetes por microscopia foi necessário efetuar o polimento mecânico da sua superfície para diminuir a rugosidade e eliminar a camada de óxidos. Assim foram realizados dois polimentos: um grosseiro (com 4 discos – P180, P320, P600 e P1200) e um polimento fino (com panos a que se adicionou pasta diamantada). Os provetes foram especialmente preparados, tendo as dimensões Ø20x10mm. Para a observação foi necessário efetuar um ataque químico, neste caso foi utilizado solução de Nital 2% (2% ácido nítrico e 98% etanol), de forma a ser possível realçar as fronteiras de grão e os constituintes microestruturais [24].

3.2 Ensaio de Dureza

Este é o tipo de ensaio de caracterização das propriedades mecânicas mais utilizado na indústria metalúrgica e metalomecânica uma vez que permite um rápido controlo da qualidade de materiais e de processos [25]. A dureza, propriedade que um material apresenta relativamente à resistência à penetração da sua superfície [26], é uma medida aproximada da tensão de cedência de um material. No contexto deste trabalho o único método do ensaio de dureza realizado foi o Rockwell C. Este ensaio é um dos mais utilizados na indústria por ser de fácil execução, não necessitando de operadores qualificados para o realizar, é realizado num curto espaço de tempo, geralmente entre 5 a 10s e os valores são obtidos diretamente a partir da medição da profundidade de penetração. Além disso este ensaio permite medir a dureza da maioria dos metais e ligas

metálicas, desde os mais macios aos mais duros, alterando-se apenas o tipo de indentador [27].

O princípio deste ensaio, (em particular Rockwell C) consiste em aplicar na camada superficial da peça a ensaiar um penetrador, neste caso um cone de diamante, com um ângulo de 120° , submetendo-o inicialmente a uma carga pequena $F_0=10\text{Kgf}$, que garante uma justaposição perfeita do penetrados à superfície a ensaiar de modo a eliminar defeitos de superfície e mecânicos do equipamento [26]. Posteriormente é aplicada outra carga, $F_1=140\text{Kgf}$ (maior que a inicial), que é somada à F_0 , originando assim a força total $F=150\text{Kgf}$ [26]. Na terceira fase deste processo, após se manter durante um dado período de tempob a força F aplicada, retira-se a força adicional F_1 , nesse momento verifica-se uma recuperação elástica do material e após a subida do indentador lê-se, o valor de dureza Rockwell obtida [26]. Na Figura 29 pode observar-se com mais detalhe esta sequência. Os ensaios de durezas cumpriram os requisitos da norma *ASTM E-18*.

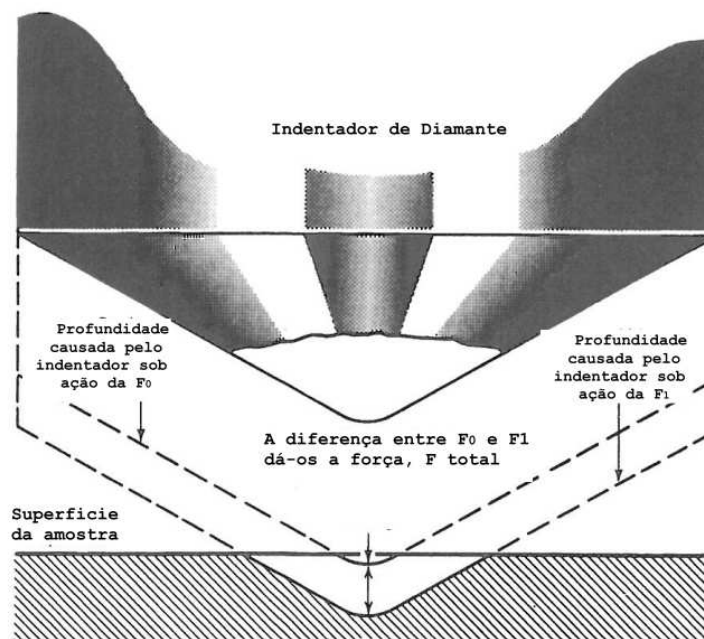


Figura 29 - Princípio de funcionamento do ensaio de dureza Rockwell C [26].

Após o polimento das amostras, foram efetuadas 5 indentações nos provetes (Figura 30) utilizando um equipamento Zwick/Roel (Figura 31), aplicando a carga de 150Kgf correspondente à escala Rockwell C.



Figura 30 – Aspeto de um provete do aço 1.2344 após o ensaio de dureza Rockwell C.



Figura 31 - Equipamento utilizado para o ensaio de dureza.

3.3 Ensaio de tração uniaxial

O ensaio de tração uniaxial é um ensaio amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos devido às vantagens de fornecer dados quantitativos das características mecânicas (nomeadamente tensão de cedência, resistência à tração, extensão na rotura e módulo de Young) dos materiais [27]. Este ensaio consiste na aplicação de carga de tração uniaxial, continuamente crescente, num provete de dimensões

normalizadas, até à sua rotura. À medida que o ensaio decorre, registam-se os valores da força aplicada e o alongamento sofrido pelo provete. A apresentação dos valores do ensaio é realizada através de um gráfico tensão versus extensão. Os ensaios foram realizados segundo a norma *ASTM A 370-E8* [26]. Os provetes utilizados apresentam geometria cilíndrica, com as dimensões indicadas na Figura 32. Estes foram torneados com uma rugosidade final de 0,6.

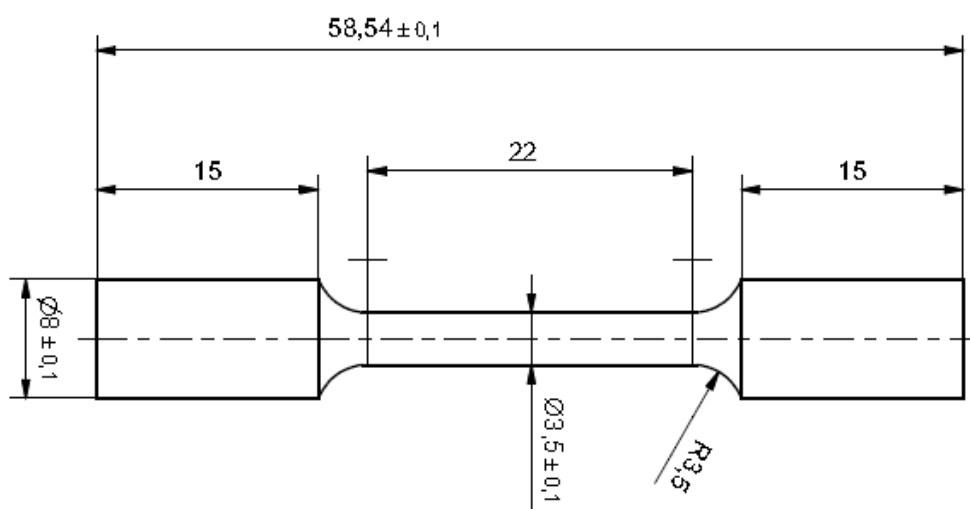


Figura 32 - Provete para ensaio de tração uniaxial.

Este ensaio foi realizado num equipamento Zwick/Roel (Figura 33) com uma célula de carga de 20kN. O ensaio realizou-se a uma velocidade de 0,5mm/min, utilizando uma pré carga de 10N. Foram ensaiados dois provetes dos seis materiais diferentes, com durezas nominais mencionadas na Tabela 5.

A extensão nominal foi calculada com base na expressão:

$$e = \frac{l - l_0}{l_0} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

l – comprimento após ser aplicada uma dada carga;

l_0 – comprimento inicial do provete.

Capítulo 3 – Procedimento Experimental

De igual forma também se pode calcular a tensão nominal, tendo como referência a força aplicada num determinado instante, sendo assim:

$$S = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 6}$$

Onde F é a força aplicada e A a área nominal da secção do provete cilíndrico no início do ensaio. Se a curva (S vs e) do ensaio de tração for traçada, esta não fornece informação real das características de tensão e deformação do material, por se basear apenas nas dimensões iniciais do provete. Durante o ensaio de tração há uma diminuição da área do provete. A equação 7 fornece informação para o cálculo da extensão real, enquanto que a equação 8 fornece informação para calcular a tensão real.

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad \text{Equação 7}$$

$$\sigma = S(1 + e) \quad \text{Equação 8}$$



Figura 33- Equipamento utilizado para o ensaio de tração uniaxial.

3.4 Ensaio de tenacidade (Charpy)

De todos os ensaios de impacto o ensaio de Charpy é o mais comum, em particular a baixas temperaturas, onde os provetes são mais fáceis de ensaiar [28]. Os materiais metálicos apresentam fundamentalmente dois tipos de rotura: dúctil ou frágil. Uma rotura dúctil caracteriza-se por apresentar deformação plástica, tendo a sua estrutura uma aparência fibrosa. Por outro lado a rotura frágil ocorre com reduzida deformação plástica, apresentando superfícies de rotura menos rugosas.

O ensaio consiste em provocar a fratura num só golpe, com um martelo pendular, de um provete entalhado, (Figura 34), que se encontra sobre dois apoios, (Figura 35). Em seguida, é determinada a energia absorvida no processo, podendo esta ser medida através da diferença de altura do pêndulo antes (h) e após o embate com o provete (h'). Em geral, as máquinas de ensaio dispõem de um indicador que se move proporcionalmente ao ângulo, fornecendo diretamente a energia absorvida [28]. A referida escala deverá permitir leituras com limite de erro de $\pm 0.5\%$ da energia potencial máxima do martelo [28]. O equipamento utilizado neste estudo está identificado na Figura 36, tendo o ensaio decorrido segundo a norma *ASTM E-23* com uma velocidade do pêndulo de 5,03m/s (16.5ft/s).

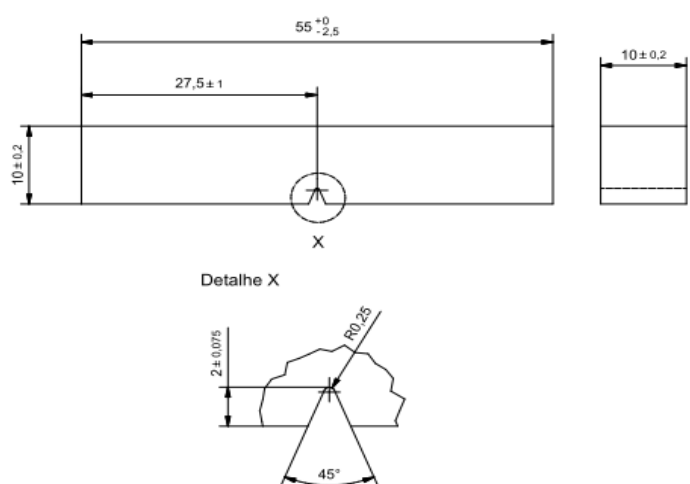


Figura 34 – Dimensões do provete utilizado para o ensaio de Charpy.

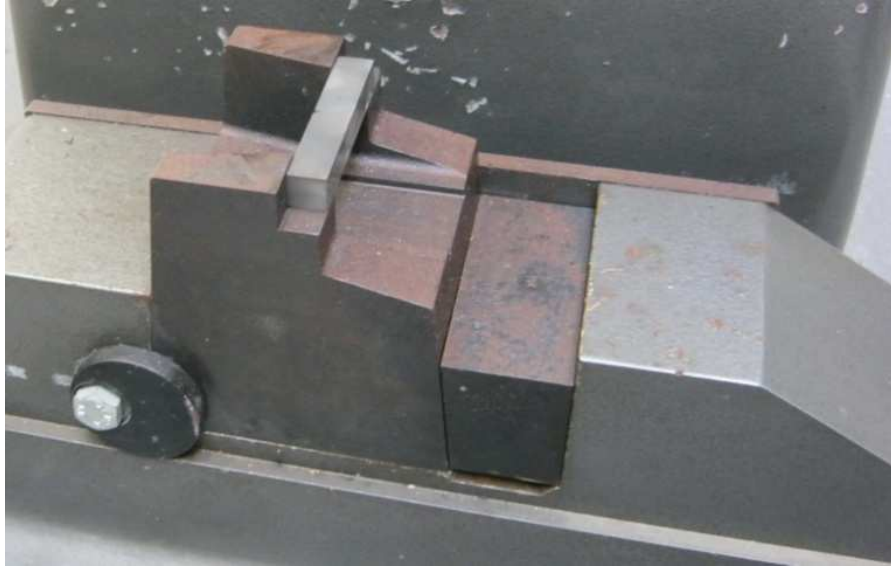


Figura 35 – Pormenor do posicionamento do provete utilizado no ensaio de Charpy.

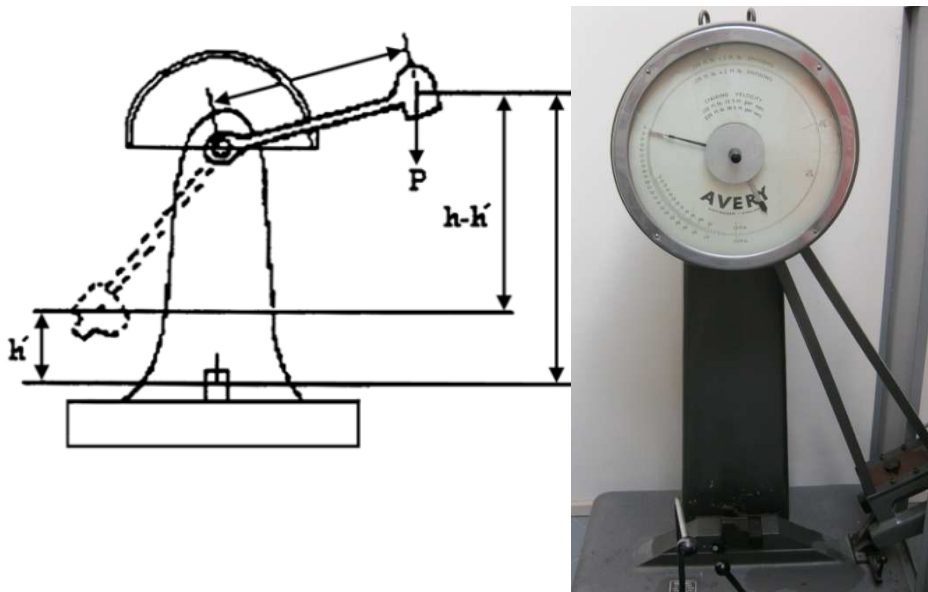


Figura 36 - Equipamento utilizado no ensaio de Charpy.

Capítulo 3 – Procedimiento Experimental

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Aço 1.2344

4.1.1 Análise Microestrutural

A microestrutura do aço 1.2344 após a referida preparação das amostras (polimento e ataque químico com Nital 2%), é apresentada na Figura 37. É possível observar uma matriz (fase clara) com estruturas globulares típicas de um recozimento de amaciamento, Figura 37a, a qual é a mais conveniente para uma maquinação facilitada com ou sem arrancamento de aparas [7]. Os glóbulos correspondem a de cementite e a alguns carbonetos embebidos na matriz ferrítica

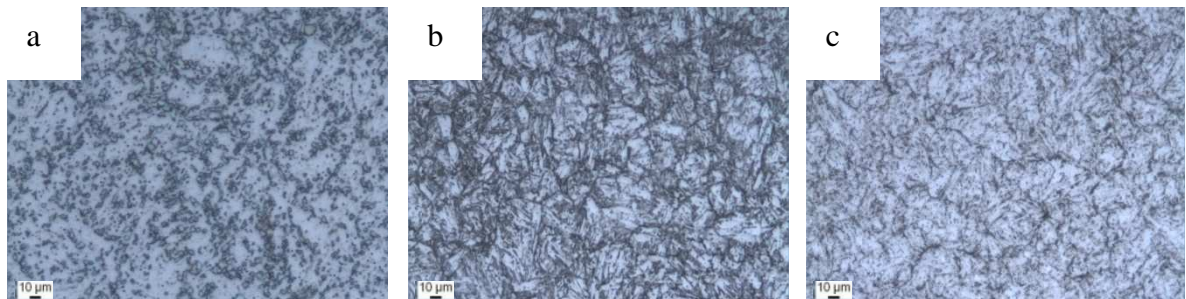


Figura 37 – Imagens obtidas por microscopia óptica do aço 1.2344 a) recozido; b) 46-49HRC; c) 50-52HRC

A microestrutura do mesmo aço com dureza intermédia (46-49HRC) pode ser observada na Figura 37b. Pode constatar-se a diferença significativa relativamente ao aço recozido devido à realização da têmpera desde a temperatura de 1020°C e dos dois revenidos a cerca de 590°C e 560°C efetuados para reduzir tensões residuais e garantir a dureza desejada. Assim observa-se uma estrutura martensítica revenida (fase acicular) com carbonetos finos (pequenos pontos na microestrutura) dispersos na microestrutura [28]. A microestrutura do aço 1.2344 com dureza superior, Figura 37c, é em tudo semelhante à do mesmo aço com dureza menor (46-49HRC), havendo apenas a referir que esse aumento na dureza corresponderá a maiores valores da tensão de cedência mas torna o aço mais frágil o que pode prejudicar a duração da peça/ferramenta a que se destina ou mesmo provocar falhas durante o fabrico da matriz.

4.1.2 Ensaio de Dureza

Os resultados decorrentes do ensaio de dureza Rockwell C para o aço 1.2344 podem ser consultados na Tabela 6.

Tabela 6- Valores de dureza Rockwell C (valores em HRC).

Dureza Pretendida	Indentações					Média
	1	2	3	4	5	
1.2344 Recozido	22,2	20,8	21,1	21,2	20,7	21,2
1.2344 46-49HRC	48,2	48,5	48,7	48,7	48,8	48,6
1.2344 50-52 HRC	51,9	52,1	52,0	52,1	52,1	52,0

A realização deste ensaio torna-se necessária e conseqüentemente importante na medida em que é necessário confirmar os valores de dureza para uma melhor compreensão e explicação dos resultados dos restantes ensaios. Os dados servirão também para tentar encontrar uma relação com a tensão de cedência e assim permitir a definição de aperto/interferência com fatores de segurança adequados e baseados num teste simples. Assim conclui-se que os valores de dureza que se pretendia atingir foram alcançados com êxito para o aço em questão utilizando protocolos adequados para os tratamentos térmicos.

4.1.3 Ensaio de Tração

As curvas de tensão vs extensão nominais e reais podem ser observadas nas Figuras 38 e 39, respetivamente, para o aço 1.2344. As curvas obtidas no ensaio de tração para este aço mostram que os tratamentos térmicos aumentam a tensão de cedência do aço relativamente ao aço no estado recozido. O aço com maior dureza é também o que tem maior tensão de cedência, embora não se verifiquem diferenças significativas a nível de extensão para a rotura. Há no entanto uma redução acentuada da capacidade de deformação plástica dos aços tratados termicamente face ao aço recozido. Na Figura 40, observa-se o estado de um provete tratado termicamente após o referido ensaio que mostra deformação plástica com redução da área de suporte de carga na zona de rotura.

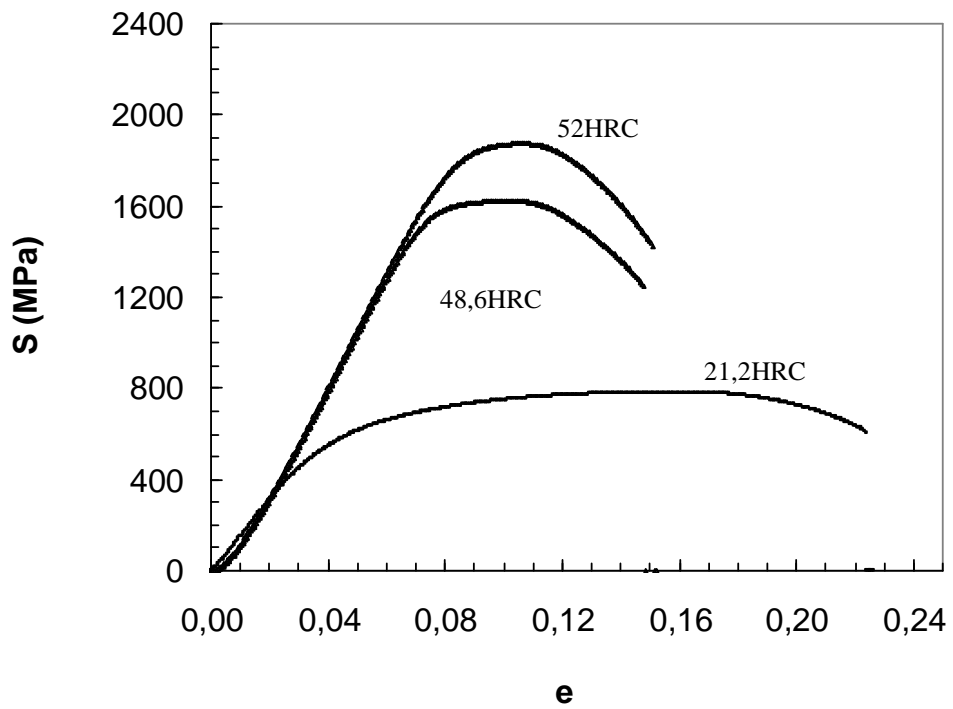


Figura 38 - Curvas tensão vs extensão nominais do aço 1.2344

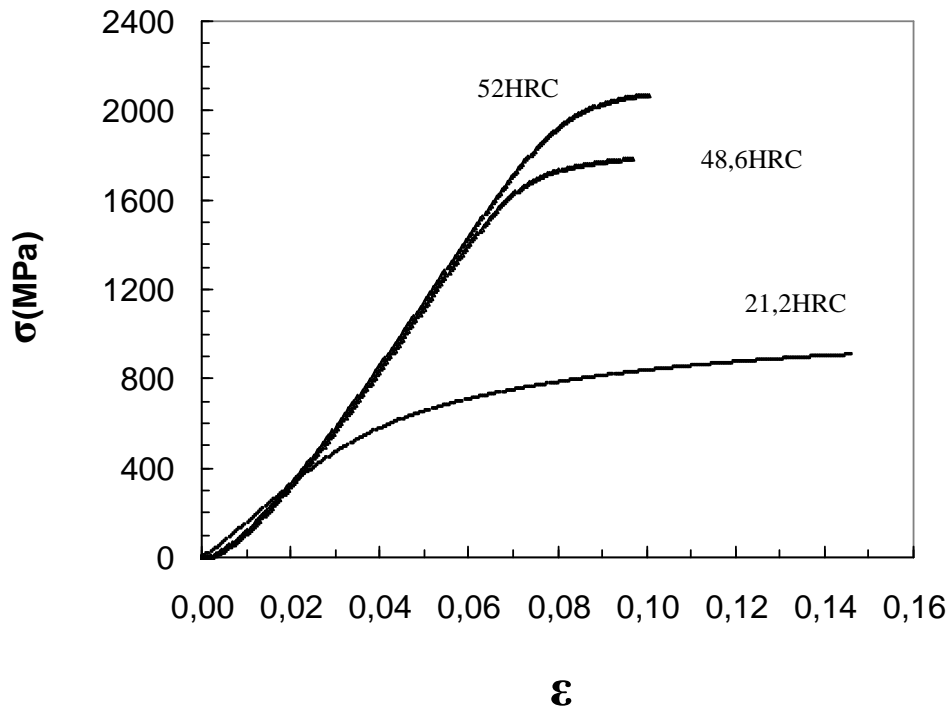


Figura 39 - Curvas tensão vs extensão real do aço 1.2344.



Figura 40 – Provete do aço 1.2344 48,6HRC após o ensaio e tração.

Na Tabela 7 encontram-se registados os valores obtidos neste ensaio e que caracterizam as propriedades do aço sujeito a diferentes tratamentos térmicos. A tensão de rotura real (σ_r), aumenta com o aumento de dureza do aço, mais do que duplicando relativamente ao mesmo material no estado recozido.

Tabela 7 - Valores obtidos no ensaio de tração do aço 1.2344. A deformação real indicada (ϵ) é a correspondente à tensão nominal máxima. $\varnothing_{\text{inicial}}$, $\varnothing_{\text{final}}$ e σ_{ced} , são os valores do diâmetro inicial, diâmetro final e tensão de cedência

Aço	$\varnothing_{\text{inicial}}$ (mm)	$\varnothing_{\text{final}}$ (mm)	e	ϵ	F (N)	S (MPa)	σ_r (MPa)	σ_{ced} (MPa)
1.2344 21,2HRC	3,5	2,54	0,157	0,146	7528,4	782,5	905,5	619,5
1.2344 48,6HRC	3,5	2,90	0,107	0,101	15762,1	1638,3	1812,9	1582
1.2344 52,0HRC	3,5	2,88	0,106	0,101	17701,4	1839,9	2035,6	1827

A observação por microscopia eletrónica de varrimento (MEV) das superfícies de fratura fornece dados adicionais relativamente ao modo de fratura, frágil ou dúctil, do aço sujeito a diferentes tratamentos térmicos [29]. Essas imagens podem ser observadas nas Figuras 41, 42 e 43, para o aço 1.2344 no estado recozido e com durezas de 48,6HRC e 52,0HRC, respetivamente. É evidente que ocorreu redução de área devido à deformação plástica sofrida. O gráfico da Figura 38 e os dados da Tabela 7 mostram que o aço no estado recozido sofreu maior variação dimensional do que após tratamentos térmicos.

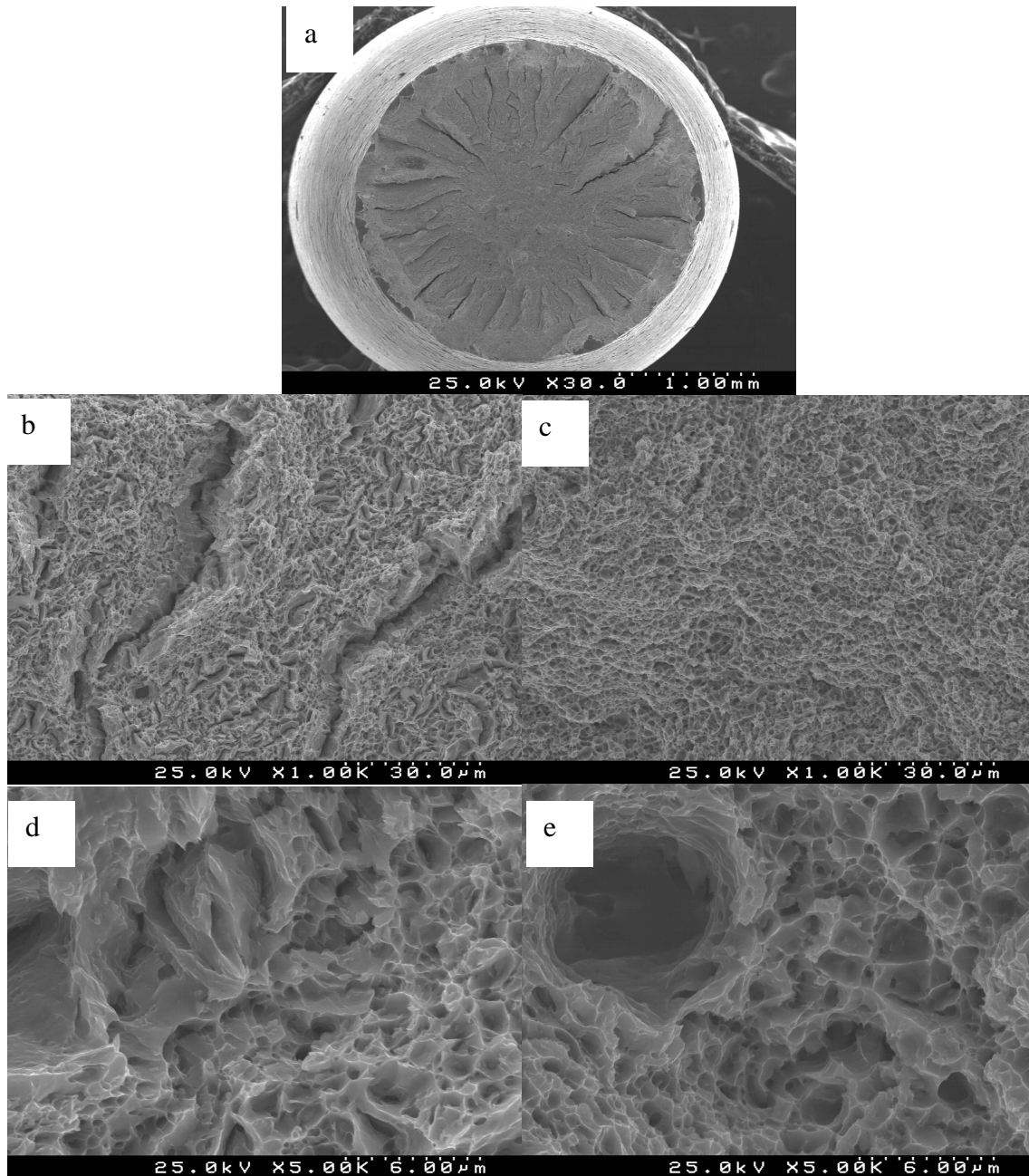


Figura 41 – Imagens obtidas por MEV do aço 1.2344 recozido: a) vista geral; b, d) detalhes da zona exterior estriada; c, e) detalhes da zona exterior com maior ampliação.

Na imagem MEV de baixa ampliação salientam-se duas zonas na superfície de fratura, Figura 41a. É possível identificar uma zona exterior, estriada (Figuras 41b e 41d) e uma zona central não estriada (Figuras 41c e 41e). A observação MEV da superfície de fratura mostra que as estrias na zona de rotura correspondem a formação de fissuras locais devido a deformação plástica excessiva, provavelmente durante a formação do “pescoço”,

após se atingir o valor da resistência à tração do material. A comparação das duas zonas, Figuras 41b-e, mostra que esta é a principal diferença, pois microestruturalmente há formação de microcavidades com arestas filamentosas ou com aspecto de folha (Figuras 41d, e), características da deformação plástica sofrida em ambas as zonas [30].

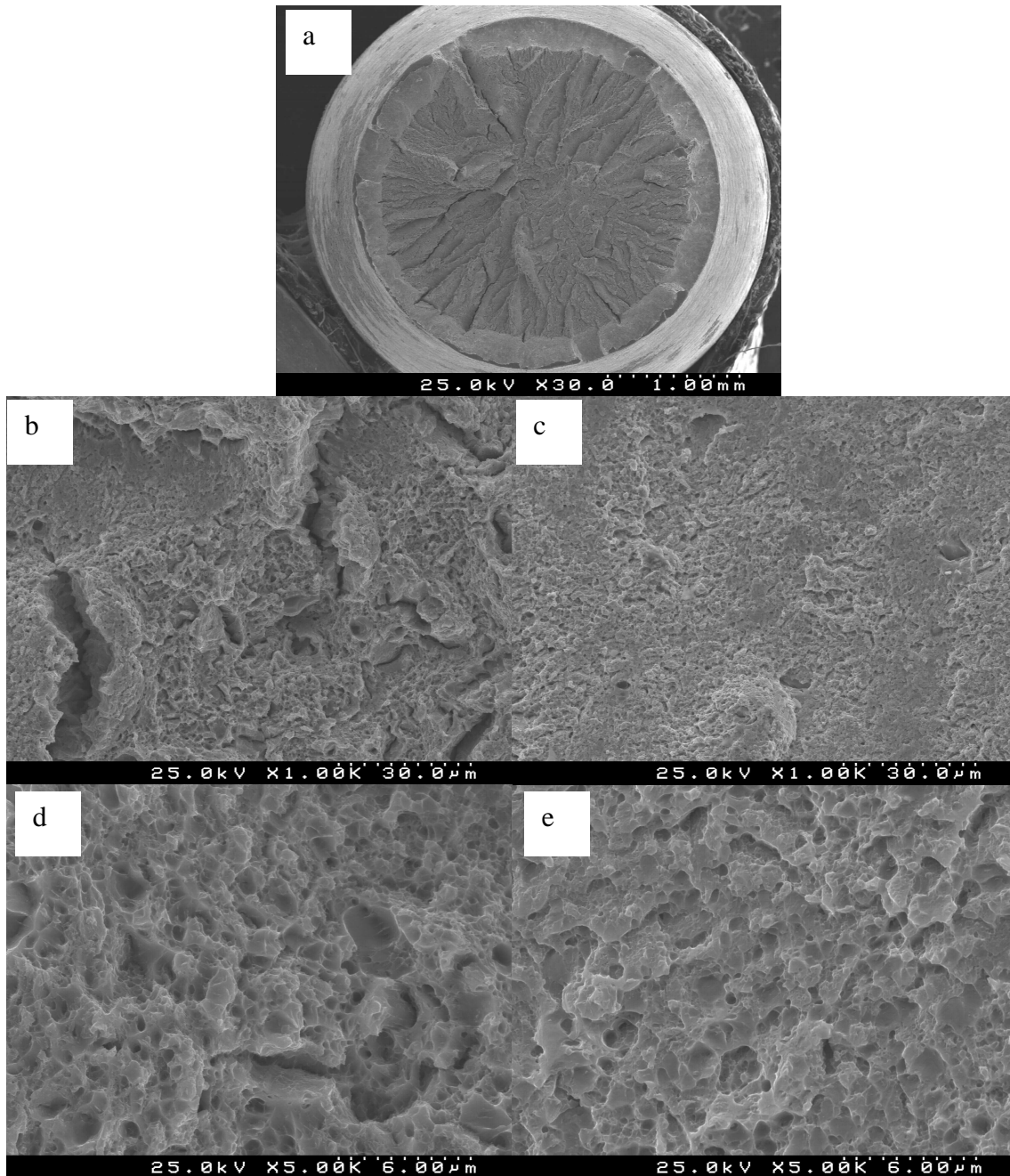


Figura 42 – Imagens obtidas por MEV do aço 1.2344 com dureza 48,6HRC: a) vista geral; b, d) detalhes da zona exterior estriada; c, e) detalhes da zona interior com maior ampliação.

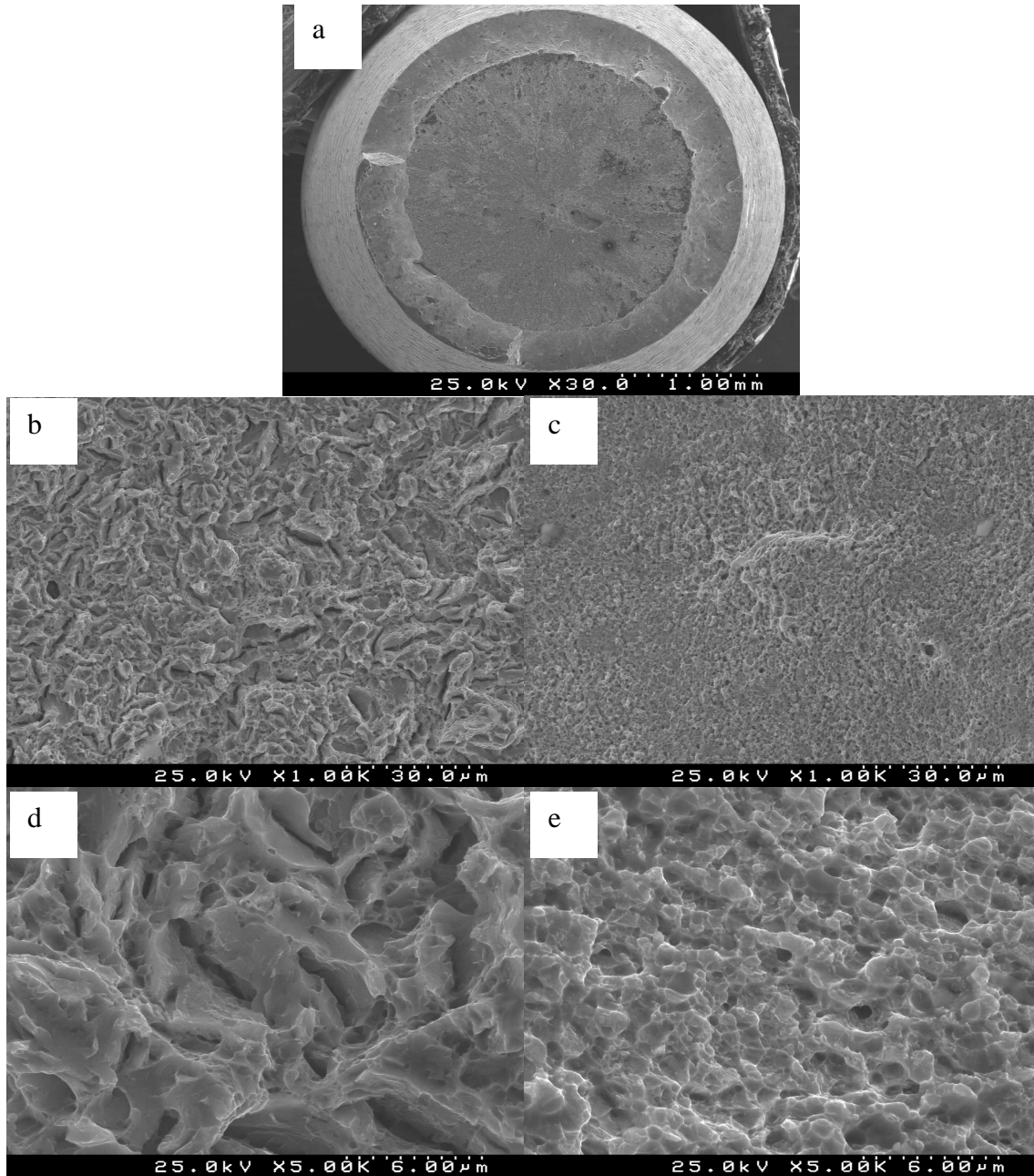


Figura 43 – Imagens obtidas por MEV do aço 1.2344 com dureza 52HRC: a) vista geral; b, d) detalhes da zona exterior estriada; c, e) detalhes da zona interior com maior ampliação

Na análise do mesmo aço com uma dureza de 48,6HRC, Figura 42, observa-se uma alteração da superfície de fratura, surgindo uma zona exterior na forma de fissura, que rodeia a zona mais central, com deformação plástica extensa, como mostra o aumento de rugosidade visível. O maior diâmetro destes provetes após ensaio, Tabela 7, mostra que há

perda de ductilidade. Como para o aço no estado recozido, as zonas estriadas visíveis nas micrografias das Figuras 42a e 42b, correspondem a fissuras internas. As micrografias obtidas a maiores ampliações, Figura 42c a 42e comprovam que a deformação plástica local é menos extensa do que para o aço recozido, não sendo nítidas a formação de paredes muito finas das cavidades aí visíveis [30].

O aumento de dureza neste aço para 52HRC leva a um aumento da zona exterior, mas a superfície de fratura apresenta no geral um aspeto mais liso, com menor rugosidade, visível nas imagens obtidas por MEV da Figura 43. No entanto a deformação plástica na rotura é semelhante para este aço com os dois tratamentos térmicos (Tabela 7 e Figura 39). As imagens da orla exterior da zona de rotura mostram que as estrias estão também presentes, Figura 43b e 43d, mas são de menor dimensão do que para o mesmo aço com durezas menores. A diminuição da ductilidade deste material relativamente ao estado recozido é também visível no detalhe da zona de fratura mais plana, no centro do provete (Figuras 43c e 43e). As cavidades não se observam com tanta facilidade, são menos profundas e não existem paredes finas que mostrem a deformação microestrutural extensa do aço no estado recozido, Figuras 41c e 41e. A curva do ensaio de tração do aço 1.2344 com durezas mais elevadas confirma que a deformação plástica é muito limitada, ao contrário do que acontece com o aço no estado recozido, Figuras 38 e 39, o que se reflete na microestrutura da superfície de fratura.

4.1.4 Ensaio de tenacidade (Charpy)

Este ensaio tem por objetivo relacionar a dureza do material com a tenacidade. Assim os valores obtidos deste ensaio encontram-se registados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores obtidos no ensaio Charpy e capacidade de absorção de energia para o aço 1.2344.

Dureza HRC	h (N.m)	h' (N.m)	Média h' (N.m)
21,2	298,28	56,94/48,81	52,9
48,6	298,28	12,88/16,27	14,6
52,0	298,28	10,85	10,9

Analisando os valores obtidos relativos a este ensaio conclui-se que ao aumento da dureza do aço corresponde uma menor capacidade de absorção de energia, que é semelhante para os dois tratamentos térmicos. Confirma-se que o aumento da tensão de cedência diminui a tenacidade do material [31] e que esta característica deve ser tida em consideração no manuseamento do aço durante as várias operações do embutimento.

4.2 Aço 1.2379

4.2.1 Análise Microestrutural

As microestruturas do aço 1.2379 no estado recozido e após os dois tratamentos térmicos para aumento da sua tensão de cedência podem ser observadas na Figura 44. Na micrografia ótica da Figura 44a, observa-se uma estrutura globular típica de um recozimento de amaciamento sendo possível identificar glóbulos de carbonetos embebidos numa matriz ferrítica com cementite e outros carbonetos de menor dimensão dispersos.

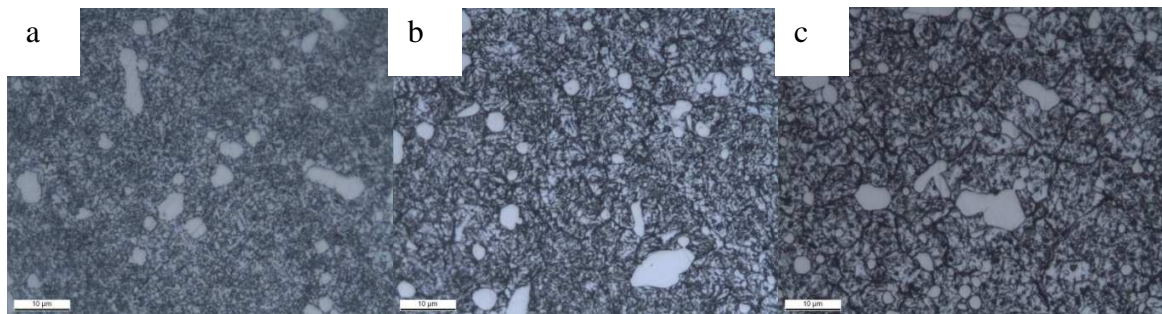


Figura 44 – Imagens obtidas por microscopia óptica do aço 1.2379 a) Recozido; b) 56-58HRC; c) 60-62HRC.

Após tratamentos térmicos é possível observar que os carbonetos de maior dimensão permanecem na microestrutura (Figuras 44b e 44c). É possível observar, para além de uma estrutura martensítica proveniente da transformação da austenite, a presença carbonetos primários e secundários e eventualmente alguma austenite residual que não se transformou durante a têmpera. Devido ao ataque químico efetuado, é possível observar

também as fronteiras de grão devido provavelmente à precipitação de cementite ou outros carbonetos finos ao longo das mesmas.

4.2.2 Ensaio de Dureza

Os resultados decorrentes do ensaio de dureza para o aço 1.2379 podem ser consultados na Tabela 9. Após a análise dos resultados da tabela conclui-se que os valores de dureza pretendidos para este estudo foram alcançados com êxito excetuando no aço 1.2379 na dureza de 56-58HRC onde os valores obtidos ficaram um pouco acima do desejado mas mesmo assim dentro do desvio estabelecido na norma (± 1).

Tabela 9- Valores obtidos após o ensaio de dureza (valores em HRC).

Indentações						
Durezas Pretendidas	1	2	3	4	5	Média
1.2379 Recozido	22,1	21,6	23,2	23,2	21,9	22,4
1.2379 56-58HRC	59,3	59,6	59,9	59,3	58,8	59,4
1.2379 60-62HRC	61,4	61,7	61,3	61,4	61,3	61,4

4.2.3 Ensaio de tração

As curvas tensão versus extensão nominais e reais do aço 1.2379 podem ser observadas nas Figuras 45 e 46, respectivamente. Tal como para o aço 1.2344 os tratamentos térmicos promovem um aumento substancial das tensões de cedência e de rotura. No entanto, ao contrário daquele, o aumento de dureza de 59,4HRC para 61,4HRC (apenas 2,0 pontos HRC) não apresentou diferenças significativas ao nível da extensão obtida. Para mais fácil comparação, os valores obtidos no teste de tração foram compilados na Tabela 10, aos quais se juntaram também os diâmetros finais dos provetes. Os dados mostram que as deformações para a rotura são menores do que para o aço 1.2344 (Tabela

7), o que é comprovado pela quase não alteração da dimensão da secção dos provetes após ensaio, Tabela 10 e Figura 47. Apenas o provete no estado recozido apresentou um alongamento considerável, Figura 46, pois após tratamento térmico a zona de deformação plástica praticamente desaparece das curvas dos respectivos ensaios de tração.

Na Tabela 10 encontram-se registados os valores obtidos neste ensaio e que caracterizam as propriedades deste aço sujeito a diferentes tratamentos térmicos. Cada valor é a média dos dois ensaios e tração efetuados para cada condição. A tensão de rotura real (σ_r), aumenta com o aumento de dureza do aço, mais do que duplicando relativamente ao mesmo material no estado recozido, tal como para o aço 1.2344. Este aço tem à partida maior tensão de cedência e resistência à tração já no estado recozido, devido ao efeito de reforço mecânico introduzido pelo teor mais elevado de carbono e carbonetos.

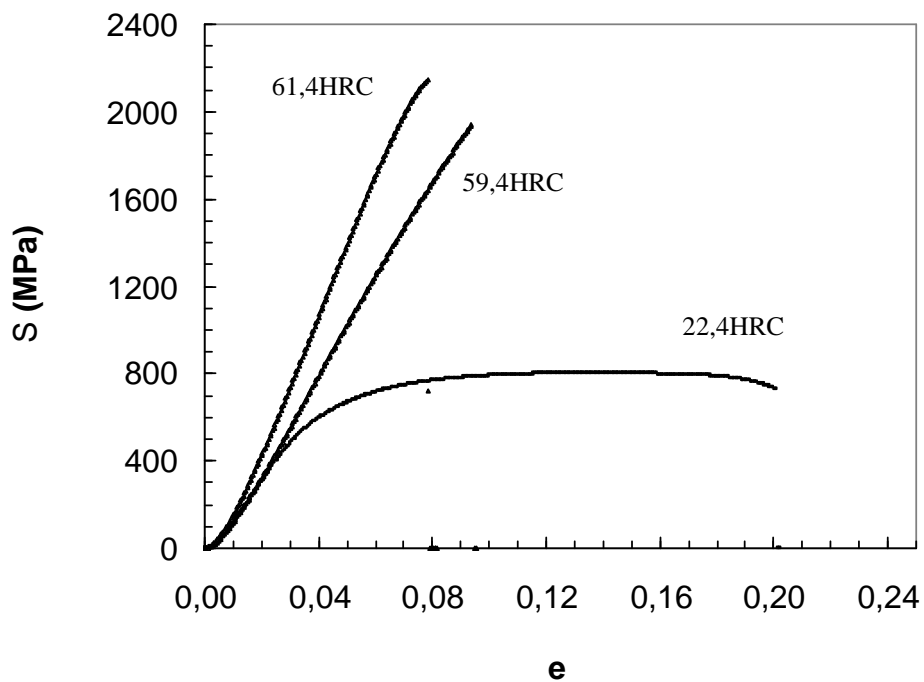


Figura 45 - Curvas tensão vs extensão nominais do aço 1.2379.

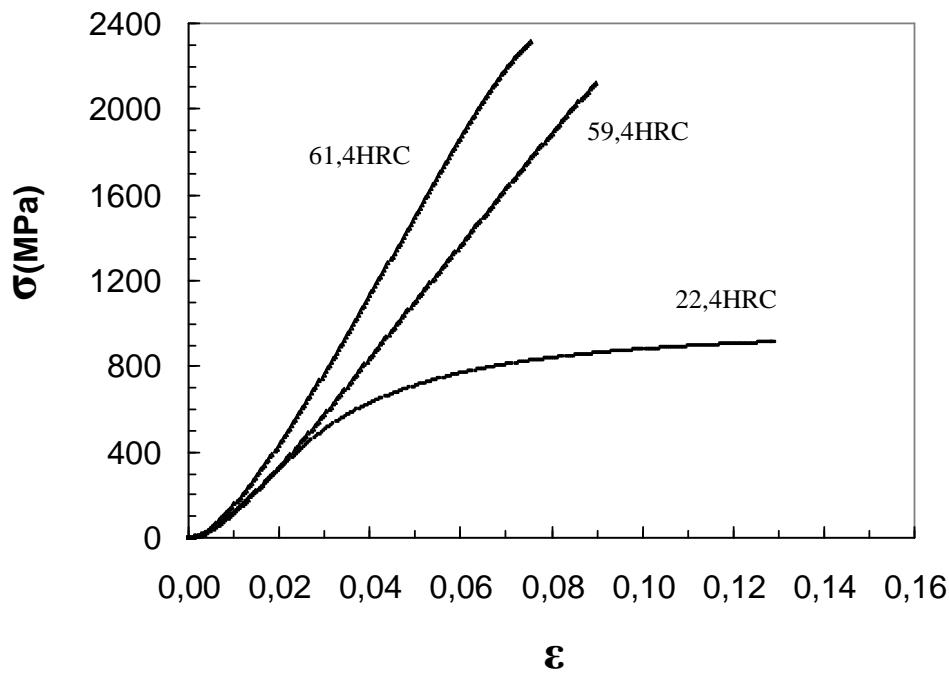


Figura 46 - Curvas tensão vs extensão reais do aço 1.2379.

Tabela 10 - Valores obtidos no ensaio de tração. A deformação real indicada (ϵ) é a correspondente à tensão nominal máxima. $\varnothing_{\text{inicial}}$, $\varnothing_{\text{final}}$ e σ_{ced} , são os valores do diâmetro inicial, diâmetro final e tensão de cedência.

Aço	$\varnothing_{\text{inicial}}$ (mm)	$\varnothing_{\text{final}}$ (mm)	e	ϵ	F (N)	S (MPa)	σ_r (MPa)	σ_{ced} (MPa)
1.2379 22,4HRC	3,5	3,02	0,138	0,129	7700,0	800,3	910,9	801,0
1.2379 59,4HRC	3,5	3,45	0,094	0,090	18663,4	1939,8	2121,9	1861,5
1.2379- 61,4HRC	3	2,98	0,078	0,075	15166,4	2145,6	2313,5	2145,0

É de salientar que o diâmetro do aço 1.2379 com dureza 61,4HRC é ligeiramente inferior aos restantes uma vez que com o diâmetro de 3,5mm não foi possível finalizar o ensaio de tração devido à limitação do equipamento de ensaio (20kN carga máxima). Como era de esperar, os maiores níveis de dureza do aço 1.2379 garantem valores de tensão de cedência superiores aos do aço 1.2344 (Tabelas 7 e 10).



Figura 47 - Provete do aço 1.2379 61,4HRC após o ensaio de tração.

A análise microestrutural da superfície de fratura, Figuras 48 a 50, permitiu comparar o efeito dos tratamentos térmicos e é importante para compreender os resultados dos ensaios mecânicos. Uma diferença óbvia relativamente ao aço 1.2344 é a não redução significativa da zona de rotura, mesmo a amostra no estado recozido como se pode observar pela comparação das Figuras 40 e 47.

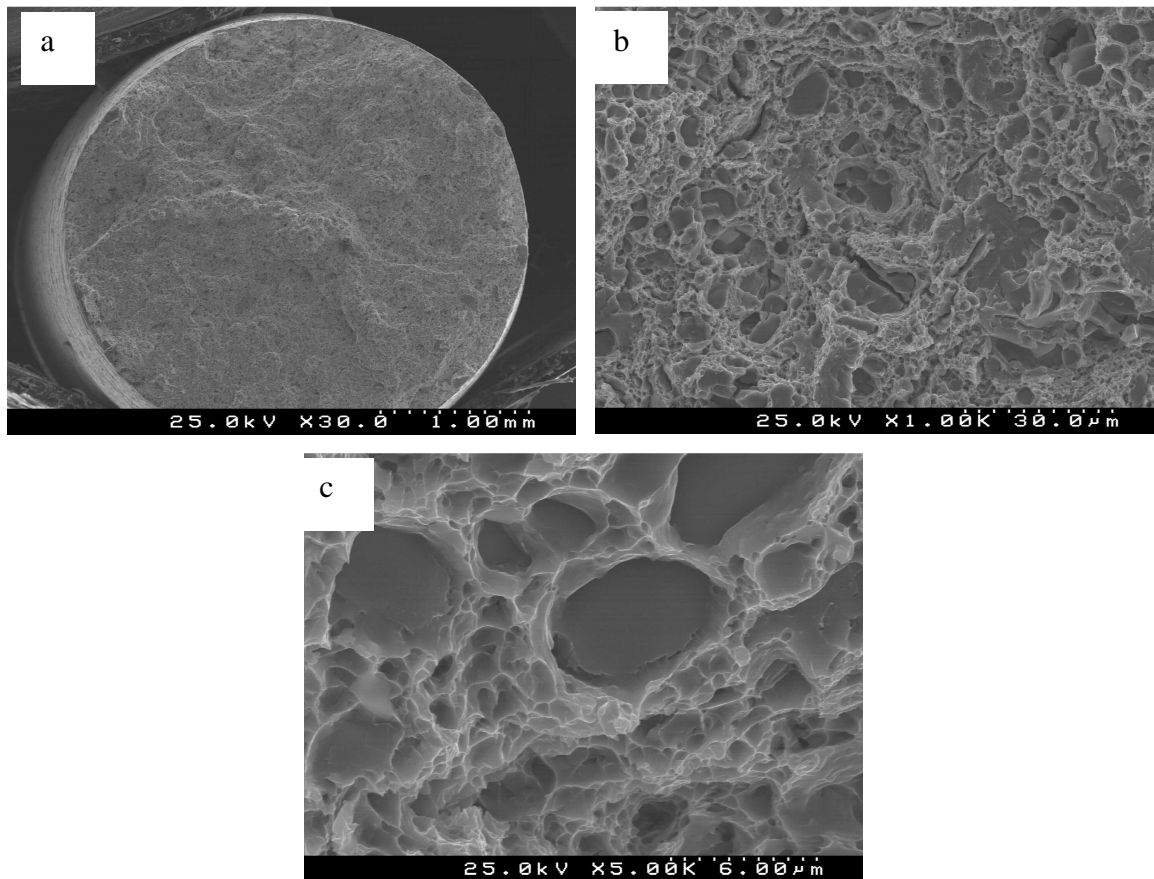


Figura 48 – Imagens obtidas por MEV do aço 1.2379 recozido, com dureza 22,4HRC: a) vista geral; b c) detalhe da superfície de fratura com maior ampliação.

A análise por MEV de baixa ampliação da superfície de fratura do provete no estado recozido, Figura 48a, mostra que esta não é plana, apresentando planos macroscópicos de clivagem. A maiores ampliações, Figura 48b, observam-se pequenas fissuras, cavidades e carbonetos fraturados transgranularmente. A imagem MEV da Figura 48c mostra que as pequenas cavidades têm paredes com terminações em forma de folha fina, indicadoras de deformação plástica extensa da matriz do aço, tal como observado para o aço 1.2344 no estado recozido. No entanto, ao contrário daquele, não surgem zonas distintas decorrentes de uma fratura em duas etapas, mas sim uma superfície homogênea, com menos deformação plástica, mais próxima do comportamento de materiais sujeitos a fratura frágil.

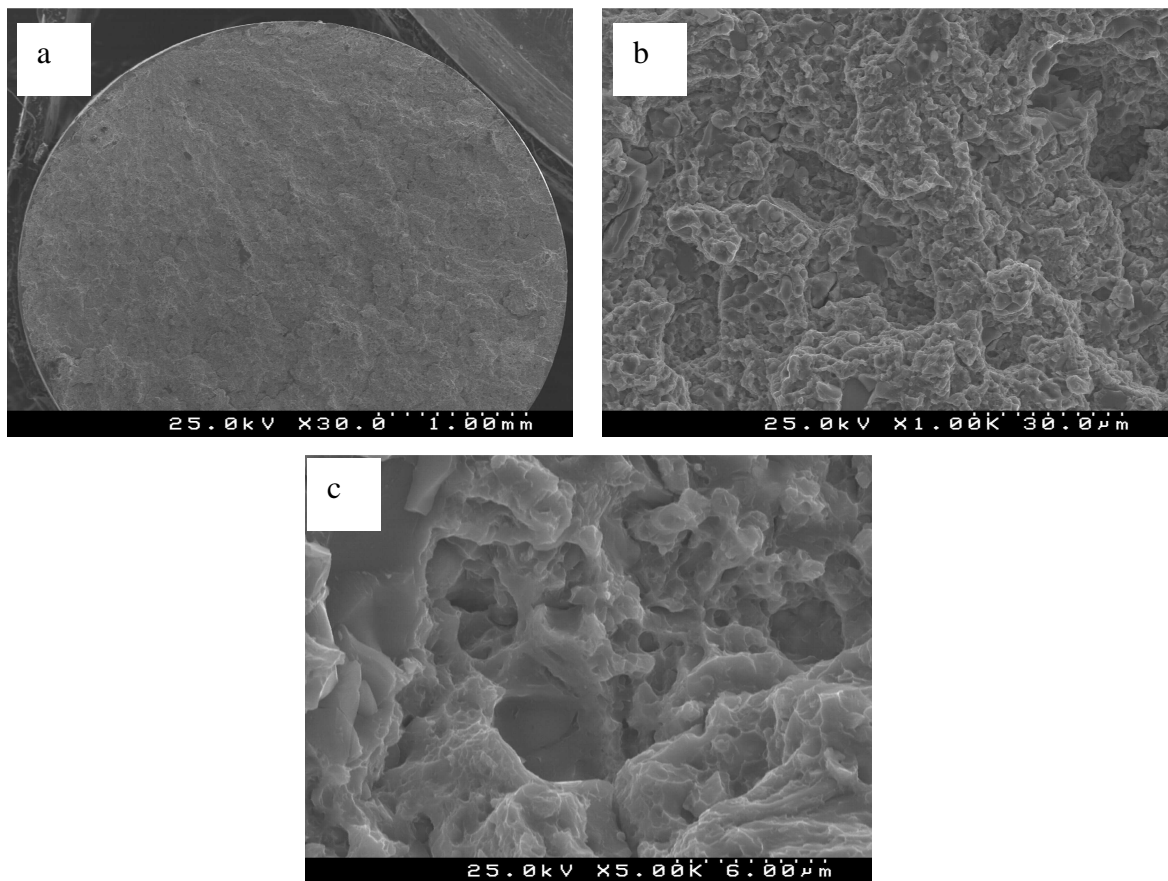


Figura 49 – Imagens obtidas por MEV do aço 1.2379 59,4HRC: a) vista geral b, c) detalhe da zona de rotura.

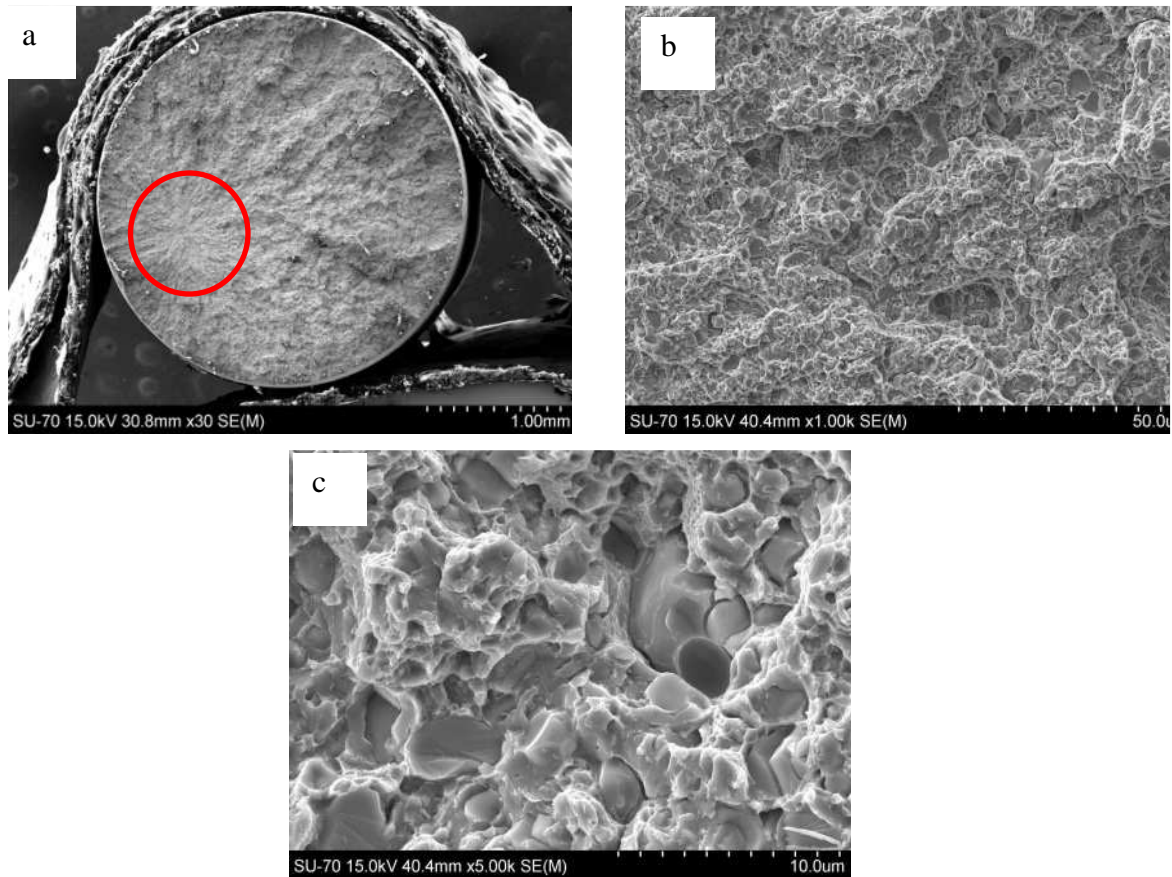


Figura 50 – Imagens obtidas por MEV do aço 1.2379 com dureza 61,4HRC: a) vista geral mostrando o ponto de início de fratura; b, c) detalhes da superfície de fratura com maior ampliação.

O tratamento térmico a que o aço foi sujeito para aumento da sua dureza para 59,4HRC transformou-o num material com comportamento à rotura essencialmente frágil, como se viu nas curvas tensão vs extensão das Figuras 45 e 46. A observação por MEV confirma este comportamento, pois a superfície de fratura, Figura 49a, é mais plana do que para o material no estado recozido, Figura 48a. O aumento de dureza da própria matriz do aço origina uma superfície de rotura onde a fratura dos carbonetos é menos evidente, Figura 49b. O detalhe microestrutural observado na Figura 49c mostra que os carbonetos continuam a sofrer rotura transgranular e que a matriz praticamente não deforma plasticamente, observando-se apenas localmente a formação de microcavidades com evidência de alguma deformação plástica local [33]. O aumento adicional de dureza para 61,4HRC conferido pelo tratamento térmico transforma este aço num material de comportamento à rotura de tipo frágil, como se vê pelas curvas dos ensaios de tração das

Figuras 45 e 46. A observação MEV de baixa ampliação da superfície de rotura, (Figura 50^a) mostra inclusive a zona de origem da fratura, à semelhança do que acontece para materiais cerâmicos. A observação a maior ampliação mostra a ausência de deformação plástica localizada, com a superfície de fratura a revelar pequenas cavidades [33] (Figura 50b), que a imagem da Figura 50c revela ser carbonetos. Esta imagem mostra ainda que há uma alteração do mecanismo de fratura, pois além da fratura transgranular de carbonetos é possível observar também arrancamentos da matriz desses carbonetos sem fratura dos mesmos (Figura 50c) como prova a superfície curva e arredondada de alguns deles.

4.2.4 Ensaio de tenacidade (Charpy)

Os valores obtidos decorrentes do ensaio realizado encontram-se representados na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores obtidos no ensaio Charpy e capacidade de absorção de energia para o aço 1.2379.

Aço	h (N.m)	h' (N.m)	Média h' (N.m)
1.2379 22,4HRC	298,28	5,42/5,42	5,4
1.2379 59,4HRC	298,28	3,39/2,71	3,1
1.2379 61,4HRC	298,28	4,75/5,42	5,1

O aço 1.2379 no estado recozido tem deformação à rotura semelhante à do aço 1.2344 no mesmo estado, como se pode ver pelos dados das Tabelas 7 e 10, tal como possuem durezas muito próximas. No entanto a sua capacidade de absorção de energia é cerca de dez vezes menor, Tabelas 8 e 11. Mesmo no estado recozido, a capacidade de absorção de energia do aço 1.2379 é muito menor do que a do aço 1.2344 tratado

termicamente. Independentemente da sua resistência mecânica, que varia entre 600MPa no estado recozido e 2146MPa para a dureza 61,4HRC, Tabela 10, a sua capacidade absorção de energia permanece inalterada, Tabela 11. Este resultado e a quase ausência de redução de área durante o ensaio de tração devem-se à sua composição química, nomeadamente a elevada quantidade de carbono e de elementos carburígenos que lhe conferem um caráter muito cerâmico, de fratura frágil [32, 33]. Apesar da sua superior resistência mecânica é importante ter em conta esta característica do aço 1.2379 que se deverá traduzir em margens de segurança superiores no desenho da operação de embutimento.

4.3 Simulação de embutimento

Pegando no exemplo mencionado na Figura 9, Secção 1.5, definindo a altura da peça como sendo 150mm, efetuou-se uma simulação no programa de elementos finitos Cosmos, de forma a avaliar os valores de tensão e deformação envolvidos. Os cálculos têm por base os valores característicos do aço 1.2344 (módulo de Young de 210GPa e coeficiente de Poisson de 0,3) e de um grau de metal duro designado por GD40 (módulo de Young de 500GPa coeficiente de Poisson de 0,22 [34]). Na Figura 51 são apresentados graficamente os resultados para os valores de tensão a que ficam sujeitos a carcaça de aço e a matriz de metal duro (MD) e na Figura 52 para a deformação, após embutimento a partir de 500°C, temperatura suficientemente elevada para expandir o orifício da carcaça de aço os 0,57mm requeridos.

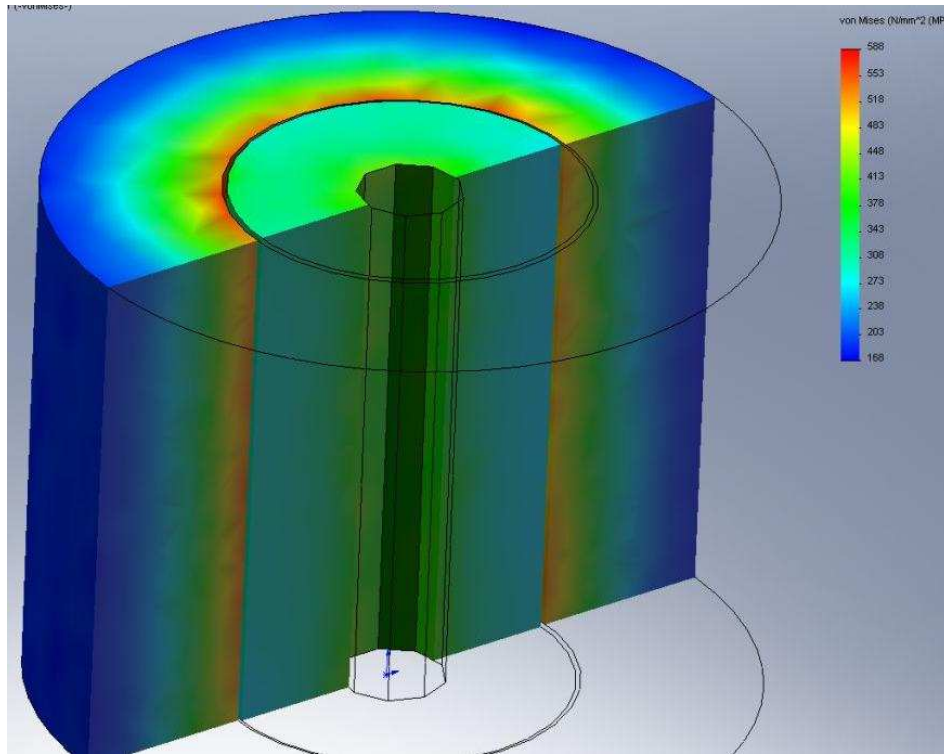


Figura 51 - Imagem obtida a partir da simulação de um embutimento com mapeamento de tensões na interface entre os dois materiais.

A zona mais alaranjada representa uma zona onde as tensões provocadas pelas forças de tração existentes no aço são mais extremas, e que neste caso específico rondam os 590MPa. No interior do metal duro o esforço de compressão é um pouco inferior em valor absoluto. O valor mais elevado da extensão ocorre na interface entre o aço e o MD. Estes resultados mostram que a utilização do aço no estado recozido levaria à deformação plástica do mesmo, pois o valor máximo calculado está acima da sua tensão de cedência, Tabela 7. Estes valores mostram que para o aço endurecido o coeficiente de segurança, definido como o quociente entre a tensão máxima de tração calculada na interface e a tensão de cedência, varia entre 2,6 e 3.

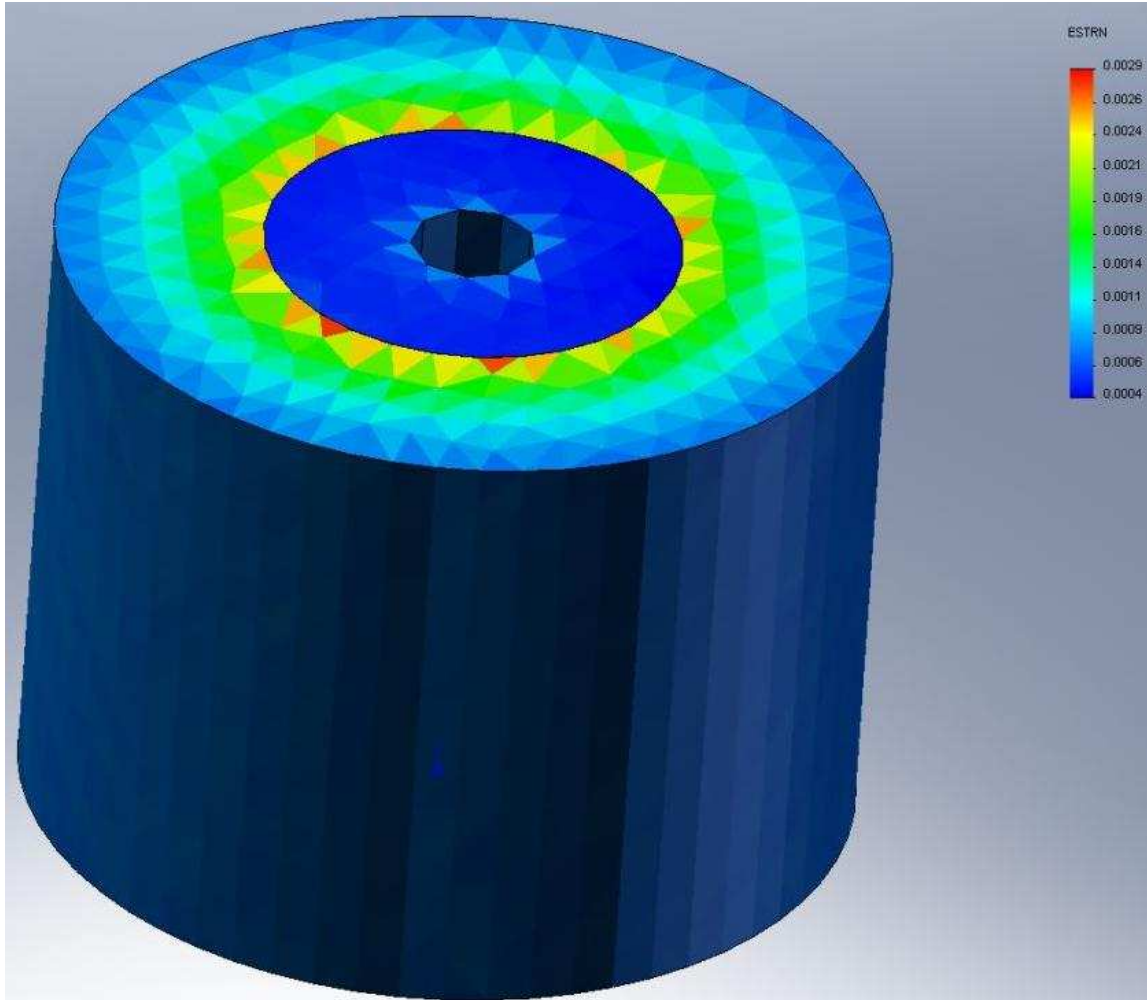


Figura 52 - Valores de extensão obtidos na simulação de elementos finitos.

A Figura 53 mostra, ainda com base no exemplo mencionado acima, como se relaciona a tensão de tração máxima na superfície interna do furo do aço e a interferência definida. Este gráfico é também válido para o embutimento a frio, pois apenas relaciona a tensão máxima com a interferência. Neste caso, e como as interferências normais são da mesma ordem de grandeza das usadas no embutimento a quente, usando quer o aço 1.2344 quer o aço 1.2379, para embutimento a frio, as tensões resultantes serão também da mesma ordem de grandeza, o que garante para este último fatores de segurança ligeiramente superiores, entre 3 e 3,6 para os tratamentos térmicos acima referidos. Este maior valor, imposto empiricamente, reduz os perigos de rotura decorrentes da sua menor capacidade de absorção de energia.

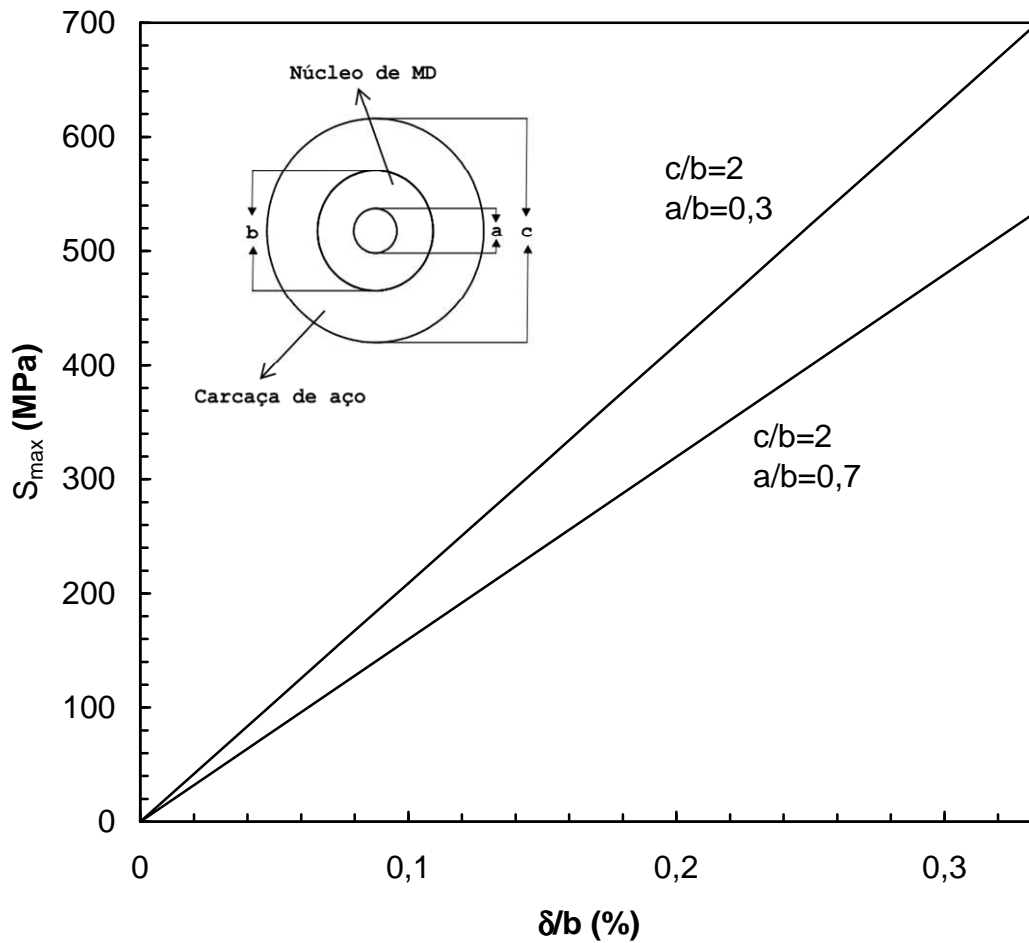


Figura 53 - Dependência entre a tensão máxima e a interferência, para duas geometrias. δ é o valor da interferência.

Com o intuito de determinar as temperaturas mínimas de embutimento a quente utilizado na DURIT, realizou-se a dilatométrica do aço 1.2344 com a dureza de 48,6HRC e 52,0HRC. Para tal foram utilizados provetes de dimensões 4x3x10. As curvas do referido ensaio podem ser observadas na Figura 54. Os valores dos coeficientes de expansão térmica (CET) obtidos para o intervalo 200-600°C foram de $16,8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ (aço 48,6HRC) e $14,9 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ (aço 52HRC), ligeiramente superiores ao valor nominal indicado pelo fabricante ($12 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$). Para o exemplo da simulação de embutimento atrás referida, estes valores resultariam num aumento mínimo de temperatura de 200°C para se atingir o valor de 0,3% da interferência e num aumento de 386°C para se atingir o valor de 0,57% imposto (Figura 9) para se efetuar o embutimento sem carga.

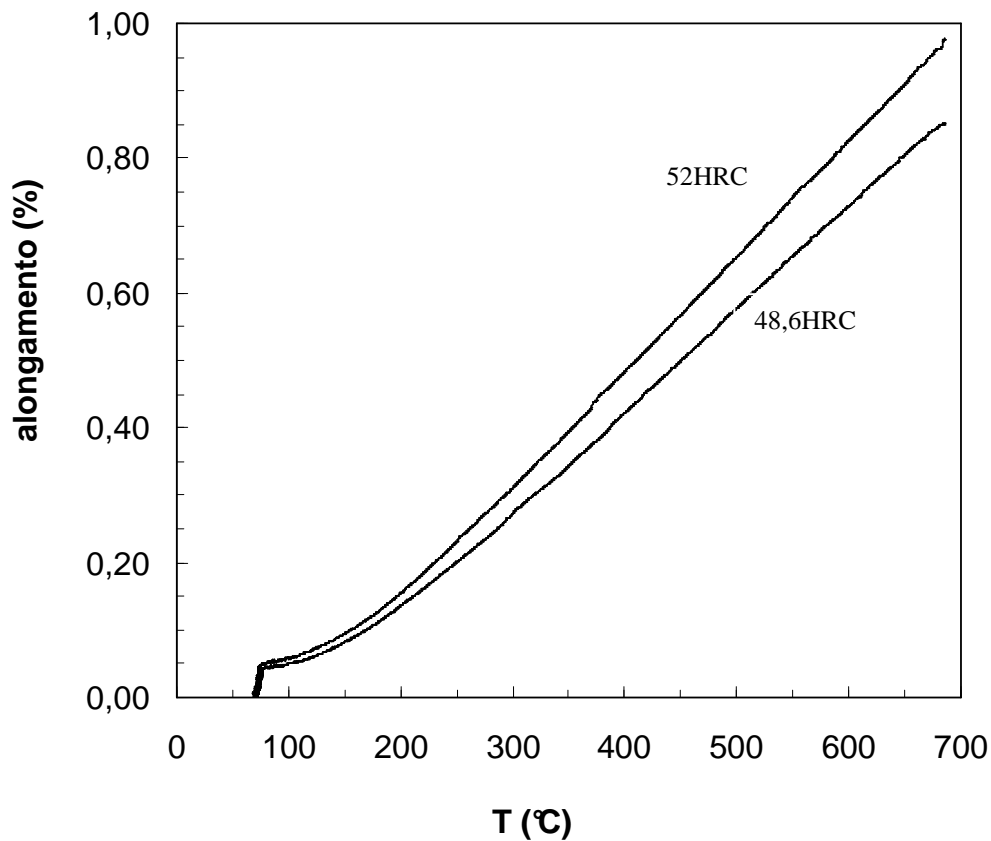
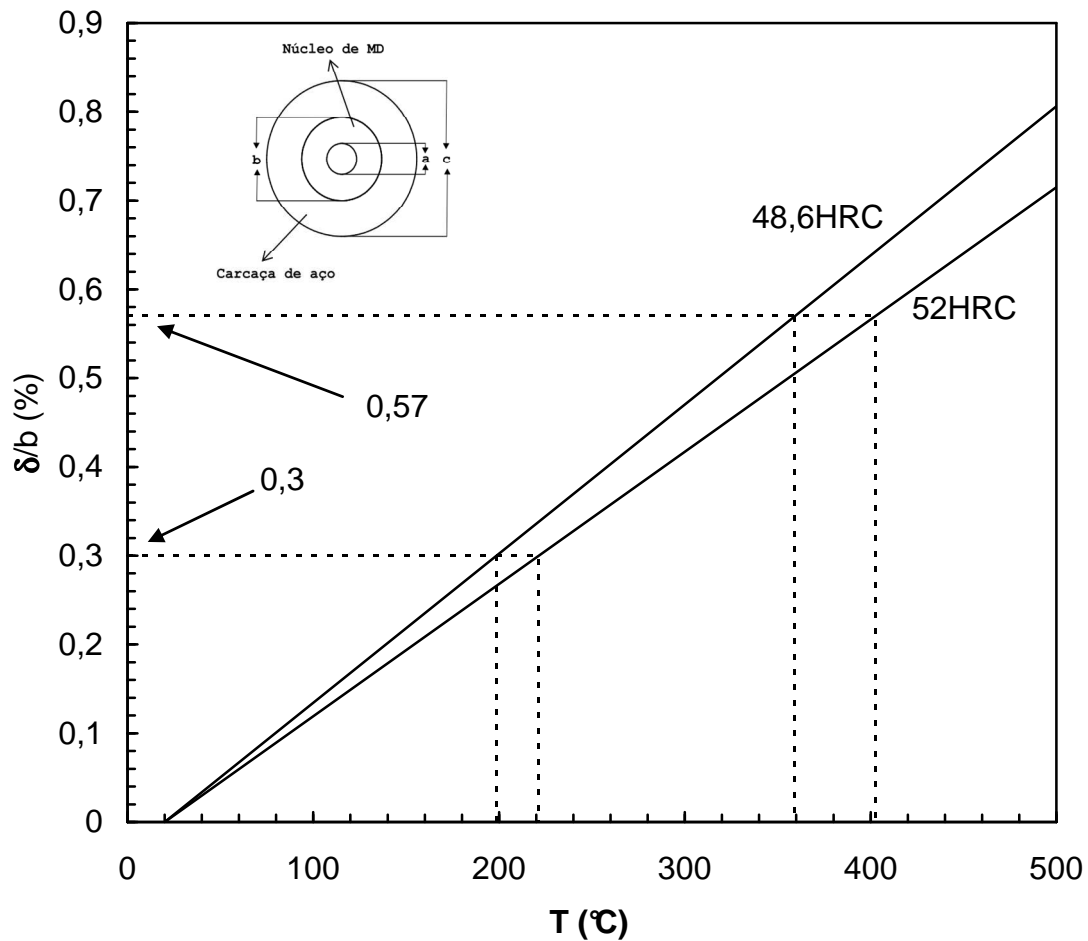


Figura 54 – Curvas dilatométricas do aço 1.2344 tratado termicamente.

Através dos valores obtidos neste ensaio é possível prever a expansão linear do aço em função da temperatura e conseqüentemente para um dado aperto prever a temperatura necessária para garantir um embutimento seguro, sem aplicar carga. No gráfico da Figura 55 apresenta-se esta evolução para o aço sujeito aos dois tratamentos térmicos, indicando-se ainda as temperaturas mínimas para se atingir o valor da interferência (0,3%) assim com o valor imposto internamente para a folga adicional (0,57%). Constata-se, pela observação destes dados que a temperatura a atingir pelas carcaças, para o exemplo específico do exemplo de embutimento aqui referido poderia ser entre 100 e 150°C inferior à prática corrente da DURIT.



Fig

Figura 55 – Temperaturas para embutimento a quente do aço 1.2344 em função da interferência .

Finalmente, os dados compilados na caracterização destes aços de grande importância para a Durit no campo de aplicação de matrizes, nomeadamente a dureza e tensão de cedência, permitiram a construção do gráfico da Figura 56. Apesar do número limitado de provetes testados nos ensaios de tração observa-se uma relação linear entre a dureza Rockwell C e a tensão de cedência dos aços 1.2344 e 1.2379 no intervalo de durezas 21HRC e 62HRC. Como os aços são muito diferentes microestruturalmente (1.2344 com poucos carbonetos e o aço 1.2379 com muitos carbonetos) e mesmo assim o coeficiente de correlação da reta é de 0,98, a curva poderá ser usada como primeira indicação para outros aços ou para estes mesmos aços, mas com níveis de dureza intermédia. O conhecimento destes valores é fundamental para impor coeficientes de segurança adequados, tanto no embutimento a quente como no embutimento a frio.

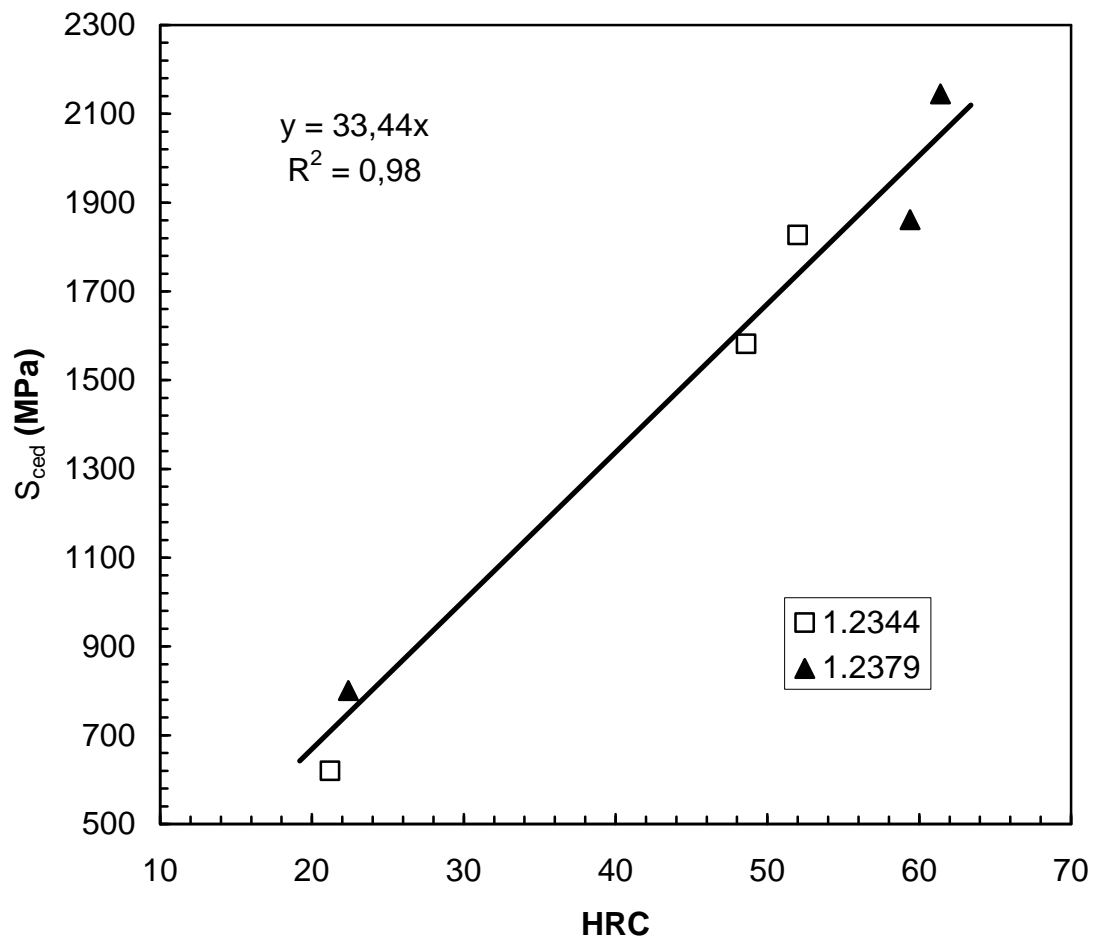


Figura 56 - Relação ente a tensão de cedência e a dureza Rockwell C dos aços 1.2344 e 1.2379.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

Capítulo 5 - Conclusões

Capítulo 5 - Conclusões

Os aços 1.2344 e 1.2379 são dois dos aços de maior importância económica no segmento de mercado das matrizes da DURIT, tendo sido selecionados para caracterização em diferentes níveis de dureza. Os tratamentos térmicos de têmpera e revenido a que ambos os aços foram sujeitos permitiram que se atingissem as durezas alvo pré-selecionada, nomeadamente: 48,6HRC e 52HRC para o aço 1.2344 e 59,4HRC e 61,4HRC para o aço 1.2379.

Em ambos os aços no estado recozido há deformação plástica extensa até à rotura, embora de maior valor para o aço 1.2344. O elevado teor de carbono e a presença de carbonetos no aço 1.2379 conferem-lhe uma tensão de cedência marginalmente superior, mas também superfícies de fratura com menos evidência de rotura plástica. Após tratamento térmico o valor da tensão de cedência sobe para mais do dobro, relativamente ao estado recozido para ambos os aços, sendo tanto maior quanto maior é a dureza. O valor máximo de tensão de cedência medido foi de 1827MPa para o aço 1.2344 e de 2145MPa para o aço 1.2379, sendo estes valores coincidentes com a resistência máxima dos mesmos devido à quase ausência de deformação plástica. A presença de carbonetos numa matriz martensítica revenida é a justificação microestrutural para a maior resistência mecânica do aço 1.2379.

O aço 1.2344 retém alguma plasticidade após tratamentos térmicos de endurecimento, enquanto que o aço 1.2379, no seu estado de maior dureza, apresenta uma rotura tipicamente frágil. A maior ductilidade do aço 1.2344 revelou-se também na sua maior capacidade de absorção de energia de impacto, enquanto que o aço 1.2379 se comporta como um material com fratura tendencialmente cerâmica, pois os tratamentos térmicos de endurecimento não afetaram estes valores, sendo praticamente constante (e baixa) a sua capacidade de resistir a impactos.

Há uma relação direta entre os valores de dureza Rockwell C e os valores da tensão de cedência de ambos os aços e que se traduz na equação: $S_{ced} = 33,44 \cdot HRC$. Esta expressão poderá ser utilizada para outros aços da mesma família.

Os dados obtidos permitiram concluir que o embutimento efetuado na DURIT apresenta coeficientes de segurança entre 2,6 e 3 para o aço 1.2344 e entre 3 e 3,6 para o aço 1.2379, ajustando empiricamente o processo à menor capacidade de absorção de impactos deste último.

Capítulo 5 - Conclusões

A análise térmica dimensional permitiu ainda concluir que a DURIT está a usar temperaturas de forno entre 100 e 140°C acima do necessário para atingir as folgas definidas internamente para o embutimento a quente.

Compilaram-se ainda dados na forma de gráficos que permitem identificar rapidamente a tensão de cedência de um dado aço em função da sua dureza Rockwell C, que permitem determinar a tensão de tração máxima na superfície interna de uma carcaça de aço em função da sua geometria, para os embutimentos a quente e a frio e ainda determinar a temperatura mínima para se fazer o embutimento a quente.

Referências Bibliográficas

- [1] DURIT; www.DURIT.pt (última consulta a 10 de janeiro de 2012)
- [2] Torres, C.S., Schaeffer, L.; *Sinterização do compósito metal duro WC-Co*, Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.4.3, 2009
- [3] Catálogo General Carbide, *The Designer's Guide to Tungsten Carbide*, 2008
- [4] Torres, C.S.; *Estudo da Moagem de Alta Energia e Sinterização do Metal Duro WC-Ni*; Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Porto Alegre, 2009
- [5] Pannoni, F.D.; *Aços Estruturais*; Blucher, 2010
- [6] Chiaverini, V.; *Aços e Ferros Fundidos – 7ª edição*”, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2002
- [7] Soares, P.; *Aços – Características e Tratamentos – 5ª Edição*, 2005
- [8] Seabra, A.V.; *Metalurgia Geral - Capítulo IX Volume II*; Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa 1981;
- [9] Silva, H.; *Relatório de Estágio – Métodos e Tempos*, 2009
- [10] Northrop, I.T.; *The joining of tungsten carbide hardmetal to steel*, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., vol.87, no. 5. May 1987.
- [11] Shigley, J.E.; *Mechanical Engineering Design – 5th Edition*; McGraw-Hill, 2002
- [12] Universal Afir; http://www.universalafir.pt/ficheiros/anexos_artigos/27/W302DE.pdf (última consulta a 20 de março de 2012)
- [13] Kennametal specialty carbide products, catálogo de 2010.
- [14] Fundación ASCAMM; *Documento guía para la elección de aceros y recomendaciones prácticas para la fabricación de moldes y matrices*; 1ª edición, Abril 2000
- [15] Becherer, A. Bruce, Whitteford, J.T.; ASM Handbook Vol. 4 – *Heat Treating*, ASM International, 2004
- [16] Totten, G.E.; *Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies*, Second Edition; Portland State University, 2006
- [17] Dados fornecidos pela empresa F. Ramada, Abril de 2012.
- [18] Molinari, A.; *Effect of deep cryogenic treatment on mechanical properties of tool steels*, Journal of Materials Processing Technology, Vol 118; 2001,

- [19] Pellizzari, M.; *Effecto del trattamento criogénico sulle proprieta microestruturalli dell'acco AISI H13*; La Metalurgia Italiana, Vol I; 2001;
- [20] Qamar, S.Z., Sheikh, A.K.; Arif, A.F.M., Pervez, T., Siddiqui, R.A.; *Heat treatment of a hot work die steel*; Archives of Materials Science and Engineering, Vol 8; 2007,
- [21] Bahrami, A.; *Effects of conventional heat treatment on wear resistance of AISI H13 tool steel*; Elsevier; 2004,
- [22] Frisk, K.; *Simulation of precipitation of secondary carbides in hot work tool steel*; Maney Publishing, 2012
- [23] Júnior, V.S., Mitsuyuki, O.; *Técnicas Metalográficas para Caracterização Microestrutural dos Aços*; 2º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais; 2008
- [24] Mansur, S.H.; *Técnicas de Caracterização de Materiais – Capítulo 7*; Guanabara, 2012
- [25] Davim, P.J.; Magalhães, G.A.; *Ensaio Mecânicos e Tecnológicos*; 3ª Edição, Estante editora, 2010
- [26] Chandler, H.; *Hardness Testing - Second Edition*, ASM International, 1999
- [27] Santos, O.F.J.; *Ensaio Destrutivos – Guia do Formando*, Instituto do Emprego e Formação Profissional; 2000
- [28] ASM Metals Handbook; *Metallography and Microstructures*; Vol. 9, ASM International, 2010
- [29] Pires, L.F.M.; Pinheiro, G.A.; *Ensaio Mecânicos dos Metais – princípios, definições, técnicas de ensaio e normas*; Instituto Nacional de Investigação Industrial, 1974
- [30] ASM Metals Handbook – *Fractography*; Vol. 12, ASM International, 2010
- [31] Catálogo Uddeholm; *Heat treatment of tool steel*, 2007
- [32] Effting, C.; *Mecânica da Fratura aplicada aos Materiais Dúcteis e Frágeis*; Universidade do estado de Santa Catarina; Joinville, 2004
- [33] Voort, G.F.V.; *Metallographic Techniques for Tool Steels*; 2004
- [34] Singh, U.P.; Streppel, A.H.; Kals, H.J.J.; *Design study of the geometry of a punching/blanking tool*; Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, 1992

ANEXO I

(CERTIFICADO DOS AÇOS)

CLIENTE CUSTOMER		Durit-Metalurgia Portuguesa do Tungsténio, Lda		N/PEDIDO Nº OUR ORDER Nº		161396 / 5									
MORADA ADDRESS		Arruamento C Apartado 24 3854-909 ALBERGARIA-A-VELHA		V/PEDIDO Nº YOUR ORDER Nº		112000467									
GUIA REMESSA/FACTURA Nº DELIVERY Nº / INVOICE Nº		156506/-----		QUANTIDADE (kg) QUANTITY (kg)		11,000		ORDEM DE FABRICO Nº WORK Nº		-----		DATA DATE		07/02/2012	
DESIGNAÇÃO PRODUTO QUALITY															
AÇO W302 ISCD. RD 20.5mm															
MATERIAL Nº WERKSTOFF Nº															
1.2344															
COMPOSIÇÃO QUÍMICA / CHEMICAL COMPOSITION(%)															
Nº VAZAMENTO HEAT Nº		LOTE BATCH		C	Cr	Mn	Mo	P	S	Si	V				
T71163		UA11		0.400	5.100	0.380	1.240	0.022	0.001	0.940	0.930				
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS / MECHANICAL PROPERTIES															
Nº VAZAMENTO HEAT Nº		LOTE BATCH		Dureza HB											
T71163		UA11		190											
OUTROS ENSAIOS / OTHER TEST RESULTS															
Nº VAZAMENTO HEAT Nº		LOTE BATCH													
OBSERVAÇÕES / OBSERVATIONS															
Estado de Fornecimento:															
												VALIDADO POR: Paulo Oliveira (Direcção da Qualidade)			

Processado e impresso por computador, e é válido sem assinatura.

RELATÓRIO DE ENSAIO - 2.2		ORIGINAL										
DE ACORDO COM EN 10204 : 2004		CERTIFICADO N°	329121									
ACCORDING TO		CERTIFICATE N°										
CLIENTE CUSTOMER	Durit-Metalurgia Portuguesa do Tungsténio, Lda	N/PEDIDO N° CUR ORDER N°	161396 / 10									
MORADA ADDRESS	Arruamento C Apartado 24 3854-909 ALBERGARIA-A-VELHA	V/PEDIDO N° YOUR ORDER N°	112000467									
GUIA REMESSA/FACTURA N° DELIVERY N° /INVOICE N°	156506/-----	QUANTIDADE (kg) QUANTITY (kg)	7,000									
		ORDEM DE FABRICO N° WORK N°	-----									
		DATA DATE	07/02/2012									
DESIGNAÇÃO PRODUTO AÇO K110 RD 16.5mm QUALITY												
MATERIAL N° 1.2379 WERKSTOFF N°												
COMPOSIÇÃO QUÍMICA / CHEMICAL COMPOSITION(%)												
N° VAZAMENTO HEAT N°	LOTE BATCH	C	Cr	Mn	Mo	P	S	Si	V			
R70344	UA10	1.540	11.050	0.270	0.720	0.019	0.0005	0.380	0.700			
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS / MECHANICAL PROPERTIES												
N° VAZAMENTO HEAT N°	LOTE BATCH	Dureza HB										
R70344	UA10	247										
OUTROS ENSAIOS / OTHER TEST RESULTS												
N° VAZAMENTO HEAT N°	LOTE BATCH											
OBSERVAÇÕES / OBSERVATIONS												
Estado de Fornecimento:												
										VALIDADO POR: Paulo Oliveira (Direcção da Qualidade)		

Processado e impresso por computador, e é válido sem assinatura.

ANEXO II

(PROPRIEDADES DOS AÇOS)



Sobremedida de Maquinagem p/ Aços Laminados e Forjados

Correspondência aproximada entre os valores de Dureza ROCKWELL, VICKERS, BRINELL e a resistência à Tração

HRC Carga 1470 N Diamante	HRA Carga 588 N Diamante	ROCKWELL				HV Carga ≥ 98 N	HB Carga 29400 N Esfera Standard	ESCLEROS- COPIO	RESISTÊNCIA A TRACÇÃO		ROCKWELL RC Carga 150 Kgf Diamante
		HRB Carga 980 N Esfera	HR15 N Carga 15Kgf-147 N Diamante	HR 30 N Carga 30Kgf-294 N Diamante	HR 45 N Carga 45Kgf-441 N Diamante				M Pa	kg/mm2	
		37,5				82	77		279	28,5	
		56,2				100	95		339	34,6	
		66,7				120	114	16	393	40,1	
		75,0				140	133	21	455	46,4	
		81,7				160	152	24	517	52,7	
		87,1				180	171	26	580	59,1	
		91,5				200	190	29	634	64,7	
		95,0				220	209	32	696	71,0	
20	60,5	97,8	69,4	41,4	19,6	238	226	34	758	77,3	20
21	61,0	98,5	70,0	42,3	20,7	243	231	35	780	79,5	21
22	61,5	99,0	70,5	43,2	21,9	248	237	35	793	80,9	22
23	62,0	100,0	71,0	44,1	23,1	254	243	35	814	83,0	23
24	62,4	101,0	71,6	45,0	24,3	260	247	37	835	85,1	24
25	62,8	101,5	72,2	45,9	25,5	266	253	38	855	87,2	25
26	63,3	102,5	72,8	46,8	26,6	272	258	38	876	89,3	26
27	63,8	103,0	73,4	47,7	27,8	279	264	40	903	92,1	27
28	64,3	104,0	73,9	48,6	28,9	286	271	41	924	94,2	28
29	64,7	104,5	74,5	49,5	30,1	294	279	41	951	97,0	29
30	65,3	105,5	75,0	50,4	31,3	302	286	42	979	99,8	30
31	65,8	106,0	75,6	51,3	32,5	310	294	43	1007	102,7	31
32	66,3	107,0	76,1	52,3	33,7	318	301	44	1035	105,5	32
33	66,8	107,5	76,6	53,2	34,8	327	311	46	1062	108,3	33
34	67,4	108,0	77,2	54,1	36,0	336	319	47	1096	111,8	34
35	67,9	108,5	77,7	55,0	37,2	345	327	48	1124	114,6	35
36	68,4	109,0	78,3	55,9	38,4	354	336	49	1158	118,1	36
37	68,9		78,8	56,8	39,6	363	344	50	1186	120,9	37
38	69,4		79,4	55,8	40,8	372	353	51	1213	123,7	38
39	69,9		79,9	56,3	41,9	382	362	52	1248	127,3	39
40	70,4		80,4	56,7	43,1	392	371	54	1283	130,8	40
41	70,9		80,9	57,0	44,3	402	381	55	1317	134,3	41
42	71,5		81,5	61,3	45,5	412	390	56	1351	137,8	42
43	72,0		82,0	62,2	46,7	423	400	57	1386	141,3	43
44	72,5		82,5	63,1	47,9	434	409	58	1420	144,8	44
45	73,1		83,0	64,0	49,1	448	421	60	1462	149,1	45
46	73,6		83,5	64,9	50,2	458	432	62	1510	154,0	46
47	74,1		84,0	65,8	51,4	471	442	63	1551	158,2	47
48	74,7		84,5	66,7	52,6	484	451	64	1599	163,1	48
49	75,2		85,0	67,0	53,0	498	464	66	1648	168,0	49
50	75,9		85,5	68,5	55,0	513	475	67	1690	172,3	50
51	76,3		86,0	69,4	56,1	528	487	68	1745	177,9	51
52	76,8		86,4	70,3	57,4	544	500	69	1806	184,2	52
53	77,4		86,9	71,2	58,6	560		71	1854	189,1	53
54	78,0		87,4	72,0	59,8	577		72	1917	195,5	54
55	78,5		87,9	73,0	60,9	595		74	1979	201,8	55
56	79,0		88,4	73,9	62,1	613		75	2034	207,4	56
57	79,6		88,9	74,8	63,2	633		76	2103	214,4	57
58	80,1		89,3	75,7	64,3	653		78	2171	221,4	58
59	80,7		89,8	76,6	65,5	674		80	2248	229,2	59
60	81,2		90,2	77,5	66,6	697		81			60
61	81,8		90,7	78,4	67,7	720		83			61
62	82,3		91,0	79,3	68,8	746		85			62
63	82,8		91,4	80,2	69,9	772		87			63
64	83,4		91,8	81,1	71,0	800		88			64
65	83,9		92,2	81,9	72,1	832		91			65
66	84,5		92,5	82,8	73,1	865		92			66
67	85,0		92,9	83,6	74,2	900		95			67
68	85,6		93,2	84,4	75,4	940		97			68