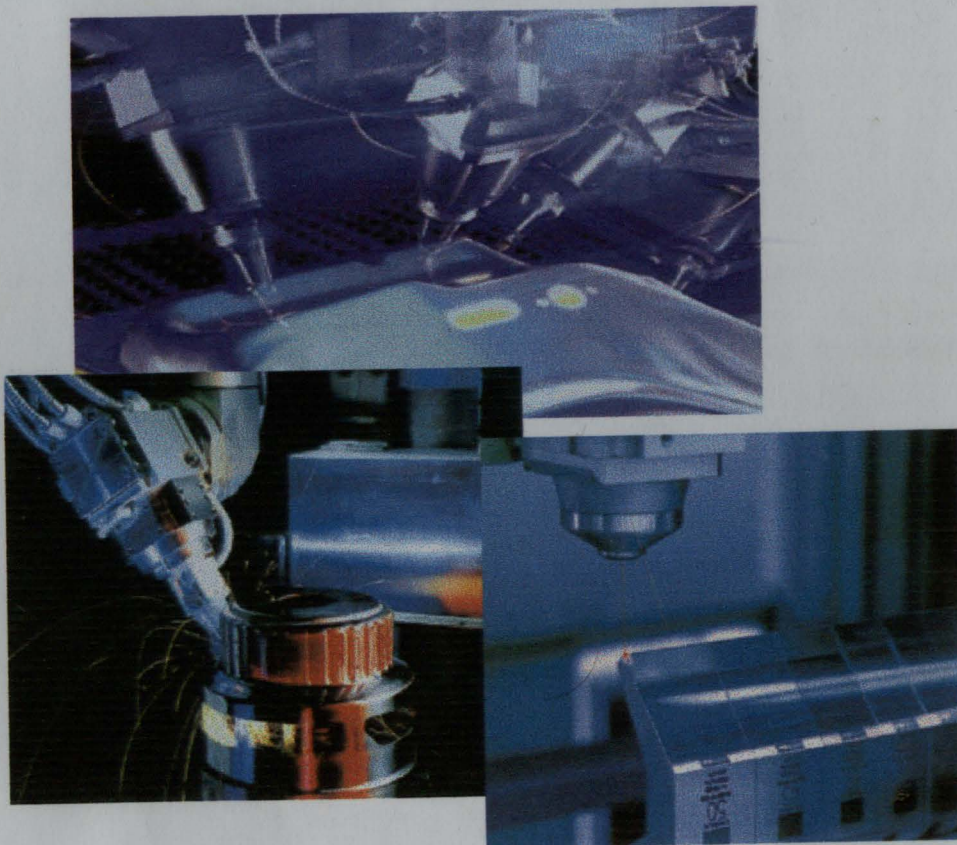


Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Estágio

**Endurecimento Superficial por LASER de um Aço
Ferramenta do Tipo O₁**



Realizado por: Andrea Maia
Orientadores: Prof. Henrique Santos (FEUP)
Eng. José Rego (Quantal)
Julho/2003



Universidade do Porto
FEUP Faculdade de Engenharia

669(047.3)
LEMM 2002/MAIa



Quantal laser tecnologia



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Social Europeu

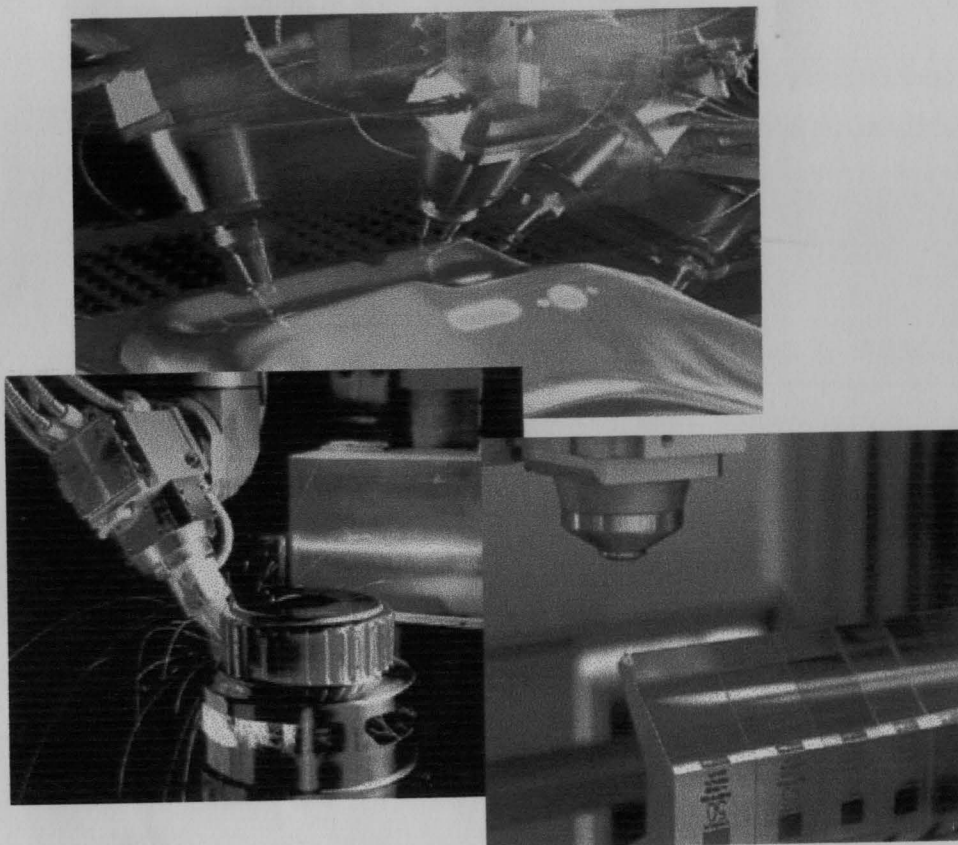


Mais Educação

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Estágio

Endurecimento Superficial por LASER de um Aço Ferramenta do Tipo O₁



Realizado por: Andrea Maia
Orientadores: Prof. Henrique Santos (FEUP)
Eng. José Rego (Quantal)
Julho/2003



Universidade do Porto
FEUP Faculdade de
Engenharia



Quantal laser tecnologia



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Social Europeu



Mais Educação

669(047.3)/LENN 2002/ΠΑΙα

Universidade do Porto	
Faculdade de Engenharia	
Biblioteca	
Nº	57378
CDU	
Data	17/05/2007

Ao Sérgio,
aos meus pais e ao meu irmão.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Henrique Santos pelo interesse, apoio e disponibilidade que sempre demonstrou.

À Prof. Filomena Viana pelo apoio e disponibilidade.

Ao Eng. João Teixeira, ao Dr. Carlos Rego e a toda a organização do IDIT pela ajuda prestada.

Ao Eng. José Rego pelo apoio e disponibilidade.

Bem como a outras pessoas, cujos nomes não foram citados, mas que contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigado.

ÍNDICE

1	Objectivo	2
2	Resumo	2
3	Introdução	3
4	Materiais e procedimento experimental	4
4.1	Materiais utilizados	4
4.2	Descrição das características do laser de CO ₂	4
4.3	Procedimento experimental	5
4.3.1	Parâmetros do endurecimento de uma pista	5
4.3.2	Avaliação de dureza e análise microestrutural	5
4.3.3	Parâmetros do endurecimento em várias pistas	6
5	Resultados experimentais	6
5.1	Endurecimento superficial de uma única pista	6
5.1.1	Estudo microestrutural e de durezas	10
5.2	Endurecimento superficial em várias pistas	13
6	Discussão dos resultados	16
7	Conclusões	18
8	Referências bibliográficas	19

1 - OBJECTIVO

Este trabalho de Estágio tem por objectivo a aplicação do Endurecimento superficial por laser num aço ferramenta do tipo O₁. No final do Estágio pretende-se caracterizar todos os passos e parâmetros necessários para endurecer de forma localizada o aço do tipo O₁

2 - RESUMO

No seguimento do trabalho executado no primeiro semestre na disciplina Seminário e após abordagem das necessidades e interesse da empresa, foi acordado o seguinte programa de trabalho desenvolvido no segundo semestre na disciplina de Estágio:

Primeira fase – Definição das condições experimentais apropriadas ao endurecimento superficial de uma única pista do aço (entendendo-se por pista o percurso esquematizado na Figura 1). Arbitrou-se como critério de aceitação dos procedimentos a obtenção de uma dureza superficial igual ou superior a 64HRC (ou 800HV, segundo conversão conforme [1]) [2]. Sobre os provetes representativos de procedimentos que satisfaçam o critério anterior foram realizadas análises de dureza e microestrutural, com vista a caracterizar a largura e profundidade da pista endurecida; a Figura 2 identifica os locais onde foram avaliadas as durezas.

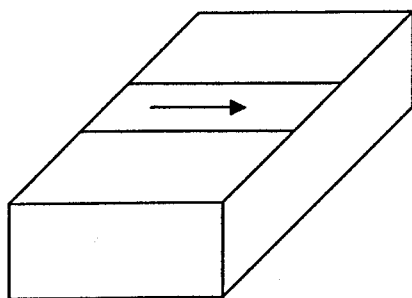


Fig. 1

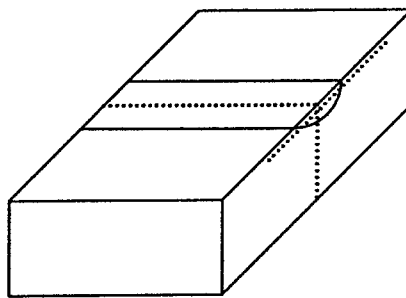


Fig. 2

Figura 1 – Esquema do percurso do feixe laser para endurecimento numa única pista.

Figura 2 – Esquema mostrando os locais de realização das incisões.

Segunda fase – Definição das condições experimentais do endurecimento em várias pistas, de modo a aumentar a largura da zona endurecida (variando o raio do ponto focal e o afastamento entre pistas).

Palavras-chave: Endurecimento superficial; Laser CO₂; Aço ferramenta do tipo O₁.

3 - INTRODUÇÃO

O endurecimento superficial sem fusão por laser é um processo que visa a melhoria de determinadas propriedades como a resistência ao desgaste e, em circunstâncias favoráveis, a resistência à fadiga devido à instalação de tensões compressivas na peça induzidas pelo processo de endurecimento. Trata-se de um tratamento térmico que consiste em incidir um feixe de radiação laser sobre a superfície do material a tratar. Este processo difere dos métodos convencionais na medida em que apenas uma pequena camada superficial fina é aquecida até à temperatura de austenitização permanecendo o resto do material inalterável. O material é aquecido e arrefece após a remoção da fonte de calor laser, por condução do calor para o material base, com velocidades da ordem de 10^4Cs^{-1} , consoante as condições de tratamento [3]. A peça que está a ser tratada tem que ter massa suficiente (6 ou 7 vezes a espessura da capa endurecida) para uma rápida remoção do calor o que promove o chamado “self quenching”, isto é, têmpera induzida pela rápida condução do calor para o interior do material [4,5]. O tratamento térmico por laser não necessita pois de um meio de arrefecimento externo.

A condição fundamental para que ocorra endurecimento é que o material possua pontos de transformação em fase sólida. Assim, os materiais mais usuais neste tipo de tratamento são os aços e os ferros fundidos; contudo, as ligas de alumínio e as ligas de titânio podem também ser tratadas por este processo.

A maioria dos metais reflecte especialmente bem a radiação na gama do infravermelho o que significa que a grande parte da radiação proveniente do laser de CO₂ não é absorvida pelo metal. A reflexão da radiação dos lasers de CO₂ pela maioria dos metais é geralmente superior a 85%. Por isso torna-se necessário cobrir a superfície metálica com um material de elevada absorvência. Desta forma a reflexão baixa para cerca de 15-20% [4,6]. O revestimento de grafite na forma de spray aerosol é o revestimento mais popular porque é facilmente aplicado e removido [7]. Para obter uma informação mais detalhada acerca dos tratamentos de endurecimento superficial por laser sugere-se a leitura do Seminário

“Endurecimento Superficial por Laser de um Aço Ferramenta do Tipo O1” realizado por Andrea Maia [8].

4 - MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 - Materiais utilizados

Para a execução deste trabalho foram utilizados provetes em aço ferramenta AISI O₁, comercializado por F. Ramada com a designação BCW, na forma de paralelepípedos com as dimensões 100x30x15mm³. A composição química deste aço está indicada na Tabela 1. O aço é comercializado no estado recozido, com glóbulos de carbonetos numa matriz ferrítica. A dureza do material foi avaliada e oscila entre 263 a 329/0.98N, com um valor médio de 288HV.

Tabela 1- Composição química do aço ferramenta O₁ em percentagens ponderais [2]

C	Si	Mn	Cr	W
0,95	0,25	1,10	0,60	0,60

Foi aplicada ao aço uma camada negra de grafite na forma de spray aerosol, para melhorar a absorção da radiação. Este revestimento é comercializado pela Kontakt Chemie com a designação Graphit 33.

4.2 - Descrição das características do laser de CO₂

Foi utilizado um laser de CO₂, da *Rofin Sinar*, designado por RS 6000 RF. É um laser do tipo fluxo axial rápido. Trata-se de um laser multimodal com um factor de qualidade $K > 0.4$, TEM₂₀ (modo electromagnético transverso) e potência máxima de 6kW que se adapta ao endurecimento superficial [9]. O pulso pode ser contínuo ou com frequência até 10kHz. Este laser possui um espelho de cobre revestido a ouro, da *Kugler*, em que a distância focal (distância do espelho ao ponto focal) é de 150mm. A máquina na qual se encontra inserido é de 3 eixos + 2 (pois possui mesa rotativa). Este equipamento apresenta velocidades de deslocamento até 20m/minuto, suporta uma carga máxima de 300kg e dispõe de um controlador Sinumerik 810M da Siemens; os percursos máximos ao longo das direcções principais são 1200mm segundo xx, 625mm segundo yy e 400mm segundo zz [10].

4.3 - Procedimento experimental

Para avaliar a aplicação do endurecimento foram estabelecidos os seguintes critérios de carácter obrigatório:

- dureza superficial igual ou superior a 64HRC;
- o valor de 550HV como limite da dureza para que a capa seja considerada endurecida (por analogia com o endurecimento superficial por cementação);
- incisões realizadas a uma distância da superfície de pelo menos três vezes o valor da respectiva diagonal; tendo em conta que foram utilizadas cargas que produziram incisões com uma diagonal máxima de $13\mu\text{m}$, tal forçou a que as incisões não pudessem ser avaliadas a menos de $40\mu\text{m}$ da superfície.

Foram realizadas experiências preliminares visando a definição de parâmetros que impusessem o endurecimento superficial. Ensaíram-se diversos valores de potência (P), da distância do bico do laser à superfície a endurecer (Z), da velocidade de avanço do laser (V) e concluiu-se que $P=4\text{kW}$, $Z=20\text{mm}$, $V=2\text{m por minuto}$ correspondiam a condições médias satisfatórias. Foi pois com base em oscilações destes valores dos parâmetros que foram conduzidas as experiências subsequentes. Estes valores dos parâmetros a utilizar foram relativamente discrepantes com os dados bibliográficos, pois segundo [11,12] valores de potência de 0,5 ou 1,5kW deveriam bastar para promover endurecimentos superficiais.

4.3.1 - Parâmetros do endurecimento de uma pista

Com base na informação anterior, foram realizadas experiências variando Z entre 10 e 40mm e V entre 1 e 4m por minuto. Foram também ensaiadas condições de arrefecimento assistido por hélio (com um caudal de 20dm^3 por minuto) e revestimentos de grafite prévios à aplicação do laser sobre a superfície a endurecer.

4.3.2 - Avaliação de dureza e análise microestrutural

Após a realização dos ensaios de endurecimento mediram-se durezas Vickers em todas as amostras através de um equipamento Shimadzu. As condições de ensaio foram as seguintes: carga aplicada de 0,98N durante 15 segundos. Foram realizadas incisões de forma a poder determinar a profundidade e largura da capa endurecida.

Em seguida foram observadas em microscopia óptica e electrónica de varrimento algumas amostras seleccionadas. As amostras polidas foram atacadas com picrato de sódio alcalino (2g ácido pícrico + 25g NaOH + 100cm³ água) e seguidamente com nital a 2% [13].

Procedeu-se posteriormente à medição de durezas à superfície das amostras (a cerca de 30µm de profundidade) com uma carga de 0,49N durante 15 segundos, de modo a garantir uma penetração pouco profunda da incisão e assim obter o valor da dureza superficial.

4.3.3 – Parâmetros do endurecimento em várias pistas

Procedeu-se ao endurecimento superficial do aço em várias pistas de forma a aumentar a área da capa endurecida. Para tal foram seleccionadas as condições $P=4\text{kW}$, $V=1,5\text{m}$ por minuto, $Z=20\text{mm}$, arrefecimento assistido por He. Procedeu-se à execução do endurecimento em 5 pistas consecutivas com diferentes afastamentos. Ensaaiaram-se translações do bico do laser entre uma e duas larguras de pista.

5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 – Resultados do endurecimento superficial de uma única pista

A figura 3 representa um exemplo do tipo de curvas obtidas nos ensaios, mostrando a variação da dureza em função da profundidade (d) e da largura (w).

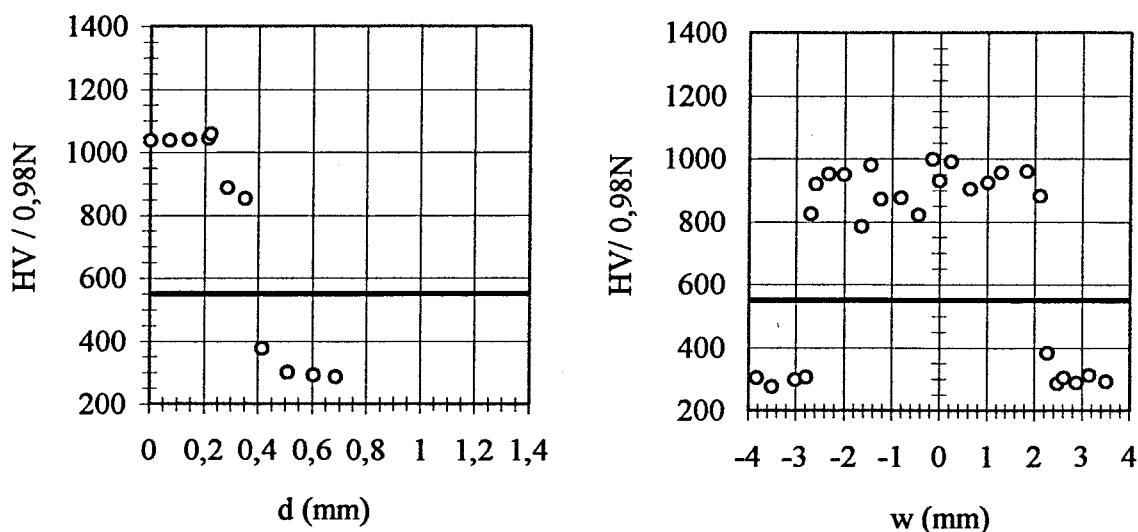


Figura 3 – Exemplo do perfil de durezas em função profundidade (d) e da largura (w) da pista; os dados fornecidos resultam das condições $P=4\text{kW}$, $V=2,5\text{m}$ por

minuto, $Z = 35\text{mm}$, com arrefecimento assistido por He. Nota: Distância do bico do laser ao ponto focal (Z') = 6,5 mm.

A Figura 4 ilustra a variação das dimensões das incisões de dureza em função da profundidade, evidenciando o aumento das respectivas diagonais.

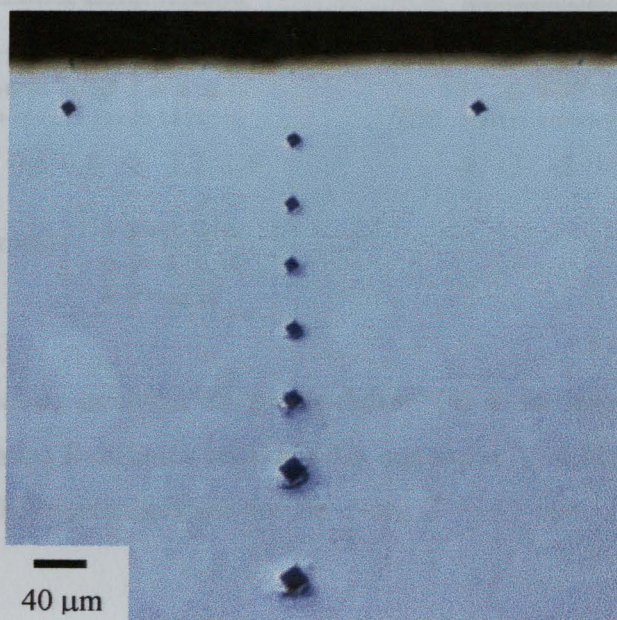


Figura 4 – Fotomicrografia ilustrativa da variação das dimensões das incisões com o aumento da profundidade.

A Figura 5 mostra a variação da dureza com a profundidade (d) e a largura (w) para diferentes valores de potência, entre 0,5 e 4kW.

As Figuras 6 e 7 mostram a variação da profundidade e da largura das capas endurecidas para diferentes valores da velocidade de avanço do bico e da distância do bico à superfície a endurecer.

A Figura 8 mostra o efeito do He no resultado do processo de endurecimento, através da variação da dureza com a profundidade e a largura em processamentos com e sem assistência de He.

A Figura 9 mostra o efeito do número de camadas de revestimento de grafite na curva de variação da dureza com a profundidade e a largura.

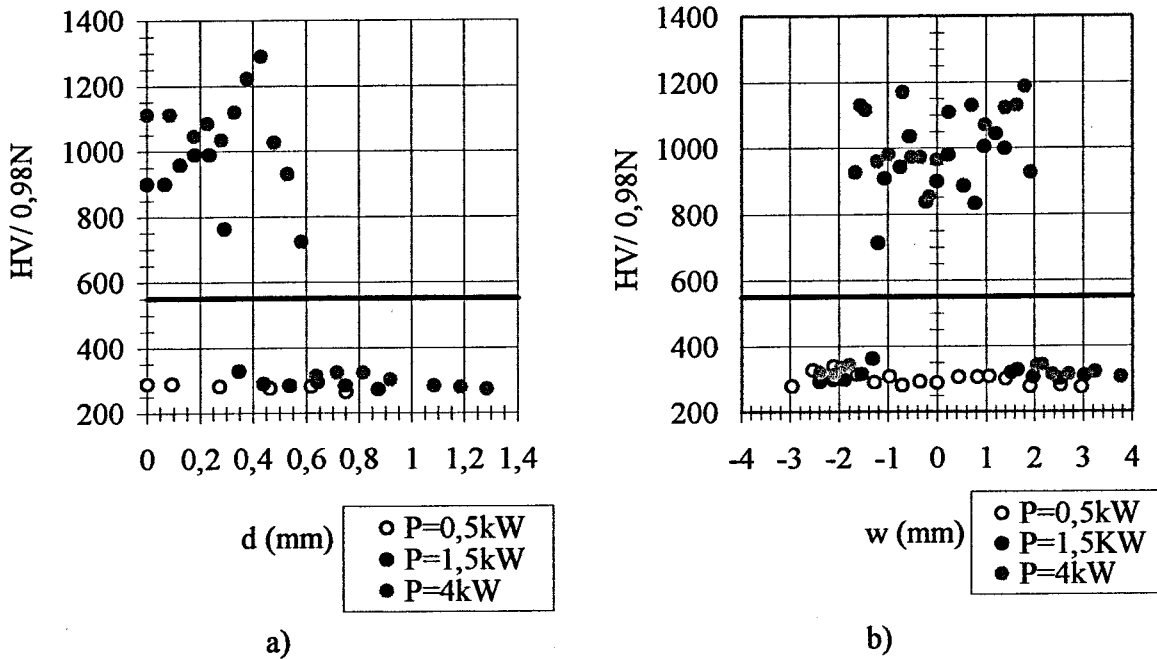


Figura 5 - Efeito da potência na profundidade (a) e na largura (b) da capa endurecida; os dados fornecidos resultam das condições $V=1,5$ m por minuto, $Z=20$ mm, com arrefecimento assistido por He. Nota: $Z' = 6,5$ mm.

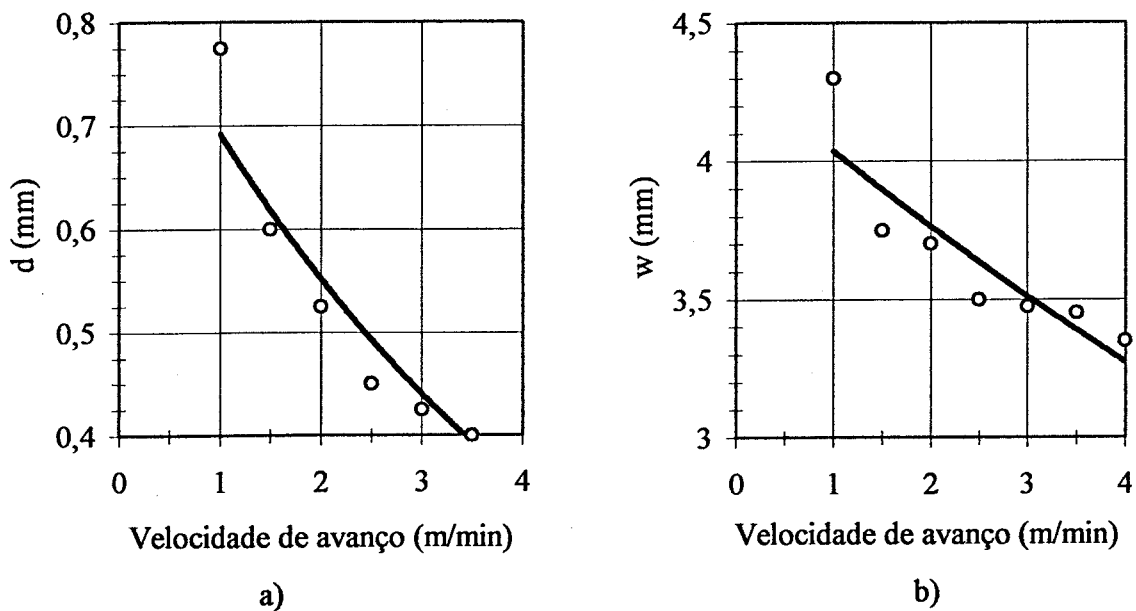
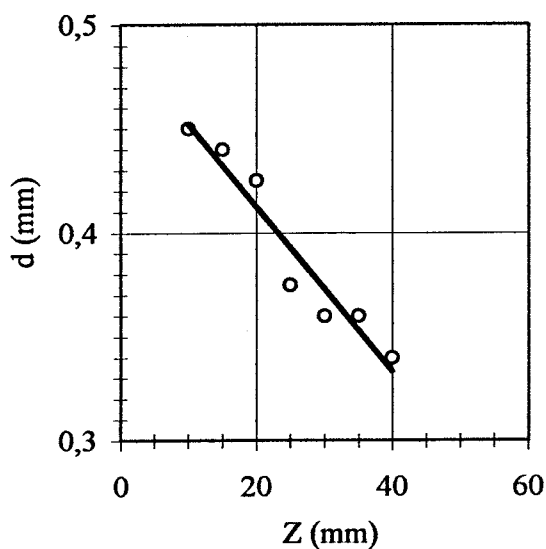
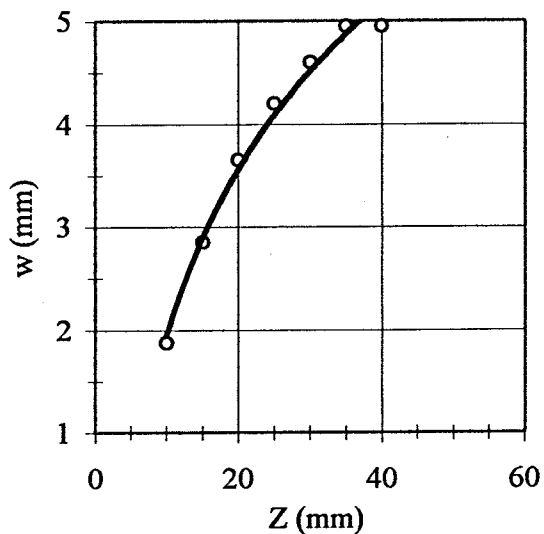


Figura 6 - Efeito da velocidade na profundidade (a) e na largura (b); os dados fornecidos resultam das condições $P= 4$ kW, $Z= 20$ mm, com arrefecimento assistido por He. Nota: $Z' = 6,5$ mm.

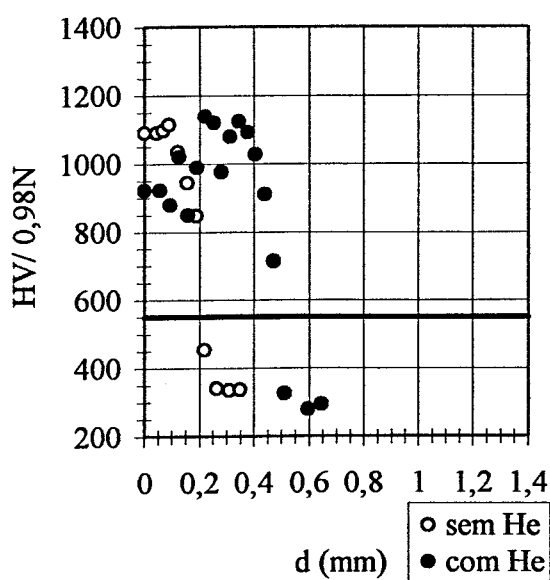


a)

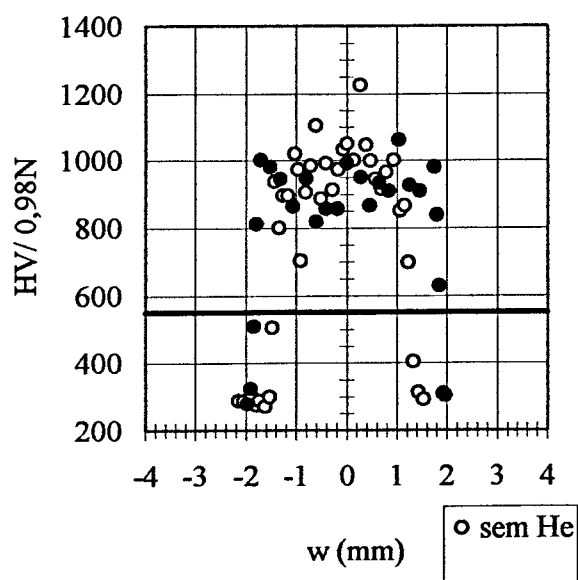


b)

Figura 7 - Efeito do Z na profundidade (a) e na largura (b); os dados fornecidos resultam das condições $P=4\text{kW}$, $V=2,5\text{m}$ por minuto, com arrefecimento assistido por He. Nota: $Z' = 6,5\text{ mm}$.



a)



b)

Figura 8 - Efeito do He na profundidade (a) e na largura (b); os dados fornecidos resultam das condições $P=4\text{kW}$, $V=2,5\text{m}$ por minuto, $Z=20\text{mm}$, com arrefecimento assistido por He. Nota: $Z' = 7\text{ mm}$.

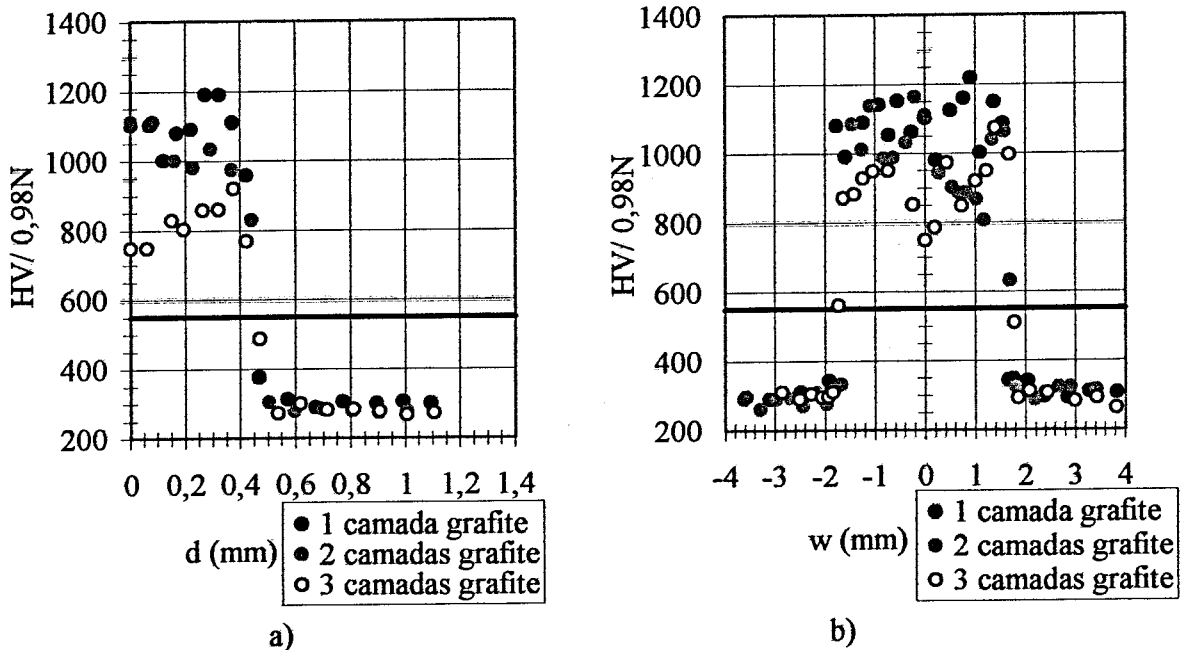


Figura 9 - Efeito da grafite na profundidade (a) e na largura (b) da capa endurecida; os dados fornecidos resultam das condições $P=4\text{kW}$, $V=2,5\text{m por minuto}$, $Z=20\text{mm}$, com arrefecimento assistido por He. Nota: $Z' = 6,5\text{ mm}$.

5.1.1 – Estudo microestrutural e de durezas

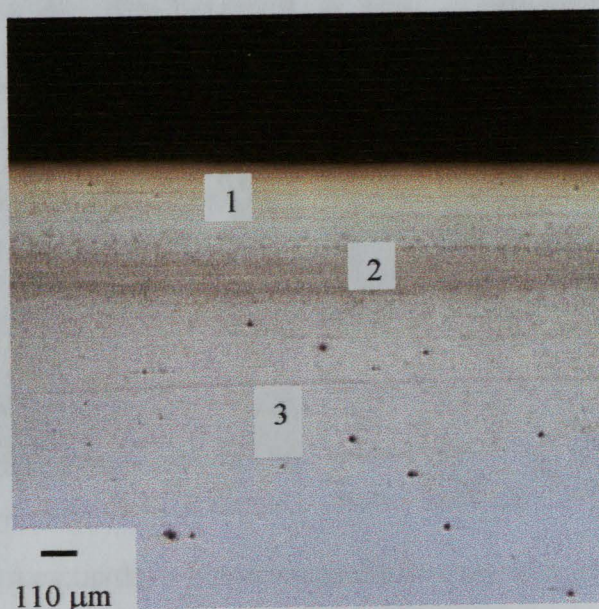
Tendo em conta os dados fornecidos anteriormente foram seleccionadas três amostras para serem sujeitas a análise microestrutural: a amostra que apresenta a capa dura de maior profundidade, a amostra que apresenta a capa dura de maior largura, a amostra que apresenta a capa de mais elevada dureza superficial.

O ataque químico das amostras não se mostrou fácil. Foram utilizados seis reagentes diferentes mas apenas dois – nital 2% e picrato de sódio alcalino – se revelaram eficazes.[13] Primeiramente atacaram-se as amostras com picrato de sódio alcalino e depois com nital 2%.

Todas as amostras apresentavam o mesmo tipo de microestrutura: uma camada superficial dura, uma região de transição e o material de base; a Figura 10 exemplifica uma microestrutura relativa ao ensaio realizado nas seguintes condições: $P=4\text{kW}$, $V=1,5\text{m por minuto}$, $Z=20\text{mm}$, com arrefecimento assistido por He.

A análise microestrutural em microscopia electrónica de varrimento revelou que a capa dura apresentava uma fina sub camada sujeita a fusão durante o endurecimento; esta constatação resultou da morfologia dendrítica apresentada por esta sub camada, evidente na

Figura 11. A Figura 12 ilustra um pormenor desta sub camada sujeita a fusão, na qual se observa a presença de um constituinte lamelar nas regiões inter dendríticas.



Figuras 10 – Fotomicrografias ilustrativas das três regiões principais: 1 - Zona dura, 2 - Zona de transição, 3 - Material base; ataque com nital 2%.

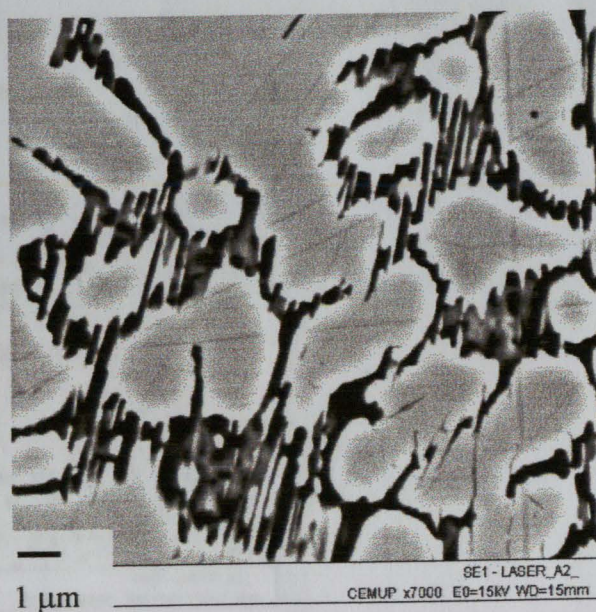


Figura 11 (figura à esquerda) - Fotomicrografia da região fundida.

Figura 12 (figura à direita) - Fotomicrografia mostrando o constituinte lamelar nas regiões inter dendríticas; ataque com picrato de sódio alcalino e nital 2%.

Nas Figuras 13, 14 e 15 apresentam-se respectivamente as microestruturas da capa dura (martensítica), da região de transição e do material de base (carbonetos globulizados uma matriz ferrítica).

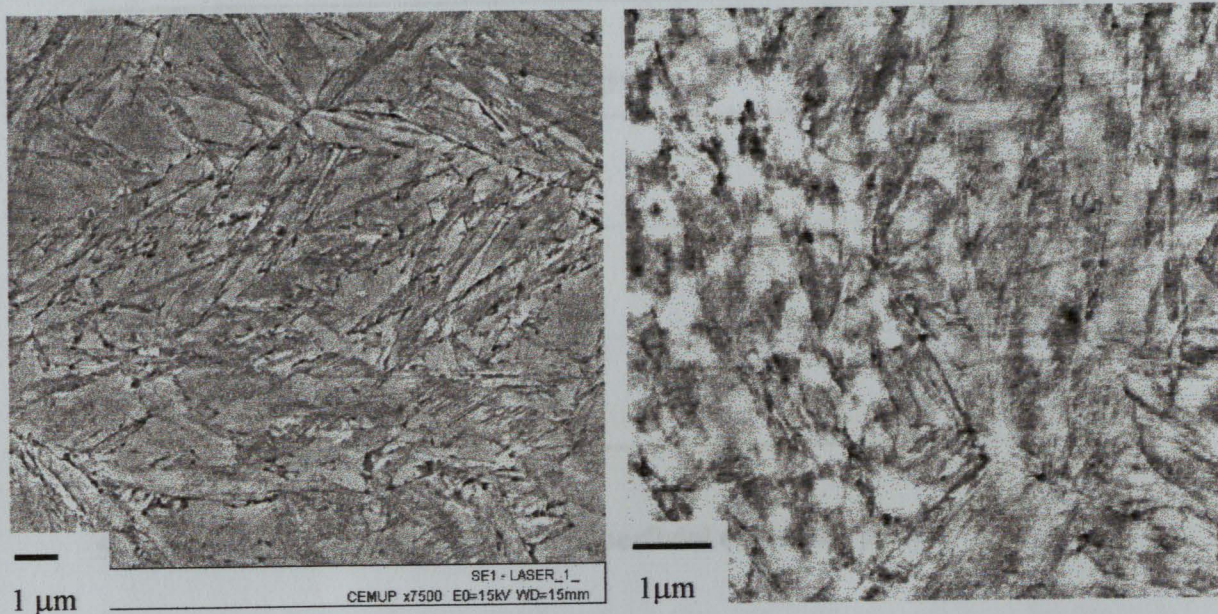


Figura 13 (figura à esquerda) – Fotomicrografia da capa dura (martensite).

Figura 14 (figura à direita) – Fotomicrografia da região de transição (agulhas de martensite e carbonetos); ataque com picrato de sódio alcalino e nital 2%.

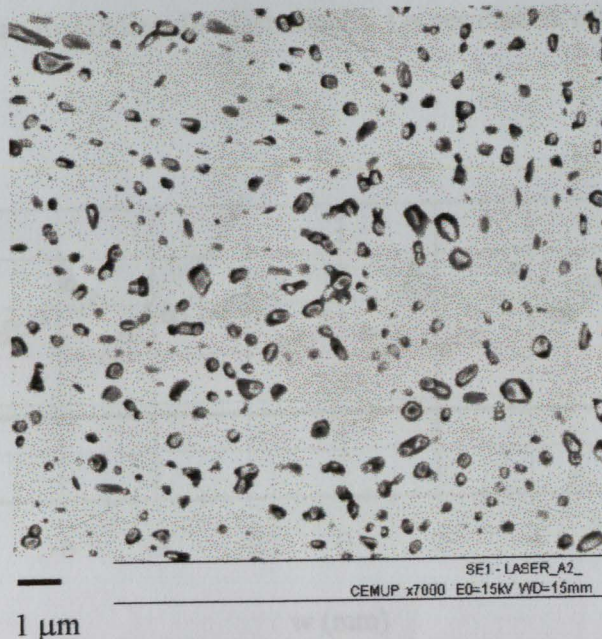


Figura 15 – Fotomicrografia reveladora da microestrutura do material de base (carbonetos numa matriz ferrítica); ataque com nital 2%.

A determinação da dureza da sub camada sujeita a fusão foi realizada sob carga de 0,49N; estes dados estão lançados na tabela 2, para amostras endurecidas a 4kW com arrefecimento assistido por He.

Tabela 2 – Durezas da sub camada sujeita fusão

Parâmetros de endurecimento	Profundidade da sub camada fundida (μm)	Dureza da sub camada fundida (HV / 0,49N)
$V=2,5\text{m}.\text{min}^{-1}$ $Z=35\text{mm}$	10	898
$V=1,5\text{m}.\text{min}^{-1}$ $Z=20\text{mm}$	62	465
$V=1,0\text{m}.\text{min}^{-1}$ $Z=20\text{mm}$	95	391

5.2 - Resultados do endurecimento superficial em várias pistas

O objectivo desta parte do trabalho consiste na determinação das condições de afastamento entre as pistas de forma a originar uma capa endurecida uniforme e com uma maior área. Utilizando as condições experimentais $P=4\text{kW}$, $V=1,5\text{m}$ por minuto, $Z=20\text{mm}$, com arrefecimento assistido por He, procedeu-se ao endurecimento em cinco pistas consecutivas com várias distâncias de afastamento. Os resultados estão disponibilizados nas Figuras 16 a 22.

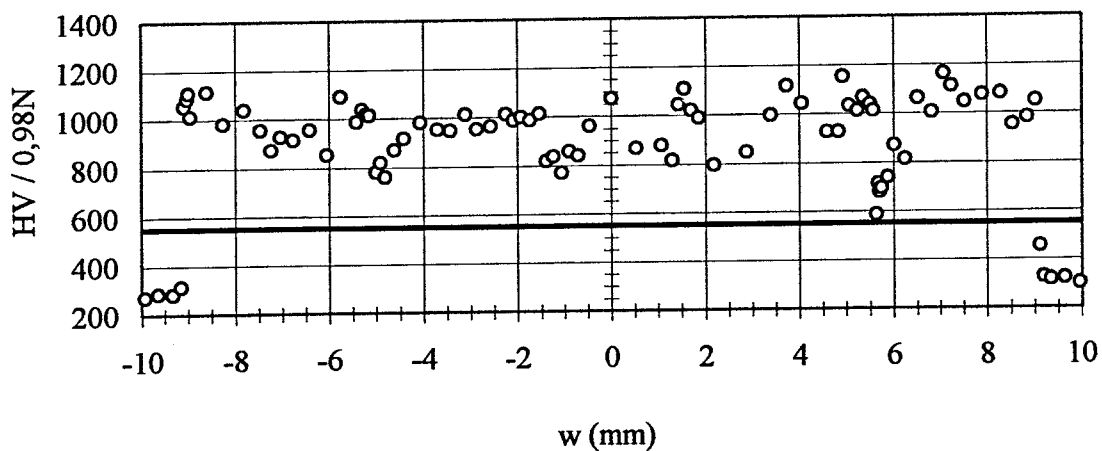


Figura 16 – Endurecimento em cinco pistas consecutivas com translação de uma largura de pista. Nota: $Z' = 6,5\text{mm}$.

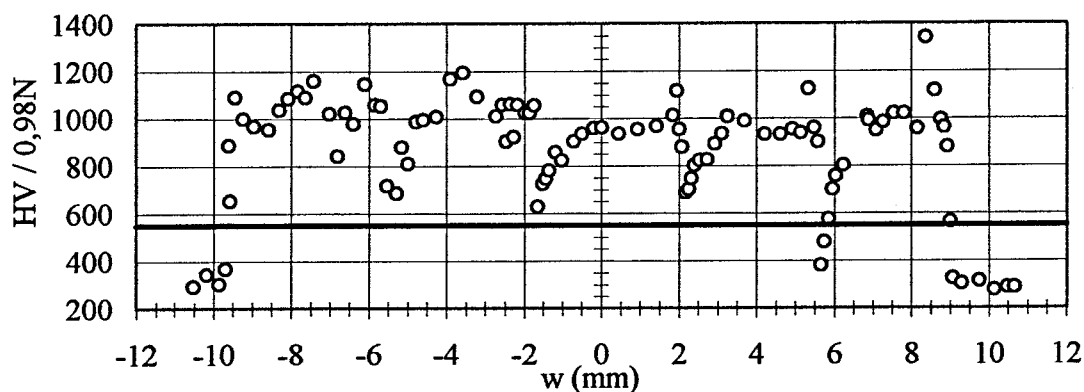


Figura 17 - Endurecimento em cinco pistas consecutivas com translação de uma e cinco centésimas de largura de pista. Nota: $Z' = 6,5$ mm.

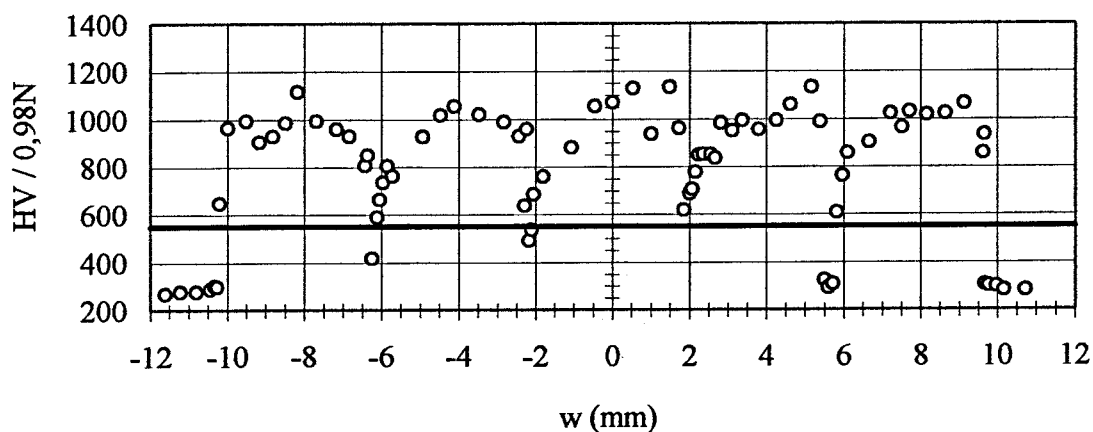


Figura 18 - Endurecimento em cinco pistas consecutivas com translação de uma e dez centésimas de largura de pista. Nota: $Z' = 6,5$ mm.

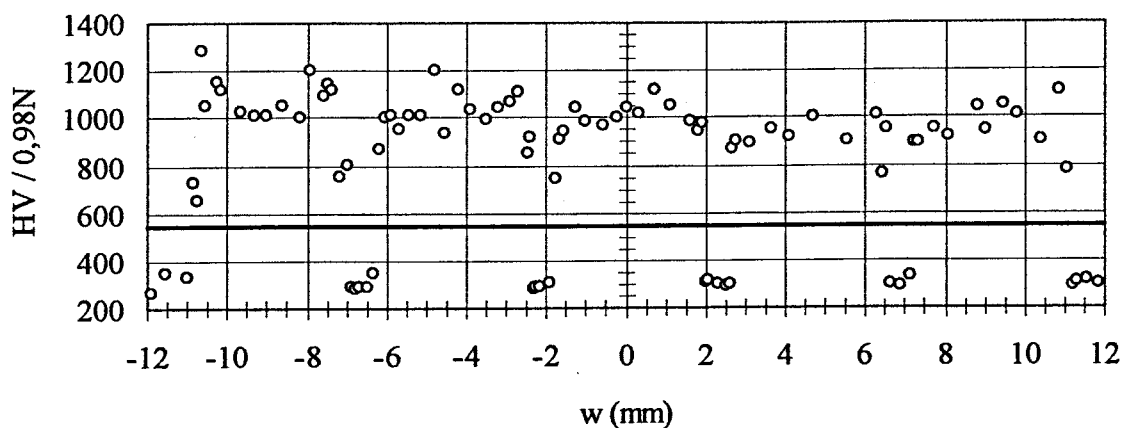


Figura 19 - Endurecimento em cinco pistas consecutivas com translação de uma e vinte e cinco centésimas de largura de pista. Nota: $Z' = 6,5$ mm.

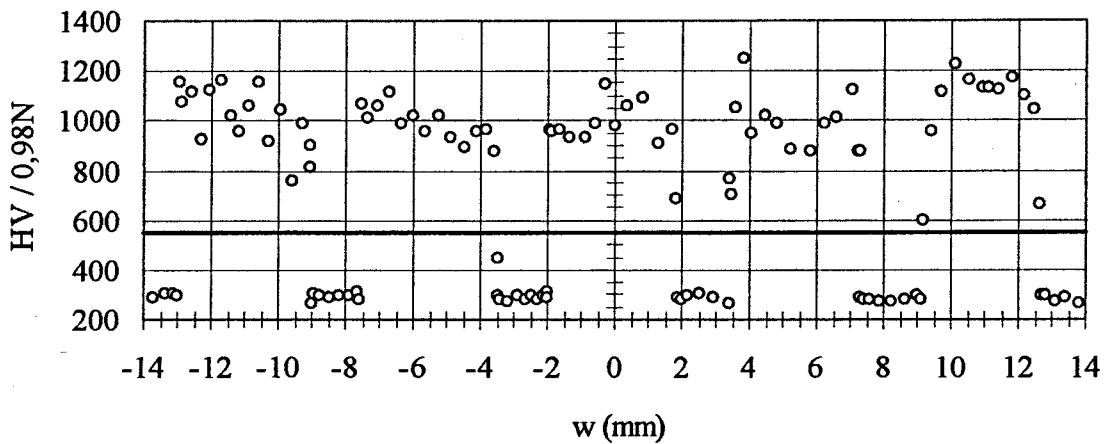


Figura 20 - Endurecimento em cinco pistas consecutivas com translação de uma e meia de largura de pista. Nota: $Z' = 6,5mm$.

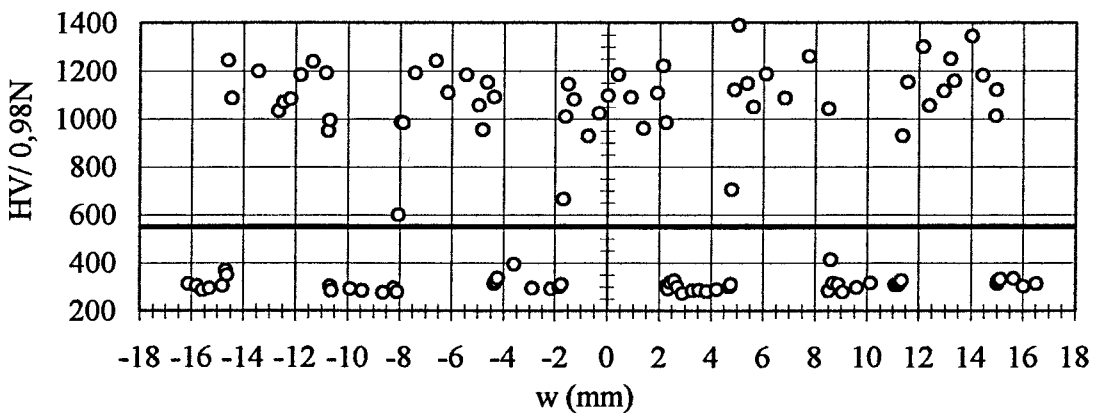


Figura 21 - Endurecimento em cinco pistas consecutivas com translação de uma e setenta e cinco centésimas de largura de pista. Nota: $Z' = 6,5mm$.

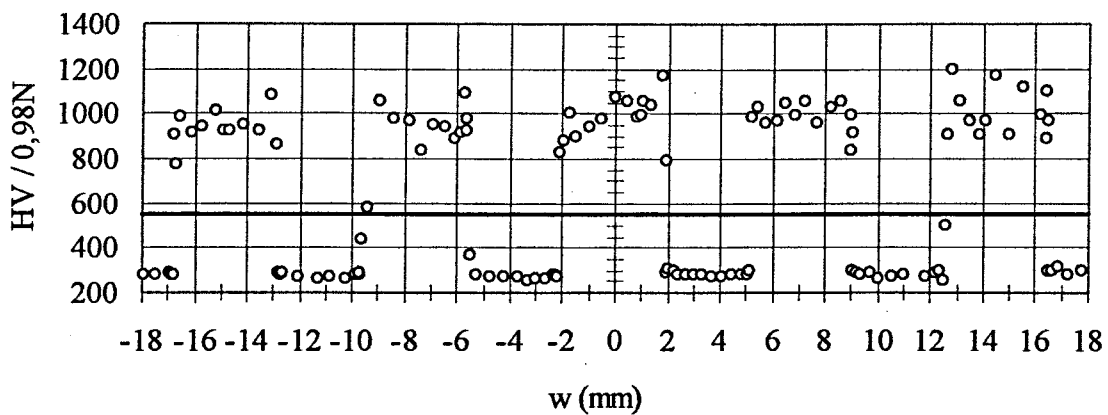


Figura 22 - Endurecimento em cinco pistas consecutivas com translação de duas de largura de pista. Nota: $Z' = 6,5mm$.

6 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados mostram claramente que o aço ferramenta O₁ pode ser endurecido superficialmente através do laser com valores de dureza à superfície de cerca de 1000HV.

A potência foi um dos parâmetros analisados neste trabalho. Dos resultados podemos comprovar que quer a profundidade quer a largura da capa endurecida aumentam com o aumento do valor da potência, pois aumenta a densidade de energia fornecida ao material. Podemos verificar ainda que a utilização de uma potência de 0,5kW não promove o endurecimento superficial do material tal como os autores da bibliografia [11] afirmam. No entanto, o trabalho desenvolvido no estágio foi executado com algumas condições experimentais diferentes das referidas em [11], tais como um TEM e um sistema óptico diferentes e uma distância focal também diferente.

Também podemos comprovar que o aumento da velocidade provocava uma diminuição exponencial da profundidade e da largura da capa dura, devido à diminuição do tempo de interacção do feixe laser no material. Comprovamos também que o aumento do Z provocava uma diminuição linear da profundidade e um aumento logarítmico da largura da capa dura porque a área do spot (secção transversal do feixe laser em contacto com o material) aumenta, logo a densidade de energia fornecida ao material diminui.

Um dos parâmetros analisados neste trabalho foi a utilização do hélio no tratamento térmico. Verificamos que a sua utilização é benéfica dado que a profundidade da capa dura aumenta para cerca do dobro relativamente a uma amostra que foi endurecida em condições idênticas sem a utilização do hélio. A largura da capa dura também aumenta. Tal facto pode ser justificado pela elevada condutibilidade térmica do hélio.

Através dos ensaios preliminares concluímos que a aplicação da grafite como revestimento absorvente da radiação laser é fundamental no tratamento de endurecimento. Contudo o número de camadas de grafite (após a primeira) aplicadas ao material mostrou-se irrelevante.

A análise microestrutural, através do microscópio óptico, das amostras escolhidas revelou a existência de três zonas distintas: uma zona dura, uma zona de transição e o material de base. Contudo a visualização no microscópio electrónico de varrimento indicou-nos a existência não de três mas sim de quatro zonas distintas, dado que por cima da zona dura se encontra uma zona fundida. O aparecimento da zona fundida deve-se à elevada densidade de energia fornecida ao material. Essa zona fundida possui uma estrutura dendrítica e um

constituente lamelar nas regiões inter dendríticas. A existência dessa zona revela-se prejudicial na medida em que a dureza baixa para 400HV. Na tabela 2 podemos verificar que a amostra cuja velocidade proveniente do ensaio com uma velocidade de avanço do laser de 1,5m por minuto, potência igual a 4kW e Z igual a 20mm apresenta uma capa fundida de menor profundidade do que a amostra resultante do ensaio com uma velocidade de 1,0m por minuto porque o tempo de interação do feixe laser no material é menor.

A zona dura é constituída por martensite acicular fina, não sendo detectada a presença de carbonetos, o que indicia que o tempo do tratamento foi suficiente para dissolver os carbonetos presentes no estado inicial do material; logo não se torna necessário proceder a um recozimento de normalização do aço antes do tratamento de endurecimento por laser. Podemos também explicitar que a fragilidade da martensite, apesar do seu elevado teor em carbono, dado a dissolução (quase) completa dos carbonetos, é suficiente para suportar o ensaio de dureza sem que dos vértices das incisões ocorra a propagação de fissuras (ver figura 4). Essa zona corresponde à zona de maior dureza nos gráficos HV versus profundidade e HV versus largura.

Abaixo da zona dura aparece a zona de transição constituída por martensite e carbonetos, tal como era de esperar. Essa zona corresponde à zona de elevado declive nos gráficos HV versus profundidade e HV versus largura.

Por último aparece o material de base, constituído por carbonetos finos dispersos numa matriz ferrítica, o qual corresponde à zona de menor dureza nos gráficos HV versus profundidade e HV versus largura.

Assim para endurecer superficialmente por laser um aço ferramenta do tipo AISI O₁ de forma a obtermos uma capa dura de 0,6mm de profundidade e 3,75mm de largura podemos preconizar a utilização de uma potência igual a 4kW, um Z igual a 20mm e uma velocidade de 1,5m por minuto. Após o tratamento devemos utilizar uma rectificadora de elevada precisão de forma a retirarmos 62µm (de capa fundida). Se não quisermos realizar a operação de rectificação, teremos de utilizar outros parâmetros que darão origem a diferentes valores de profundidade e de largura de capa dura.

Verificamos ainda que para obtermos uma superfície endurecida uniformemente por vários percursos consecutivos do laser, devemos proceder a translações do laser iguais ao valor da largura de uma pista. Um maior afastamento origina regiões não endurecidas entre os sucessivos percursos do laser.

No seguimento deste estágio propõe-se, num trabalho futuro, a verificação da influência de outros revestimentos na absorção da radiação laser tais como tinta preta e os

fosfatos de zinco e de manganês, a utilização de um laser de CO₂ com as mesmas características do laser utilizado mas com um TEM diferente, a utilização de diferentes estados iniciais do material a endurecer e a verificação da sobreposição de pistas na dureza do material.

7 – CONCLUSÕES

Este trabalho de estágio permitiu estudar a influência de vários parâmetros no endurecimento superficial por laser tais como a potência, a velocidade, a distância do bico do laser à amostra (Z), o uso da grafite como revestimento absorvente da radiação laser, o uso do gás hélio e a partir desses resultados definir as condições experimentais apropriadas ao endurecimento superficial de uma e de várias pistas do laser. Como principais conclusões deste estudo podemos explicitar as seguintes:

- 1) a dureza superficial é cerca de 1000HV;
- 2) o aumento do valor da potência provoca o aumento quer da profundidade quer da largura da capa endurecida;
- 3) para uma potência de 0,5kW não se verifica o endurecimento superficial;
- 4) o aumento da velocidade provoca uma diminuição exponencial na profundidade e na largura da zona tratada;
- 5) o aumento do bico do laser à amostra provoca uma diminuição linear da profundidade e um aumento logarítmico da largura;
- 6) a utilização do He durante o endurecimento provoca um aumento da largura e da profundidade da capa endurecida;
- 7) o número de camadas de grafite (após a primeira) é irrelevante no endurecimento;
- 8) nas amostras endurecidas verifica-se a existência de quatro zonas diferenciadas: zona fundida dendrítica; zona dura martensítica; zona de transição e finalmente o material de base constituído por ferrite e carbonetos;
- 9) a existência da zona fundida revela-se prejudicial na medida em que a dureza baixa para 400 HV;
- 10) é possível alargar uniformemente a zona tratada através do varrimento pelo laser em várias pistas.

8 – BIBLIOGRAFIA

- [1] G. L. Kehl: "Principles of Metallographic Laboratory Practice", 3rd edn, 470; 1949, USA, Mc Graw Hill Book Company.
- [2] <http://www.sz-metal.si/products/steels/OW4.pdf>
- [3] Metals Handbook: "Heat Treating", 9th edn, vol. 4, 507-517, 581-617; ASM.
- [4] <http://www.laserk.com/newsletters/paperheattreat.html>
- [5] http://www.precolaser.com/applications/processes/heat_treating.htm
- [6] E.A. Metzbower: "Lasers in material processing", 108-114; ASM.
- [7] J. C Ion: "Surface Engineering", 2002, Vol.18, (1), 14 – 31.
- [8] A. Maia: "Endurecimento Superficial por Laser de um Aço Ferramenta do Tipo O₁", Relatório de Seminário, Janeiro, 2003, 1-22.
- [9] <http://www.laseroptical.co.uk/kinoforms-applications.html>
- [10] Manual do Laser RF 6000 RS.
- [11] H. Bande, G. Lesperance, M. Islam, A. Koul: " Materials Science and Technology", 1991, vol 7, (5), 452-457.
- [12] Y. Arata; "Aplication of Laser for Material Processing – Heat Flow in Laser Hardening", 550-564; ASM.
- [13] G.F.V. Voort: "Metallography Principles and Practice", 632, 637, 638, 643 e 646, 1999, New York; ASM International.





FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000087378



Mais Educação



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Social Europeu

Nome: Andrea Raquel Moreira Maia

Curso: Eng. Metalúrgica e Materiais

Datas: 1/2/2003 a 6/30/2003

Tema: Endurecimento superficial por laser

Empresa: Quantal Laser Tecnologia

Concurso: 306/012-03 – PRODEP II – Medida 3/Ação 3.2 -
Estágios