



**FEUP**

Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS



**DURIT**

DURIT Brasil Ltda

# **TRATAMENTOS TÉRMICOS DE TÊMPERA EM VÁCUO E EM ÓLEO DE AÇOS AISI H13 E D2**

Porto, Julho de 2006

Ciência. Inovação  
2010

Elaborado por: Miguel Nelson Aguiar Mendes Faria  
Orientado por: Eng. Nuno Miguel Miranda  
Prof. Henrique Santos

669(047.3)/  
LEMM  
2006/FARm



**FEUP**

Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS



**DURIT**

DURIT Brasil Ltda

# **TRATAMENTOS TÉRMICOS DE TÊMPERA EM VÁCUO E EM ÓLEO DE AÇOS AISI H13 E D2**

Porto, Julho de 2006

Ciência.  
Inovação  
2010

Elaborado por: Miguel Nelson Aguiar Mendes Faria  
Orientado por: Eng. Nuno Miguel Miranda  
Prof. Henrique Santos



## Agradecimentos

Quero apresentar os meus sinceros agradecimentos ao Sr. Eng. Manuel Valente, Director geral da DURIT Metalurgia Portuguesa do Tungsténio Ltda pela oportunidade que me concedeu em realizar este estágio curricular.

Ao Sr. João Valente, Director geral da empresa DURIT Brasil Ltda, pela oportunidade, por toda a hospitalidade e apoio do primeiro ao último dia da minha estadia em Salvador da Bahia.

Ao Eng. Nuno Miranda, pela incansável disponibilidade, orientação e conhecimentos transmitidos, tornando-se para mim uma referência a todos os níveis.

Quero agradecer ao Professor Henrique Santos pela orientação e ajuda.

Gostaria de apresentar a minha gratidão a todas as pessoas que trabalham na DURIT Brasil Ltda, com tive a oportunidade de conviver e aprender muito neste arranque da minha vida profissional.

Aos meus amigos no Brasil, pela forma como me receberam e me integraram.

Este trabalho é dedicado aos meus pais, ao meu padrinho e ao Brandão por toda a paciência, esforço e dedicação.

669 (047-3) / LECT 2006 / FALM

Univ. <small>de São Paulo</small>
Faculdade de Engenharia
Biblioteca
Nº 105298
CDU
Data 24 / 02 / 2010

# Índice

<b>Preâmbulo</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>2</b>
<b>1.1 Tratamento térmico de têmpera e revenido</b> .....	<b>2</b>
<b>1.1.1 Têmpera</b> .....	<b>2</b>
<b>1.1.2 Meios de arrefecimento de têmpera</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1.2 Revenido</b> .....	<b>5</b>
<b>1.2 Variação dimensional</b> .....	<b>5</b>
<b>1.3 Estudo da camada descarburada</b> .....	<b>6</b>
<b>1.4 Aços AISI H13 e AISI D2</b> .....	<b>6</b>
<b>2. Materiais, equipamentos e reagentes</b> .....	<b>7</b>
<b>3. Planeamento das tarefas</b> .....	<b>10</b>
<b>4. Encomenda dos aços</b> .....	<b>10</b>
<b>5. Caracterização do forno</b> .....	<b>10</b>
<b>4.1 Ajuste da banda proporcional</b> .....	<b>11</b>
<b>4.2 Calibração da malha do forno</b> .....	<b>12</b>
<b>5. Sequência operatória para tratamento térmico do aço AISI D2</b> .....	<b>14</b>
<b>5.1 Tratamento térmico de têmpera e revenido</b> .....	<b>14</b>
<b>5.2 Tratamento térmico de recozimento de amaciamento</b> .....	<b>18</b>
<b>6. Tratamento térmico de têmpera em óleo e sob gás pressurizado</b> ....	<b>19</b>
<b>6.1 Estudo da variação dimensional</b> .....	<b>21</b>
<b>6.2 Estudo da descarburação</b> .....	<b>23</b>
<b>7. Exemplo prático da aplicação dos resultados</b> .....	<b>26</b>
<b>8. Bibliografia</b> .....	<b>28</b>
<b>Anexos</b>	

## Preâmbulo

O trabalho de estágio consistiu em efectuar tratamentos térmicos à escala industrial sobre amostras de dois aços seleccionados. O estudo envolveu o processamento de têmpera em óleo e em gás sob pressão, com vista a determinar sua influência nas características dos materiais. O objectivo do trabalho visou estabelecer, a partir de resultados práticos, diferenças resultantes dos processos de tratamento térmico de têmpera, nomeadamente nos seguintes aspectos:

- Estudo da variação dimensional verificada após cada um dos tratamentos;
- Estudo da camada descarburada.

Os resultados permitiram ainda avaliar a microestrutura obtida através de cada um dos processos, assim como avaliar a propriedade dureza.

Os aços escolhidos foram o AISI H13 e o AISI D2. Essa escolha foi motivada pela Durit Brasil, que pretende efectuar tratamentos térmicos de têmpera nestes aços num forno a vácuo com têmpera sob gás pressurizado, equipamento do qual passará brevemente a dispor. Seguindo as condições operatórias actuais da empresa, foi proposto efectuar para ambos os aços, o tratamento térmico de têmpera utilizando o forno eléctrico com atmosfera oxidante e o óleo como meio de arrefecimento. Esse procedimento já existia para o aço AISI H13 mas não para o AISI D2 e, nesse sentido, surgiu a necessidade de elaborar uma sequência operatória para o tratamento térmico de têmpera para este aço, através do mesmo processo.

A têmpera sob gás pressurizado deve ser usada quando a taxa de arrefecimento que se pretende é superior à imposta pelo arrefecimento ao ar e inferior à obtida pelo arrefecimento em óleo. Os aços de liga utilizados neste trabalho são passíveis de serem temperados ao ar. Como tal, os resultados da variação dimensional obtidos após têmpera em óleo podem ser considerados forçados, uma vez que eram evitáveis.

Nas etapas de aquecimento e austenitização, é vantajosa a utilização de um forno a vácuo em detrimento de um forno que opere com atmosfera oxidante, muito devido ao fenómeno da descarburação. Essa vantagem traduz-se em significativas poupanças de aço, ferramentas, horas/máquina e horas/homem, mas também na redução de tensões estruturais, distorções e mesmo fractura. Por outro lado, problemas ecológicos, de segurança e toxicológicos relacionados principalmente com a névoa de óleo resultante do banho de têmpera tornam a têmpera em óleo a ser evitada sempre que possível.

# 1. Introdução

## 1.1 Tratamento térmico de têmpera e revenido

Capazes de afectar a maioria dos metais, principalmente as ligas ferrosas e os aços ligados em particular, os tratamentos térmicos são de elevada importância prática e são alvo de um contínuo desenvolvimento e aperfeiçoamento.

Como tratamento térmico, entende-se o conjunto de operações de aquecimento e arrefecimento que sob condições controladas de tempo, temperatura, atmosfera e velocidade, visam transformações substanciais na estrutura e, conseqüentemente, nas propriedades (em particular mecânicas) dos aços. Uma vez que é necessário assegurar a obtenção de determinadas propriedades, é essencial que haja um claro conhecimento das estruturas que podem ser produzidas nos aços em diferentes condições, nos diversos processos e equipamentos disponíveis para o efeito.

Em função de um ou vários objectivos específicos, é grande a variedade de tratamentos térmicos aplicáveis, nomeadamente aos aços, tais como homogeneização, amaciamento, endurecimento, entre outros. [1,2,3,4]

Neste trabalho serão abordados especificamente os tratamentos térmicos têmpera, de revenido e de recozimento de amaciamento.

### 1.1.1 Têmpera

O tratamento térmico de têmpera consiste em arrefecer controladamente um aço desde o seu estado austenítico, de tal modo que se consiga evitar a transformação da austenite em ferrite ou cementite mais perlite, dando lugar preferencialmente à transformação em martensite. A temperabilidade é um conceito importante a reter na medida em que pode ser definida como a previsão da profundidade de endurecimento numa dada peça, estabelecendo uma relação entre o aço com o qual foi produzida e as condições do tratamento térmico. Uma microestrutura diz-se temperada quando apresenta 50% ou mais de martensite. São vários os métodos de avaliação da temperabilidade: curvas em U e os procedimentos de Grossman e de Jominy.

Conhecendo com rigor a lei de arrefecimento é possível prever a microestrutura mas é grande o número de variáveis que a afectam, por exemplo: as dimensões e geometria da peça, a qualidade do seu acabamento superficial, a temperatura de austenitização, a condutibilidade térmica do aço, a natureza, temperatura e intensidade

de agitação do meio de arrefecimento. A severidade de têmpera varia significativamente quer mudando o meio de arrefecimento quer, se no mesmo meio, mudarmos a temperatura, a agitação, etc. As severidades de arrefecimento muito elevadas originam distorções, tensões residuais e até mesmo fractura, em alguns casos. [4]

### **1.1.2 Meios de arrefecimento usados na têmpera**

São vários os meios de arrefecimento usados na têmpera: água, óleo, soluções aquosas de polímeros, sais fundidos e gases inertes sob pressão. Dois interessam particularmente no âmbito deste trabalho, o óleo e o gás sob pressão.

#### **Óleo**

Existem vários tipos de óleos para tratamento térmico: convencionais, de arrefecimento acelerado e de têmpera em banho quente. A natureza do óleo, a temperatura e a agitação a que ele opera dependem da operação que se requer. O óleo utilizado no decorrer do trabalho experimental foi do tipo convencional. É o tipo de óleo mais simples e económico. As leis de arrefecimento que óleos deste tipo proporcionam não são muito rápidas. A primeira etapa de arrefecimento (radiação) é longa e na terceira etapa (convexão) o arrefecimento é lento. No entanto, devido à utilização do óleo em torno dos 40°C durante a têmpera, a lei de arrefecimento desta terceira etapa é acelerada, aumentando também o risco de distorção. O aumento da temperatura do banho conduz a uma diminuição da viscosidade e, conseqüentemente, a um aumento da velocidade média de arrefecimento. A temperatura máxima de aplicação de qualquer óleo é dada pelo ponto de inflamação do mesmo.

O óleo, utilizado como meio arrefecedor de têmpera, pode ser colocado num recipiente externo ao forno onde, durante o processo, as peças são mergulhadas. Este procedimento implica que as etapas que precedem o arrefecimento (aquecimento, respectivos estágios intermédios e austenitização) tenham lugar num forno, geralmente a operar com atmosfera oxidante. Em alternativa, a têmpera em óleo pode ocorrer dentro de um forno de vácuo que possua duas câmaras. Neste processo, a câmara de têmpera (onde está o óleo) é activada com vácuo e recebe a carga da câmara de aquecimento.

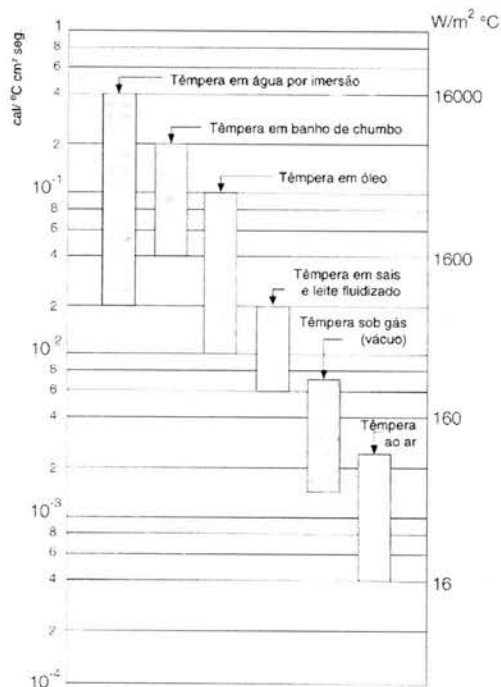
O perigo de operar com óleo no processo de têmpera reside na libertação de gases e risco de chama. Como medidas de segurança é necessário respeitar algumas



normas, como o uso de Equipamento de Protecção Individual (EPI's) - luvas, máscara, avental, etc.[1,4,5]

### Gás sob pressão

A utilização de gás pressurizado na têmpera está associado à austenitização em vácuo. Actualmente, é o processo de tratamentos térmicos que mais tem tido



**Fig. 1** - Coeficientes de transferência de calor para diferentes meios arrefecedores. [6]

A velocidade de arrefecimento é geralmente função da pressão do gás. No entanto, as leis de arrefecimento impostas são lentas, sendo de realçar que é inexistente a segunda etapa do arrefecimento rápida (característica dos meios líquidos).

São vários os gases utilizados para o processo de têmpera em fornos a vácuo. A sua aplicação depende do preço, propriedades físicas e de transferência de calor. É importante referir que a excelente uniformidade com que o gás entra e circula na câmara do forno, e que minimiza os gradientes térmicos característicos na têmpera, diminuindo assim o risco de ocorrer distorções ou mesmo fracturas.[4,5]

desenvolvimento. Comparativamente com as restantes formas de tratamento, apresenta vantagens no acabamento superficial das peças, devido à ausência do oxigénio e na atenuação das deformações, em virtude do elevado rigor de controlo das leis de aquecimento e arrefecimento. No tratamento térmico em fornos a vácuo, os óxidos metálicos que possam surgir na superfície das peças volatilizam-se ao passo que em fornos de atmosfera oxidante têm lugar reacções químicas.

### 1.1.3 Revenido

Dada a sua fragilidade, é impossível a utilização de um aço após tratamento térmico, em termos industriais. Com vista a perder essa fragilidade, executam-se sempre revenidos, que servem também para reduzir ou eliminar tensões, diminuir dureza, e, conseqüentemente, aumentar a plasticidade e a resistência ao choque. Em resumo, o revenido visa otimizar as propriedades dureza e resistência ao choque, em função da aplicação que se pretende. Alterando a microestrutura de têmpera, cria-se uma outra mais estável de acordo com as características pretendidas. O conjunto de transformações estruturais que tomam parte durante o revenido, são tanto mais intensas quanto mais elevada a temperatura de revenido. Para temperaturas de revenido fixas, o processo é potenciado com o aumento da temperatura de revenido. O efeito de um revenido num aço é, habitualmente caracterizado por meio de curvas de revenido (dureza em função da temperatura de revenido). [4,6]

## 1.2 Variação Dimensional

Muito embora a finalidade da têmpera seja otimizar as propriedades do aço e ao mesmo tempo minimizar a distorção, estes são, contudo, objectivos contraditórios.

As distorções podem ser consideradas em dois grupos: distorções de volume e de forma. As distorções de forma (ou geométricas) manifestam-se por variações de curvatura ou das relações angulares, torções, flexões, etc. São o resultado de tensões residuais aplicadas ao material (na maquinação, por exemplo), de fluência durante o tratamento térmico e de gradientes térmicos. As distorções de forma são mais imprevisíveis e aleatórias devido aos parâmetros que lhes estão associadas. Os factores relacionados com o aparecimento dos gradientes térmicos na têmpera são: as dimensões da peça, a lei de arrefecimento imposta, a agitação e o próprio meio de têmpera e ainda a qualidade da superfície da peça.

As distorções de tamanho ou volume manifestam-se por uma expansão ou contracção, e resultam da variação de volume específico. A têmpera e o revenido são os principais responsáveis pelas distorções volumétricas. Uma vez que os diferentes constituintes do aço têm volumes específicos diferentes, quando ocorrem as transformações características dos aços, eles vão verificar dilatações e contracções. Na têmpera verifica-se uma dilatação do aço, que no entanto pode ser compensada, em parte, pela ocorrência de austenite residual.[1,4]

### 1.3 Estudo da camada descarburada

Os ciclos térmicos de têmpera que são elaborados em atmosfera oxidante são susceptíveis de criarem problemas na superfície das peças. As peças, em contacto com o oxigénio reagem quimicamente. A superfície fica rica em óxido de ferro e pobre em carbono, em virtude da oxidação/descarburação superficial e isso traduz-se numa alteração das propriedades como a dureza e resistência à fadiga. Torna-se necessário, para aços que vão ser tratados nessas condições, conhecer qual a camada descarburada que vai ter lugar pois isso terá influência directa no desenho e no gasto de material. A melhor protecção é conseguida através da utilização de fornos que operam sob vácuo ou em atmosferas controladas. Nestes casos, não é esperado detectar-se sinais de descaburação nas peças tratadas.

De salientar que, a descaburação aumenta com o aumento da temperatura de operação pois o carbono do interior da peça difunde-se para a superfície para assim compensar a perda deste elemento. É por esta razão que a dureza aumenta à medida que se elimina a camada superficial.[6]

### 1.4 Aços AISI H13 e AISI D2

Tipo de aço	<u>AISI H13</u>	<u>AISI D2</u>
Composição química (% wt)	C – 0,37-0,43; Mn – 0,30-0,50; Si – 0,90-1,20; Cr – 4,80-5,50; Ni. – 0,30 máx.; Mo – 1,10-1,40 V – 0,90-1,10	C – 1,40-1,60; Mn – 0,60; Si – 0,60; Cr – 11,00-13,00; Mo – 0,70-1,20; V – 1,10; Co – 1,00
Outras denominações	W.-Nr. 1.2344 DIN X 40 CrMoV 5 1	W. -Nr.1.2379 DIN X 155 CrVMo12 1

#### Aço AISI H13

Aço ao crómio-molibdénio-vanádio para trabalho a quente, com excelentes propriedades mecânicas a temperaturas elevadas, alta maquinabilidade e grande estabilidade dimensional no tratamento térmico. É pouco sensível a choques térmicos que ocorrem em ferramentas arrefecidas com água. Extremamente susceptível à descaburação de modo que é aconselhável proteger do ar, ou austenitizar em atmosfera controlada ou em vácuo. Regista boa profundidade de têmpera e resistência à fractura. Após revenido não apresenta um endurecimento secundário significativo devido ao baixo teor em carbono. A resistência à corrosão é mediana.

A sua gama de aplicações é vasta: matrizes e punções para forjamento, matrizes de recalçamento a quente e insertos para matrizes, moldes e componentes de máquinas de fundição sob pressão de ligas de zinco e alumínio, matrizes de extrusão de latão, alumínio e magnésio, mandris e outros componentes de extrusoras, moldes para plásticos, facas de tesouras a quente.[2]

### **Aço AISI D2**

Aço-ferramenta muito versátil, com elevado teor em carbono e cromo. Temperável ao ar devido ao seu elevado teor em molibdénio. Excelente resistência à abrasão devido ao elevado volume de carbonetos de cromo na sua microestrutura. Exibe distorção mínima após têmpera. De modo a adquirir uma dureza elevada, estes aços devem ter estágios de austenitização no limite máximo aconselhável para assegurar uma boa dissolução dos carbonetos.

Cortantes de precisão para espessuras até 12mm, lâminas de corte para espessuras até 6mm. Matrizes de extrusão, cunhos e punções para trabalho a frio. Moldes simples para plástico com alta resistência ao desgaste.[2,11]

## **2. Materiais, equipamentos e reagentes**

Em seguida especifica-se todos os equipamentos e instrumentos, assim como os materiais e reagentes que estiveram envolvidos em todo o percurso experimental.

- **Matéria – prima**

Aços AISI H13 e D2. As quantidades e dimensões dos provetes utilizados no estágio industrial encontram-se no quadro I e no quadro II do Anexo.

- **Forno K400 da Brasimet**

Forno de câmara com aquecimento eléctrico. Opera em atmosfera oxidante e possui um termopar embutido do tipo S ligado a um controlador de aquecimento com ajuste da banda proporcional. A temperatura máxima de trabalho é 1300 °C. Potência instalada de 400kW. Dimensões da câmara de 400x600x600mm. (ver foto no Anexo).

- **Forno de vácuo**

Forno de vácuo *IPSEN*. Têmpera em atmosfera controlada de N<sub>2</sub>. O forno possui quatro termopares do tipo K: dois destinam-se a colocar em locais preferenciais

das peças; um controla a temperatura na câmara e o outro está ligado ao alarme. O ciclo térmico é controlado com um controlador PID da IPSEN. (ver foto no Anexo).

- **Torno mecânico *Nardini 350***

Usado para confeccionar eixos e maquinar as peças cilíndricas. Neste caso foi utilizado para maquinar o diâmetro externo e faceamento das amostras.

- **Rectificadora plana *Ferdimat***

Usada para rectificar as superfícies planas, nomeadamente as paralelas. A mesa é dotada de movimento transversal e longitudinal que permite que toda a superfície da peça seja atingida.

Na rectificadora plana foram utilizadas como ferramentas de corte, mós de óxido de alumínio e de nitreto cúbico de bóro (Borazon - CBN)

**Mó de óxido de alumínio branco**

Tido em conta como um dos tipos de mós mais populares, o óxido de alumínio é extremamente resistente e tem uma forma de cunha que auxilia a penetração em alta velocidade em materiais resistentes sem a perda excessiva ou fractura do grão. É usado com bom rendimento em materiais com elevada resistência tais como aços de liga com dureza inferior a 40-45 HRC para desbaste e rectificação. A mó de óxido de alumínio utilizada apresenta granulação média (60-46), dureza média-mole (K-J), estrutura densa e liga vitrificada.[7]

**Mó de Borazon - CBN**

As mós de Borazon (nitreto cúbico de boro - CBN) são aconselháveis para a rectificação de aços rápidos/temperados e aços sinterizados com dureza superior a 45 HRC, onde superam em economia e precisão os abrasivos convencionais (óxido de alumínio e carboneto de silício). A escolha da liga e sua dureza, granulação e concentração do abrasivo está intrinsecamente ligada ao serviço a ser executado. Em seguida descrevem-se características da mó de Borazon utilizada.

- Liga abrasiva: tipo resinóide, própria para operações de rectificação de aços rápidos e temperados mas que requer boa refrigeração pois não é boa condutora de calor;
- Material do corpo: constituído por resina plástica com reforço não metálico com bom amortecimento de vibrações;
- Granulação: B181 [corresponde acima de  $1,2\mu\text{m}$  Ra (rugosidade)];
- Concentração: 12,5% de grãos CBN no volume da camada abrasiva;
- Velocidade de corte: 30-50 m/s com refrigeração e 15-30 m/s a seco;

- Velocidade de remoção: 3000 mm<sup>3</sup>/min.[7,8]

- **Centro de maquinação vertical *Romi /Discovery 560***

Alta capacidade de remoção de material e alta precisão. Entre outras especificações, dotada de troca automática de ferramentas e CNC de alta performance que possui processador, memória, regulações e entradas de medição.

O software de programação é o ShopMill, que permite simplificar a elaboração de programas através de entrada de dados em telas amigáveis ao programador, que não necessita de conhecimentos da linguagem ISO. A programação é simplificada através de ciclos fixos de furação, fresamento e corte de perfis. Possui simulação gráfica de maquinação e permite a operação da máquina nos modos manual ou automático. [9,10]

- **Lapidador *Lapmaster de 15''***

Lapidador com disco de cobre de 15'' de diâmetro e com spray de suspensão de diamante de 14µm de granulometria.

- **Durómetro *Wilson /Rockwell série 500***

Durómetro para medição de dureza HRC

- **Durómetro *Wolpert***

Utilizado para medição de dureza Vickers com uma carga de 30Kgf e para dureza Rockwell C com uma carga de 150 Kgf.

- **Discos de desbaste e polimento *Struers***

Foram utilizados dois discos de polimento nos quais se usaram pasta diamantada de 5-10µm (pré-acabamento) e 2-4µm (acabamento);

- **Microscópio *Leitz***

Objectivas de 100x, 200x, 500x e 1000x. O microscópio tem acoplado um adaptador de câmara ligado a um CPU que permite o tratamento e armazenamento de imagem.

- **Reagentes**

Ataque para aços Nital 2% (ácido nítrico e álcool).

### 3. Planeamento das tarefas

Toda a actividade do estágio foi definida e organizada através da construção de um diagrama de Gantt que ajudou a posicionar as diferentes tarefas do trabalho no período de tempo disponível, efectuando contudo ajustes regulares.

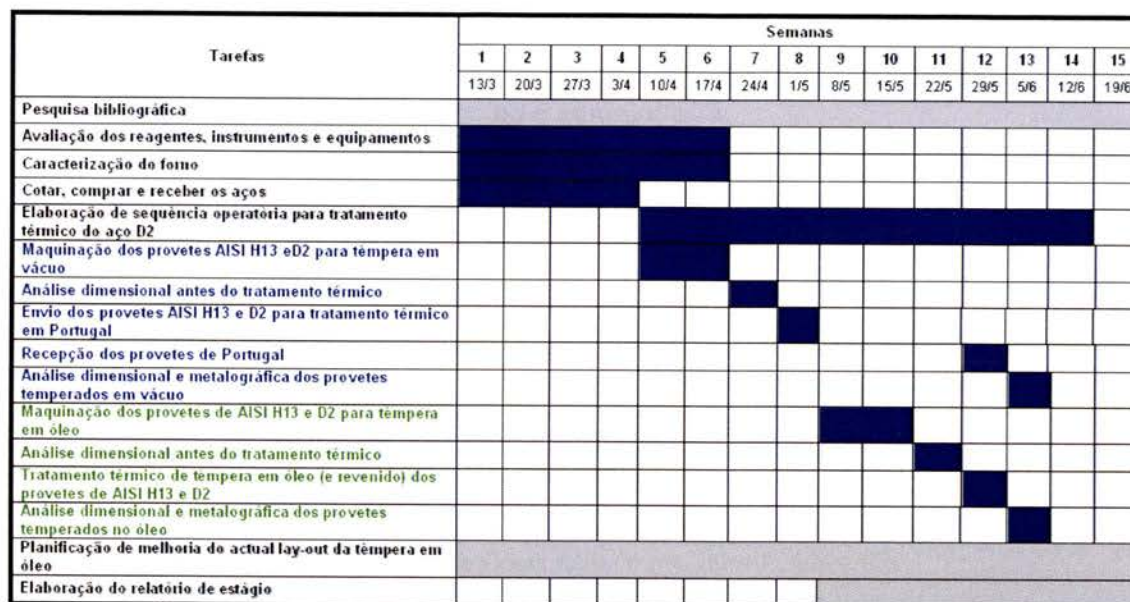


Fig. 2 - Diagrama de Gantt que estabelece as tarefas que constituem o estágio no período em que este decorreu.

### 4. Encomenda dos aços

Os aços e suas respectivas quantidades foram cotados e depois encomendados à empresa Iguafér - Ferro e Aço, de São Paulo, Brasil – empresa certificada pela ISO 9001:2000. No anexo, além da informação detalhada relativamente aos aços está uma cópia do certificado de qualidade emitido pelo fornecedor (quadros I e II do Anexo).

### 5. Caracterização do forno

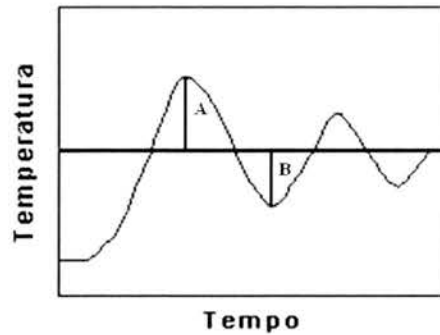
Antes de iniciar os procedimentos no forno com o qual se iria trabalhar procurou-se caracterizá-lo, não só para avaliar o seu estado de funcionamento actual mas também para optimizar o seu desempenho, através do conhecimento e correcção dos erros e factores que influenciam a sua eficiência. A caracterização do forno de tratamentos térmicos consistiu em duas etapas:

- avaliação da banda de ajuste do forno;
- calibração da malha do forno (termopar, cabo de compensação e controlador).

## 5.1 Ajuste da banda proporcional

A banda é um valor que se ajusta no forno e sobre o qual o controlador actua para controlar o processo. Tem como objectivo melhorar a sua estabilidade no controle do aquecimento e manutenção da temperatura desejada.

A banda de ajuste é um algoritmo que monitoriza continuamente o erro relativamente ao setpoint e analisa a resposta do controlador durante as perturbações ao processo. Se o algoritmo reconhecer uma oscilação responde recalculando o parâmetro proporcionalidade entre valores máximo e mínimo.



**Fig. 3** – Exemplo de um ciclo de aquecimento de um forno com controlador de aquecimento com o valor banda = 0%

$$Banda(\%) = \left(1 - \frac{B}{A + B}\right) \times 100 \quad [12] \quad (1)$$

Bom controlo significa: estabilidade da linha de temperatura de controlo no setpoint, ou seja, sem grandes flutuações, e também resposta rápida aos desvios em relação ao setpoint igualando assim a temperatura pretendida

O valor banda obtido é ajustado no respectivo botão do controlador. Desta forma o funcionamento será optimizado e o tempo de estabilização da temperatura de um patamar será menor.

O procedimento para determinar o valor da banda passou pelas seguintes etapas:

1. Ajustou-se o valor banda do mostrador do forno a zero;
2. Definiu-se a temperatura de setpoint em 1003 °C;
3. Colocou-se o forno vazio em funcionamento e registaram-se os valores de temperatura, fornecidos pelo mostrador “Leitura” (mostra o valor medido pelo termopar embutido no fundo do forno) ao longo do tempo;
4. Leu-se os desvios máximos positivo A e negativo B (figura 3);
5. Aplicou-se a fórmula (1) para determinar a banda;



6. Repetiu-se o procedimento anterior já com a banda ajustada ao valor resultante da aplicação da fórmula (1).

### Resultados do ajuste da banda proporcional

Na seguinte figura apresentam-se os valores de temperatura em leituras efectuadas ao longo do tempo. Primeiro com a banda ajustado a zero e, depois, ajustado ao valor resultante da aplicação da fórmula (1).

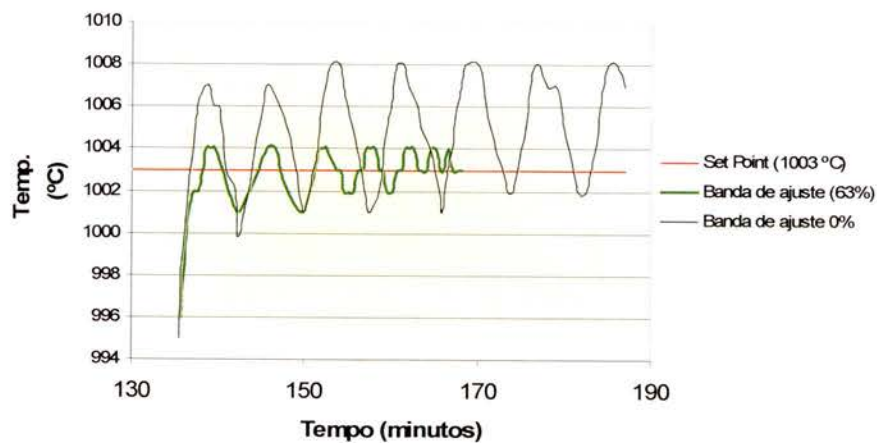


Fig. 4 - Comparação de comportamentos do forno para valor de banda 0% e 63%.

### Conclusões do ajuste da banda do forno

Após ter ajustado a banda para um valor de 63%, foi muito mais rápida e eficaz a aproximação ao patamar predefinido (1003 °C). Cerca de 36 minutos depois de se ter atingido os 1003 °C, a temperatura do mostrador “Leitura” estabilizou quase por completo nessa temperatura, oscilando no máximo 1 °C por períodos de um ou dois segundos.

## 5.2 Calibração da malha do forno

Foi encomendado ao laboratório de calibração IOPE, acreditado pela Rede Brasileira de Calibração (RBC – INMETRO), uma calibração de toda a malha do forno: indicador digital, cabo de compensação ( $\varnothing$  6,0 mm) e sensor termopar. A calibração foi feita em 5 valores de temperatura diferentes.

O procedimento consistiu em comparar o desempenho do termopar do forno com um termopar calibrado com um desvio conhecido. Numa pequena fonte de calor colocou-se o termopar do forno e o termopar calibrado (propriedade do laboratório de

calibração) a 170mm de profundidade e compararam-se as leituras de ambos. Ajustaram-se durante o procedimento 5 setpoints na fonte de calor: 250, 500, 755, 1006 e 1100 °C. A temperatura registada pelo termopar calibrado determinou-se através do valor registado num multímetro, o qual se convertia em °C recorrendo a uma tabela. O valor registado pelo termopar do forno leu-se no indicador do controlador, situado na parte frontal do mesmo.

No Anexo pode ser consultada uma cópia do certificado de calibração (figura 3 do Anexo).

### Resultados da calibração da malha do forno

Os resultados que estão resumidos na seguinte tabela referem-se à média de 4 leituras, tomadas num intervalo de 60 segundos.

**Quadro I** – Resultados da calibração da malha do forno K400-Brasimet (Durit Brasil).

Temperatura Referência V.V.C. (°C)	Média das Leituras (°C)	Erro (°C)	Incerteza de Medição ± (°C)
249,96	250,0	0,04	2,06
501,16	500,0	-1,16	2,44
758,13	755,0	-3,13	2,43
1005,82	1006,0	0,18	2,43
1100,02	1100,0	-0,02	2,65

V.V.C. = valor verdadeiro convencional

Erro = Média das leituras – V.V.C.

O resultado das leituras para uma distribuição normal, corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

No Anexo encontra-se uma cópia do certificado de calibração emitido.

### Conclusões da calibração da malha do forno

A calibração da malha do forno mostrou que o seu funcionamento, nomeadamente a leitura da temperatura fornecida pelo controlador e registada pelo termopar é considerada satisfatória. O maior erro relativamente à temperatura de referência verifica-se para o “setpoint” 755 °C.

## 6. Sequência operatória para tratamento térmico do aço AISI D2

### 6.1 Tratamento térmico de têmpera e revenido

Este procedimento teve como objectivo elaborar a sequência operatória para tratar termicamente o aço AISI D2 nas condições que a Durit Brasil dispõe. O objectivo consistiu em construir curvas de revenido e diagrama de recozimento de amaciamento que satisfaçam os respectivos fins. O resultado é inserido na instrução de trabalho de tratamentos térmicos da empresa para permitir consulta – ver figura 5 do Anexo.

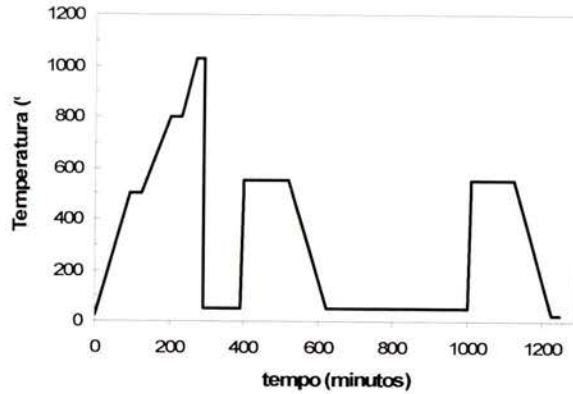
Utilizaram-se provetes com dois diâmetros diferentes (38,1mm e 12,7mm), ambos com 50mm de comprimento. As dimensões e quantidades utilizadas podem ser consultadas no quadro I do Anexo. Para a duração do estágio austenítico em função do diâmetro das amostras, o comprimento destas deveria ser 4 vezes maior. Assim, o ideal seria as amostras de 38,1mm de diâmetro terem acima de 155 mm de comprimento. As dimensões acima descritas foram utilizadas seguindo o exemplo de estudos semelhantes realizados na empresa, para outros aços.

Com base nos dados bibliográficos<sup>[2]</sup> e tendo em conta os resultados que se pretendiam, escolheram-se, inicialmente, duas temperaturas de austenitização (1010 °C e 1065 °C) e três temperaturas de revenido (550, 575 e 600 °C) para cada temperatura de austenitização. Mais tarde, à medida que se verificaram desvios significativos relativamente aos dados da bibliografia<sup>[2]</sup>, efectuaram-se novos ensaios com ajustes ao nível das temperaturas de revenido e das durações dos estágios austeníticos.

O aquecimento até à austenitização envolveu dois estágios intermédios: um a 500°C e outro a 800°C. A taxa de aquecimento até à austenitização (no último patamar de aquecimento) foi de aproximadamente 5°C/min. Após estágio austenítico, as peças foram retiradas do forno e introduzidas no óleo, dentro de uma cesta. Dispondo apenas de um forno, teve-se que esperar a estabilização do mesmo na temperatura de revenido desejada e colocaram-se as peças no seu interior para a realização do primeiro revenido. Por fim retiraram-se as peças do forno deixando-as a arrefecer ao ar. Todos os revenidos tiveram a duração de 2h tendo sido realizado um segundo revenido nas mesmas condições do primeiro.

No final, obteve-se um vasto leque de resultados, dos quais apenas alguns se seleccionaram para construir o procedimento. Os resultados são os dos ensaios de

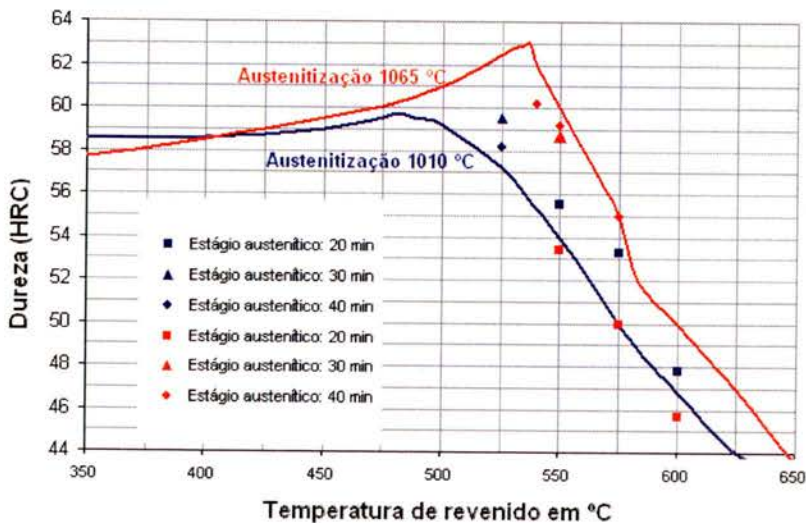
dureza HRC efectuados a cada amostra. O método aplicado foi o da Durit Brasil. Procedeu-se a três ensaios, considerando o último destes o resultado.



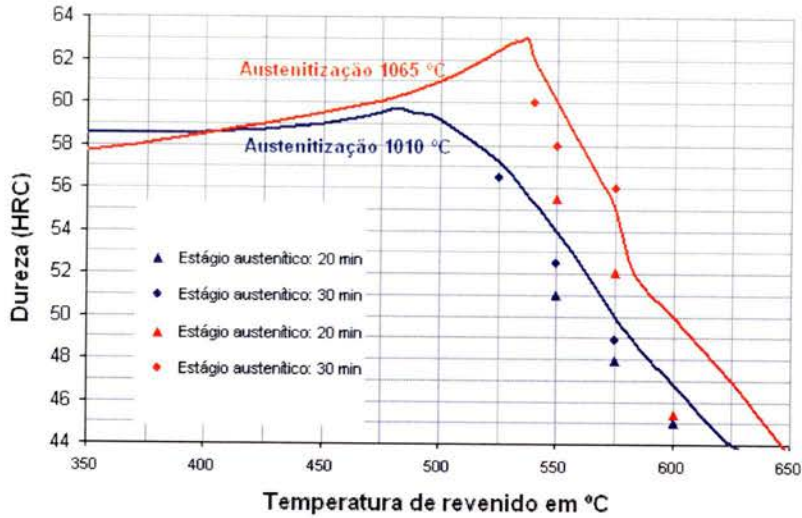
**Fig. 5** - Ciclo térmico de têmpera e revenido do aço AISI D2

### Resultados da sequência operatória para tratamento térmico de têmpera e revenido do aço AISI D2

As figuras 6 e 7 exibem os resultados de dureza HRC obtidos nas várias condições de tratamento térmico aplicadas às amostras do aço AISI D2. As curvas de revenido foram construídas com valores fornecidos pela bibliografia[2]. Os valores destacados correspondem aos que foram obtidos neste trabalho experimental.

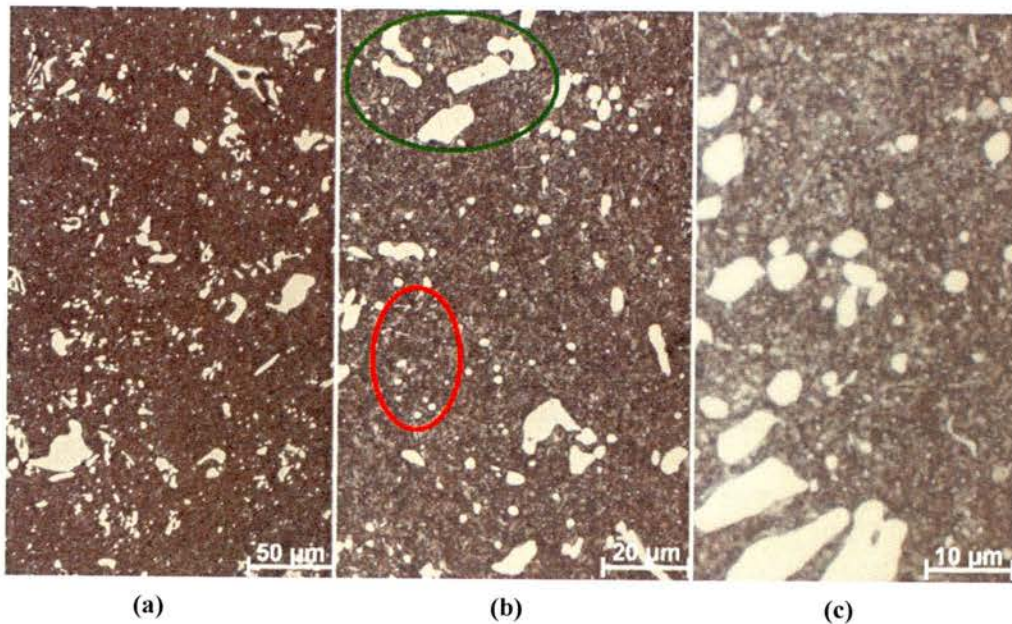


**Fig. 6** – Diagrama de revenido do aço D2. Amostras de Ø38,1mm. Durezas medidas nas superfícies planas das amostras após 1mm de rectificação. Os revenidos foram duplos e com a duração de 2h cada.



**Fig. 7** – Diagrama de revenido do aço D2. Amostras de  $\varnothing 12,7\text{mm}$ . Durezas medidas numa das superfícies planas das amostras, após 1mm de rectificação. Os revenidos foram duplos e com a duração de 2h cada.

Não se verificam diferenças assinaláveis entre as várias amostras tratadas no decorrer deste estudo experimental de modo que se escolheu apenas uma para caracterização microestrutural. A figura 8 mostra a três ampliações diferentes da mesma amostra de aço AISI D2 utilizada na definição da sequência operatória de tratamento térmico do mesmo.



**Fig. 8** – Amostra do aço AISI D2 com  $\varnothing 38,1\text{mm}$ , austenitizada a  $1065\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 40 minutos. Duplo revenido a  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  com a duração de 2h cada. Ataque com Nital (2%) durante 15secs. Face do provete após 1mm de rectificação. Carbonetos por dissolver numa matriz martensítica. Presença de dois grupos de carbonetos que se distinguem pelo tamanho. Os de maiores dimensões estão assinalados pelo círculo verde e os mais pequenos pelo círculo vermelho.

## Conclusões da sequência operatória para tratamento térmico de têmpera e revenido do aço AISI D2

Após os tratamentos térmicos, definiu-se que a duração do estágio austenítico que constaria neste procedimento deveria seguir a regra aproximada de 30+10min/40mm de diâmetro pois os resultados correspondentes foram os que mais se aproximaram dos valores expressos nas curva de revenido baseadas na bibliografia. A taxa de aquecimento do forno foi aproximadamente 5°C/min, o que significa que para dimensões das peças em questão, ao chegar ao patamar austenítico, estas já tinham atingido a respectiva temperatura e, assim sendo, a duração de 20 minutos aplicada inicialmente (para ambos os diâmetros de 38,1 e 12,7mm) seria suficiente para a transformação austenítica. Na maioria dos casos detectou-se um aumento da dureza com o aumento da duração do estágio austenítico. Interpreta-se isso como uma maior dissolução de carbonetos (principalmente os mais pequenos) na matriz durante essa etapa do tratamento, apesar de na análise metalográfica não se ter detectado tal facto. No entanto, houve um caso em que isso não aconteceu e, para uma duração de estágio menor a dureza originada é superior. Isto deve-se às condições serem muito próximas e os resultados possíveis de serem obtidos dentro da mesma gama – ver figura 6.

Nas condições do trabalho experimental efectuado, apesar da regra que se definiu ser válida, para a duração do estágio austenítico, ela é-o para os diâmetros que se utilizou e não pode ser tratada de um modo contínuo.

A elaboração do procedimento de tratamento térmico do aço AISI D2 ficou assim definida:

- Temperatura de enformamento próxima da temperatura ambiente;
- Aquecimento lento: 5°C/min;
- Dois estágios intermédios, um a 500 °C e outro a 800 °C;
- T<sup>a</sup> de austenitização: 1065 °C pois os resultados para esta temperatura originam os valores mais elevados de dureza;
- Duração dos estágios intermédios durante o aquecimento e do estágio austenítico: 30+10min/40mm de diâmetro;
- O óleo de têmpera à temperatura ambiente e com agitação moderada;
- Duração do estágio de revenido (duplo): 2h

**Quadro II** – Tempos de austenitização determinados no decorrer deste estudo

Diâmetro das peças (mm)	Duração do estágio de austenitização
12,7	30 min
38,1	40 min

**Quadro III** – Quadro-guia para realizar tratamentos térmicos de têmpera e revenido ao aço AISI D2 na Durit Brasil.

Dureza HRC pretendida	Temperatura (°C)	
	Têmpera	Revenido (duplo)
60	1065	540
59		550
55		575

## 6.2 Tratamento térmico de recozimento de amaciamento

De modo a estudar o ciclo térmico de recozimento do aço AISI D2 foi simulado um deficiente tratamento térmico de têmpera e revenido. Para se poder recuperar o aço, foi realizado o tratamento térmico de recozimento de amaciamento, ao fim do qual se processou nova têmpera e revenido com o intuito de obter uma dada dureza. A amostra utilizada tinha as dimensões de Ø38,1 x 50mm. O ciclo de recozimento aplicado foi baseado em dados bibliográficos<sub>[2]</sub> e consistiu num aquecimento até aos 885 °C com estágio de 3 horas à mesma temperatura. O arrefecimento inicial foi no forno até aos 750 °C, ao que se seguiu um arrefecimento ao ar até à temperatura ambiente. A taxa de arrefecimento, até se abrir o forno, foi de aproximadamente 26 °C/hora. A bibliografia refere-se a 22 °C/hora<sub>[2]</sub>.

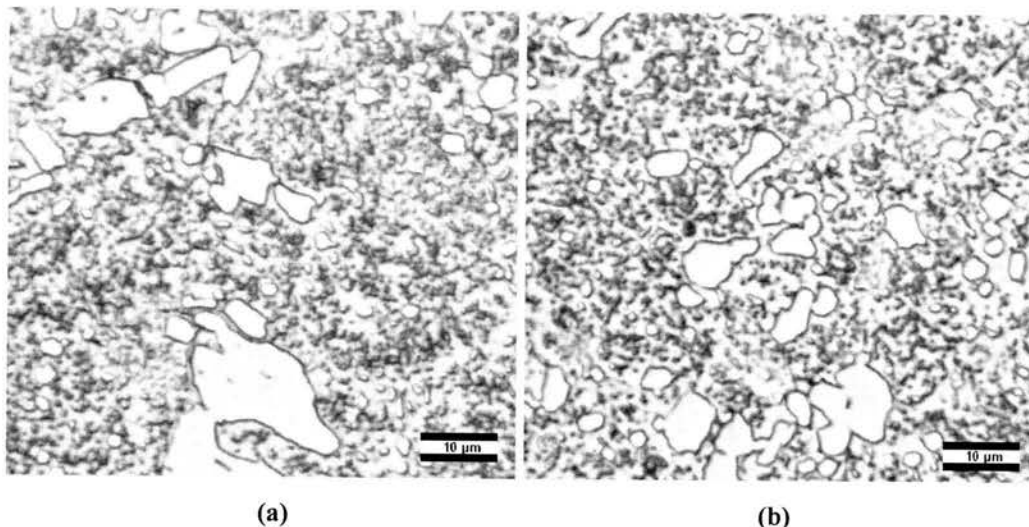
O tratamento térmico de têmpera e revenido aplicado após recozimento caracterizou-se por uma austenitização a 1065 °C durante 40 minutos e duplo revenido a 540 °C durante 2 horas.

O ciclo de recozimento que consta neste procedimento para o aço AISI D2 ficou assim definido:

- Temperatura de enformamento próxima dos 500 °C;
- Aquecimento lento: 5°C/min;
- Estágio de 3 horas a 885 °C;
- Arrefecimento lento no forno até 750 °C: aproximadamente 26 °C/hora;
- Arrefecimento ao ar até à temperatura ambiente.

## Resultado do tratamento térmico de recozimento de amaciamento

A figura 9 relaciona a microestrutura do aço AISI D2 após o tratamento de recozimento de amaciamento (b) com a microestrutura no estado recozido, tal como foi entregue pelo fornecedor do aço (a).



**Fig. 9** – Amostras de aço AISI D2 com Ø38,1mm. (a) estado recozido, antes de qualquer tratamento; (b) após tratamento térmico de têmpera e revenido mais recozimento de amaciamento. Ataque com Nital (2%) durante 20secs

### Conclusão do tratamento térmico de recozimento de amaciamento

O aço foi entregue pelo fornecedor no estado recozido e registou 220 HV (30 kgf). Após tratamento térmico de têmpera e revenido, a dureza da amostra era 53,4 HRC. Após recozimento de amaciamento, esse valor desceu para 210 HV (30 kgf). Comprovou-se que o aço foi recuperado através da aplicação, com sucesso, de um novo tratamento térmico, cuja dureza resultante foi de 60 HRC, tal como era de esperar – consultar quadro IV nos resultados da sequência operatória de tratamento térmico para o aço AISI D2.

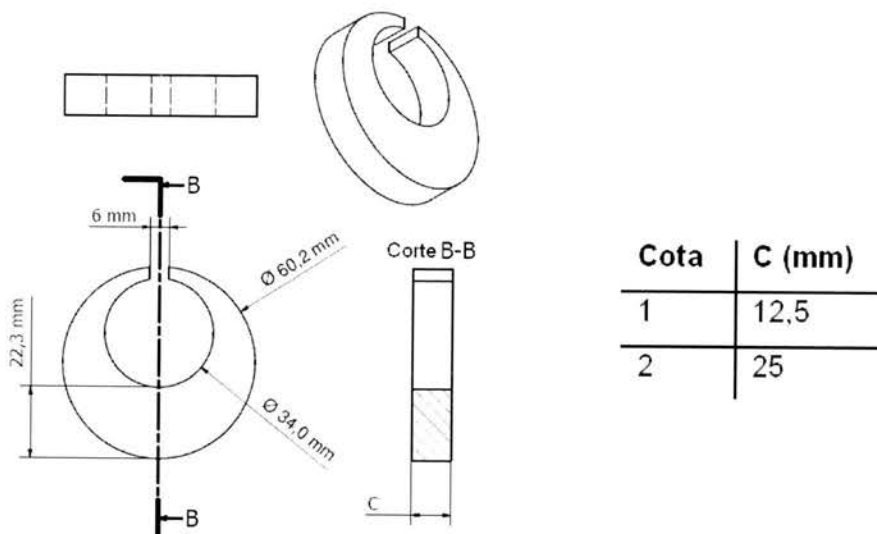
## 7. Tratamento térmico de têmpera em óleo e sob gás pressurizado

O estudo envolveu o processamento de têmpera em óleo e em gás sob pressão, com vista a determinar sua influência nas características dos aços AISI H13 e AISI D2. No tratamento térmico de têmpera em óleo foi utilizado um forno eléctrico com atmosfera oxidante enquanto que para a têmpera sob gás pressurizado utilizou-se um



forno que opera em vácuo. O objectivo do trabalho visou estabelecer, a partir de resultados práticos, diferenças resultantes dos processos de tratamento térmico de têmpera, nomeadamente nos seguintes aspectos:

- Estudo da distorção verificada após cada um dos tratamentos;
- Estudo da camada descarburada.



**Fig. 10** – Geometria dos provetes “Navy C-ring” utilizados no estudo comparativo dos tratamentos térmicos de têmpera em vácuo e em óleo. Modelo realizado em Autodesk Inventor.

Tendo em conta o estudo da distorção optou-se por utilizar um dos mais antigos modelos de provetes de teste de distorção após têmpera, o “Navy C-ring” [1,5]. Após se ter encomendado e recebido o aço, as amostras foram maquinadas ficando com a geometria apresentada na figura 10. Confeccionaram-se peças com as espessuras 1 e 2.

Os aços foram fornecidos na forma cilíndrica de 63,5mm de diâmetro. No torno mecânico confeccionou-se o diâmetro externo final de aproximadamente 60,2mm. Ainda no torno, todas as amostras foram facejadas após terem sido cortadas na serra mecânica, e ficarem com a respectiva espessura final depois de rectificadas na rectificadora plana.

A última etapa de maquinação da preparação dos provetes foi criar um diâmetro interno de 34,0mm com um “rasgo” de 6mm. Esta operação foi realizada num centro de maquinação vertical.

O quadro seguinte mostra a quantidade e distribuição dos provetes para cada um dos procedimentos. Para que os resultados tivessem tratamento estatístico foi definido uma amostragem de  $n=5$  para cada ensaio prático.

**Quadro IV** – Distribuição dos provetes de teste utilizados no estudo comparativo da têmpera em vácuo e em óleo.

Aço	AISI H13				AISI D2			
Procedimento	TT de têmpera em óleo		TT de têmpera em vácuo		TT de têmpera em óleo		TT de têmpera em vácuo	
Dimensões dos provetes	Ø60,5mm x 12,5mm	Ø60,5mm x 25mm	Ø60,5mm x 12,5mm	Ø60,5mm x 25mm	Ø60,5mm x 12,5mm	Ø60,5mm x 25mm	Ø60,5mm x 12,5mm	Ø60,5mm x 25mm
Quantidade	5 provetes	5 provetes	5 provetes	5 provetes	5 provetes	5 provetes	5 provetes	5 provetes

Cada conjunto de provetes foi sujeito ao respectivo tratamento térmico de têmpera e em seguida foram revenidos. Em qualquer um dos casos os revenidos foram duplos e com a duração de 2 horas cada, sendo o primeiro no mesmo dia da têmpera e o segundo revenido no dia seguinte.

O ciclo térmico aplicado foi o mesmo para todos os casos. O aquecimento até à austenitização envolveu dois estágios intermédios, um a 500°C e outro a 800°C. A taxa de aquecimento até à austenitização foi de aproximadamente 5 °C/min. Para qualquer um dos casos, a temperatura de austenitização utilizada foi 1020 °C e o respectivo estágio teve a duração de 30 minutos. Os revenidos efectuados após cada um dos processos foram feitos em forno com atmosfera oxidante, a 585 °C.

A têmpera sob gás pressurizado e os revenidos que se seguiram tiveram lugar nas instalações da Durit Portugal ao passo que o tratamento térmico de têmpera em óleo e respectivos revenidos foram processados na Durit Brasil.

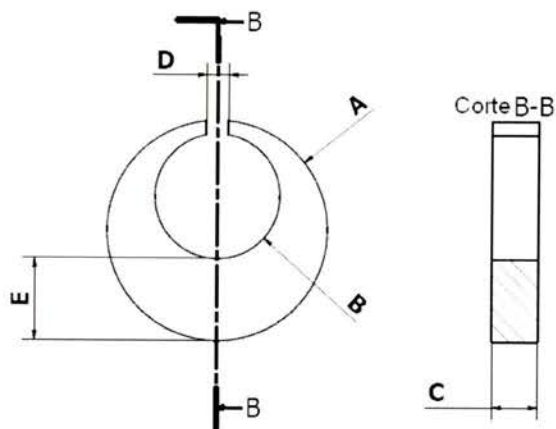
Na têmpera em óleo, as peças foram retiradas do forno após austenitização e mergulhadas no óleo na posição vertical. O banho encontrava-se aproximadamente a 40 °C e sob agitação moderada. Na têmpera sob gás pressurizado, o arrefecimento ocorreu sob uma pressão de 2,5bar após finalizado o estágio austenítico, e todo o processo foi realizado dentro do respectivo forno.

Os provetes temperados em óleo foram submetidos a jacto com micro esferas de vidro após terem sido tratados.

## 7.1 Estudo da variação dimensional

Os resultados do estudo da variação dimensional foram obtidos através da medição de cada uma das cotas que definem as dimensões dos provetes, antes e depois dos tratamentos térmicos.

Foram vários os instrumentos de medição utilizados para registar os resultados:



**Quadro V** – Instrumentos utilizados para medir as diferentes cotas dos provetes.

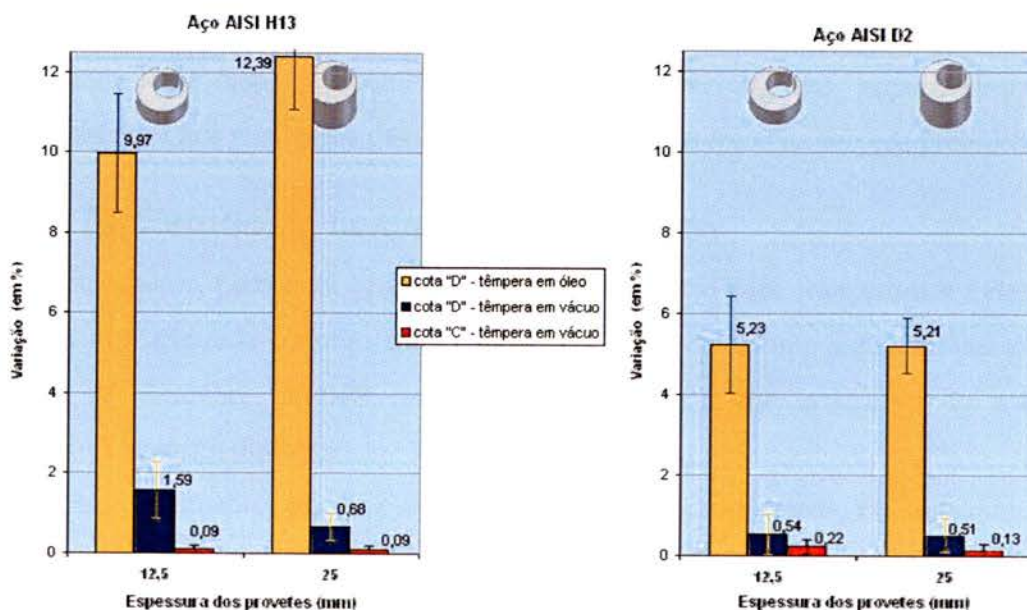
Cota	Instrumento	Erro
A	Micrómetro externo digital 50-75mm	± 0,001
B	Micrómetro interno digital 30-40mm	± 0,001
C	Paquímetro	± 0,02
D	Paquímetro digital	± 0,01
E	Micrómetro externo digital 0-25mm	± 0,001

**Fig. 11** – Cotas dos provetes que foram objecto de medição no estudo da análise dimensional.

### Resultados do estudo da variação dimensional

Na avaliação da deformação após tratamento térmico de têmpera em óleo e sob gás pressurizado, a cota identificada como “D” foi a que registou a variação dimensional maior. Todas as outras cotas sofreram variações menores, todas elas inferiores a 1%.

No Anexo podem ser consultados os resultados da variação dimensional obtidos para cada cota, em cada grupo de provetes de teste.



**Fig. 12** – Variação dimensional dos provetes em função da espessura dos mesmos, da cota “D” para tratamento térmico de têmpera em óleo e da cota “C” e “D” para tratamento térmico sob gás pressurizado.

Todos os resultados são a média de ensaios em 5 amostras e apresentam-se numa probabilidade de abrangência de 95% para uma distribuição normal.

## **Conclusões do estudo da variação dimensional**

Ambos os aços AISI H13 e D2 sofreram variações significativas na dimensão em estudo (cota “D”) para as condições em que foram tratados. A diferença de variação dimensional mais assinalável foi entre peças do mesmo aço e da mesma espessura mas para processos de tratamento térmico diferentes.

A distorção na curvatura, verificada pela variação da cota “D”, pode ser o resultado de fluência ocorrida durante o tratamento térmico e deve-se, muito provavelmente a gradientes térmicos provocados pela elevada lei de arrefecimento imposta pelo óleo (que contraria as especificações de ambos os aços – são temperáveis ao ar), pela própria geometria da peça, pela agitação do banho (foi moderada) e pela temperatura a que o mesmo se encontrava (aproximadamente 40 °C).

Resta apenas dizer que estes resultados foram de certo modo forçados, sabendo de antemão que os aços em causa são susceptíveis de serem temperados ao ar. A têmpera em óleo deu origem a uma deformação absurda (dez vezes superior ao aceitável) e devido a este resultado, não se deve efectuar tratamentos térmicos de têmpera em óleo para estes aços. Na têmpera sob gás pressurizado, as restantes cotas verificaram sempre deformação inferior a 0,5%, tal como mostra na figura 12 para variação da cota “C” (que foi a que mais variou depois da cota “D”). A deformação obtida após tratar estes aços em gás sob pressão num forno a vácuo é aceitável e dentro das gamas referidas pela bibliografia<sup>[2]</sup>. No caso de se proceder à têmpera ao ar em detrimento de no óleo, os resultados da variação dimensional das peças esperavam-se mais próximos dos resultados das correspondentes peças tratadas sob gás pressurizado.

## **7.2 Estudo da camada descarburada**

Conhecer, para cada aço, o sobremetal necessário para compensar a indesejável camada descarburada é muito importante. Para além de definir algumas questões em termos de desenho, permite também avaliar uma maior economia de material, diminuindo o custo das peças.

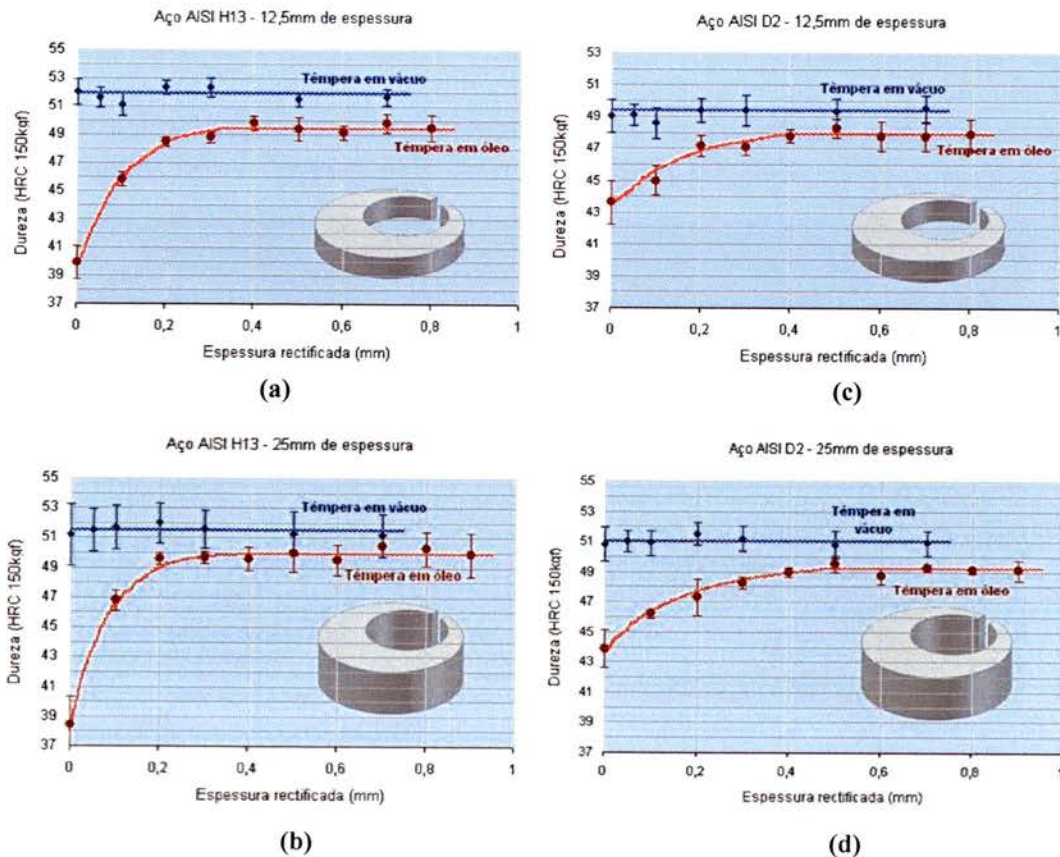
No tratamento térmico de têmpera em óleo, as etapas do aquecimento e austenitização tiveram lugar num forno eléctrico com atmosfera oxidante. Por essa razão, e devido à elevada temperatura de trabalho (1020°C), é de esperar a ocorrência de oxidação e descarburagem na superfície das peças de ambos os aços. Nas peças tratadas termicamente sob gás pressurizado (no forno que opera em vácuo), por sua vez, não é previsto sinais de descarburagem.

Após tratamento térmico de têmpera e revenido, mediu-se a dureza HRC na zona central duma das superfícies planas das peças, rectificando sucessivamente a camada superficial até que o valor da dureza estabilizasse. Nas peças temperadas em óleo removeu-se 0,1mm de cada vez. Nos provetes temperados em vácuo começou-se por remover 0,05mm, depois 0,1mm e finalmente rectificou-se sucessivamente 0,2mm. A razão de aumentar a espessura rectificada deve-se ao valores de dureza não evidenciarem variação significativa. Foi possível conhecer para cada tipo de aço e processo térmico usado, a camada descarburada a evitar (sobremetal de compensação). Em todas as amostras que foram alvo de análise metalográfica procedeu-se, após rectificação, a desbaste no lapidador (aproximadamente 1 hora) e a polimento.

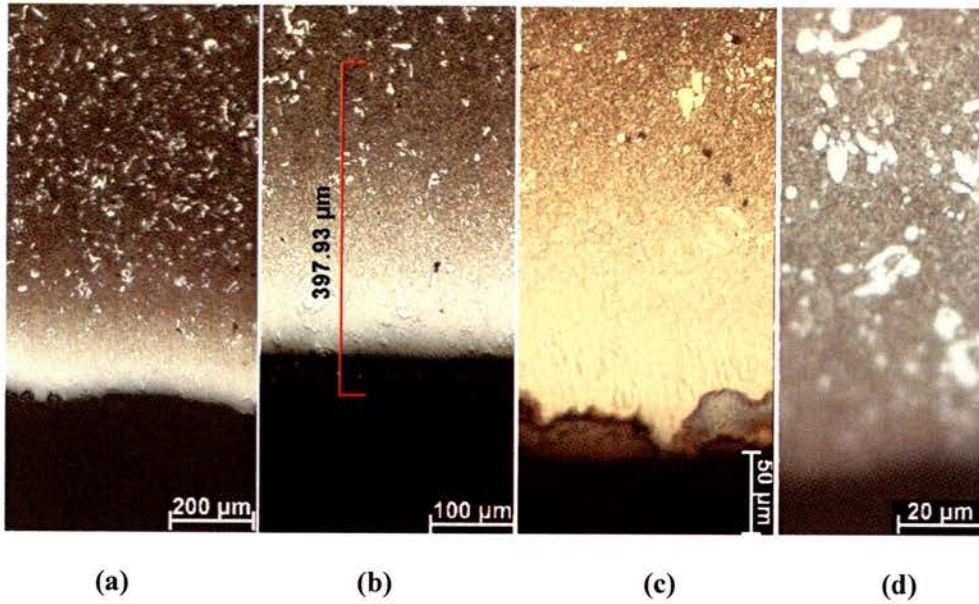
### Resultados do estudo da camada descarburada

Os resultados do estudo da camada descarburada são apresentados nas imagens seguintes, na forma de gráficos de dureza em função da camada superficial rectificada.

No Anexo podem ser consultados, na forma de tabela, os resultados obtidos para cada um dos 4 casos apresentados.

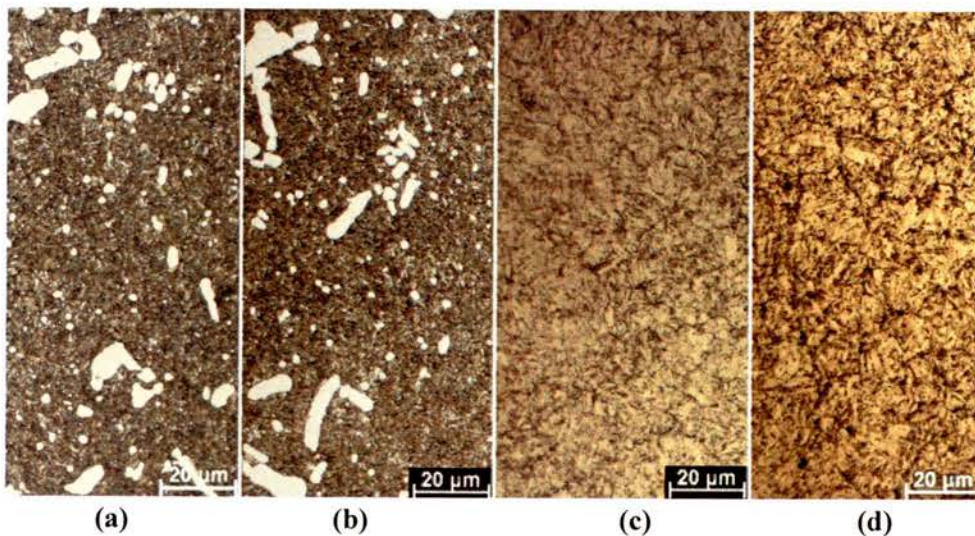


**Fig. 13** – Gráficos de dureza em função da camada superficial rectificada. Todos os resultados são a média de ensaios em 5 amostras e apresentam-se numa probabilidade de abrangência de 95% para uma distribuição normal.



**Fig. 14** –Aço AISI D2. Austenitização a 1020°C durante 30min. Duplo revenido a 585°C durante 2h. 0,8mm de rectificação na superfície plana dos provetes. Ataque com Nital (2%) durante 15secs. **(a)**, **(b)** e **(c)**: a mesma amostra com ampliações diferentes. Camada superficial de um provete temperado em óleo onde se detecta a descarburização. A matriz martensítica surge mais evidenciada à medida que aumenta a distância à periferia da amostra. **(d)**: imagem da periferia de uma amostra temperada sob gás pressurizado onde não se detecta descarburização. O segmento assinalado na figura (b) corresponde, aproximadamente, à distância à superfície a partir da qual, durante sucessivas rectificações, o valor da dureza estabilizou no aço AISI D2 [ver figura 13(d)].

A figura 15 apresenta as microestruturas obtidas em cada aço e em ambos os meios de processos de tratamento térmico de têmpera e revenido.



**Fig. 15** – Microestruturas da zona central de amostras com a mesma geometria. Austenitização a 1020°C e duplo revenido a 585°C durante 2h. 0,8mm de rectificação. Ataque com Nital (2%) durante 20secs. **(a)** Aço AISI D2 temperado em óleo. Carbonetos de crómio bem definidos numa matriz de martensite; **(b)** aço AISI D2 temperado em vácuo. Microestrutura idêntica à apresentada em (a); **(c)** aço AISI H13 temperado em óleo. Matriz de martensite revenida (estrutura em forma de agulha); **(d)** aço AISI H13 temperado em vácuo. Microestrutura idêntica à de (c).

## Conclusões do estudo da camada descarburada

A primeira conclusão que se pode tirar dos resultados relativos a este estudo é que, nas peças de ambos os aços que foram tratadas termicamente sob gás pressurizado não foi detectada descarburagem. À medida que se vai rectificando e medindo a dureza HRC, o valor desta mantém-se estável e a análise microestrutural comprovou isso mesmo pois nas peças temperadas em forno de vácuo a microestrutura na superfície é semelhante à da zona mais afastada – ver figura 14(d) e 15(a).

Nas peças temperadas em óleo, por terem sido austenitizadas num forno de atmosfera oxidante, a descarburagem ocorreu e foi necessário retirar aproximadamente 0,3mm na superfície dos provetes de AISI H13 e 0,4mm na superfície dos provetes de AISI D2 até que o valor da dureza HRC estabilizasse. Na figura 14(b) e 14(c) é clara a diferença na microestrutura da camada descarburada e da zona central da mesma peça.

## 8. Exemplo prático da aplicação dos resultados

Vai-se agora recorrer aos resultados obtidos no estudo da camada descarburada e dar um exemplo de uma situação prática que demonstra a vantagem de aplicar o tratamento térmico de têmpera sob gás pressurizado em detrimento da têmpera em óleo ou ao ar, utilizando um forno de atmosfera oxidante para aquecimento e austenitização.

- Numa determinada empresa surge uma encomenda de 500 peças cuja geometria final será de  $\text{Ø}50 \times 150 \text{mm}$ . A aplicação requer que o aço seja o AISI D2. A empresa tem capacidade para efectuar tratamentos térmicos nas suas instalações. O forno que possui é de atmosfera oxidante e o arrefecimento de têmpera tanto pode ser efectuado em óleo como ao ar.
- A empresa, devido ao forno que utiliza, tem em conta que o sobremetal mínimo de compensação de modo a evitar a camada descarburada para peças do aço AISI D2 é 0,4mm.
- O preço do aço AISI D2 está cotado actualmente em EUR 10,5/kg.

Assume-se que o fornecedor do aço consegue providenciar bitolas com o diâmetro e comprimento requisitado. Tendo em conta as dimensões das peças e o sobremetal mínimo de compensação devido à camada descarburada, terá que se

encomendar bitolas de  $\varnothing 50,8\text{mm}$ . Se a empresa tivesse possibilidade de temperar o aço em vácuo, as bitolas encomendadas seriam as de  $\varnothing 50,0\text{mm}$  (pondo de parte qualquer rectificação antes e/ou depois do tratamento térmico). Em seguida avaliar-se-á o gasto de aço extra devido ao fenómeno da descarburização.

$$V_{\text{aço extra}} = ([\pi \cdot (\varnothing_{\text{ext}}/2)^2] - [\pi \cdot (\varnothing_{\text{int}}/2)^2]) \cdot \text{altura da peça}$$

$$V_{\text{aço extra}} = ([\pi \cdot (50,8/2)^2] - [\pi \cdot (50,0/2)^2]) \cdot 150,8 = 9,65\text{cm}^3$$

$$\rho_{\text{AISI D2}} = 7,7 \text{ g/cm}^3 \text{ [11]}$$

$$\text{massa}_{\text{aço extra}} = 74,3 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

Apenas por ter sido necessário encomendar a bitola de  $\varnothing 50,8\text{mm}$  em vez da de  $\varnothing 50,0\text{mm}$ , em cada peça tem-se um excesso de  $74,3 \times 10^{-3} \text{ kg}$ . Para o total da encomenda de 500 peças tem-se 37,15 kg de aço AISI D2 a mais, aos quais correspondem, pelo preço do aço, aproximadamente a EUR 390. A este custo ainda se pode adicionar os gastos de ferramentas de corte, horas/máquina e horas/homem necessários na maquinação.

Em função duma prospecção de mercado, serviços prestados, pessoal, volume e características das peças produzidas, custo do equipamento produtivo e de controle, manutenção, gastos de energia, material de consumo, despesas operacionais e administrativas e todo um restante conjunto de investimentos necessários à implantação de uma unidade de tratamentos térmicos em vácuo, faz sentido realizar um estudo de viabilidade económica com esse objectivo.



## 9. Bibliografia

- 1 - Totten, G.E.; Howes, A.H.; Marcel Dekker; “Steel Heat Treatment Handbook”; 1997.
- 2 - Chandler, Harry; “Heat Treater’s Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels”; 2ª Edição; ASM International; 1995.
- 3 - “Uddeholm, Heat Treatment of Steel”; [www.bucorp.com](http://www.bucorp.com)
- 4 - Santos, Henrique; Sebenta de Tratamentos Térmicos de ligas ferrosas, FEUP.
- 5 - Totten, G.E.; Bates, C.E.; Clinton, N.A.; “Handbook of Quenchants and Quenching Technology”; ASM International; 1993.
- 6 - Catálogo de informação técnica de aços-ferramenta; Thyssen; 1997
- 7 - Catálogo Tecnotools, ferramentas e abrasivo Ltda
- 8 - Catálogo de mós Winter
- 9 - Catálogo da Romi
- 10 - [www.romi.com.br](http://www.romi.com.br)
- 11 - “Uddeholm, Cold Work Steel AISI D2”; [www.bucorp.com](http://www.bucorp.com)
- 12 - Manual do forno K400 da Brasimet

# **ANEXO**

**Quadro I** - Descrição da matéria-prima utilizada para o estudo dos tratamentos térmicos de têmpera em óleo e em vácuo.

	<b>H13</b>				<b>D2</b>			
<b>Densidade</b>	7,76 g/cm <sup>3</sup>				7,70 g/cm <sup>3</sup>			
<b>Procedimento</b>	TT de têmpera em óleo		TT de têmpera em vácuo		TT de têmpera em óleo		TT de têmpera em vácuo	
<b>Dimensões dos provetes</b>	Ø60,5mm x 12,5mm	Ø60,5mm x 25mm	Ø60,5mm x 12,5mm	Ø60,5mm x 25mm	Ø60,5mm x 12,5mm	Ø60,5mm x 25mm	Ø60,5mm x 12,5mm	Ø60,5mm x 25mm
<b>Quantidade</b>	5 provetes	5 provetes	5 provetes	5 provetes	5 provetes	5 provetes	5 provetes	5 provetes
<b>Total da encomenda</b>	Ø63,5mm x 600mm				Ø63,5mm x 600mm			
<b>Volume de aço</b>	1899,2 cm <sup>3</sup>				1899,2 cm <sup>3</sup>			
<b>Massa</b>	14,74 kg				14,62 kg			

**Quadro II** - Descrição da matéria-prima utilizada para elaboração da sequência operatória do tratamento térmico do aço AISI D2.

<b>Densidade</b>	7,70 g/cm <sup>3</sup>		
<b>Procedimento</b>	Optimização do tratamento térmico		Recozimento
<b>Dimensões</b>	Ø38,1mm x 50 mm	Ø12,7mm x 50 mm	Ø38,1mm x 50 mm
<b>Quantidade</b>	18	18	18
<b>Total</b>	950mm (Ø 38,1 mm) + 900mm (Ø 12,7 mm)		
<b>Volume de aço</b>	1196,4 cm <sup>3</sup>		
<b>Massa</b>	9,2 kg		

**Iguafer\***  
Ferro e Aço Ltda.

RUA CABO ROMÉU CASAGRANDE, 600  
PARQUE NOVO MUNDO - SÃO PAULO  
CEP 02180-060



TEL. (0\_\_11) 6954-0377  
FAX (0\_\_11) 6954-6543  
Site: www.iguaferr.com.br

Certificada ISO 9001:2000

Nº 092508 QM

**CERTIFICADO DE QUALIDADE Nº 010712**

Data: 15/03/2006

Cliente: DURIT BRASIL LTDA N.F. nº 29430

ITEM	Pedido	Corrida	Material / Dimensões	Acab.	Peso
1	04018/1	12298855	H-13 RED. 23,50 X 600	LAM	15,00
2	04018/1	0786310	D-2 RED. 65,50 X 600	LAM	15,00

**COMPOSIÇÃO QUÍMICA**

ITEM	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	W
1	0,390	0,970	0,360	0,012	0,003	5,040	1,220		0,900	
2	1,540	0,390	0,360	0,026	0,001	11,70	0,740	0,400	0,780	0,090

OBS.:

30/3/2006

*Handwritten signature*



IGUAFER FERRO E AÇO LTDA.

FOR 20 REV. 02

Fig. 1 – Cópia do certificado de qualidade emitido pelo fornecedor dos aços

**LABORATÓRIO DA IOPE**  
**REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**
**LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO PELA Cgcre / Inmetro SOB O N.º 073**
**Certificado de Calibração n.º : IOPE-RT-024-06/0117 fl. 1/1**
**Cliente** : DURIT do Brasil Ltda.  
**Endereço** : Via de Penetração III, nº 519  
 43700-000 Simões Filho / BA

**Descrição do instrumento de Medição (IM)** : Termopar + indicador digital + malha, Ø 6,0 mm. Com valor de uma divisão de 1°C para 0,0 a 1300,0°C.

**Comprimento "U"** : 250 mm. **Fabricante do Indicador** : BRASIMET.  
**Ref. IOPE** : P.1. 80374/FAT.035 **N.º de Série do Indicador** : n/c  
**Ref. do Cliente** : AFM/n/c **Tag do Conjunto** : FO.03 SRM.CB.  
**N.º de Série do Sensor** : n/c.

**RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO**

Temperatura Referência V.V.C. (°C)	Média das Leituras (°C)	Erro (°C)	Incerteza de Medição ± (°C)	K
249,96	250,0	0,04	2,08	2,00
501,16	500,0	-1,16	2,44	2,00
758,13	755,0	-3,13	2,43	2,00
1005,82	1006,0	0,18	2,43	2,00
1100,02	1100,0	-0,02	2,65	2,00

Os resultados apresentados referem-se a média de 4 leituras, tomadas a intervalos de 60 segundos. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k informados na tabela acima, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

**RASTREABILIDADE DOS PADRÕES UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO**

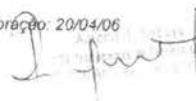
IDENTIFICAÇÃO	INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO PADRÃO	TIPO	CERTIFICADO	VALIDADE	RASTREABILIDADE
ST-0108	TERMOPAR	TIPO S	IOPE-RT-011-24/0200	10/2006	RBC
IE-0102	MULTÍMETRO 5 1/2 DIG	FLUKE 8842A	IPT-51636	09/2005	RBC

**NOTAS :**

- 1-Calibração por comparação, conf. procedimento(s) IOPE MPOL-005 Rev 03
- 2-Normas de referência ASTM E-1137 (97)
- 3-Inservação do sensor no(s) meio(s) térmico(s) a uma profundidade de 170 mm para todos os pontos de calibração.
- 4- Os Valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1990
- 5- V.V.C. = Valor verdadeiro convencional
- 6-Condições Ambientais 20 ± 2 °C, UR 30 a 70 %
- 7- Esta calibração não insere o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica
- 8-Este certificado atende aos requisitos de credenciamento pela Cgcre / Inmetro, o qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades - SI).
- 9-O Inmetro é signatário do acordo de reconhecimento mútuo da ILAC e de acordo bilateral de reconhecimento mútuo com a European Co-operation for Accreditation.
- 10 Calibração realizada nas instalações do cliente.
- 11 Localização Forno para tratamento térmico.

Data da emissão: 25/04/06

Data da calibração: 20/04/06



Os resultados apresentados referem-se a(s) condição(s) de calibração, nas condições especificadas, não sendo extensivos a quaisquer outros fins. A reprodução do documento para outros fins, só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

**IOPE - INSTRUMENTOS DE PRECISÃO LTDA.**  
 RUA EULÁLIO DA COSTA CARVALHO, 99 - BAIRRO DO LIMÃO - CEP 02712-050 - SÃO PAULO - SP  
 PABX (11) 3959-3959 - FAX (11) 3936-6124 - Site: www.iope.com.br - E-mail: laboratorio@iope.com.br

**Fig. 2** – Cópia do certificado de calibração emitido pelo Laboratório IOPE, calibradora da malha do forno.

**Quadro III** – Resultados da análise dimensional das peças do aço AISI H13 (12,5mm).

Tratamento Térmico	Cota (mm)	A		B		C		D		E	
	Peça	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Em óleo	1	60,194 60,184	60,159 60,061	33,917	34,106	22,30	22,01	5,95	6,39	12,477	12,395
	2	60,183 60,193	60,052 60,134	33,916	34,036	22,30	21,97	5,90	6,54	12,465	12,395
	3	60,240 60,263	60,132 60,057	33,829	34,126	22,25	22,10	5,90	6,52	12,469	12,400
	4	60,200 60,195	60,016 60,029	33,883	34,053	22,20	22,10	5,90	6,45	12,461	12,350
	5	60,173 60,174	60,066 60,123	33,826	34,075	22,25	22,12	5,85	6,54	12,471	12,405
Em vácuo	1	60,283	60,305 60,240	33,882	33,926	22,55	22,55	5,95	6,03	12,707	12,715
	2	60,311	60,290 60,300	33,868	33,935	22,50	22,50	5,90	5,98	12,704	12,715
	3	60,296	60,260 60,285	33,829	33,909	22,50	22,50	5,90	6,03	12,709	12,715
	4	60,208	60,260 60,235	33,883	33,941	22,55	22,50	5,90	6,05	12,712	12,715
	5	60,188	60,255 60,215	33,869	33,925	22,55	22,50	5,95	5,98	12,707	12,720

**Quadro IV** – Resultados da análise dimensional das peças do aço AISI D2 (12,5mm)

Tratamento Térmico	Cota (mm)	A		B		C		D		E	
	Peça	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Em óleo	1	60,294 60,322	60,203 60,190	33,857	33,931	22,20	22,05	5,90	6,35	12,478	12,385
	2	60,293 60,337	60,186 60,230	33,846	33,869	22,25	22,10	5,95	6,23	12,475	12,395
	3	60,291 60,325	60,184 60,190	33,855	33,912	22,20	22,16	5,90	6,20	12,476	12,410
	4	60,271 60,307	60,209 60,184	33,870	33,900	22,20	22,22	5,90	6,17	12,471	12,390
	5	60,383 60,387	60,320 60,370	33,873	33,997	22,30	22,27	6,00	6,25	12,470	12,405
Em vácuo	1	60,369	60,405 60,350	33,906	33,925	22,60	22,65	5,98	5,93	12,709	12,710
	2	60,399	60,410 60,375	33,836	33,879	22,56	22,60	5,98	5,90	12,709	12,710
	3	60,254	60,270 60,245	33,830	33,805	22,50	22,50	5,98	5,98	12,709	12,715
	4	60,366	60,345 60,315	33,973	33,982	22,54	22,60	5,98	5,95	12,701	12,700
	5	60,318	60,260 60,280	33,820	33,880	22,50	22,40	5,98	5,98	12,692	12,700

**Quadro V – Resultados da análise dimensional das peças do aço AISI H13 (25mm)**

Tratamento Térmico	Cota (mm)	A		B		C		D		E	
	Peça	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Em óleo	1	60,232 60,221	60,153 60,197	33,990	34,271	22,10	22,09	5,85	6,67	24,855	24,765
	2	60,175 60,188	60,120 60,145	34,998	34,279	22,10	22,05	5,85	6,58	24,858	24,790
	3	60,215 60,229	60,192 60,170	33,996	34,236	22,25	22,07	5,90	6,50	24,855	24,760
	4	60,072 60,147	60,053 60,060	34,049	34,242	22,30	22,00	5,85	6,55	24,864	24,790
	5	60,171 60,221	60,237 60,183	33,956	34,244	22,25	22,02	5,85	6,63	24,856	24,790
Em vácuo	1	60,434	60,425 60,440	33,997	34,011	22,55	22,50	5,95	5,95	25,171	25,180
	2	60,130	60,180 60,250	33,953	33,999	22,45	22,40	5,90	5,95	25,296	25,305
	3	60,086	60,205 60,110	33,855	33,915	22,35	22,35	5,90	5,95	25,292	25,300
	4	60,082	60,210 60,150	33,937	33,989	22,50	2,50	5,95	6,00	25,285	25,295
	5	60,149	60,250 60,210	33,897	33,972	22,50	22,50	5,90	5,95	25,300	25,310

**Quadro VI – Resultados da análise dimensional das peças do aço AISI D2 (25mm)**

Tratamento Térmico	Cota (mm)	A		B		C		D		E	
	Peça	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Em óleo	1	60,293 60,298	60,297 60,204	33,911	34,006	22,30	22,13	5,95	6,28	24,848	24,790
	2	60,281 60,278	60,203 60,209	33,925	34,065	22,30	22,14	5,95	6,28	24,853	24,795
	3	60,274 60,282	60,239 60,241	33,995	34,063	22,20	22,18	5,95	6,18	24,858	24,795
	4	60,252 60,281	60,166 60,197	33,925	34,046	22,10	22,15	5,95	6,30	24,854	24,805
	5	60,290 60,285	60,222 60,272	33,946	34,088	22,30	22,21	5,95	6,26	24,856	24,795
Em vácuo	1	60,050	60,080 60,150	33,929	33,922	22,25	22,25	5,95	6,00	24,960	24,970
	2	60,384	60,405 60,410	33,969	33,924	22,50	22,60	5,85	5,90	25,298	25,305
	3	60,361	60,375 60,415	33,917	33,935	22,50	22,50	5,95	5,95	25,296	25,305
	4	60,405	60,405 60,420	33,912	33,962	22,60	22,60	6,00	6,00	25,297	25,305
	5	60,393	60,380 60,400	33,921	33,966	22,55	22,50	5,95	6,00	25,297	25,305

**Quadro VII** - Durezas HRC 150 kgf medidas em função da espessura rectificada nos provetes de 12,5 mm do aço AISI H13 tratados em óleo e em vácuo

	Rectificação (mm)	Nº do provete					Média
		1 (HRC)	2 (HRC)	3 (HRC)	4 (HRC)	5 (HRC)	
Em óleo	0	42	38,5	40	40	39	<b>39,9</b>
	0,1	46,5	46	45,5	45	46	<b>45,8</b>
	0,2	49	48,5	48,5	48	48,5	<b>48,5</b>
	0,3	49,5	48,5	48,5	48,5	49	<b>48,8</b>
	0,4	50,5	49,5	49	50	50	<b>49,8</b>
	0,5	50,5	50	48	49	49,5	<b>49,4</b>
	0,6	50	49,5	48,5	49	49	<b>49,2</b>
	0,7	50	51	49,5	49	49,5	<b>49,8</b>
	0,8	50,5	50,5	48	49	49,5	<b>49,5</b>
Em vácuo	0	53	53	52	51,5	50,5	<b>52,0</b>
	0,05	52,5	51	52,5	51	51	<b>51,6</b>
	0,1	52	50,5	52	51	50	<b>51,1</b>
	0,2	52,5	52,5	52	53	51,5	<b>52,3</b>
	0,3	52,5	52,5	53	52,5	51	<b>52,3</b>
	0,5	51,5	51	51,5	52,5	51	<b>51,5</b>
	0,7	52	52	52	52	50,5	<b>51,7</b>

**Quadro VIII** - Durezas HRC 150 kgf medidas em função da espessura rectificada nos provetes de 12,5 mm do aço AISI D2 tratados em óleo e em vácuo

	Rectificação (mm)	Nº do provete					Média
		1 (HRC)	2 (HRC)	3 (HRC)	4 (HRC)	5 (HRC)	
Em óleo	0	45	42	45	42	44	<b>43,6</b>
	0,1	45	45	45	43,5	46,5	<b>45,0</b>
	0,2	47,5	47	47,5	46	48	<b>47,2</b>
	0,3	47	46,5	47	47	48	<b>47,1</b>
	0,4	47,5	47,5	48	47,5	48,5	<b>47,8</b>
	0,5	47,5	48	49	48	49	<b>48,3</b>
	0,6	48	48	48,5	46	48,5	<b>47,8</b>
	0,7	48,5	48	48,5	46	48	<b>47,8</b>
	0,8	48	49	48	46	48,5	<b>47,9</b>
Em vácuo	0	49	49,5	49,5	47	50	<b>49,0</b>
	0,05	50	49,5	49	48	49	<b>49,1</b>
	0,1	50	48	48	47,5	49,5	<b>48,6</b>
	0,2	50,5	49	48,5	49	50	<b>49,4</b>
	0,3	50,5	49	49	48	50,5	<b>49,4</b>
	0,5	50,5	49	49	48	50	<b>49,3</b>
	0,7	50	49	49	48,5	51	<b>49,5</b>



**Quadro IX** - Durezas HRC 150 kgf medidas em função da espessura rectificada nos provetes de 25 mm do aço AISI H13 tratados em óleo e em vácuo.

	Rectificação (mm)	Nº do provete					Média
		1 (HRC)	2 (HRC)	3 (HRC)	4 (HRC)	5 (HRC)	
Em óleo	0	41	35	38,5	39,5	38	38,4
	0,1	47	45,5	47	47	47,5	46,8
	0,2	49,5	50	49	49,5	50	49,6
	0,3	49	50	49,5	50	50	49,7
	0,4	50	48	50	50	50	49,6
	0,5	50,5	47,5	50,5	50,5	51	50,0
	0,6	49,5	47,5	50	50	50,5	49,5
	0,7	50,5	49	51	51	51	50,5
	0,8	51	48	50,5	51	51	50,3
	0,9	50,5	47	50	51	51	49,9
Em vácuo	0	50	53	48	54	51	51,2
	0,05	50	53	49,5	53	52	51,5
	0,1	50	53	50	53,5	52	51,7
	0,2	50	53,5	51	53,5	52	52
	0,3	50	52,5	50	53	52,5	51,6
	0,5	49,5	52,5	49,5	53	52	51,3
	0,7	50	52	49	53	52	51,2

**Quadro VII** - Durezas HRC 150 kgf medidas em função da espessura rectificada nos provetes de 25 mm do aço AISI D2 tratados em óleo e em vácuo

	Rectificação (mm)	Nº do provete					Média
		1 (HRC)	2 (HRC)	3 (HRC)	4 (HRC)	5 (HRC)	
Em óleo	0	43	45,5	42	44	45	43,9
	0,1	46,5	46	46	46	46,5	46,2
	0,2	47,5	48	47,5	45	48,5	47,3
	0,3	48	48,5	48	48	49	48,3
	0,4	48,5	49	49	49	49,5	49,0
	0,5	49	50,5	49,5	49	49,5	49,5
	0,6	48	49	48,5	49,5	48,5	48,7
	0,7	49	49,5	49,5	49,5	49	49,3
	0,8	49	49	49	49,5	49	49,1
	0,9	49,5	50	49	49	48	49,1
Em vácuo	0	51	50	49	52	52	50,8
	0,05	52	51,5	50	50,5	51	51,0
	0,1	52,5	50	50,5	50,5	51	50,9
	0,2	53	51,5	51	51	51	51,5
	0,3	52,5	51,5	51	51	50	51,2
	0,5	52,5	51	50	50,5	50	50,8
	0,7	52,5	51	50	50,5	50,5	50,9

**Quadro XI** - Características das amostras, tratamento térmico e respectivos resultados dos ensaios de dureza da amostra recozida.

Dimensão da amostra	Tratamento térmico	Austenitização	Revenido	Estágio austenítico	Dureza
Ø38,1x50mm	Recozido (entregue pelo fornecedor)				220 HV (30kgf)
	Têmpera e revenido	1010 °C	550 °C	20min	53,4 HRC
	Recozimento de amaciamento				210 HV (30 kgf)
	Nova têmpera e revenido	1065 °C	540 °C	40min	60,2 HRC



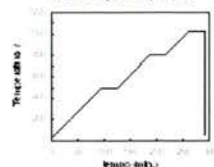
**Fig. 3** – Forno K400 da Brasimet



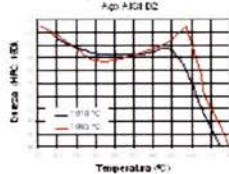
**Fig. 4** – Forno de vácuo IPSEN.

## ACO AISI D2 (1.2379)

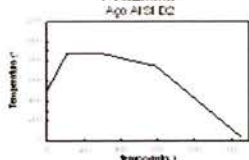
Ciclo de aquecimento Aço AISI D2



Obtenção de Perfil de Dureza Aço AISI D2



Resfriamento Aço AISI D2



### Tempera:

- Colocar as peças no fundo do forno;
- Ligar o forno e programá-lo para a temperatura de 500°C;
- Manter o forno à temperatura de 500°C durante 20+10min./20mm de diâmetro da peça;
- Elevar a temperatura do forno até à temperatura de 800°C;
- Manter à temperatura de 800°C durante 20+10min./20mm de diâmetro;
- Subir a temperatura do forno até 1065°C (temperatura de austenitização);
- Manter o forno à temperatura de austenitização durante 20+10min./20mm de diâmetro da peça (**mínimo 30min.**);
- Colocar a cesta no recipiente do óleo e ligar a agitação;
- Retirar a peça do forno e colocá-la na cesta que se encontra no óleo;
- Abrir completamente a porta do forno para que o mesmo arrefeça rapidamente.

### Revenimento:

- Estabilizar o forno na temperatura desejada (consultar quadro IV);
- Retirar as peças do óleo e colocá-las no fundo do forno;
- Manter o forno à temperatura de revenimento durante 1h./25mm de diâmetro da peça (**mínimo 2h.**);
- Retirar as peças do forno e deixá-las arrefecer ao ar.

**Atenção:** Efetuar sempre um 2º revenimento igual ao acima descrito. O 1º revenimento deve ser efetuado no mesmo dia do tratamento de têmpera.

### Recozimento:

- Deixar o forno ligado no dia anterior à temperatura de 500°C;
- No dia seguinte, colocar as peças no fundo do forno e programar o mesmo para a temperatura de 855°C;
- Manter o forno à temperatura de estágio durante 3 horas;
- Desligar o forno e deixar as peças arrefecerem dentro dele até à temperatura de 750°C;
- Retirar as peças do forno e deixá-las arrefecer ao ar.

HRC pretendida	Temperatura (°C)	
	Têmpera	Revenido
60,0		540
59,0	1065	550
55,0		575

**NOTA:** Após terminar os tratamentos térmicos, enviar as peças para jateamento, eliminação da camada descarbonada e medição de dureza HRC. Usar sempre EPI'S (luvas, máscara e avental) quando retirar ou colocar peças no forno.

Este quadro está de acordo com a IT-SRM13 (Rev.02)

**Fig. 5** – Sequência operatória para tratamento térmico do aço AISI D2. Este procedimento está incluído num quadro, afixado na área de tratamentos térmicos da Durit Brasil e faz parte da respectiva instrução de trabalho.



FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000105298