



CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

INVESTIGAÇÃO DO PROCESSO DE ENDURECIMENTO DE MATERIAIS VIA LASER

JOSÉ ROBERTO BERRETTA

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências na Área de Reatores Nucleares de
Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear.

Orientador:

Dr. Paulo Iris Ferreira

São Paulo

1995

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

INVESTIGAÇÃO DO PROCESSO DE ENDURECIMENTO DE MATERIAIS VIA LASER

JOSÉ ROBERTO BERRETTA

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Mestre em Ciências na Área de
Reatores Nucleares de Potência e
Tecnologia do Combustível Nuclear.**

Orientador:

Dr. Paulo Iris Ferreira

SÃO PAULO

1995



***Dedico esta dissertação aos meus pais
Angelo e Dalva,
que sempre estiveram presentes
nas minhas realizações.***

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao **Dr. Paulo Iris Ferreira**, pelo empenho e dedicação na orientação deste trabalho.

Agradeço à **Ana**, minha namorada e amiga, pela compreensão, apoio e incentivo constantes.

Agradeço ao **Dr. Nilson Dias Vieira**, pelo incentivo para iniciar este trabalho e por possibilitar a elaboração deste nos laboratórios da Divisão de Óptica Aplicada do IPEN-CNEN/SP.

Agradeço:

Ao **IPEN** por possibilitar o uso de seus laboratórios em parte dos experimentos.

À **COPESP** por possibilitar o uso de seus laboratórios em parte dos experimentos.

A todos os colegas do ME/IPEN que contribuíram para a execução deste trabalho.

INVESTIGAÇÃO DO PROCESSO DE ENDURECIMENTO DE MATERIAIS VIA LASER

José Roberto Berretta

RESUMO

No presente trabalho investigou-se o processo de endurecimento superficial do aço AISI 1045, induzido pela incidência de um feixe laser. O efeito das variáveis diâmetro (ϕ_f), densidade de energia (W_e) e de potência (W_p) do feixe (parâmetros do laser) e da atmosfera presente durante a irradiação (ambiente e argônio) foi analisado para irradiações puntiformes e trilhas de pontos. As técnicas de microdureza Vickers, metalografia óptica, microscopia eletrônica de varredura e difração de raio X foram empregadas na caracterização do endurecimento e microestrutura da zona afetada pelo feixe laser. Para o ponto isolado, foi possível constatar que: a zona afetada pelo laser tem a forma de uma calota esférica (concha) com dimensões fortemente sensíveis aos parâmetros de feixe e atmosfera; a dureza medida na superfície e ao longo de uma profundidade (numa seção transversal da zona afetada) é máxima nas imediações da superfície e decresce rapidamente na interface entre a zona afetada e o material de base; a ação do feixe laser provoca notável endurecimento do material, elevando a dureza, do valor inicial 250 HV para valores máximos na faixa de 800-1000 HV; a microestrutura da zona afetada pelo laser é composta de duas regiões: a primeira, próxima à superfície do material irradiado, caracterizada pela presença de uma martensita altamente refinada, seguida de uma região de transição, onde coexistem a ferrita proeutetóide e a martensita. A investigação das trilhas de pontos forneceu subsídios iniciais para se definir como deve ser o processo de endurecimento superficial de uma peça, para a relação entre os parâmetros do laser e a geometria da distribuição dos pulsos na superfície da peça. Além disso, desenvolveu-se uma equação fenomenológica, para a variação da profundidade da zona afetada pelo laser (z), com as variáveis de feixe que pode ser descrita por: $z = A \left(1 - B / \sqrt{W_p} \sqrt{W_e} \right)$, onde o parâmetro A depende da atmosfera empregada e B não depende da atmosfera mas varia ligeiramente com a variação de W_p . Com esta equação, foi possível a construção de um ábaco que pode ser usado no planejamento de operações rotineiras de endurecimento superficial do aço AISI 1045. Este ábaco, se ampliado, pode ser eventualmente utilizado pelo projetista de laser para a escolha da faixa de parâmetros adequados para o endurecimento de materiais, o que pode resultar em equipamentos dedicados a este fim, mais econômicos.

LASER HARDENING INVESTIGATION OF MATERIALS

José Roberto Berretta

ABSTRACT

In this work, the laser hardening process has been investigated using the AISI 1045 steel. The effects of the variables diameter (ϕ_f), energy density (W_e) and power density (W_p) of the laser beam, as well as, the environmental atmosphere (room and argon) during irradiation, on the surface hardening, was analyzed for single point and multiple point (trail of points) irradiations. Vickers indentation micro hardness, optical metallography, scanning electron microscopy and X-ray diffraction were utilized for the characterization of the laser beam affected zone. For the single point irradiation it was verified that: the laser affected zone has a spherical cap (shell) shape with dimensions strongly sensitive to laser beam parameters and environmental atmosphere; the hardness measured on surface, as well as along the depth (transversal section of the affected zone), is maximum near the surface and decreases rapidly in the interface between the affected zone and the base metal; the action of laser beam induces a strong increase in the AISI 1045 hardness; from an initial value of 250 HV to maximum values in the range 800-1000 HV; the microstructure of the affected zone is composed of two regions, one, near the surface of irradiated material, characterized by the presence of highly refined martensite, and, another, a transition region, where martensite coexists with proeutectoid ferrite. The investigation performed on multiple point irradiation (trail of points) has given initial information for a better definition of the surface hardening of parts; concerning the laser parameters and the geometry of the pulse distribution on the part surface. Also, a phenomenological equation relating the maximum depth of the laser affected zone, z , with beam parameters was obtained,

given by: $z = A \left(1 - B / \sqrt{W_p} \sqrt{W_e} \right)$, where the parameter A depends on the environment atmosphere, and B is only slightly dependent on W_p . With the use of this equation a monogram was constructed, which can be used for routine surface hardening operations with AISI 1045 carbon steel. This monogram, if enriched with data from others materials, may be eventually used by the laser designer to choose the better range for the laser beam parameters adequate to surface hardening, owing to dedicated, more economical laser equipments.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
2 O LASER.....	2
2.1 Propriedades da luz.....	2
2.2 Absorção e emissão.....	4
2.3 Meio ativo.....	6
2.4 Bombeamento.....	7
2.5 Ressonador.....	9
2.6 Oscilação laser	11
2.7 Propriedades da luz laser.....	12
2.7.1 Propriedades espaciais da luz laser	14
2.8 Principais lasers	19
3 O MATERIAL.....	24
4 FUNDAMENTOS DO PROCESSAMENTO DE MATERIAS VIA LASER	27
4.1 Interação da radiação laser com os materiais	27
4.2 Termofísica do processo	31
4.3 Tratamento térmico superficial via laser	36
5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	42
5.1 Escolha do material.....	42
5.2 Preparação do material para o experimento	42
5.3 Equipamentos lasers utilizados	43

	Página
5.4 Procedimento experimental para medir a absorção da radiação laser pela superfície em função do acabamento	43
5.5 Irradiação das amostras	45
5.6 Caracterização do material irradiado	46
5.6.1 Macrografia da superfície após irradiação	48
5.6.2 Microdureza da superfície.....	49
5.6.3 Micrografia da seção transversal das amostras irradiadas	49
5.6.4 Microdureza das seção transversal das amostras irradiadas	51
5.6.4a Microdureza dos pontos isolados.....	51
5.6.4b Microdureza das trilhas de pontos	51
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
6.1 Absorção da superfície em função do acabamento.....	53
6.2 Observação da superfície após irradiação.....	55
6.3 Microdureza da superfície na região dos pontos isolados.....	59
6.4 Metalografia da seção transversal na região do ponto isolado.....	68
6.4.1 Microestrutura da região alterada pela radiação laser	72
6.5 Microdureza da seção transversal dos pontos isolados.....	79
6.6 Análise da trilha de pontos	91
7 CONCLUSÕES	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104

1 - INTRODUÇÃO

O tratamento térmico superficial é largamente empregado no setor industrial, tais como: indústria automobilística, aeronautica, nuclear, de ferramentas, de máquinas operatrizes, de mineração, e outras. A finalidade do emprego desta técnica é melhorar as características físico-químicas do material, ou seja, sua resistência ao desgaste ou a corrosão, de forma a torná-lo adequado a sua finalidade.

As técnicas de tratamento térmico mais conhecidas envolvem uma infraestrutura de grandes dimensões e altos custos. Além disto, as técnicas convencionais possibilitam apenas o tratamento da peça como um todo, afetando as características dimensionais e geométricas, e ocasionando a formação de carepa na superfície. Estas alterações indesejáveis acrescentam ao processo de tratamento térmico convencional uma usinagem posterior, para a obtenção do acabamento final. O ferramental especial, que esta etapa a mais exige, significa considerável aumento dos custos.

A busca de técnicas alternativas que evitem estes problemas é muito desejada, levando ao desenvolvimento de técnicas como a de tratamento térmico via "electron-beam" e de investigações do potencial uso do laser.

O objetivo deste trabalho é a investigação da técnica de tratamento térmico de superfície via laser. Técnica esta que pode vir a simplificar o tratamento térmico superficial de materiais, pela possibilidade de poder tratar regiões localizadas de peças ou máquinas, por poder ser feito em local aberto, pela possibilidade de ser usada como operação final em um processo de fabricação, etc.

Assim, dentro da grande variedade de técnicas de tratamento térmico via laser elegeram-se, para um estudo aprofundado, visando entender e dominar essa técnica, a têmpera superficial via laser sem fusão da superfície.

Para atingir esse objetivo foi feito um estudo no aço AISI 1045, das faixas de densidade de energia (quantidade de energia por unidade de área) e densidade de potência (quantidade de potência por unidade de área), do diâmetro do feixe que incide na superfície do material e da atmosfera que envolve a região onde ocorre o processamento. A análise das irradiações foram feitas, na incidência do feixe laser no material, em pontos únicos e em trilhas de pontos.

As técnicas de microdureza Vickers, metalografia óptica, microscopia eletrônica de varredura e difração de raio-X foram empregadas na caracterização do endurecimento e microestrutura da zona afetada pelo feixe laser.

2 - O LASER

A palavra LASER é um acrônimo que significa "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", isto é, "Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação".

Einstein, em 1917, previu pela primeira vez, de forma teórica, a emissão estimulada. Em 1951, C.H.Townes desenvolveu a primeira possibilidade de aplicação desse fenômeno: a amplificação de ondas ultracurtas (maser), sua confirmação experimental, veio pelas mãos do próprio Townes, em 1954.

O artigo de A.L.Schawlow e C.H.Townes, em 1958, foi a primeira publicação em matéria de lasers, com repercussão mundial nos meios científicos.

O primeiro laser (rubí) foi fabricado por T.H.Maiman, nos Estados Unidos, e entrou em funcionamento em julho de 1960. Maiman utilizou a técnica de bombeamento óptico, que é ainda a única maneira de fazer funcionar todos os lasers de estado sólido.

O aparecimento do laser foi saudado com o célebre jogo de palavras "uma solução à procura de um problema". Desde então, o laser vem evoluindo de maneira fulgurante, graças à multiplicidade de seus campos de aplicação, à sempre maior confiabilidade de fabricação do equipamento e ao desenvolvimento de novas técnicas.

O laser, equipamento polivalente que oferece soluções originais e competitivas, continua a estimular o desenvolvimento de novas aplicações, como o recozimento de supercondutores, a fabricação de ligas ou a microtêmpera, que eram desconhecidas há alguns anos. Por esses motivos, o laser tem hoje aplicações nas mais variadas áreas: no setor industrial, em transformação de materiais, microeletrônica, metrologia, telecomunicações, instrumentação, fotoquímica, na área médica, no setor nuclear e nas aplicações militares.

2.1 - Propriedades da Luz

Para melhor entender o laser será útil comentar algumas definições e propriedades da luz que tem natureza dual onda-partícula [Schawlow, 1969], ou seja, a luz é constituída de fótons que se propagam como onda eletromagnética.

Fótons são partículas sem massa, que possuem uma energia E , ou equivalentemente são ondas eletromagnéticas. Podem ser gerados por emissão espontânea, de materiais num estado de não equilíbrio (excitado). Os fótons podem interagir com a matéria, onde podem ocorrer processos de absorção ou emissão estimulada. A física atômica oferece uma

interpretação onde a energia E do fóton é proporcional à frequência da onda eletromagnética.

$$E = h\nu \quad (1)$$

onde h é a constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ J.s).

A onda eletromagnética é caracterizada por uma frequência de oscilação ν e um comprimento de onda λ . A característica essencial de tal onda é propagar-se sem atenuação no vácuo, na velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s). Portanto, entre a frequência e o comprimento de onda existe, no vácuo, a relação:

$$\lambda = c/\nu \quad (2)$$

Esta relação permanece válida nos meios não condutores descritos por uma permeabilidade magnética e susceptibilidade elétrica constantes no espaço, sendo c substituída pela velocidade da luz no meio em questão.

A propagação de ondas eletromagnéticas é definida por um sistema de equações denominadas Equações de Maxwell [Jackson, 1962]. Entre as famílias de soluções dessas equações uma desempenha um papel fundamental, pois descreve a propagação de uma onda eletromagnética plana. Portanto, no caso particular de regime estacionário (por exemplo num ressonador), a representação do campo elétrico $E_{(r,t)}$ associado ao ponto r no instante t , da onda eletromagnética de frequência angular $\omega = 2\pi\nu$ e com vetor de onda k que caracteriza a direção de propagação, é dada pela relação:

$$E_{(r,t)}^{est} = A_{(r)} \cdot e^{i[kr - \omega t + \phi(r)]} \quad (3)$$

Onde, o módulo $k = 2\pi/\lambda$ é o número de onda, a amplitude A e a constante de fase ϕ são, cada uma em geral, função de r e de t e a expressão entre colchetes é a fase instantânea de onda (comumente chamada fase de onda). Em regime estacionário, estes parâmetros dependem apenas da posição r .

Esta representação em ondas monocromáticas planas é a base para a descrição do campo eletromagnético de um laser.

O espectro eletromagnético possui uma parte útil que cobre mais de 12 ordens de grandeza, conforme mostra o diagrama da figura 1, que se estende das ondas mais longas de rádio até a região dos raios X e γ . Conseqüentemente, o termo radiação luminosa deve ser tomado no sentido lato, pois ele abrange as frequências ópticas, ou seja o infravermelho (IV), o visível e o ultravioleta (UV). As divisões são

imprecisas e necessariamente arbitrárias, exceto talvez para a região do visível: 700 nm (vermelho) a 400 nm (violeta).

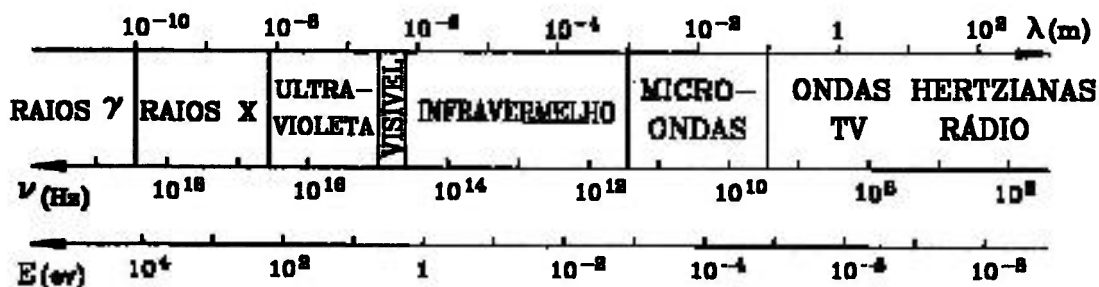


Fig.1 - Espectro eletromagnético.

Neste contexto pode-se definir o laser, que é uma excepcional fonte de luz com grande número de partículas, as quais tem a mesma energia, o mesmo comprimento de onda e propriedades especiais, comumente no intervalo espectral que se estende do infravermelho remoto ao ultravioleta.

2.2 - Absorção e Emissão

Uma coleção de átomos, moléculas ou íons pode emitir fótons no intervalo de frequências ópticas do espectro eletromagnético.

Uma transição radiativa ocorre quando um elétron orbitando ao redor de um núcleo muda de camada, adquirindo ou perdendo uma quantidade de energia (fótons), e o átomo é levado a um estado excitado ou ao estado fundamental.

Um átomo, em presença de um campo eletromagnético, pode efetuar uma transição de um estado estacionário inicial de energia E_1 , para um estado final de energia E_2 . Quando há transição para uma energia maior que a do estado inicial, o processo denomina-se absorção de um fóton. No caso recíproco de uma transição para um estado de energia mais baixa, o processo se denomina emissão de um fóton. O resultado fundamental da mecânica quântica é que a frequência luminosa ν_{21} do fóton da transição é dada por:

$$h\nu_{21} = E_2 - E_1 \quad (4)$$

Essa relação, chamada de Bohr, expressa a conservação de energia entre o átomo e o campo. Por ocasião de uma transição, a diferença de energia entre os dois estados atômicos deve ser exatamente compensada pela absorção ou emissão de um fóton. A frequência ν_{21} da radiação correspondente deve ser exatamente igual a esse valor, pois não

existe qualquer mecanismo para dissipar a energia de um fóton de frequência ligeiramente diferente, conforme mostrado na figura 2.

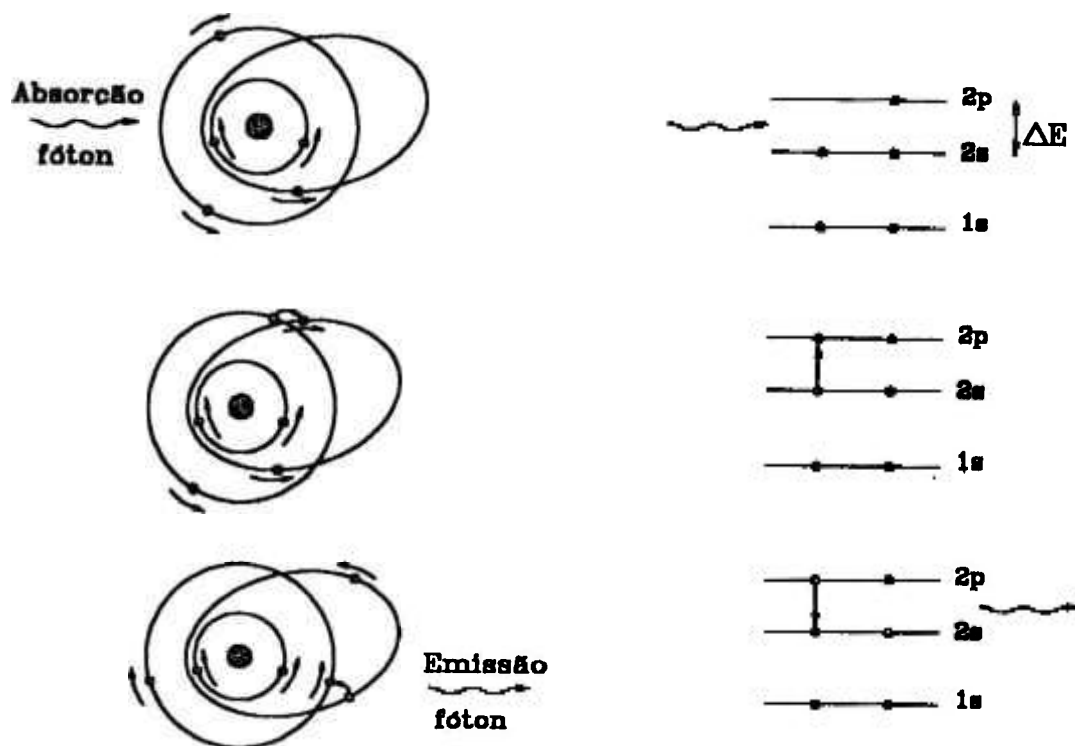


Fig.2 - Esquema de absorção e emissão espontânea de um fóton.

Os diferentes processos de interação da radiação eletromagnética com um sistema atômico, são três [Schiff, 1968]:

Absorção - se o meio atômico for submetido a um campo eletromagnético e se estiverem presentes fótons de frequência ν_{21} , o átomo pode absorver um deles e ver-se assim conduzido do estado E_1 para o estado de energia superior E_2 . Ocorre desaparecimento de um quantum do campo eletromagnético (fótons), em benefício do sistema atômico.

Emissão espontânea - nesse processo, um átomo efetua espontaneamente uma transição de um estado excitado E_2 para um estado de menor energia E_1 emitindo um quantum de energia $h\nu_{21}$. A emissão espontânea tem a propriedade de ser isotrópica, sendo aleatório o instante de emissão. Se numerosos átomos estão simultaneamente em um mesmo estado excitado, a emissão coletiva será escalonada no tempo. Este fenômeno é conhecido por fluorescência. O tempo característico τ de desexcitação dos átomos é a duração da vida média do estado excitado.

Emissão Estimulada - é o processo recíproco do precedente. Em presença de um campo, um fóton de energia exatamente igual a $h\nu_{21}$ induz um átomo a efetuar uma transição do nível superior E_2 para o nível E_1 , o átomo emite um segundo fóton, que não só a frequência ν , como

também todas as outras características (direção, fase, polarização) são idênticas às características do fóton indutor. Essa criação de um segundo fóton resulta de um acoplamento entre a onda incidente e o sistema atômico. O sistema atômico que recebe um fóton fornece um segundo fóton, agindo como amplificador de radiação. É o processo de emissão estimulada, que está na própria origem do funcionamento dos lasers.

Os diagramas da figura 3 representam esquematicamente esses três processos.



Fig.3 - Transições radiativas entre níveis de energia.

2.3 - Meio Ativo

A emissão de luz laser provém de um conjunto de átomos, moléculas ou íons que podem se apresentar nos estados sólido, líquido ou gasoso. Este conjunto é denominado meio ativo.

A maioria dos átomos no estado fundamental tem as camadas interiores completamente preenchidas e apenas uma ou duas camadas periféricas estão parcialmente preenchidas. Via de regra, os elétrons das camadas interiores não participam dos processos químicos ou ópticos.

As exceções importantes são alguns metais de transição (vanádio, cromo, etc.) e algumas terras raras (neodímio, samário, etc.). Tais elementos possuem uma camada eletrônica interna incompleta cercada por uma camada externa que forma uma blindagem com relação aos outros átomos. Conseqüentemente, numa transição radiativa, os níveis internos de energia são pouco alargados, o que lhes permite desempenhar um papel decisivo no funcionamento dos lasers de isolante dopado.

Quando vários átomos formam uma ligação estável, eles constituem uma molécula, onde os elétrons podem ser descritos por uma configuração orbital análoga a dos átomos. Além de seus estados de energia eletrônica, as moléculas possuem estados de energia de vibração e de rotação. Um estado quântico da molécula é então representado por um conjunto de números quânticos de rotação. Tais estados de energia vibracional e rotacional são a base de funcionamento de alguns lasers moleculares.

Se o meio ativo de um laser fosse constituído de apenas dois níveis, seria impossível colocar a maioria dos átomos em estado excitado. É por isso que os sistemas atômicos ou moleculares habitualmente utilizados funcionam, ou em três níveis, ou em quatro níveis, ou ainda com transferência ressonante de energia [Yariv, 1971]. A figura 4 esquematiza estes três principais sistemas atômicos encontrados nos lasers.

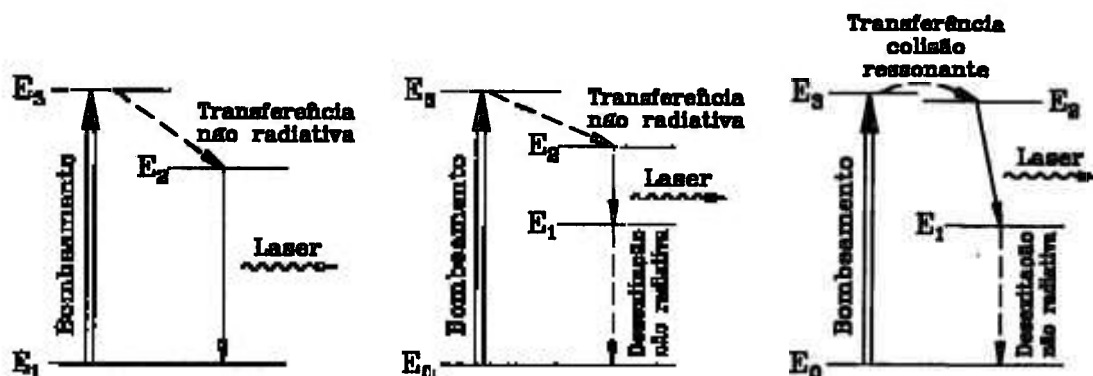


Fig.4 - Esquema dos sistemas atômicos dos lasers.

No sistema de três níveis, o nível fundamental é o nível terminal da fluorescência (E_1). A inversão de população entre os níveis E_2 e E_1 é obtida povoando-se, por bombeamento externo, o nível E_3 . Este se desexcita de forma rápida por um processo não radiativo (colisões, vibrações cristalinas, etc.) para o nível metaestável E_2 . O laser de rubi é um exemplo característico do sistema de três níveis. A dificuldade do processo está no bombeamento intenso necessário para manter uma inversão de população suficiente entre o nível E_2 e o nível fundamental E_1 , pois é preciso que mais da metade dos átomos estejam armazenados no nível E_2 , para que ocorra a inversão de população.

Em um sistema de quatro níveis, o nível terminal E_1 da transição óptica possui energia superior à do nível fundamental. Dessa forma o sistema não tem a necessidade de fornecer um bombeamento de grande intensidade. As transferências não radiativas, tanto entre E_3 e E_2 como entre E_1 e E_0 , geralmente são muito rápidas. Portanto o nível E_1 permanece essencialmente vazio. Com isso, uma baixa população no nível metaestável E_2 já é suficiente para a inversão de população ser mantida, sendo necessário somente um bombeamento moderado para mantê-la.

2.4 - Bombeamento

Considerando-se um conjunto de átomos ou moléculas em equilíbrio, tem-se que a população do nível inferior da transição é indiscutivelmente a mais elevada, e a absorção predomina sobre a emissão

estimulada. Assim, para que a emissão estimulada predomine, é necessário produzir uma situação que não existe naturalmente. É necessário destruir o equilíbrio termodinâmico, e fazer com que o nível superior da transição seja o mais povoado, isto é, uma inversão de população. Para realizar essa condição, é necessário fornecer energia a esse conjunto de átomos ou moléculas (ao meio ativo), por intermédio de uma fonte exterior de energia: o bombeamento.

Muitas fontes de energia podem ser utilizadas como fonte exterior de excitação. A seguir uma lista dos métodos de bombeamento empregados com bons resultados [Maillet, 1987]:

Bombeamento óptico	Incoerente: lâmpada flash, lâmpada de arco Coerente: outro laser
Bombeamento eletrônico	Descargas elétricas (contínuas, radio-frequência, etc.) Feixe de elétrons
Bombeamento térmico	Expansão hidrodinâmica
Bombeamento químico	Combustões químicas exotérmicas (chamas) Combustões rápidas (explosões)
Bombeamento por partículas pesadas	Feixe de íons Produtos de fissão de um reator
Bombeamento por radiação ionizante	Explosão nuclear Fonte de raio X

Nota-se que as técnicas de bombeamento são bem diversificadas. O bombeamento óptico, que é o princípio utilizado nos lasers de estado sólido empregados neste trabalho, será descrito com mais detalhes.

O bombeamento óptico é, provavelmente, o método mais direto para criar uma inversão de população. Consiste em utilizar uma fonte auxiliar de radiação, coerente ou incoerente, na frequência adequada para ser absorvida pelo tipo de meio ativo considerado, conduzindo-os, assim, a seus estados excitados [Levine, 1966].

Os dispositivos mais comuns são lâmpadas, do tipo dos flashes eletrônicos utilizados em fotografia, de gás nobre como o xenônio,

o criptônio ou o neônio, sob baixa pressão em um tubo de quartzo munido de dois eletrodos, onde uma descarga elétrica pulsada com corrente de alta densidade ($>100 \text{ A/cm}^2$), cria uma fluorescência de grande brilhância. Quando uma corrente elétrica é descarregada no tubo, forma-se um plasma, que emite uma radiação de banda larga. Essa radiação possui um espectro complexo formado por linhas isoladas e por um contínuo. Geralmente é possível ajustar os parâmetros da descarga, isto é, a pressão, a tensão e a corrente, de forma a adaptar uma parte dessa banda de emissão a uma faixa útil de absorção do meio laser ativo em questão.

Os lasers de isolante dopado, como por exemplo: Cr:TiO_2 , Nd:YAG , Nd:YLF e $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$; e os lasers de corante, funcionam por bombeamento óptico.

2.5 - Ressonador

O ressonador é a sede de uma oscilação eletromagnética estacionária. O ressonador óptico é constituído por dois espelhos montados frente a frente a uma dada distância e tendo uma reta que passa por um plano normal aos dois espelhos, similar ao interferômetro de Fabry-Pérot [Koechner, 1988]. A função do ressonador, dado um meio de ganho em seu interior, é manter e amplificar o campo eletromagnético. A figura 5 apresenta esquematicamente as configurações dos ressonadores mais utilizados.

Utilizam-se dois artifícios para comparar entre si as configurações geométricas dos ressonadores: a estabilidade e a taxa de preenchimento.

A noção de estabilidade caracteriza a reprodutibilidade do trajeto do feixe que reflete de um espelho para o outro. Se, após múltiplas reflexões, o feixe não for refletido para fora da cavidade, este é estável, e instável no caso contrário. Para um ressonador constituído por dois espelhos com raios de curvatura R_{c1} e R_{c2} , respectivamente, espaçados por uma distância L , define-se o critério de estabilidade do sistema como [Koechner, 1988]:

$$0 < (1 - L/R_{c1}) \cdot (1 - L/R_{c2}) < 1 \quad (5)$$

Uma boa taxa de preenchimento significa que a extensão espacial do feixe na cavidade, isto é seu volume óptico, preenche o máximo de volume do meio ativo.

Compreende-se que para lasers de potência seja necessário encontrar um compromisso entre estes dois critérios antinômicos, pois uma boa estabilidade significa um confinamento quase total do feixe em torno do eixo óptico, que implica em um baixo preenchimento do ressonador.

Sem empreender um estudo detalhado das diferentes configurações, serão examinadas algumas propriedades dos ressonadores mais clássicos, constituídos de espelhos esféricos.

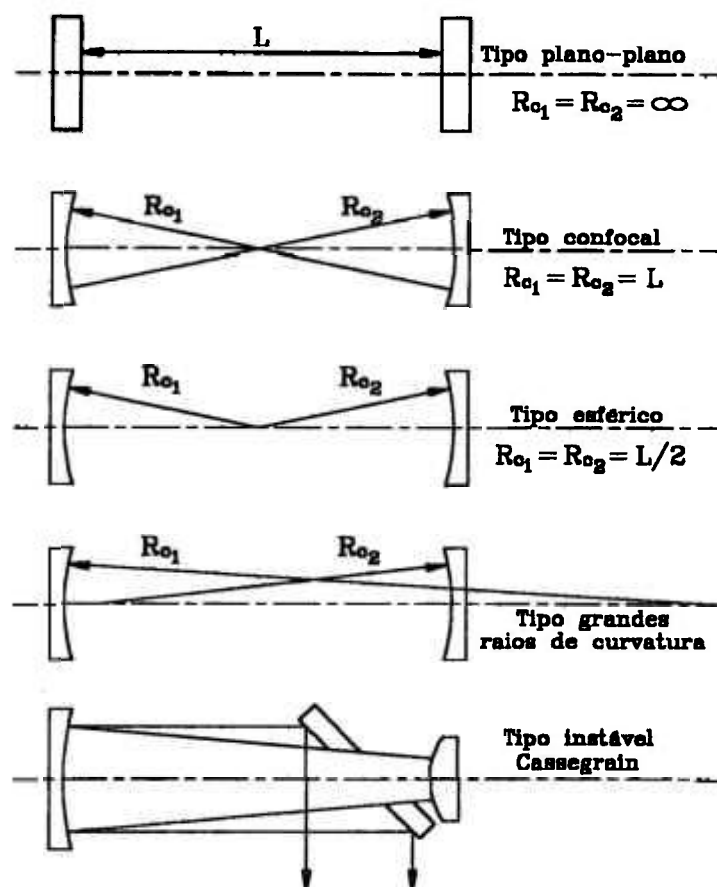


Fig.5 - Esquema dos ressonadores mais utilizados.

Os *espelhos planos-paralelos* ($R_{c1} = R_{c2} = \infty$) constituem ressonadores com uma taxa de preenchimento máxima, pois o volume total da cavidade pode ser preenchido. Entretanto, se os espelhos estiverem ligeiramente desalinhados, o feixe poderá ser refletido para fora da cavidade após um número pequeno de reflexões. A estabilidade desses ressonadores é marginal.

Algumas combinações de espelhos esféricos apresentam boa estabilidade, mas os espelhos esféricos nem sempre permitem o preenchimento eficaz do volume da cavidade. Um tipo de ressonador muito utilizado é o *ressonador confocal simétrico* ($R_{c1} = R_{c2} = L$), onde os espelhos têm como foco comum o meio geométrico do ressonador. Nesse ponto, o feixe se comprime em uma pequena extensão circular de raio w_0 chamada de *cintura do feixe* e unicamente determinada pela geometria dos espelhos. A cintura do feixe possui um raio dado por:

$$w_0 = (\lambda L / 2\pi)^{1/2} \quad (6)$$

O volume excitado situado fora do eixo óptico quase não é utilizado, o que explica a insignificante taxa de preenchimento desse tipo de ressonador.

Os *ressonadores esféricos simétricos* ($R_{c1} = R_{c2} = L/2$) possuem dois focos situados à distância $L/4$ de seus respectivos espelhos e têm um círculo de gargalo central quase nulo. Embora esses ressonadores tenham uma taxa de preenchimento bastante elevada, elas quase não são utilizadas, por serem marginalmente estáveis.

O compromisso geométrico mais frequente entre os lasers industriais é o ressonador com *grandes raios de curvatura* ($R_{c1} \gg L$, $R_{c2} \gg L$), que apresenta uma estabilidade aceitável e um feixe cujo perfil espacial ocupa de forma satisfatória o meio ativo.

Em algumas situações, uma *configuração instável do ressonador* pode ser muito útil. Nos lasers de potência, frequentemente é vantajoso empregar ressonadores instáveis, pois estes possibilitam a otimização do preenchimento do volume excitado. Ambos os espelhos têm então uma refletividade máxima, e os trajetos de ida e volta do feixe amplificado são pouco numerosos. Em contrapartida, o essencial das perdas é constituído pelas perdas de acoplamento do feixe para o exterior ao nível dos espelhos. Modificando-se simplesmente a distância entre os dois espelhos, pode-se ajustar o acoplamento de saída numa grande faixa de valores. A saída de um ressonador instável do tipo Cassegrain apresenta um feixe com seção reta anular. Esta forma característica não diminui muito as possibilidades de utilização do feixe. Este pode ser focalizado, por exemplo, em um campo cujo centro apresenta o máximo de intensidade, como nos outros lasers. Estes ressonadores que apresentam grandes perdas são utilizados sobretudo com meios ativos de ganhos elevados de fraco sinal e tornam possível uma extração máxima de energia do meio ativo sob forma de um feixe de boa qualidade. Permitem, portanto, gerar potências ópticas muito elevadas.

2.6 - Oscilação Laser

A oscilação laser é obtida construindo-se um ressonador óptico constituído por dois espelhos refletivos, colocados frente a frente e o meio ativo com bombeamento adequado entre eles, como representado esquematicamente na figura 6. Esses espelhos refletem a onda eletromagnética gerando múltiplas passagens de ida e volta no meio ativo dessa onda, amplificando assim o campo eletromagnético na cavidade. O acoplamento óptico em direção ao exterior realiza-se com o uso de um espelho semitransparente.

Considere-se o estabelecimento do campo eletromagnético entre os dois espelhos do ressonador, um dos quais semitransparente. Sob influência de bombeamento, os átomos são levados ao estado excitado. A intensidade da emissão espontânea efetua-se a uma taxa superior àquela permitida pelo equilíbrio termodinâmico. Essa emissão ocorre em todas as direções, e especialmente na direção do eixo óptico do ressonador, onde será refletida pelos espelhos. Nessa direção obter-se-á um trajeto formado de múltiplas reflexões entre os espelhos, onde a radiação amplifica-se por emissão estimulada, a cada passagem pelo meio ativo. Uma certa fração do campo eletromagnético atravessa o espelho semitransparente para constituir o feixe laser, ao passo que a fração refletida mantém-se na cavidade no trajeto ao longo do eixo óptico, resultando no aumento de intensidade da radiação na cavidade. Este processo repete-se numerosas vezes, resultando em uma regeneração da radiação, e a energia armazenada no nível superior E_2 da transição é rapidamente convertida em uma onda eletromagnética muito intensa, pelo princípio da emissão estimulada. A figura 7 ilustra o que foi descrito.

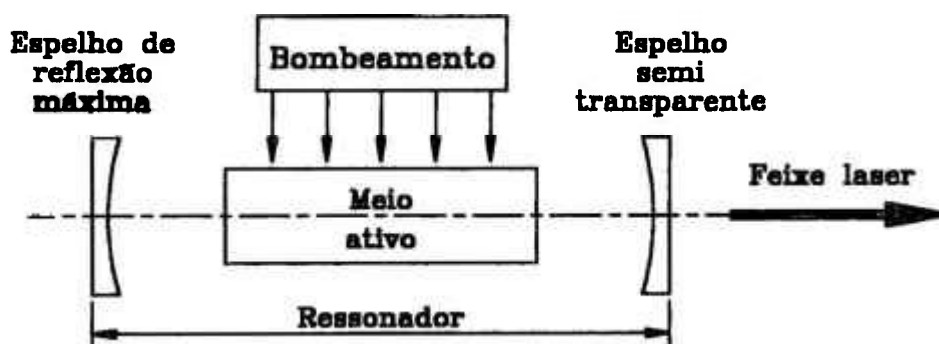


Fig.6 - Esquema básico de um laser.

Deve ficar bem claro que, em regime permanente, a extração da energia eletromagnética ao nível do espelho semitransparente é um processo contínuo e não um processo repetitivo como se poderia pensar por essa simples descrição. Convém lembrar que a função do ressonador não é apenas garantir a regeneração e amplificação da onda eletromagnética, mas também filtrar uma ou várias frequências de oscilação desse campo no interior da banda de emissão dos átomos ativos pelo comprimento de onda de reflexão dos espelhos.

2.7 - Propriedades da Luz Laser

Entre as condições que explicam como os lasers podem funcionar e produzir feixes com um grau extremamente alto de intensidade estão a monocromaticidade, a coerência, a direcionalidade e a brilhância.

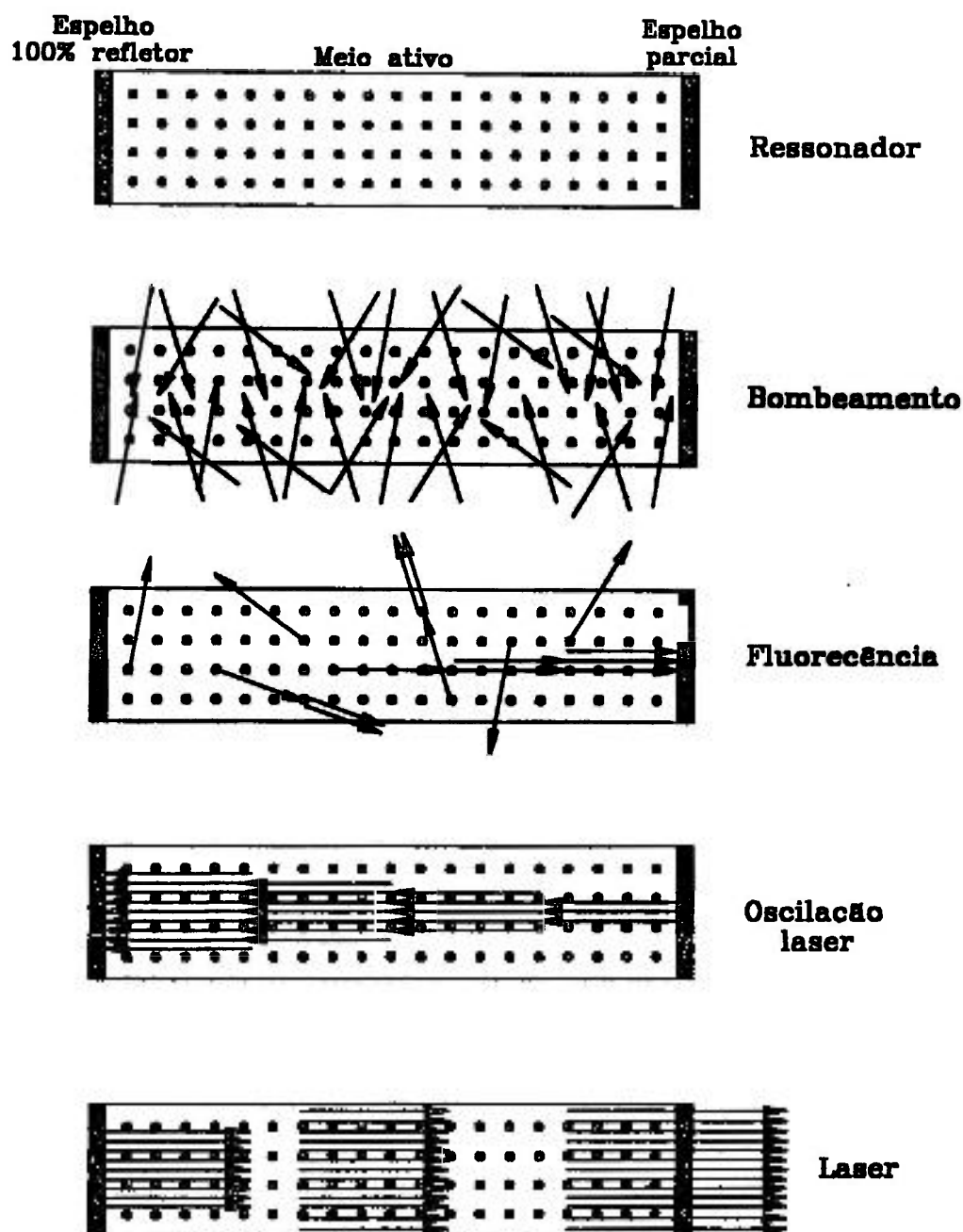


Fig.7 - Princípio de funcionamento do laser.

A *monocromaticidade* é a propriedade que ocorre devido a duas circunstâncias: somente uma onda eletromagnética de frequência ν pode ser amplificada e, visto que o arranjo de dois espelhos forma uma cavidade ressonante, a oscilação pode ocorrer somente nas frequências ressonantes desta cavidade. Esta última circunstância induz a largura de linha do laser ser muito mais estreita que a largura de linha característica da transição $2 \rightarrow 1$ (ver fig.4), observada em emissão espontânea.

Coerência é uma propriedade que para ser entendida será necessário definir dois conceitos, isto é, o de coerência espacial e o de

coerência temporal. Uma onda eletromagnética será considerada coerente quando atender simultaneamente esses dois conceitos.

Para definir *coerência espacial* considera-se dois pontos P_1 e P_2 no instante $t=0$, que estão na mesma frente de onda de uma dada onda eletromagnética, sendo $E_1(t)$ e $E_2(t)$ os campos elétricos correspondentes destes pontos. Pela definição, a diferença entre as fases dos dois campos no instante $t=0$ é zero. Agora, se essa diferença permanecer zero num instante $t>0$ qualquer, existe uma coerência entre os dois pontos. Se isso ocorre para dois pontos quaisquer da frente de onda eletromagnética, essa onda tem coerência espacial.

Para definir *coerência temporal* será considerado um campo elétrico da onda eletromagnética num dado ponto P , nos tempos t e $t+\tau$. Se para uma dada diferença de tempo τ , a diferença de fase entre os dois valores de campo elétrico permanece o mesmo para qualquer tempo t , existe coerência temporal durante o intervalo τ . Se isso ocorrer para um valor de τ qualquer, a onda eletromagnética tem coerência temporal.

Direcionalidade ocorre pelo fato do material ativo estar em uma cavidade ressonante, onde somente uma onda propagando ao longo da direção da cavidade pode ser sustentada pela mesma.

A *brilhância* de uma dada fonte de onda eletromagnética é definida como a potência emitida por unidade de área de superfície por unidade de ângulo sólido. Um laser de potência moderada tem um brilho que é ordens de grandeza maior que o brilho das fontes convencionais. Isto deve-se à altíssima direcionalidade do feixe laser.

2.7.1 - Propriedades espaciais da luz laser

Modos transversos

O ressonador óptico de um oscilador laser é uma estrutura aberta, constituída por dois espelhos bastante espaçados e altamente refletivos, situados frente a frente. Assim, do ponto de vista da óptica geométrica, é evidente que os modos desse ressonador apresentam perdas muito grandes, especialmente para a propagação transversa, e que os modos com perdas baixas estão associados com a propagação da radiação ao longo do eixo da cavidade. Consequentemente, a manutenção dos modos é possível desde que sejam impostas algumas restrições à geometria da cavidade.

Em regime estacionário, denomina-se modo transverso uma distribuição espacial $|A(r)|$ estável do campo da onda laser em um plano perpendicular ao eixo do ressonador. Nos lasers estáveis com espelhos esféricos, tais configurações espaciais do campo denominam-se modos transversos eletromagnéticos TEM_{mnq} (figura 8). Os índices inteiros

enumeram os zeros da distribuição espacial segundo dois eixos ortogonais de coordenadas em uma seção transversal, e q é o índice de modo longitudinal associado. O cálculo dessas distribuições também permite determinar as frequências dos modos. A teoria [Koechner, 1988] mostra que as frequências que satisfazem a condição de ressonância completa nas três dimensões podem ser expressas por:

$$\nu_{mnq} = \{q + [(m + n + 1) / \pi] \cdot \cos^{-1} [1 - (L / R_{c1})]^{1/2} \cdot [1 - (L / R_{c2})]^{1/2}\} \cdot c / 2L \quad (7)$$

Está claro que as frequências axiais $\nu_q = q \cdot (c / 2L)$, estão ligeiramente defasadas de uma quantidade que expressa a existência de ressonâncias transversas do campo.

O modo TEM_{00q} , muitas vezes chamado simplesmente de TEM_{00} , não possui zero algum, qualquer que seja a direção considerada ($m=n=0$), pois é axialmente simétrico. É o chamado modo fundamental do ressonador aberto, e sua distribuição do campo é gaussiana.

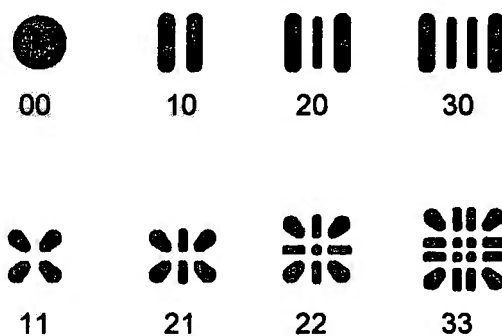


Fig. 8 - Esquema da distribuição espacial das intensidades dos modos transversos

Do ponto de vista da teoria da difração, isto significa que a amplitude do campo que se propaga na cavidade possui em todos os pontos uma distribuição gaussiana. O princípio físico desse resultado está no fato de cada reflexão sobre um espelho produzir a transformada de Fourier da onda incidente. A distribuição espacial, que em uma propagação livre reproduz-se igual a si mesma, é de natureza gaussiana, uma vez que ela é a sua própria transformada de Fourier. A intensidade do campo em um ponto do ressonador, situado a uma distância r do eixo $0z$ (ver fig.9) do ressonador, escreve-se para o caso do modo fundamental:

$$I(r) = I_0 \cdot e^{-2r^2/w^2(z)} \quad (8)$$

onde, I_0 é a intensidade sobre o eixo óptico e $w(z)$ é o raio do círculo para o qual a intensidade diminui de um fator e^2 com relação a I_0 .

Em um feixe gaussiano, pode-se demonstrar [Koechner, 1988] que o raio $w(z)$ varia ao longo do eixo óptico segundo a lei hiperbólica

$$w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + (z/z_r)^2} \quad \text{onde} \quad z_r = \pi \cdot w_0^2 / \lambda \quad (9)$$

onde, w_0 é o raio mínimo do feixe ou raio da cintura do feixe unicamente determinado pela geometria da cavidade, e z_r , chamado de distância de Rayleigh, é um parâmetro de escala que separa o campo próximo da onda do campo remoto.

As hipérboles geradas pela intersecção da superfície axissimétrica de raio $w(z)$ com planos contendo o eixo Oz são apresentadas na figura 9. Elas são normais às frentes de onda e correspondem à direção local do fluxo de energia. Compreende-se agora que, com um modo transversal desse tipo, forma-se um ressonador estável simplesmente inserindo-se, em dois locais do eixo óptico, refletores cujos raios de curvatura unem-se localmente à frente esférica de onda. Nessas condições, o feixe refletido reproduz-se idêntico a si mesmo.

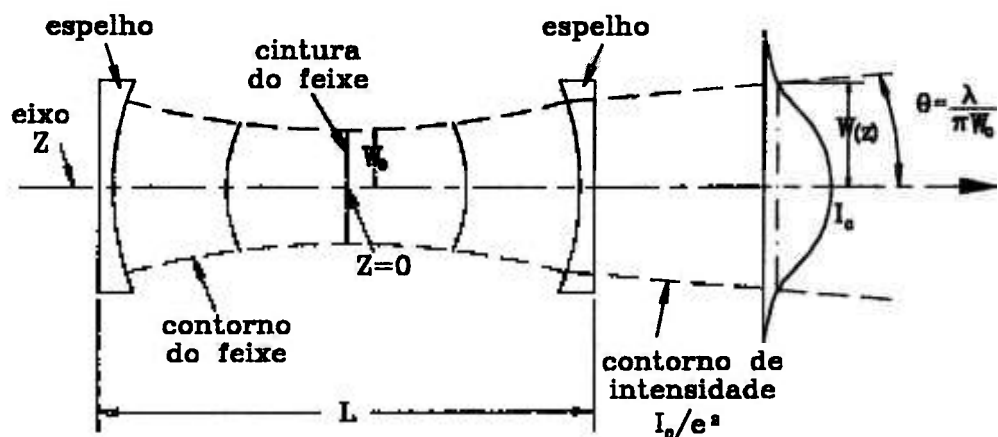


Fig.9 - Esquema da distribuição energética do modo fundamental gaussiano, cintura do feixe, divergência e frentes de onda.

O feixe de saída de um laser pode resultar da superposição de vários modos transversos de ordem superior. A propriedade fundamental que torna tão importante o feixe gaussiano é que, devido à observação feita sobre a transformada de Fourier, eles mantêm sua distribuição gaussiana mesmo se forem focalizados ou transmitidos por sistemas ópticos.

Os ressonadores instáveis apresentam distribuições transversas mais complexas. Entretanto, pode-se demonstrar que o modo fundamental de um ressonador, como o ressonador Cassegrain, corresponde a uma distribuição uniforme da energia no feixe de geometria anular, isto é, uma onda plana com extensão espacial limitada a esse anel.

Divergência

O feixe laser, que tem como característica a sua direcionalidade e excepcional colimação, se propaga no espaço seguindo as curvas hiperbólicas do fluxo de energia. Portanto, o feixe tem uma divergência que é quantificada pela medida do ângulo formado pela linha de centro do feixe e a curva hiperbólica do fluxo de energia que tende assintoticamente a um cone cujo o semi-ângulo, para o modo TEM₀₀, tende a:

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi \cdot \omega_0} \quad (10)$$

O limite do ângulo de divergência de um feixe é determinado pelas leis de difração. Durante sua passagem em um orifício de abertura d , um fóton com determinada quantidade de movimento p , sob incidência normal, tem sua quantidade de movimento alterada por um componente situado no plano do orifício. A direção de propagação é desviada de um ângulo θ que no caso geral é dado por [Koechner, 1988]:

$$\theta = K \cdot \lambda / d \quad (11)$$

onde, K é um fator de proporcionalidade próximo da unidade e depende da distribuição transversa de energia no feixe incidente: $K=1,22$ em uma onda plana (distribuição uniforme) e $K=2/\pi$ em um feixe gaussiano.

Os feixes oriundos de um laser e que beiram ou igualam o valor mínimo fixado pela equação, chamados limitados pela difração, representam o caso final realizável. Apenas os feixes gaussianos ou os de distribuição uniforme podem realmente ser limitados pela difração, não sendo possível uma focalização abaixo desse limite. Geralmente, deseja-se a menor divergência possível. Na tabela 1 [Maillet, 1987] tem-se alguns valores típicos das divergências encontradas nos lasers mais comuns no campo científico ou industrial.

Tab.1 - Valores médios da divergência dos principais lasers comerciais.

	CO ₂	Nd:YAG	Nd:vidro	AsCa	Rubi	HeNe	Ar
Comprimento de onda λ (μm)	10,6	1,06	1,06	0,905	0,694	0,632	0,488
Divergência 2θ (mrad)	1-10	2-10	0,5-10	20-200	0,5-10	0,2-11	0,5-1

Nota-se na tabela 1 que, em muitos casos, a divergência natural pode cobrir aproximadamente uma ordem de grandeza. Isto só é totalmente exato para lasers de grande potência, como os lasers de CO₂ ou os lasers de vidro dopados com neodímio, ou ainda os lasers de rubi, pois

a divergência tende a aumentar com o aumento da potência. Os valores da tabela 1 representam os valores de um feixe natural emergindo do laser sem colimação especial. Sempre se pode aumentar a colimação utilizando um telescópio com uma montagem afocal. A figura 10 apresenta o esquema básico. Duas lentes com respectivas distâncias focais f_1 e f_2 são colocadas de maneira a partilhar um foco em comum. Se o feixe laser inicial de diâmetro d_1 e de divergência θ_1 cobrir tanto a primeira como a segunda lente, a colimação do laser será o inverso do aumento do telescópio, o que significa que:

$$\theta_1 \cdot d_1 = \theta_2 \cdot d_2 \quad (12)$$

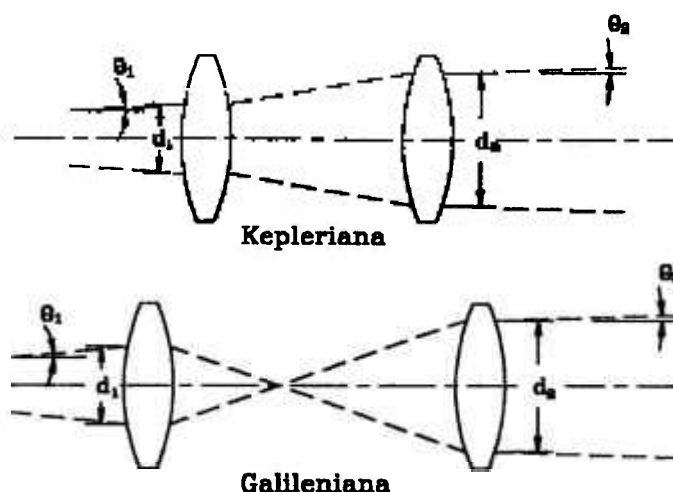


Fig.10 - Esquemas de telescópios para modificação da divergência de um feixe.

Para compreender de maneira empírica a profunda distinção existente entre o laser e uma fonte luminosa convencional, a tabela 2 compara as propriedades espectrais [Maillet, 1987] de uma lâmpada de mercúrio com o laser mais comum (laser de hélio-neônio - HeNe). Uma comparação deste tipo só será representativa se for levado em conta o ângulo sólido em que se efetua a emissão, assim como a largura espectral da radiação emitida. A grandeza representativa será então a luminância espectral ou brilhância. Constata-se que para uma potência 10^5 vezes menor, o laser HeNe possui uma brilhância pelo menos 10^7 vezes maior que a da lâmpada de mercúrio, devido ao fato da emissão laser efetuar-se em uma banda muito estreita de frequências. Justamente nesta notável pureza espectral é que reside a vantagem dos lasers. Vem somar-se a isto uma propriedade espacial essencial que caracteriza a diretividade da radiação: um feixe laser possui uma divergência pequena, ou seja, o ângulo sólido em que se efetua a emissão é muito pequeno, da ordem de microesteradianos.

Nos lasers pulsados, a energia luminosa é fornecida durante pulsos breves que duram, geralmente, de alguns nanossegundos até no máximo alguns milissegundos, e a energia concentra-se de forma

temporal. Assim, uma potência de pico de alguns megawatts irradiada por um laser comum de rubi, corresponde a uma brilhância aproximadamente 10^{13} vezes maior que a brilhância do sol (no mesmo ângulo sólido e na mesma banda de frequência).

Tab.2 - Tabela comparativa entre uma fonte luminosa comum e um laser.

	Lâmpada convencional a vapor de mercúrio	Laser - HeNe
Comprimento de onda	$\lambda=546,0 \text{ nm}$	$\lambda=632,8 \text{ nm}$
Potência	$P=100 \text{ W}$	$P=0,1 \text{ mW}$
Banda espectral	$\Delta\lambda=10 \text{ nm}$	$\Delta\lambda=2 \cdot 10^{-3} \text{ nm}$
Ângulo sólido de emissão	$\delta\Omega=4\pi \text{ esteradianos}$	$\delta\Omega=10^{-6} \text{ esteradianos}$
Brilhância	$I_\lambda=1 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$	$I_\lambda=5 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$

2.8 -Principais Lasers

Desde o surgimento do primeiro laser até os nossos dias, várias centenas de tipos de lasers, funcionando em comprimentos de onda que vão do IV remoto até o UV e utilizando praticamente todos os meios ativos disponíveis, demonstraram nos laboratórios sua viabilidade. Além disso prosseguem os estudos sobre desenvolvimento de novos lasers, como o de elétrons livres e de raio X. Entretanto, apenas algumas dezenas deles chegaram e continuaram a ser fabricados industrialmente. Embora todos esses lasers possuam em comum um meio ativo, um sistema de bombeamento e uma cavidade ressonante, suas características de funcionamento diferem radicalmente em numerosos aspectos, tais como as propriedades do feixe e as limitações de operação. Evidentemente, diferem também pelo preço.

Naturalmente não é possível expor com detalhes essa evolução tecnológica. Assim, serão descritos somente alguns lasers que são objetos de aplicações de natureza científica ou industrial. Os lasers são classificados em quatro famílias, diferenciadas basicamente pela natureza do meio ativo:

Lasers de isolante dopados, onde a radiação proveniente de uma lâmpada, flash ou arco, excita opticamente a emissão de átomos introduzidos sob forma de íons metálicos e de terras raras em uma matriz sólida isolante de cristal ou vidro. Esses diferentes tipos de lasers são constituídos de forma semelhante, às vezes até mesmo idêntica, exceto quanto à forma do cristal ou a alguns elementos de óptica utilizados.

Lasers de gás, que constituem a maior parte da indústria de lasers e funcionam com base em uma excitação, geralmente de natureza elétrica mas ocasionalmente também de natureza química, de meios gasosos

atômicos, neutros, ionizados ou moleculares. Apresentam dois modos de funcionamento, contínuo e pulsado e dois regimes gasosos, em fluxo ou selado.

Lasers de corantes, operam com o mesmo tipo de meio ativo, um corante orgânico diluído em um solvente líquido. Retiram energia da radiação emitida por outra fonte óptica (lâmpada flash ou lasers). Suas características dependem essencialmente das características da fonte óptica de bombeamento.

Lasers de semicondutores, em que a radiação é emitida no interior de uma junção p - n em um diodo de tipo semicondutor. O comprimento de onda depende da composição desse material. As características de funcionamento estão ligadas à composição, bem como à estrutura do dispositivo.

A figura 11 apresenta o espectro eletromagnético e as respectivas posições dos lasers comerciais mais comuns, segundo seus comprimentos de onda de emissão.

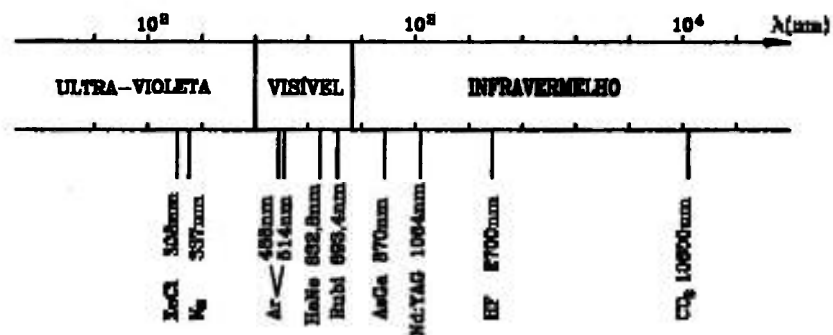


Fig.11 - Espectro eletromagnético com o posicionamento dos lasers comerciais mais comuns segundo os seus comprimentos de onda.

A seguir estão apresentadas as principais linhas de emissão e características de funcionamento dos lasers mais relevantes.

— Laser de gás carbônico CO₂ ($\lambda=10,6 \mu\text{m}$), laser molecular que emite em regime contínuo ou pulsado.

— Laser de neodímio (Nd) situado no infravermelho próximo ($\lambda=1,06\mu\text{m}$). É um laser de isolante dopado com Nd. A matriz isolante pode ser cristalina (YLF, YAG), que funciona em regime contínuo ou pulsado, ou amorfa (vidro dopado), que funciona essencialmente em regime pulsado.

— Laser de arseneto de gálio (AsGa), laser de semicondutor que emite no IV próximo (λ de 850 até 900 nm), em regime contínuo.

— Laser de rubi (Cr:Al₂O₃), laser de isolante dopado que funciona em pulsos no visível ($\lambda=694,3 \text{ nm}$, vermelho).

— Laser de hélio neônio (HeNe), laser de gás que emite em regime contínuo no visível ($\lambda=632,8 \text{ nm}$ (vermelho)).

— Laser de corante, laser compatível com frequências em todo o visível (de 700 até 400 nm) e alguns valores do IV e UV, em regime contínuo ou pulsado.

— Laser de argônio, laser de gás ionizado que funciona em regime contínuo em várias linhas visíveis, sendo as duas linhas mais intensas em $\lambda=488$ nm (azul) e $\lambda=514$ nm (verde).

— Laser de nitrogênio (N_2), emite no UV ($\lambda=337$ nm), em regime pulsado.

— Laser de excímero, lasers moleculares pulsados no UV, cujo representante mais comum é o laser de cloreto de xenônio ($XeCl$), que emite em $\lambda=308$ nm.

Serão comentados com maiores detalhes a seguir os lasers de isolante dopado, que atuam como ferramenta nesse trabalho.

Laser de rubi. O primeiro meio ativo em que foi demonstrado o efeito laser é o rubi, que continua a ser um laser muito utilizado.

O meio ativo é uma barra de rubi rosa obtida por cristalogênese artificial, isto é, um cristal de alumina transparente ou coríndon (Al_2O_3), cuja rede isolante serve de hospedeira para íons de cromo Cr^{3+} .

Nesse laser, o nível fundamental é também o nível inferior da transição laser. Assim, de acordo com as observações anteriores, o laser de rubi é um sistema de três níveis. Por esse motivo, ele apresenta um limiar de funcionamento muito elevado e exige um bombeamento muito potente, da ordem de 300 J/cm^2 , para estabelecer a inversão de população. O nível superior é separado em duas componentes. Isto explica a ocorrência de duas emissões, em 694,3 nm e 692,7 nm, sendo que a primeira é predominante.

Geralmente, o bombeamento do rubi é efetuado submetendo-se a barra a um bombeamento óptico por lâmpada flash. As densidades de corrente nas lâmpadas podem ultrapassar 100 A/cm^2 , sendo de 500 μs o tempo de bombeamento.

No plano do ressonador óptico, já se abandonou a técnica de Maiman, que utilizava o próprio cristal como ressonador, após ter previamente polidos e tratados as faces das extremidades do bastão. Os atuais lasers de rubi, ou de isolante dopado em geral, utilizam espelhos externos. Ou o bastão possui faces talhadas na incidência de Brewster dando a emissão numa polarização linear bem definida, ou então o bastão é talhado em um ângulo próximo ao da normal com relação ao seu eixo, e as faces polidas são tratadas com camadas multidielétricas anti-refletoras no comprimento de onda de funcionamento.

Um laser de rubi pode liberar energias da ordem de algumas dezenas de joules para durações de pulsos da ordem do milissegundo, ou seja, potências de pico de alguns quilowatts. Em funcionamento chaveado, geralmente se obtém alguns joules para pulsos de 30ns, ou seja, potências de pico entre 30 e 100 MW. As taxas de repetição habituais de um laser de rubi variam entre 0,1 e 0,5 Hz.

Laser Nd:YAG. O laser de neodímio está entre os mais importantes, pois desempenha papel de destaque em numerosas aplicações industriais e científicas. O sistema atômico utiliza íons trivalentes de uma terra rara, neodímio (Nd^{3+}), presente como dopante em um cristal de YAG (Yttrium Aluminium Garnet, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$). A emissão laser dominante situa-se em $\lambda_0 = 1064 \text{ nm}$ à temperatura ambiente.

O Nd:YAG corresponde a definição de um laser de quatro níveis. Portanto, os limiares de bombeamento são muito mais baixos que no caso do laser de rubi. Assim, o laser de neodímio funciona também com relativa facilidade em regime contínuo.

Deve-se acrescentar que a condutibilidade térmica do YAG é mais elevada que a do rubi, o que permite taxas de repetição de várias dezenas de hertz e funcionamento contínuo.

Em regime pulsado, os lasers de Nd:YAG comerciais liberam, em regime chaveado, energias de várias centenas de milijoules em modo fundamental (TEM_{00}) em taxas de repetição que variam entre 1 e 50 Hz. Sob todos os aspectos, os sistemas de bombeamento e alimentação são semelhantes aos utilizados nos lasers de rubi. A energia que pode ser liberada por um laser Nd:YAG é limitada pela capacidade de armazenamento da barra de cristal. No atual estágio da tecnologia, as barras cilíndricas obtidas por cristalogênese e depois usinadas só podem ser fabricadas em pequenas dimensões que não excedem 15 cm, com volume da ordem de 2 a 5 cm^3 . Quando se trabalha em taxas de repetição elevada, a limitação é determinada pela capacidade de resfriamento do bastão.

Em funcionamento contínuo, a performance dos lasers de Nd:YAG corresponde a uma potência que varia da unidade a algumas dezenas de watts em modo TEM_{00} e entre a unidade a algumas centenas de watts quando estão presentes vários modos transversos.

Recentemente, surgiu uma barra de geometria nova, em forma de placa (slab). A placa, cujas faces das extremidades são talhadas na incidência de Brewster, faculta um funcionamento com potência média muito elevada.

Os lasers de Nd:YAG de placas são promissores, oferecendo potências médias substancialmente maiores que as dos bastões, e isso com excelente qualidade de feixe, sem exigir compensação dinâmica ou ajustes nos alinhamentos.

Laser de vidro dopado com neodímio. Entre os lasers de isolante dopados, o laser de vidro dopado com íons de neodímio ocupa um lugar de destaque, devido às potências de pico extremamente elevadas que ele permite criar.

Trata-se de um laser de quatro níveis cuja estrutura é muito semelhante à do Nd:YAG, exceto que a transmissão principal situa-se a $\lambda_0 = 1062$ nm. Embora os vidros utilizados sejam macroscopicamente amorfos (silicato, fosfato), os campos elétricos locais microscópicos desdobram os níveis de energia do íon.

Em princípio não existe limitação de tamanho na fabricação de vidros dopados com íons de neodímio. As barras fabricadas por escoamento e posterior usinagem podem apresentar grandes dimensões. Assim, o volume de armazenamento pode aumentar consideravelmente, e os limites são impostos pela homogeneidade e pela ausência de defeitos do material bem como pela possibilidade de eliminar o calor depositado por ocasião do bombeamento. Os diâmetros podem ultrapassar 10 cm, e as barras até mesmo já foram substituídas por uma sucessão de discos elípticos com espessura nitidamente inferior ao pequeno eixo e, portanto, de fabricação e resfriamento mais fáceis que as barras longas.

Entretanto, o limiar desses lasers é muito mais elevado que o dos lasers de Nd: YAG.

Como o volume ativo é consideravelmente maior, os pulsos resultantes são muito energéticos. Em baixas taxas de repetição de alguns pulsos por minuto, os lasers mais comuns liberam energias de 10 a 100 J em períodos de 15 a 20 ns. A tecnologia desses lasers assemelha-se, em todos os aspectos, à dos outros lasers de isolante dopado.

A associação em forma de cadeia desses lasers propicia energias de saída extremamente altas. O primeiro elemento da cadeia é um oscilador de picossegundos estabilizado, de baixa energia. Cria-se o feixe, que em seguida é amplificado em uma sucessão de amplificadores lasers, constituídos por barras ativas excitadas por lâmpadas, porém sem cavidade resonante. Para evitar que o material ativo, atravessado por energias cada vez maiores à medida que se avança na cadeia, venha a sofrer fratura, as seções de barras possuem diâmetros crescentes. Dessa forma trabalha-se com uma densidade de energia sensivelmente constante, inferior ao limiar de fratura. As energias alcançadas podem ultrapassar o quilojoule, com durações de pulso de uma centena de picossegundos.

As diferentes propriedades do neodímio dopado no YAG e nos vidros são complementares. Os lasers Nd:YAG apresentam vantagens no funcionamento chaveado ou em contínuo, ao passo que os lasers de Nd:vidro são mais úteis em taxas de repetição baixas, para pulsos de energia intensa, para o funcionamento em cadeia de altíssima potência.

3 - O MATERIAL

Os aços-carbono contém uma quantidade de carbono em uma faixa desde valores muito pequenos, da ordem de 0,005% em peso de C nos aços ultra-baixo carbono, até um máximo de 2% em peso de C nos aços ferramentas de alto-carbono. O carbono modifica profundamente a transformação de fase, a microestrutura e as propriedades dos aços.

O desempenho dos aços depende das propriedades associadas com sua microestrutura, como frações volumétricas, tamanho de grãos e a morfologia das várias fases constituintes de uma seção macroscópica do aço, com uma dada composição em uma dada condição de processamento. Devido a todas as fases dos aços serem cristalinas, suas microestruturas são formadas de vários cristais, muitas vezes de três ou quatro tipos diferentes, os quais são fisicamente combinados pela solidificação, mudanças de fase do estado sólido, deformação à quente, deformação à frio ou tratamento térmico. Em geral, cada tipo de microestrutura é desenvolvida visando faixas de propriedades características via processamento específico que controla e explora as mudanças estruturais.

A figura 12 mostra o diagrama de equilíbrio de fases do ferro-carbono [Davis, 1990] e as mudanças que o carbono induz no equilíbrio de fases do ferro puro. As ligas de ferro-carbono que contém até 2% em peso de C são classificadas como aço, enquanto as que contém acima de 2% em peso de C são classificadas como ferro fundido.

As fases constantes do diagrama são:

ferrita: solução sólida ferro-carbono de estrutura cúbica de corpo centrado;

austenita: solução sólida ferro-carbono de estrutura cúbica de face centrada;

cementita: fase de composição Fe_3C .

O campo da fase austenítica mostrado na figura 12 é a região utilizada para os trabalhos à quente e tratamentos térmicos do aço carbono. A austenita, no resfriamento, transforma-se em outra estrutura. Se o resfriamento for lento dentro de condições próximas do equilíbrio, a austenita se transformará em uma mistura de ferrita e cementita (figura 12), denominada perlita. Se o resfriamento for rápido, não haverá tempo suficiente para a formação da perlita e, conseqüentemente, a austenita se transformará numa fase metaestável denominada martensita, de estrutura tetragonal de corpo centrado. Cada uma dessas transformações determina as bases dos tratamentos térmicos aplicados nos aços. Assim, a eventual alta temperatura de estabilidade da austenita na liga ferro carbono e a transformação de estado sólido da austenita no resfriamento cria várias oportunidades para otimizar a forma, a microestrutura e as propriedades para diversas aplicações.

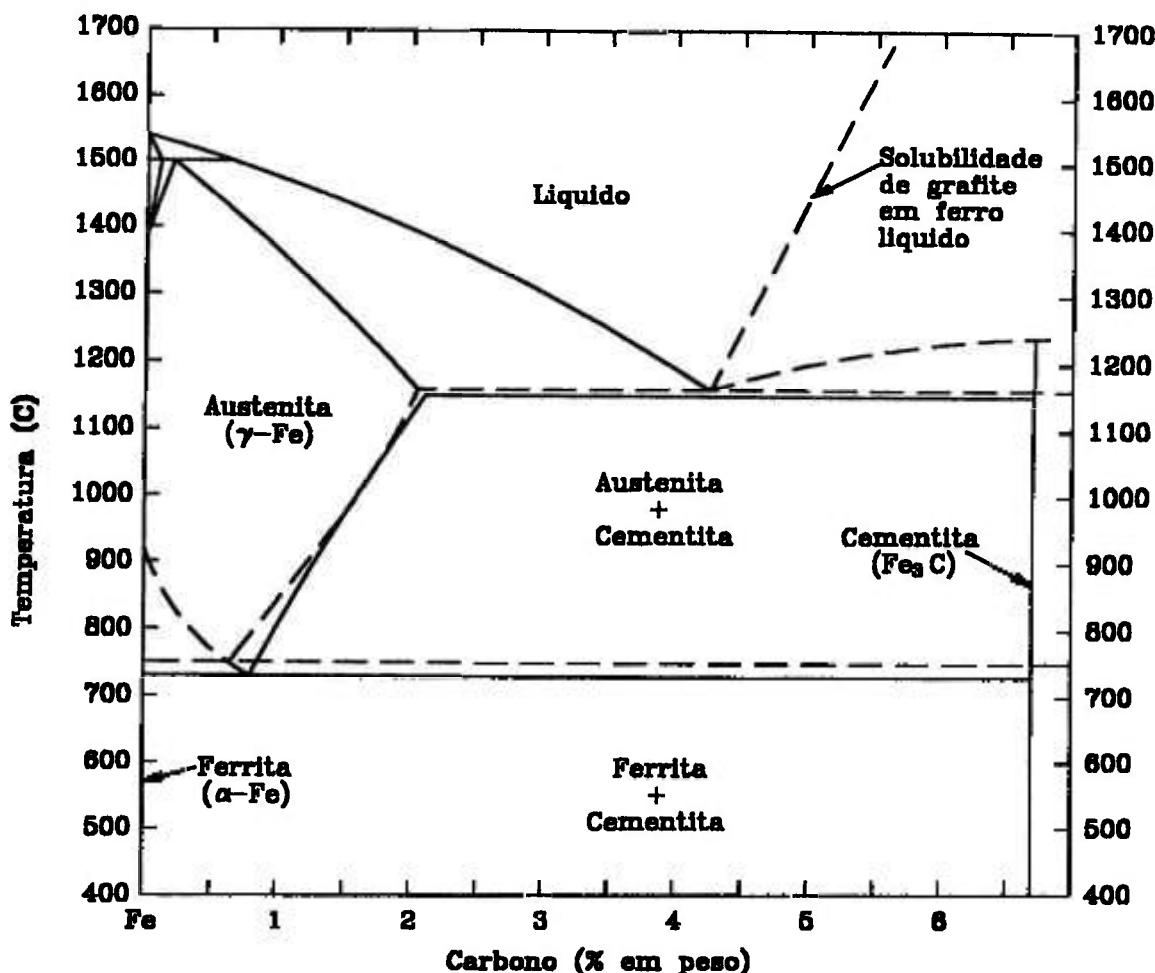


Fig. 12 - Diagrama de equilíbrio de fases do ferro-carbono

A figura 13 mostra a dureza em função do teor de carbono para os vários tipos de microestrutura [Davis, 1990]. A dureza é facilmente medida e geralmente é diretamente proporcional a resistência à tração e inversamente proporcional à ductilidade e tenacidade. Embora a relação dureza-teor de carbono esteja mostrada como uma linha na figura 13, ela é de fato melhor representada como uma banda devido aos vários fatores que podem causar variações na dureza em uma dada microestrutura. Como exemplo, a resistência à tração de aços baixo carbono de microestruturas ferríticas é muito sensível ao tamanho de grão, enquanto que nos aços com microestruturas perlítica a resistência à tração depende sensivelmente do espaçamento das lamelas de cementita e ferrita.

Em todos os tipos de microestrutura a dureza aumenta com o aumento da quantidade de carbono, mas a microestrutura martensítica é aquela que mostra um aumento mais representativo. Por causa da baixa solubilidade do carbono na ferrita (exceto para têmpera martensítica), o carbono é primeiramente concentrado nas fases de carbonetos.

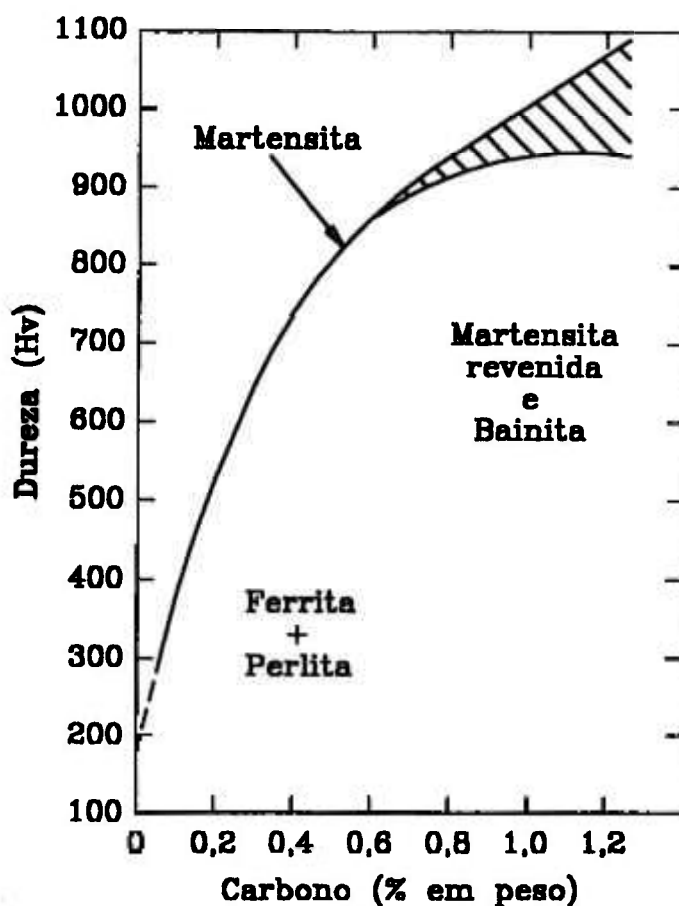


Fig.13 - Gráfico da dureza em função da quantidade de carbono para várias microestruturas do aço. A seção hachurada mostra o efeito da austenita retida

Na têmpera existem, entretanto, limites práticos a serem observados. É o caso dos aços baixo carbono que não têm resfriamento suficientemente rápido para formação de martensita. Sendo assim a microestrutura ferrítica é produzida, quando resfriados pelos processos convencionais.

4 - FUNDAMENTOS DO PROCESSAMENTO DE MATERIAIS VIA LASER

A compreensão dos processos de interação entre o feixe incidente e os materiais a serem tratados é essencial para o conhecimento das possibilidades e dos limites de usinagens por laser. A apresentação das características físicas dessa interação terá como centro os materiais metálicos, mas as propriedades essenciais de tal interação laser-matéria são, em geral aplicáveis a outros tipos de meios sólidos.

4.1 - Interação da Radiação Laser com os Materiais

A radiação laser tem um número de propriedades únicas: alta densidade de potência, direcionamento preciso, monocromaticidade e coerência. Essas propriedades possibilitam concentrações de energia com densidades de potência variando de valores extremamente baixos até valores acima de 10^{18} W/cm², e transferência rápida de quantidade de energia precisa para o material sem contato físico. A transferência intensa de energia provoca a ocorrência de modificações estruturais na camada superficial do material.

O processamento de materiais via laser depende de propriedades relativas ao feixe laser, das propriedades físico-químicas do material e também do tipo de atmosfera onde o sistema se encontra. As propriedades do feixe laser que influenciam no processamento são: características de energia da radiação laser, densidade de potência, duração da exposição à fonte de calor, distribuição espacial da intensidade do feixe e parâmetros geométricos do feixe. As características relevantes do material para o processamento são: as dimensões (massa) da peça irradiada, quantidade específica de energia absorvida pelo material e a taxa em que a energia absorvida é dissipada no material. A atmosfera que envolve o local onde ocorre o processamento é um dos parâmetros que muito influencia na característica final do material submetido à exposição de uma fonte de calor.

O diagrama de blocos da figura 14 ilustra esquematicamente os processos físicos no material irradiado a laser [Kraposhin, 1982], juntamente com suas causas e efeitos.

A energia da radiação laser, E , concentrada na superfície do material tratado, é distribuída como mostrado a seguir:

$$E = E_{ref} + E_m + E_{pl} \quad (12)$$

onde: E_{ref} é a energia que é refletida, especular e difusa, pela superfície irradiada e dispersada no espaço vizinho.

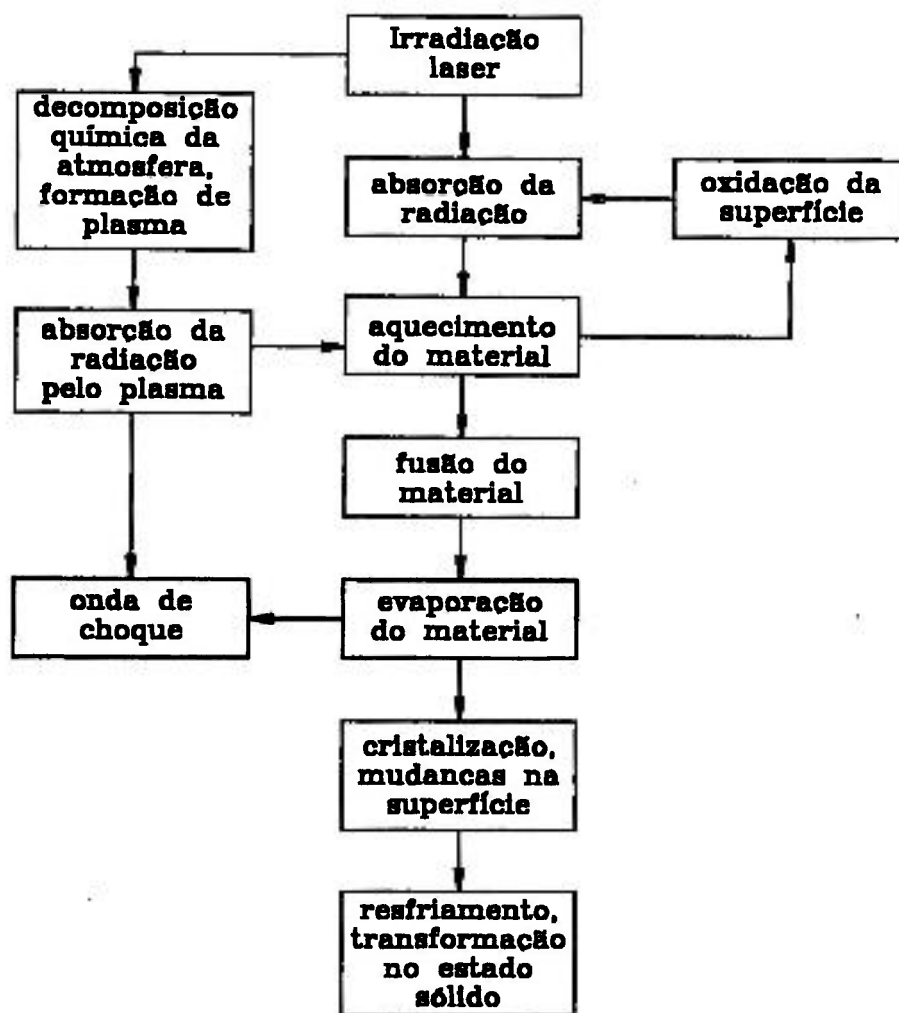


Fig.14 - Diagrama de blocos do processo físico no material irradiado a laser.

$$E_{ref} = E.R \quad (13)$$

onde: R é o coeficiente de reflexão da superfície, definido por:

$$R = R_1 + R_2 \quad (14)$$

onde: R_1 é o coeficiente de reflexão especular

R_2 é o coeficiente de reflexão difusa

E_m é a energia da radiação laser absorvida pelo material

E_{pl} é a energia da radiação laser absorvida pelo plasma formado sobre a superfície do material irradiado

A figura 15 apresenta a refletividade de alguns metais, medidas em superfícies polidas e sob vácuo, em função do comprimento de onda λ da radiação incidente [Charschan, 1972]. Da figura, pode-se constatar que, exceto para o alumínio, R sofre variações muito acentuadas

em uma banda espectral compreendida entre 500 e 900 nm. No infravermelho, a refletividade atinge rapidamente um valor constante próximo a unidade, o que tenderia a desqualificar os lasers infravermelhos. Entretanto, os valores indicados aplicam-se apenas a superfícies metálicas polidas e no vácuo. Na maioria das aplicações do laser, entretanto, outros fatores devem ser considerados, tais como a contaminação da superfície, a rugosidade, etc., que alteram profundamente os valores de R .

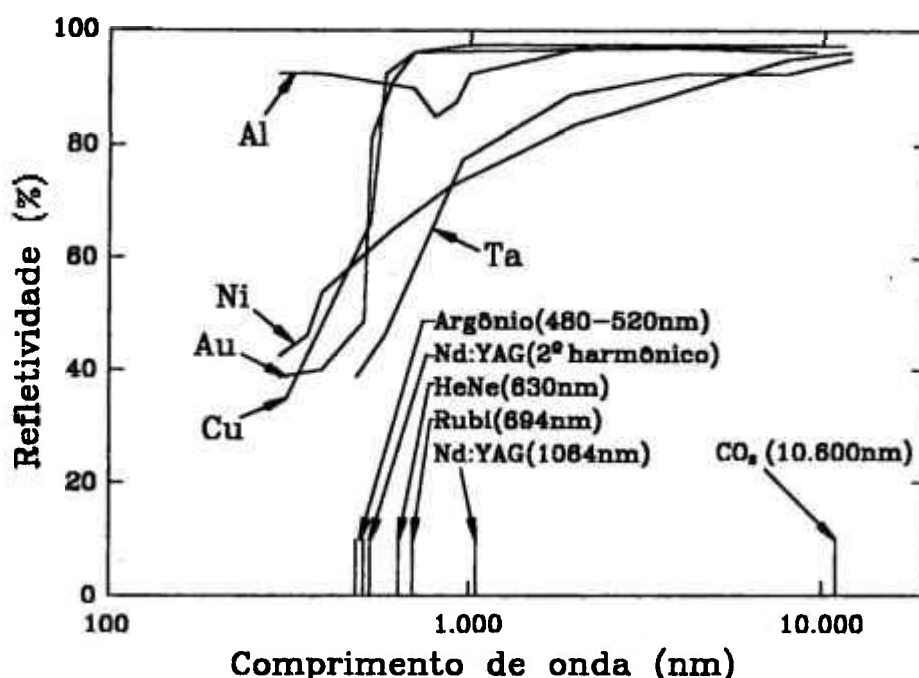


Fig.15 - Gráfico de reflexão a temperatura ambiente em função do comprimento de onda para alguns materiais.

Além dessas considerações, a absorção da radiação laser pelo material sofre grande variação com o aumento da temperatura na superfície do material, como ilustrado para o aço inoxidável AISI 304 [Maillet, 1987] na figura 16, onde observa-se o brusco aumento da absorção entre as temperaturas de fusão (T_f) e evaporação (T_v) do material. Acima da temperatura de evaporação os valores da absorção, que estão próximos à unidade, voltam a ter pequena variação com o aumento da temperatura.

As temperaturas de fusão e evaporação do material, no gráfico da absorção em função da temperatura (figura 16), delimitam três zonas, I, II e III, que correspondem respectivamente a: zona de tratamento térmico, zona de soldagem e zona de corte.

A radiação laser que incide na superfície do material, penetra neste e é então absorvida. A penetração da radiação no material é descrita pela equação:

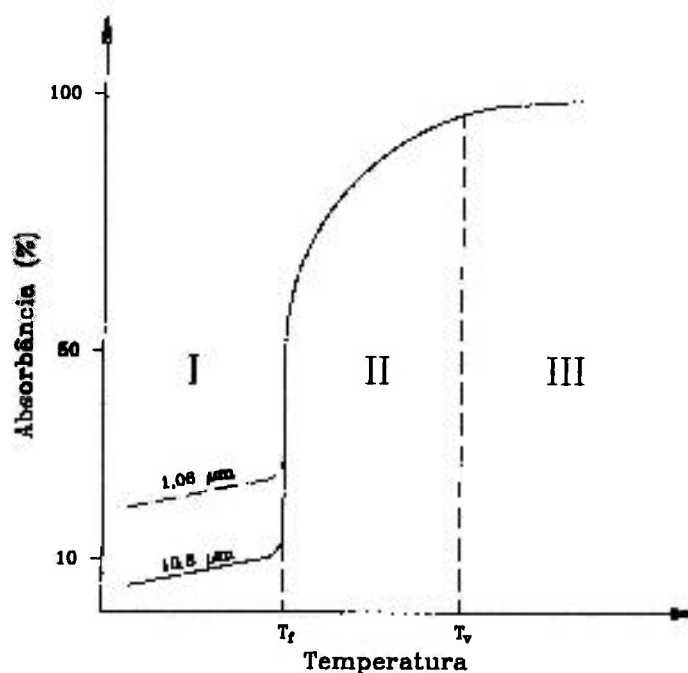


Fig.16 - Gráfico da absorção do aço inoxidável 304 de energia laser em função da temperatura para o laser de Nd:YAG e para o laser de CO_2 .

$$E(z) = E \cdot (1-R) \cdot e^{-\alpha z} \quad (15)$$

onde: $E(z)$ é a energia da radiação penetrando no material para a profundidade z

α é o coeficiente de absorção

A quantidade de energia absorvida em uma camada de espessura Δz é igual:

$$|\Delta E_{(z)}| = E \cdot (1-R) \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha z} \cdot \Delta z \quad (16)$$

A quantidade de energia absorvida é grande na superfície, e decresce de modo suave da superfície para o centro do material.

Embora a equação (16) aplica-se para diferentes materiais, não são somente os valores de α e R que determinam o processamento via laser, mas também os mecanismos de transferência de calor que podem ser diferente para cada material específico.

A quantidade de luz que é absorvida no metal ocorre primeiramente pelos elétrons livres. A energia dos elétrons aumenta, e em seguida decresce com a dissipação de energia na colisão com os átomos ou íons na rede cristalina. Esse processo ocorre em uma camada com uma espessura de $1/\alpha$, sendo que para os metais o coeficiente de absorção α está entre $10^4 - 10^5 \text{ cm}^{-1}$. Portanto, a radiação laser é absorvida nos metais em uma camada de 0,1 a 1 μm de espessura. Deste modo, a radiação laser pode ser considerada uma fonte de calor na superfície ou próxima a esta.

Outro parâmetro de energia importante é a energia específica (W_e) fornecida ao material.

$$W_e = W_p \cdot t = \frac{P \cdot t}{A} = \frac{4 \cdot E}{\pi \cdot d_0^2} \quad (17)$$

onde: $W_p = P/A$ é a potência específica fornecida ao material

P é a potência da radiação laser

A é a área da superfície dentro da qual a radiação laser é focalizada, no caso específico deste trabalho $A = \pi d_0^2/4$.

d_0 é o diâmetro do feixe que incide no material.

4.2 - Termofísica do Processo

Quando submetida à radiação laser, a superfície de um metal pode atingir temperaturas de centenas a alguns milhares de graus. A energia absorvida no metal é transferida da superfície para dentro do material com o auxílio da condução de calor eletrônica. Durante o processo de aquecimento a laser diferentes processos físicos ocorrem no material [Ready, 1982] como ilustrado na figura 17.

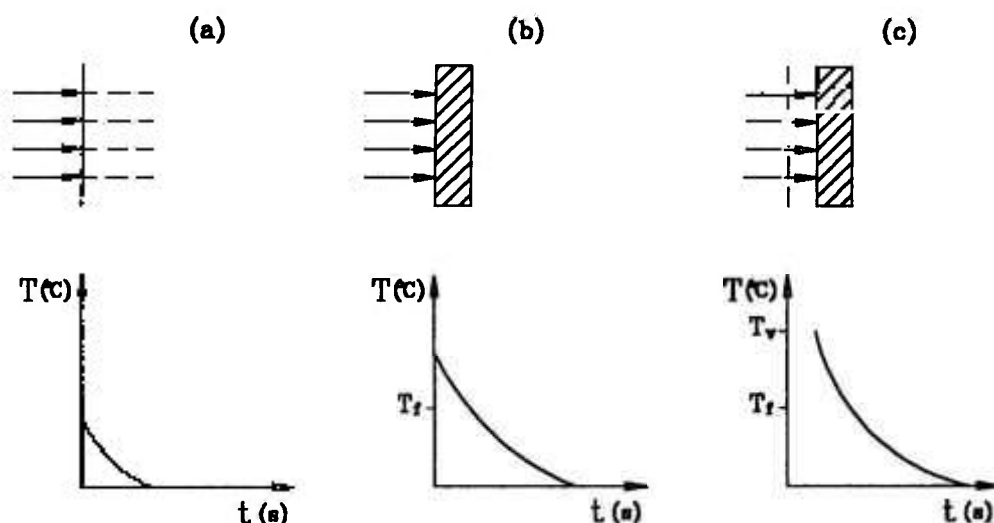


Fig.17 - Esquema dos processos físicos e distribuições de temperatura na camada superficial. (a) $T < T_f$; (b) $T_f < T < T_v$; (c) $T < T_v$ (as setas indicam a radiação laser incidente e a seção hachurada indica a camada fundida).

Quando a radiação laser que atinge a superfície do metal tem baixa intensidade, a superfície do material é aquecida a uma temperatura T , essa temperatura será distribuída em uma camada superficial como mostrado na figura 17a. Aumentando-se essa intensidade, a temperatura na superfície do material aumenta, podendo ser superior à temperatura do

ponto de fusão T_f . Uma zona de fusão forma-se na superfície do material e avança para o seu interior, como indicado na figura 17b. Um novo aumento na intensidade do feixe laser pode elevar a temperatura da superfície do material acima do ponto de vaporização T_v . Como resultado da vaporização do material, a superfície absorvedora move-se na direção da ação do feixe laser. Ao mesmo tempo a radiação será absorvida pelas camadas mais internas aumentando a profundidade de material irradiado, conforme ilustrado esquematicamente na figura 17c.

A fonte de calor, equivalente à ação de um feixe laser na superfície dos metais, é uma fonte superficial distribuída, isto é, praticamente toda a energia de radiação é absorvida em uma estreita camada superficial e o raio r_0 da área de aquecimento é muito maior que a profundidade para a qual o calor difunde, isto é, $r_0 \gg (a.t)^{1/2}$. Este fato permite uma formulação unidirecional do problema de encontrar o campo de temperatura em um corpo semifinito exposto a uma fonte de calor concentrada. Neste caso o campo de temperatura pode ser encontrado pela solução da equação clássica de condução de calor.

$$\frac{\partial^2 T_{(z,t)}}{\partial z^2} - \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T_{(z,t)}}{\partial t} = \frac{q_{(z,t)}}{k} \quad (18)$$

Onde as condições iniciais e o limite são:

$\partial T / \partial z_{(0,t)} = 0$, isto é, durante a exposição à fonte de calor, não existe transferência de calor entre a superfície irradiada e o meio vizinho.

Para $T_{(\infty,t)} = T_{(z,0)} = 0$ a amostra irradiada é um corpo seminfinito com a temperatura inicial $T_0=0$.

T é a temperatura do material em um ponto arbitrário com coordenadas x, y, z no tempo t .

a é o coeficiente de difusividade térmica do material.

k é o coeficiente de condutividade térmica.

$q_{(z,t)}$ é a quantidade de calor liberado por unidade de volume e por unidade de tempo, que depende das coordenadas x, y, z e do tempo t .

Quando o material é tratado via laser com pulsos de milissegundos, temos [Kovalenco, 1988]:

$$q_{(z,t)} = A \cdot W_p \cdot \varphi(t) \quad (19)$$

onde: $\varphi(t)$ é uma função descrevendo a estrutura da dependência do tempo do pulso laser; para o regime de radiação quase estacionário com um pulso aproximadamente retangular $\varphi(t) = 1$.

A solução geral da equação diferencial em uma formulação linear (quando as dependências da temperatura das constantes termofísicas e da absorção do material irradiado são desprezados) junto às condições iniciais e limites apresentadas anteriormente é dada por [Kovalenco, 1988] [Arecchi, 1972]:

$$T_{(z,t)} = \frac{2 \cdot A \cdot W_p \sqrt{a \cdot t}}{k} \cdot ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{a \cdot t}}\right) \quad (20)$$

onde: $ierfc(x) = \int_0^\infty [1 - erf(y)] \cdot dy$ é a integral de complementação da função erro

$erf(y)$ é a função erro, que é tabelada em [Likov, 1967]

A temperatura na superfície do material irradiado $T(0,t)$ em um tempo t próximo do tempo de duração do pulso laser t_p é dado aproximadamente por [Kovalenco, 1988] [Arecchi, 1972]:

$$T_{(0,t)} \cong \left(\frac{2 \cdot W_p}{k}\right) \cdot \sqrt{\frac{a \cdot t_p}{\pi}} \quad (21)$$

A taxa de aquecimento da camada superficial do material durante o pulso pode ser determinada pela expressão diferencial com o t respectivo [Kovalenco, 1988] [Arecchi, 1972]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{A \cdot W_p \cdot \sqrt{a}}{k \cdot \sqrt{t}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{z^2}{4 \cdot a \cdot t}\right)} \quad (22)$$

Nas dependências apresentadas o tempo de propagação do fluxo de calor t é comparável com a duração da exposição do material à radiação laser, isto é, com a duração do pulso laser t_p . Dentro de condições reais, depois que a fonte de calor para de atuar, o processo de equalização de temperaturas ocorre no material. Ao mesmo tempo, depois que a radiação laser pára de atuar, a curva isotérmica com uma temperatura fixa move-se para o centro do material, e então ela retorna depois que uma certa profundidade z_{max} é alcançada. Para o caso unidimensional a temperatura em qualquer ponto do material no eixo da fonte de calor num plano abaixo de $z = 0$ pode ser determinada pela expressão [Carslaw, 1986]:

$$T_{(z,t)} = \frac{2 \cdot A \cdot W_p \cdot \sqrt{a}}{k} \cdot \left[\sqrt{t_0} \cdot \text{ierfc} \left(\frac{z}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right) - \sqrt{t_0 - \tau} \cdot \text{ierfc} \left(\frac{z}{2 \cdot \sqrt{a \cdot (t_0 - \tau)}} \right) \right] \quad (23)$$

A profundidade máxima para a qual uma dada isotérma penetra (por exemplo, na temperatura de austenitização T_h) pode ser determinada com o auxílio da expressão abaixo [Carslaw, 1986]

$$z_{\max} = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot t_0 \cdot (t_0 - \tau) \cdot \ln \sqrt{t_0 / (t_0 - \tau)}}{\tau}} \quad \text{para } b < 0,3 \quad (24)$$

onde: $b = T_h / T_{(0,t)}$

t_0 é o tempo no qual uma isotérmica alcança a profundidade de máximo

τ é a duração do pulso

T_h é a temperatura de endurecimento fixada

$T_{(0,\tau)}$ é a temperatura da superfície

É demonstrado em [Goryachev, 1974] que os resultados obtidos na equação acima se aproximam bem das expressões:

$$z_{\max} = \frac{\sqrt{a \cdot t}}{\sqrt{2 \cdot e^b}} \quad \text{para } b < 0,3 \quad (25)$$

$$z_{\max} = 3,8 \cdot e^{(-3,3 \cdot b)} \quad \text{para } 0,3 < b < 0,75 \quad (26)$$

$$z_{\max} = 1,24 \cdot (1 - b) \quad \text{para } 0,75 < b < 1 \quad (27)$$

A taxa de resfriamento do material depois que a fonte de calor pára de atuar, associada à taxa e à temperatura de aquecimento determina todo o processo físico relacionado ao endurecimento, pode ser determinada pela expressão [Ready, 1971]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{2 \cdot A \cdot W_p \cdot \sqrt{a}}{k} \left\{ \frac{e^{\frac{-z^2}{4 \cdot a \cdot t_0}}}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot t_0}} - \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot (t_0 - \tau)}} \cdot e^{\frac{-z^2}{4 \cdot a \cdot (t_0 - \tau)}} \right\} \quad (28)$$

As dependências de temperatura obtidas com o uso de radiação laser contínua para endurecimento térmico são mais complexas [Kovalenco, 1988] [Arecchi, 1972] [Ready, 1971], e não serão abordadas neste trabalho.

Os problemas precedentes de determinação de distribuição de temperatura em um material irradiado com radiação laser pulsada são resolvidos em uma formulação linear, isto é, quando a dependência da temperatura das constantes termofísicas e da absorção são desprezadas. Para uma maior precisão da descrição do processo de aquecimento essas dependências tem que ser levadas em conta. Aumentar a precisão dos processos térmicos estudados é possível, considerando-se cada fator como multidimensional, a dependência da temperatura, e a complexidade da configuração das regiões, o que torna o modelo extremamente complexo [Shvets, 1986]. Estudos teóricos mostram que a distribuição de temperatura obtida com o uso de modelos matemáticos lineares e não lineares podem diferenciar substancialmente. Existem dados [Kovalenco, 1988] mostrando que os erros introduzidos na linearização de constantes termofísicas não lineares do material, dependentes da temperatura, para aço baixo carbono alcançam centenas de graus em uma região adjacente a fonte e de 25 a 30% para a distribuição de temperatura como um todo. O efeito da não linearidade no estado térmico de amostras de cobre tratadas com uma fonte de energia concentrada é insignificante, a máxima diferença não excede 5% [Rykalín, 1979]. Isto é atribuído ao fato que o efeito da não linearidade, introduzido pelos fatores estudados no último caso, são compensados mutuamente.

Em [Shvets, 1986] foi proposto que o efeito da não linearidade pode ser estimado, no caso do processo multidimensional, pelo estudo de problemas simplificados com um pequeno número de dimensões.

Os estudos teóricos e experimentais de um estado térmico da camada superficial de um material irradiado a laser, com respeito à microestrutura, mostraram [Ready, 1971] que as características da distribuição de temperatura no material, o gradiente de temperatura e a taxa de aquecimento e resfriamento, são fortemente afetadas pelos parâmetros de energia de radiação, tempo de exposição à fonte de calor, a característica da distribuição de intensidade no feixe e as características termofísicas e dimensões geométricas do material tratado. No caso geral, o gradiente de temperatura na camada superficial exposta à irradiação via laser é realmente alto (10^4 - 10^6 °C/cm), e decresce gradualmente da superfície para o centro do material. Devido aos altos gradientes de temperatura, a taxa de resfriamento também se eleva para uma faixa alta, não usual, atingindo 10^4 - 10^6 °C/s e dentro de certas condições até 10^8 °C/s. Dessa maneira taxas de resfriamento foram calculadas e confirmadas experimentalmente em um estudo da distância interdendrítica na microestrutura de um material irradiado. As taxas de aquecimento a laser

($10^5 - 10^8$ °C/s) são aproximadamente da mesma ordem de grandeza que as taxas de resfriamento, equilibrando-se um pouco acima. Existem resultados [Ready, 1971] mostrando que a taxa de aquecimento pode atingir grandezas de 10^{10} °C/s.

Desse modo, ocorrem altas taxas de aquecimento e resfriamento, não usuais, em uma região localizada do material pré-determinada e também mudanças estruturais e de fases não usuais. A estrutura do material, formada dentro dessas condições, tem uma dispersão alta e desenvolve grande quantidade de discordâncias na estrutura, como consequência das ondas de tensão térmica que formam térmicas circulares e são caracterizadas por uma distribuição específica de elementos de ligas e outras características.

4.3 - Tratamento Térmico Superficial via Laser

Os processos físicos que ocorrem na camada superficial do material sob radiação laser são determinados pelos parâmetros do laser, características metalúrgicas do material e pela atmosfera que envolve a interação laser-material. Os principais parâmetros envolvidos são a densidade de potência da radiação, o tempo de interação do feixe laser e o material.

Os processos físicos apresentados mostraram que pode-se empregar o laser de três maneiras distintas no intuito de tratar termicamente o material [Kovalenko, 1988], tendo com resultado os seguintes processos:

Grupo 1 - Aquecimento a temperaturas que não excedam o ponto de fusão, mas suficiente para as transformações fase-estrutura.

Grupo 2 - Aquecimento a temperaturas acima do ponto de fusão, mas abaixo do ponto de vaporização, para mudança de fase do material.

Grupo 3 - Aquecimento a temperaturas bem acima do ponto de vaporização, para intensa vaporização do material da superfície.

Os efeitos que ocorrem na superfície do material tratado decorrem de um desses três processos, constituindo a base para o desenvolvimento de numerosos métodos de tratamento térmico de materiais a laser que, por exemplo, aumentam o desempenho de componentes de máquinas e ferramentas de corte [Altshulin, 1990] [Andriyakhin, 1983] [Bagdasarov, 1990] [Galerie, 1989] [Golovko, 1980] [Gurkovsky, v. 9, 1990] [Ierusalimskaya, 1968] [Kear, 1984] [Mehrotra, 1990] [Scott, 1993] [Singh, 1992].

Todos esses métodos dependem tanto da forma da radiação laser usada, como do mecanismo pelo qual a radiação interage com o material, podendo ser dividido em alguns grupos básicos:

O *primeiro grupo* incorpora métodos de tratamento a laser que não causam fusão ou qualquer outra mudança na rugosidade inicial da superfície, e são associadas somente com o aquecimento da camada superficial do material tratado e seu subsequente autoresfriamento. Pelo controle do processo de aquecimento e resfriamento é possível obter diferentes efeitos na camada superficial, em particular, têmpera, revenimento e recozimento.

Têmpera via laser é um processo onde uma fina camada superficial do material tratado é aquecida acima da temperatura do ponto de transformação de fase-estrutura, depois o material é resfriado em ultra altas taxas devido à rápida remoção do calor dentro da grande massa de material. Dentro dessas condições o material na camada superficial é autotemperado. O efeito de endurecimento, observado primeiramente em aços carbono e em alguns aços especiais, consiste de uma formação específica, altamente dispersa, de pequena penetração da estrutura espacialmente distorcida na camada superficial [Andriyakhin, 1980] [Blaes, 1988] [Gurkovsky, v. 10, 1990]. Essa estrutura contém blocos com alta dispersão e alta densidade de discordâncias, e sua microdureza é de 1,5 a 5 vezes maior que a estrutura do material recozido. A profundidade da camada endurecida pode alcançar de 0,05 a 3 mm, dependendo das condições de irradiação.

Recozimento a laser [Hegge, De Beurs, 1990] é um processo de tratamento de materias para lâminas finas, baseado no uso da radiação com densidade de potência relativamente baixa, provendo uma taxa de aquecimento e resfriamento que não excedam os valores críticos. Uma estrutura característica de revenimento ou recozimento é formada na camada superficial ou no volume todo do material (se a espessura for semelhante a profundidade da zona afetada pelo calor (ZAC)).

O *segundo grupo* incorpora métodos onde ocorre fusão na superfície do material [Costa, 1994] [D'Anna, 1991] [Hegge, De Hosson, 1990] [Rieker, 1990]. Esses métodos englobam endurecimento térmico, onde a radiação laser induz a formação de uma estrutura amorfa e superfície microligada.

Endurecimento a laser com fusão da superfície [Brandsen, 1990] [Ion, 1991] [Kraposhin, 1982] [Moulin, Siffre, 1990] [Moulin, Marcus, 1990] [Pelletier, 1989] (com transição de fase) difere do endurecimento sem fusão da superfície, pelas grandes dimensões da zona de interação do laser e da maior heterogeneidade da estrutura na região alterada, que contém pelo menos três camadas. A camada externa com estrutura dendrítica, caracterizada pela têmpera do material líquido, seguida por uma camada transicional (ZAC), e o material base [Fastow, 1990].

As propriedades da camada superficial irradiada no regime de fusão, em particular a microdureza e as micro e macro tensões, dependem

fortemente da composição química do material. Desse modo, por exemplo, nos aços carbono endurecidos a laser com fusão na superfície não ocorre nenhuma mudança sensível nas propriedades da camada superficial quando comparada com o tratamento de endurecimento sem fusão na superfície. Já nos aços liga, contendo uma grande quantidade de carbonetos que no aquecimento podem se dissolver, um aumento da quantidade de austenita retida pode ocorrer.

Uma desvantagem significativa do endurecimento a laser com fusão na superfície é que a rugosidade inicial da superfície é destruída, e com isso é necessária uma usinagem posterior ao endurecimento para eliminar as irregularidades geradas na superfície.

A formação de uma estrutura superficial amorfa [Fetzer, Phys. Rev. B, 1990] [Fetzer, J. Non-cryst. Sol., 1990] envolve um processo no qual é criado, na superfície do material tratado, um gradiente de temperatura muito alto (o máximo possível). Ao mesmo tempo as taxas de resfriamento alcançam grandezas da ordem de $10^6 - 10^7$ °C/s em uma fina camada superficial entre 0,02 e 0,05 mm. Dessa maneira as taxas de resfriamento em muitos casos são suficientes para congelar a estrutura que está desordenada na fusão, isto é, para transformar um metal enquanto este está no estado amorfo. O processo de formação de uma estrutura superficial amorfa induzida a laser pode ser realizada em ligas com composição especial, incluindo também as ligas baseadas em ferro, bem como os outros materiais pré-revestidos com um composto ou multicomposto que tenha uma favorável inclinação para a formação de estrutura amorfa quando exposto a radiação laser sozinho ou em conjunto com o material base. Outra característica importante desses materiais que têm formação de uma camada amorfa é que são materiais com ponto de eutético profundo [Kulkarni, 1989].

Superfície microligada [Abboud, 1990] [Abboud, 1992] [Chande, 1984] [Dahotre, 1990] [Volgin, 1983] [Kim, 1990] [Rieker, 1989] [Schnneweiss, 1989] a laser é um processo de fusão da camada superficial do material e introdução de elementos de liga na fusão formada. Como resultado do processo turbulento, devido a ação de forças hidrodinâmicas e gradientes de temperatura, os elementos de liga são misturados mecanicamente com o material base. Além da mistura mecânica, também ocorre difusão mútua na fase líquida com a formação de solução sólida. Uma vez que a solução sólida ocorre dentro de condições de calor específicas e é resfriada em altas taxas devido à condução de calor, as concentrações de elementos de liga que são encontradas dentro das condições de equilíbrio são fixadas na solução sólida.

Superfície microligada é empregada para aumentar a resistência ao desgaste, às altas temperaturas, ao calor e à corrosão.

Revestimento a laser é um método eficaz para aumentar o desempenho e restaurar superfícies de trabalho de partes de máquinas e ferramentas [Aihua, 1991] [Hegge, Boetje, 1990] [Hirano, 1991] [Subramanian, 1991]. O material de revestimento é fornecido na forma de fio ou pó para a superfície antes ou simultaneamente à radiação laser. Sob ação da radiação laser o pó é fundido e o material base é parcialmente fundido para prover uma boa adesão do revestimento a este material.

O *terceiro grupo* incorpora métodos onde o fator característico é o mecanismo de vaporização pela interação da radiação laser com o material. Incluem-se neste grupo o endurecimento por choque que é realizado quando materiais são trabalhados com radiação laser pulsada em nanossegundos e densidades de potência da ordem de $10^9 - 10^{12}$ W/cm². Inicialmente uma camada fina de metal de baixo ponto de fusão (por exemplo, chumbo) é depositado na superfície a ser irradiada. A radiação vaporiza o metal de uma maneira explosiva. O jato hidrodinâmico formado interage com o material principal e gera em sua camada superficial uma potente onda de choque que se propaga na direção do centro do material, aumentando sua tensão plástica (endurecimento a frio). Ao mesmo tempo a camada superficial é aquecida e as correspondentes transformações de fase-estrutura ocorrem. Esse método é empregado para o endurecimento superficial de partes de máquinas termodinâmicas quando o endurecimento por métodos tradicionais de tratamento térmico são contra indicados.

A tabela 3 mostra as características gerais de irradiação para os métodos mencionados. Note que estes dados são de caráter aproximado e são apresentados considerando-se as propriedades de energia de equipamentos laser industriais existentes.

Em função de sua alta velocidade, os métodos de tratamento de materiais a laser podem ser empregados largamente em muitas áreas da indústria metalúrgica.

Para diferentes componentes de máquinas e ferramentas, dependendo dos requisitos impostos para o estado da camada superficial da parte, é possível recomendar o método mais efetivo de tratamento a laser entre os mencionados. As possíveis áreas de aplicação dessa tecnologia são indicadas a seguir e classificadas pelo método de tratamento via laser.

a) *Têmpera superficial:*

— Endurecimento de superfícies de trabalho de punções, matrizes de recortar discos, e matrizes de dobramento, matrizes, moldes, ferramentas para endurecimento a frio (forja), lâminas de serra, ferramentas de bancada, alicate de corte, paquímetros e micrômetros.

— Aumento da resistência ao desgaste da superfície de trabalho de ferramentas de corte como: escareadores planos e circulares, serra

circular, fresas circulares e de topo, fresas para dentes de engrenagens tipo disco e frontal, fresas helicoidais, ferramentas de torner, bedames, brocas, alargadores, machos. Endurecimento de prendedores (cachorros) para fixação de ligas duras.

Tab.3 - Tabela referencial de parâmetros para métodos de tratamento superficial via laser.

Método de tratamento via laser	Tipo de radiação	Densidade de potência (W/cm ²)	Velocidade de processo (m/min)	Produtividade do processo (mm ² /min)	Rugosidade na superfície R _a (μm)	Profundidade da camada tratada	Materiais tratados
Têmpera superficial	Pulsada	10 ³ -10 ⁴	0,36	3.000	sem mudanças	0,15	Aços carbono e ligas com C>0,1% em massa, ferro fundido, ligas de titânio
	Contínua		0,2-5	20.000		2,5	
Recozimento de chapas finas	Pulsada	10 ² -10 ³	0,5	3.400	sem mudanças	0,05	Aços carbono e ligas, ferro fundido, ligas de titânio, bronze, ligas de alumínio
	Contínua			5.000		3	
Têmpera superficial com fusão na superfície	Pulsada	10 ⁴ -10 ⁶	0,12	360	20-50	0,5	Aços carbono, titânio, ligas de alumínio
	Contínua		0,2-2	8.000		3	
Amorfização	Pulsada	10 ⁶ -10 ⁷	120-160	600.000	1,25-2,5	0,0005-	Ligas especiais, ferro fundido, aços revestidos
	Contínua					0,05	
Superfície microligada	Pulsada	10 ⁵ -10 ⁶	0,2-2	8.000	2,5-50	1,2	Aços e ligas de qualquer tipo
	Contínua						
Enchimento (restauração)	Contínua	10 ⁵ -10 ⁶	0,1-0,5	1.000	20-100	2,3	Aços, ferro fundido, ligas não ferrosas, ligas especiais
Endurecimento com onda de choque	Pulsada	10 ⁹ -10 ¹²	0,01	100	sem mudanças	0,05-0,1	Aços carbono, aços austeníticos, aços maraging, ligas de alumínio e titânio

— Aumento da resistência ao desgaste de superfícies de trabalho de lâminas de retíficas sem centros, pinças de torno, empurradores e excêntricos (cames), batentes (fim de curso), parafusos de ajustagem, guias de máquinas e dentes de engrenagens.

— Tratamento de superfícies que desgastam rapidamente de partes de unidades turbogeradoras hidráulicas, sistemas de injeção de combustível e máquinas de combustão interna: superfície de contato de válvulas com revestimento de estelita, anéis de regulação de unidades turbogeradoras hidráulicas, pistões, eixo de comando de válvulas (eixo de cames), anéis de pistão, juntas universais de eixos cardan, partes de máquinas textéis.

b) *Recozimento de chapas finas:*

— Tratamento das extremidades de molas planas e helicoidais, alívio de tensões internas em soldas, recozimento localizado de seções de uma superfície onde podem ocorrer concentrações de tensões.

c) *Têmpera superficial com fusão na superfície:*

— Tratamento associado com mudança na rugosidade da superfície, não podendo ser empregado como operação final. Aumento da resistência ao desgaste de pinos de êmbolos (pinos de cruzetas), anéis reguladores de unidades turbogeradoras hidráulicas, eixos de manivelas, fusos de máquinas operatrizes, êmbolos de cilindros hidráulicos, guias, cames, polias, roldanas, gabaritos passa-não passa, superfícies de contato de selos metálicos, sede de válvulas, superfícies de desgaste rápido de partes feitas de ligas de alumínio e partes fabricadas pelo método de metalurgia do pó.

d) *Amorfização:*

— Aumento da resistência ao desgaste e características magnéticas de cabeças de gravadores. Aumento da resistência ao desgaste e resistência à corrosão de pontas de ferro de soldar, instrumentos médicos, turbina de gás e palhetas de compressores, partes e ferramentas empregadas em usinagem de precisão eletroquímica, superfícies internas de revestimentos em máquinas químicas e de polímeros. Preparação de materiais bi-metálicos.

e) *Superfície microligada:*

— Aumento da resistência à erosão e corrosão, tensões de vibração de palhetas de turbinas a gás de ligas leves. Aumento da resistência ao desgaste de pistões de máquinas de combustão interna feitos de liga de alumínio. Tratamento de molde para fundição sob pressão, ferramentas de prensar a quente, válvulas de admissão e escape, cabeçote de cilindros de motores, partes de turbinas a gás. Preparação de ferramentas baseadas em aços baixo-carbono.

f) *Enchimento (restauração):*

— Restauração de partes desgastadas de máquinas: eixos, semi-eixos de vagão de trem e guindastes, transportadores de rosca sem fim em máquinas de polímeros, cames, acento de válvulas, atuadores.

g) *Endurecimento com onda de choque:*

— Reforço de soldas em partes feitas de ligas de alumínio e titânio. Aumento da resistência ao desgaste e tensão de fadiga em palhetas de turbina a gás e compressores para bombeamento de gás natural, feitos em aço inox austenítico, ligas de titânio, ligas de alumínio; pinhão e partes de rolamentos de esferas, superfícies de trabalho de anéis raspadores em pistões feitos de ligas de alumínio, partes de ferramentas feitas de ligas duras.

5 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1 - Escolha do Material

O aço eleito para os experimentos foi o AISI-1045, com composição detalhada na tabela 4, que é classificado como aço médio carbono, classe essa para ser usada em condições de têmpera e revenimento. Este aço médio carbono é usualmente empregado em eixos, engrenagens, fusos, acoplamentos, virabrequins, trilhos e rodas de trem e peças forjadas.

Tab. 4 - Composição química do aço AISI - 1045.

	C	Mn	Pmax	Smax
	(% em peso)	(% em peso)	(% em peso)	(% em peso)
AISI-1045	0,43-0,50	0,60-0,90	0,040	0,050

O material foi adquirido no mercado na forma de uma barra cilíndrica de meia polegada de diâmetro fornecido na condição recozida..

5.2 - Preparação do Material para o Experimento

O material, na condição como recebido, foi cortado e faceado em torno, para a preparação das amostras (figura 18), nas seguintes dimensões ϕ 12,7 x 12 mm. Estas dimensões para a amostra foram escolhidas de modo que seu volume ($V_a = 1267 \text{ mm}^3$) pudesse ser considerado infinito em relação ao volume que é aquecido pelo pulso do laser ($V_l = 0,12 \text{ mm}^3$).

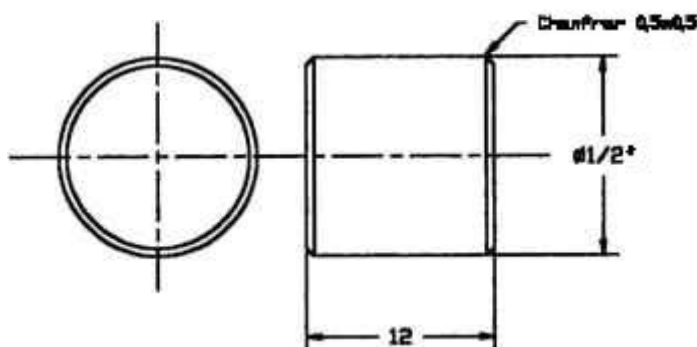


Fig. 18 - Forma e dimensões das amostras utilizadas no experimento.

As superfícies a serem irradiadas foram lixadas com lixa 400 que fornece uma rugosidade $R_a \approx 0,20 \mu\text{m}$. Esta condição de rugosidade foi adotada a partir de um estudo, feito neste trabalho, da influência da

rugosidade da superfície na absorção do feixe pelo material e a influência da rugosidade na medida de microdureza das amostras.

Para investigar a influência da rugosidade da superfície na absorção do feixe pelo material, amostras do aço AISI-1045 nas dimensões anteriormente descritas foram preparadas de modo a se obter superfícies com rugosidades diferentes por meio de polimento, lixamento (lixa: 180, 220, 320, 400, 600), torneamento e jateamento (jato de areia).

5.3 - Equipamentos Laser Utilizados

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados como fonte de radiação vários equipamentos laser. Uma descrição é apresentada a seguir.

Laser LXP-04, laser de neodímio vidro, pulsado, com energia de saída de até 6 J, duração de pulso de 120 μ s e frequência de até 3 Hz, construído no IPEN. Esse laser foi utilizado no experimento de investigação da influência do acabamento da superfície (rugosidade) na absorção do material da amostra. Na investigação do endurecimento da superfície, esse laser não foi utilizado, por não possuir ajuste da largura temporal do feixe. Essa largura, fixa em 120 μ s, está fora da faixa usual para endurecimento de superfície via laser, segundo a literatura [Kovalenco, 1988] e confirmado numa investigação preliminar realizada no início deste trabalho [Berretta, 1992].

Laser Spacerays, modelo 100, laser de rubi, com energia de saída de até 100 J, duração de pulso de 1 ms e frequência de 0,5 Hz. Esse laser também foi utilizado no experimento de investigação da influência do acabamento da superfície (rugosidade) na absorção do material da amostra. Na investigação do endurecimento da superfície, esse laser não foi utilizado, também, por não possuir ajuste da largura temporal do feixe. Essa largura, fixa em 1 ms, está fora da faixa usual para endurecimento de superfície via laser.

Laser Lasag, modelo 322, laser de Neodímio-YAG, com energia de saída de até 200 J, duração de pulso com variação contínua de 0,1 a 20 ms e frequência de até 100 Hz. Esse laser foi utilizado na investigação do endurecimento da superfície, pois sua versatilidade o torna uma ferramenta adequada aos experimentos de investigação do efeito dos parâmetros. Além disso, este laser está acoplado a uma máquina de controle numérico computadorizado com quatro eixos de movimento, o que facilita em muito o posicionamento e movimento da amostra.

5.4 - Procedimento Experimental para Medir a Absorção da Radiação Laser pela Superfície em Função do Acabamento

Inicialmente foi feito um estudo no intuito de se investigar o efeito do acabamento da superfície na absorção da radiação laser pelo material, tanto para o laser de neodímio como para o laser de rubi. A medida de absorção da energia da radiação laser (E_m) pelo material é uma medida indireta, que é resultado da diferença entre a energia da radiação que incide no material (E) e a energia da radiação refletida (E_{ref}).

$$E_m = E - E_{ref}$$

Assim, foram preparadas amostras do aço AISI-1045 nas dimensões $\phi 12,7 \times 12 \text{ mm}$ de modo a se obter superfícies com rugosidades diferentes, por meio de polimento, lixamento (lixa: 180, 220, 320, 400, 600), torneamento e jateamento (jato de areia), como indicado na tabela 5.

Tabela 5 - Rugosidade média (R_a) de superfícies com vários tipos de acabamentos.

Método	Polimento	Lixamento					Torneamento	Jateamento
	6 μm	600	400	320	220	180	-	-
$R_a(\mu\text{m})$	0,13	0,20	0,27	0,35	0,43	0,49	1,08	1,30

As medidas de energia da radiação refletida e energia de radiação espalhada pela superfície do material, foram realizadas em arranjos ópticos especialmente montados para este fim, tanto para o laser de neodímio LXP-04 (figura 19) como para o laser de rubi Spacerays (figura 20).

A energia da radiação que incide no material, foi aferida colocando-se um detetor calorimétrico, marca Scientech (modelo 373), no local do material (amostra) nos arranjos das figuras 19 e 20, como pode ser visto no arranjo da figura 21. Assim, aferiu-se a energia incidente na superfície ($E = 2 \text{ J}$), que foi monitorada antes e depois das medidas de energia da radiação refletida e energia da radiação espalhada. Este procedimento garante maior confiabilidade dos resultados, pois os lasers têm uma flutuação intrínseca na variação de energia de pulso para pulso.

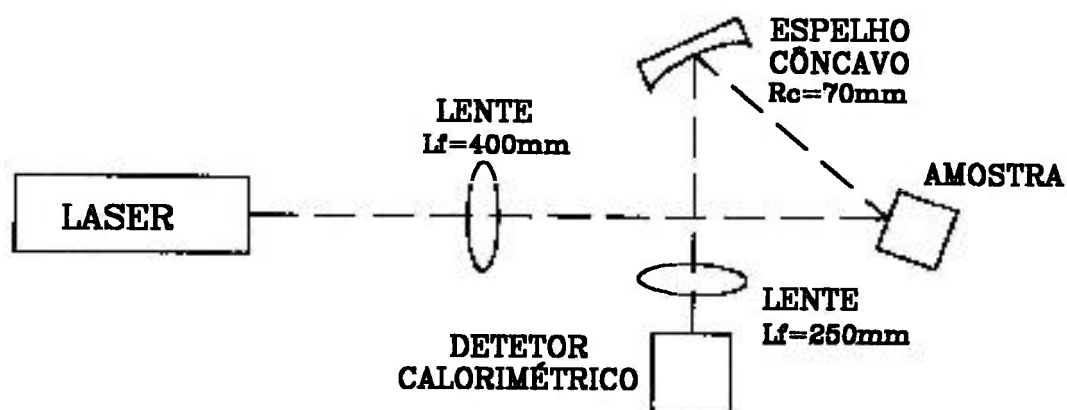


Fig.19 - Esquema da montagem para estudo da absorção em função do acabamento da superfície para o laser de rubi.

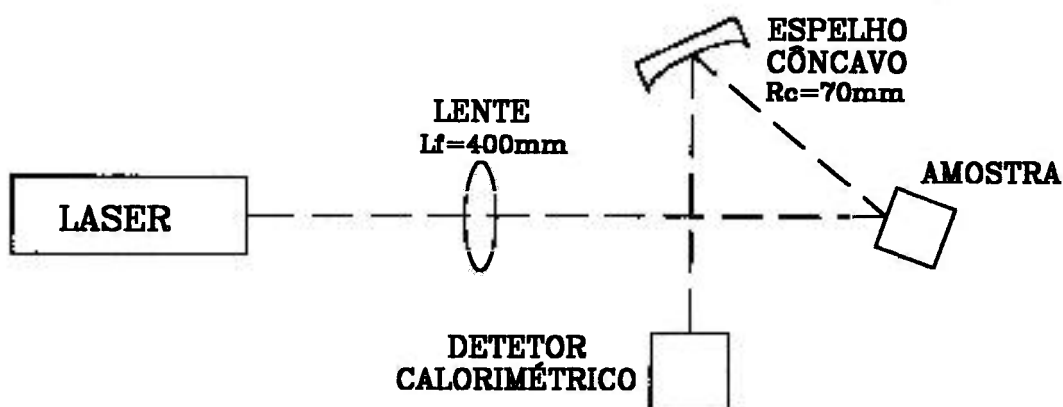


Fig.20 - Esquema da montagem para estudo da absorção em função do acabamento da superfície para o laser de neodímio.

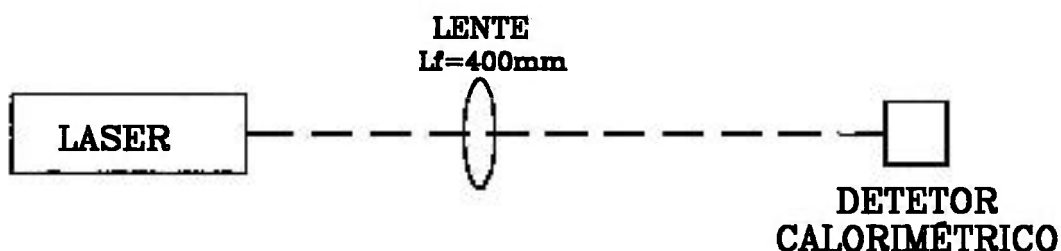


Fig.21 - Esquema da montagem para aferir a energia da radiação que está sendo incidida no material.

5.5 - Irradiação das Amostras

As amostras foram irradiadas incidindo-se o feixe laser em pontos bem definidos da superfície. Foi também utilizada uma superposição de pontos de irradiação de modo a simular uma trilha. A

figura 22 mostra uma representação esquemática da distribuição dos pontos de irradiação na superfície da amostra.

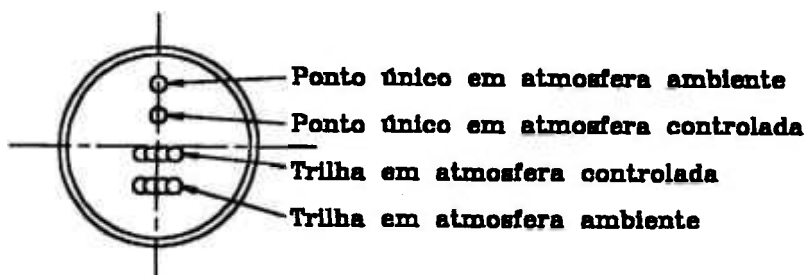


Fig.22 - Esquema de distribuição dos pontos de irradiação na superfície da amostra.

A investigação do endurecimento superficial foi feita utilizando-se o laser Lasag modelo 322.

De modo a estudar o efeito da radiação laser no endurecimento da superfície, os seguintes parâmetros foram investigados: densidade de energia, densidade de potência, diâmetro do feixe incidente na superfície e a atmosfera que envolve a área que está sendo irradiada. Para tanto, mais de uma centena de amostras foram utilizadas.

A avaliação dos efeitos de densidade de energia e de densidade de potência da radiação laser no endurecimento da superfície, foi feita em amostras irradiadas utilizando-se:

densidade de energia em cinco condições diferentes, dentro da faixa de $W_e=1,40\text{J/mm}^2$ até $W_e=3,25\text{J/mm}^2$,

densidade de potência em cinco condições diferentes, dentro da faixa de $W_p=150\text{W/mm}^2$ até $W_p=454\text{W/mm}^2$,

mantendo-se os demais parâmetros constantes, conforme sumarizado na tabela 6. São também incluídos na tabela 6 os valores de energia e do tempo de duração de pulso obtidos a partir dos valores de W_e , W_p e ϕ do feixe, utilizados no ajuste do equipamento.

A investigação da influência da atmosfera, que envolve a área que está sendo irradiada no endurecimento superficial, foi realizada em amostras irradiadas em presença de ar e em presença de argônio, para todas as condições da tabela 6.

As amostras irradiadas em presença de ar serão denominadas, neste trabalho, “amostras irradiadas em atmosfera ambiente” e as irradiadas em presença de argônio (soprado na superfície) serão denominadas “amostras irradiadas em atmosfera controlada”.

A investigação da influência do diâmetro do feixe que incide na superfície do material foi realizada utilizando-se amostras irradiadas com feixes de três diâmetros em atmosfera ambiente e em atmosfera

controlada, para as condições de densidade de energia e de densidade de potência que estão apresentadas na tabela 7.

Dessa maneira, acredita-se ser possível avaliar a influência de todos os parâmetros relevantes, isoladamente, um a um, no endurecimento de aços médio carbono, através da radiação do laser de neodímio.

5.6 - Caracterização do Material Irradiado

As amostras, após serem irradiadas foram caracterizadas por metalografia óptica a partir de macrografias da superfície e micrografias de cortes transversais dos pontos irradiados e cortes longitudinais às trilhas de pontos. Medidas de microdureza Vickers na superfície e na profundidade, foram utilizadas para a caracterização do endurecimento do material.

5.6.1- Macrografia da Superfície após Irradiação

A superfície das amostras submetidas à irradiação com laser foi observada em um estereoscópio. As modificações provocadas pelo laser na superfície, tais como, oxidação e alteração na rugosidade, puderam ser analisadas.

Para revelar a área afetada pelo calor no processo de irradiação com laser, as amostras submetidas à irradiação foram atacadas quimicamente com uma solução de nital a 2%.

O aspecto geral da superfície das amostras após a irradiação antes e após ataque químico foi documentado em fotomicrografias.

5.6.2- Microdureza da Superfície

Medidas de microdureza Vickers foram utilizadas para investigar as relações entre os vários parâmetros de feixe e o endurecimento resultante do material irradiado.

As medidas de microdureza foram feitas em um microdurômetro, marca Wolpert. O procedimento para se obter a medida na superfície das amostras, foi o seguinte: as medidas de microdureza foram executadas ao longo de uma linha que passa pelo centro do ponto onde incidiu a radiação laser, conforme ilustrado na figura 23. Todas as medidas de microdureza foram realizadas com uma carga aplicada de 100 g.

Tab. 6 -Parâmetros do laser para testes de tratamento térmico de superfície.

W_e (J/mm ²)	W_D (W/mm ²)	ϕ do feixe (mm)	Tempo (ms)	Energia (J)
1,40	450	1	3,1	1,10
1,40	375	1	3,7	1,10
1,40	300	1	4,7	1,10
1,40	225	1	6,2	1,10
1,40	150	1	9,3	1,10
1,85	450	1	4,1	1,45
1,85	375	1	4,9	1,45
1,85	300	1	6,2	1,45
1,85	225	1	8,2	1,45
1,85	150	1	12,3	1,45
2,36	450	1	5,2	1,85
2,36	375	1	6,3	1,85
2,36	300	1	7,9	1,85
2,36	225	1	10,5	1,85
2,36	150	1	15,7	1,85
2,80	450	1	6,2	2,20
2,80	375	1	7,5	2,20
2,80	300	1	9,3	2,20
2,80	225	1	12,4	2,20
2,80	150	1	18,7	2,20
3,25	450	1	7,2	2,55
3,25	375	1	8,7	2,55
3,25	300	1	10,8	2,55
3,25	225	1	14,4	2,55
3,25	163	1	20,0	2,55

Tab. 7 -Parâmetros do laser para testes de tratamento térmico de superfície.

W_e (J/mm ²)	W_D (W/mm ²)	ϕ do feixe (mm)	Tempo (ms)	Energia (J)
2,36	450	1,0	5,2	1,85
2,36	450	1,5	5,2	4,17
2,36	450	2,0	5,2	7,41
2,36	375	1,0	6,3	1,85
2,36	375	1,5	6,3	4,17
2,36	375	2,0	6,3	7,41
2,80	450	1,0	6,2	2,20
2,80	450	1,5	6,2	4,95
2,80	450	2,0	6,2	8,80
2,80	375	1,0	7,5	2,20
2,80	375	1,5	7,5	4,95
2,80	375	2,0	7,5	8,80
3,25	450	1,0	7,2	2,55
3,25	450	1,5	7,2	5,74
3,25	450	2,0	7,2	10,21
3,25	375	1,0	8,7	2,55
3,25	375	1,5	8,7	5,74
3,25	375	2,0	8,7	10,21

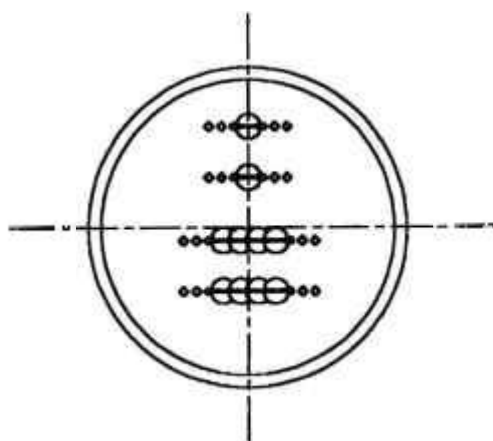


Fig. 23 - Esquema da superfície mostrando as posições onde foram feitas as medidas de microdureza.

5.6.3- Micrografia da Seção Transversal das Amostras Irradiadas

Para a micrografia de cortes transversais dos pontos irradiados e cortes longitudinais às trilhas de pontos, as amostras foram submetidas a uma sequência de cortes, conforme figura 24, em uma cortadora de disco diamantado de baixa rotação, marca Isomet. Após os cortes, foram seguidos os procedimentos metalográficos usuais para preparação de amostras. Sendo assim, as amostras foram embutidas em baquelite, lixadas desde a lixa 220 até a lixa 1200 metalográfica e polidas com óxido de cromo 1 μm . Após o polimento, as amostras foram atacadas com nital 2% para revelar a região de interesse no intuito de observá-la, analisá-la e fotografá-la em microscópio (marca Zeiss). Foram usados diversos aumentos, sendo cada um deles o mais adequado para cada amostra.

Por meio dessas micrografias, deseja-se observar o contorno e a profundidade das modificações ocorridas no material em função dos parâmetros da radiação laser incidente na superfície, além das mudanças de estrutura que ocorrem nessa região.

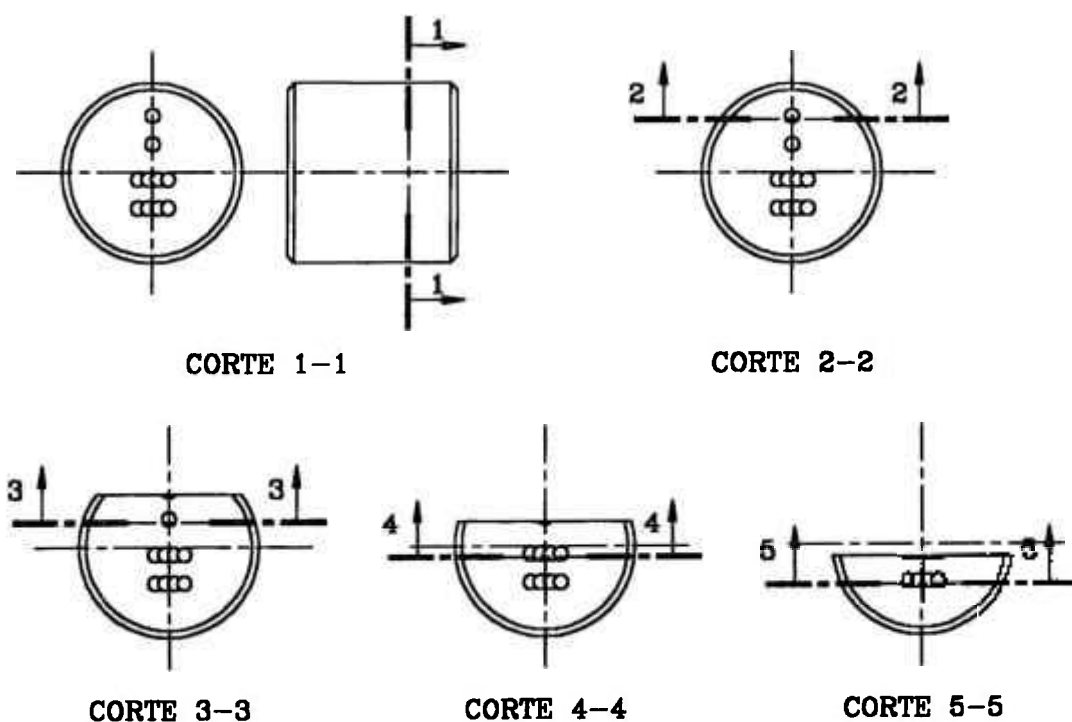


Fig.24 - Esquema da sequência de cortes para investigação da influência da radiação no material em função da profundidade, por micrografia e microdureza.

A observação do contorno e da profundidade das modificações ocorridas no material deve ser feita na seção que contém a linha de centro do pulso, onde esses dados atingem o maior valor. Mas a

obtenção precisa de uma seção desejada é muito difícil dentro dos procedimentos e equipamentos disponíveis para a análise, como por exemplo, fazer a marcação na superfície da amostra que passe pelo centro da região afetada pelo laser (na hipótese da marcação ser possível, a que distância desta linha deve ser feito o corte para que ao final das operações de lixamento e polimento, se esteja na seção desejada?). Assim, optou-se por fazer um corte a uma distância qualquer em relação ao centro da região afetada pela radiação laser, mas que estivesse dentro desta região, preparar a amostra por procedimento metalográfico descrito anteriormente e estudá-la obtendo-se todos os dados de interesse. Em seguida submeter a amostra a um desbaste de 100 μm e executar os procedimentos metalográficos de preparação de amostras novamente. Observar a seção no microscópio e medir se ocorreu aumento na profundidade da região afetada pela radiação laser. Se o aumento for confirmado, reestudar essa seção obtendo-se todos os dados de interesse novamente. Repetir o procedimento sucessivamente até que ocorra a diminuição na profundidade da região afetada pela radiação laser. Adotar a seção com a maior profundidade como sendo a seção que contém a linha de centro do pulso, que é a seção de interesse.

5.6.4- Microdureza da Seção Transversal das Amostras Irradiadas

5.6.4a - Microdureza dos Pontos Isolados

Na seções obtidas pelos cortes transversais dos pontos irradiados, também foram feitas medidas de microdureza para a investigação de sua variação em função da profundidade. Avaliou-se, também, através dessa medida de dureza em função da profundidade, as alterações sofridas pelo material submetido à ação da radiação laser nos diversos parâmetros mencionados na tabela 6 e 7.

O procedimento para obtenção dessas medidas é descrito a seguir. A máquina foi calibrada com uma carga de 100 g. As medidas de microdureza foram executadas na linha de centro da região afetada pelo laser. A primeira medida foi feita próxima a superfície, tomando-se os cuidados necessários para que o efeito de borda não influencie na medida, seguindo até a uma profundidade onde se observe que a dureza estabilizou, em valores do material de base que são conhecidos previamente, conforme a figura 25.

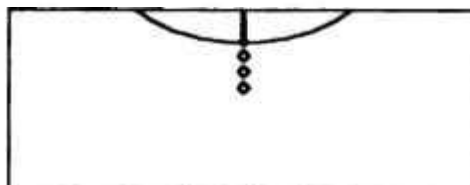


Fig.25 - Esquema de seção do corte transversal da amostra passando por um ponto de irradiação mostrando as posições onde foram feitas as medidas de microdureza em função da profundidade.

5.6.4b - Microdureza das Trilhas de Pontos

Na seção transversal da amostra ao longo da linha de centro da trilha de pontos foram feitas medidas de microdureza em uma linha paralela à superfície a uma profundidade de $50\ \mu\text{m}$, com uma carga de 100 g para se verificar a variação da dureza na trilha de pontos a uma dada profundidade, conforme a figura 26. Com essa medida poderá ser feita uma avaliação quanto a possibilidade de se fazer uma usinagem posterior no material tratado.

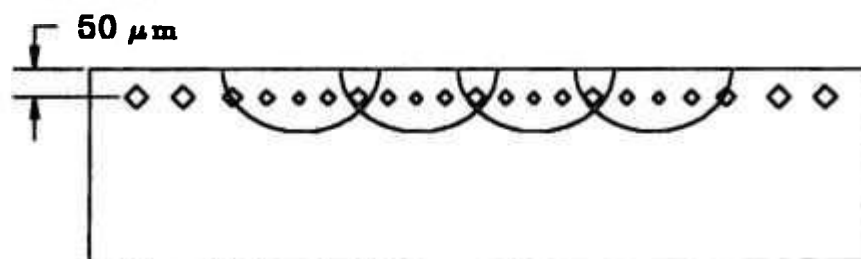


Fig.26 - Esquema de medida de microdureza em uma linha paralela à superfície a uma profundidade de $50\ \mu\text{m}$.

6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos diversos experimentos serão apresentados neste capítulo. Com esses resultados, listados a seguir, acredita-se ser possível uma avaliação das variações dos parâmetros estudados, quanto a sua influência para se obter endurecimento superficial por radiação laser.

6.1 - Absorção da Superfície em Função do Acabamento

No experimento para determinação da absorção da superfície em função de seu acabamento, investigou-se a variação da quantidade de energia refletida pela superfície em função da rugosidade média (R_a) dessa superfície, tanto para o laser de rubi, tabela 8, como para o laser de neodímio, tabela 9. De posse desses dados calculou-se a porcentagem de energia absorvida pelo material em função da rugosidade média da superfície e se colocou esses valores no gráfico da figura 27 para uma melhor visualização do resultado e melhor comparação entre eles.

Tab.8 - Tabela dos valores medidos e calculados no experimento para determinação da porcentagem de energia absorvida pelo material em função da rugosidade da superfície para o laser de rubi.

E (mJ)	R_a (μm)	E_{ref} (mJ)	E_m (mJ)	% E_m (%)
2000	0,13	1000	1000	50,0
2000	0,20	825	1175	58,8
2000	0,27	765	1235	61,8
2000	0,35	720	1280	64,0
2000	0,43	680	1320	66,0
2000	0,49	630	1370	68,5
2000	1,08	500	1500	75,0
2000	1,30	380	1620	81,0

Tab.9 - Tabela dos valores medidos e calculados no experimento para determinação da porcentagem de energia absorvida pelo material em função da rugosidade da superfície para o laser de neodímio.

E (mJ)	R _a (μ m)	E _{ref} (mJ)	E _m (mJ)	% E _a (%)
1800	0,13	1065	735	40,8
1900	0,20	1060	840	44,2
1900	0,27	975	925	48,7
1300	0,35	555	745	57,3
1700	0,43	730	970	57,1
1550	0,49	680	870	56,1
1350	1,08	430	920	68,1
1250	1,30	370	880	70,4

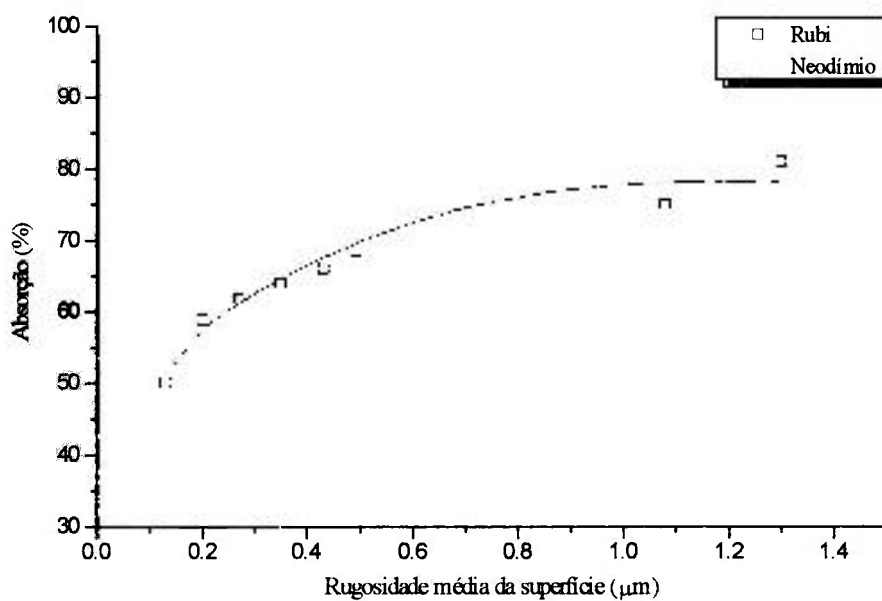


Fig.27 - Gráfico da porcentagem de energia da radiação laser absorvida pelo material em função da rugosidade média da superfície.

Observa-se no gráfico que a absorção da radiação laser pela superfície do material em função do acabamento da superfície tem o mesmo comportamento, tanto para o laser de rubi como para o laser de neodímio. Grande variação nos valores de absorção ocorre para valores de rugosidade média abaixo de $0,6 \mu\text{m}$. Para os valores acima de $1 \mu\text{m}$ de rugosidade média, tem-se os maiores valores de absorção, os quais tendem a um valor constante. Verifica-se que, para o laser de rubi, a absorção é aproximadamente 10% maior do que a observada para o laser de neodímio.

Assim, os valores de rugosidade acima de $1 \mu\text{m}$ são os melhores para se trabalhar, pois, se a absorção do material é maior, é necessário um feixe laser de menor energia e potência para se atingir o objetivo desejado. O laser a ser utilizado, portanto, pode ser de menor porte e, conseqüentemente, de menor custo. Isso é possível se o acabamento final da peça, que será usada em uma determinada aplicação, permitir uma rugosidade média acima de $1 \mu\text{m}$ ou o tratamento não ser a operação final dessa peça.

Para que não haja influência na medida de microdureza, uma superfície de baixa rugosidade é necessária. Portanto, neste trabalho as amostras foram preparadas com superfície de $R_a = 0,20 \mu\text{m}$ e o tratamento térmico de endurecimento superficial foi utilizado como operação final.

6.2 - Observação da Superfície Após Irradiação

O material submetido à irradiação com o feixe laser, segundo o procedimento esquematizado na figura 22, teve a sua superfície analisada com o uso de um estéreo microscópio. Nas figuras de número 28 a 32 são apresentadas macrografias da superfície das amostras irradiadas onde podem ser vistos os pontos e as trilhas de pontos com passo de $0,7\phi_f$, antes e depois de ataque químico com nital 2%.

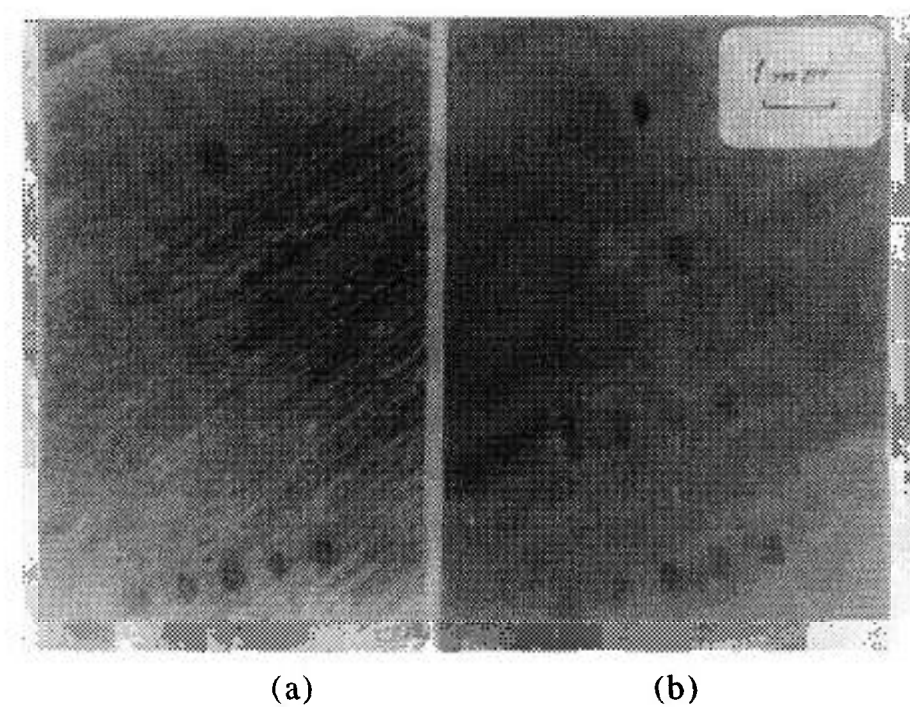


Fig.28 - Macrografia da superfície de amostra irradiada via laser com $We=1,40J/mm^2$, $Wp=300W/mm^2$ e $\phi_f=1mm$. (a) antes de ataque químico, (b) depois de ataque químico com nital 2%.

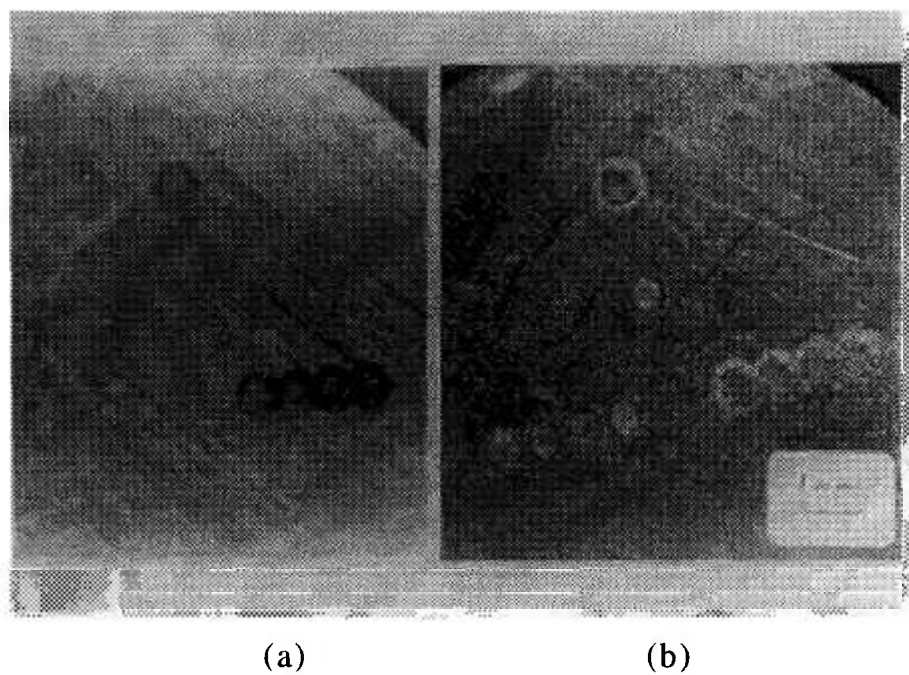


Fig.29 - Macrografia da superfície de amostra irradiada via laser com $We=2,80J/mm^2$, $Wp=225W/mm^2$ e $\phi_f=1mm$. (a) antes de ataque químico, (b) depois de ataque químico com nital 2%.

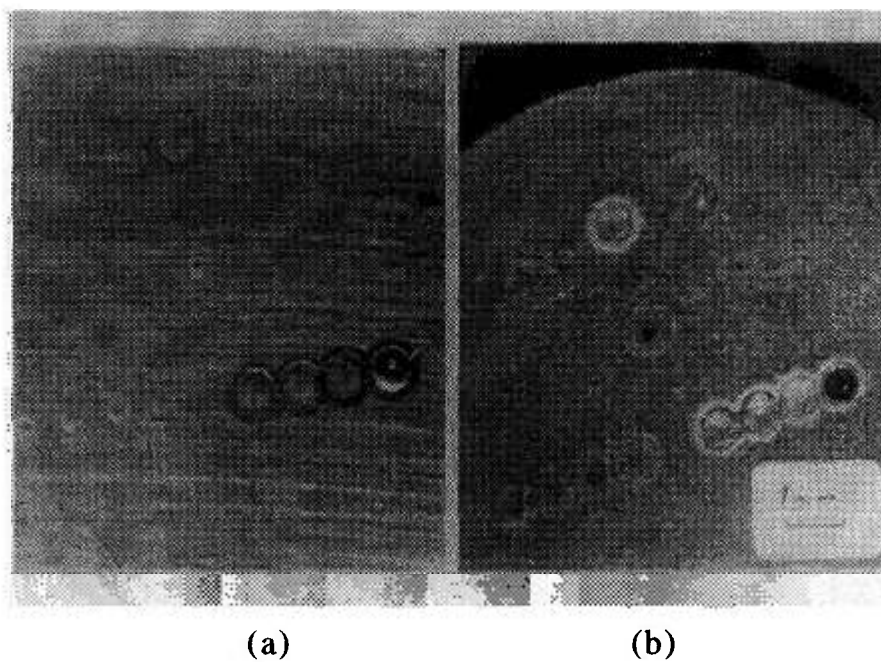


Fig.30 - Macrografia da superfície de amostra irradiada via laser com $We=2,80J/mm^2$, $Wp=450W/mm^2$ e $\phi_f=1mm$. (a) antes de ataque químico, (b) depois de ataque químico com nital 2%.

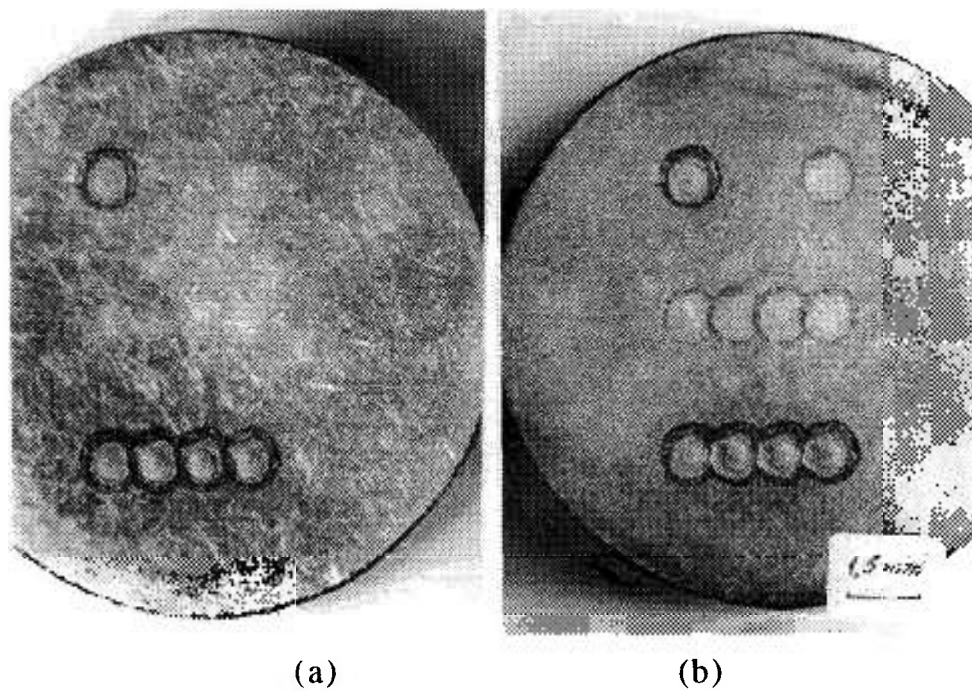


Fig.31 - Macrografia da superfície de amostra irradiada via laser com $We=2,80J/mm^2$, $Wp=225W/mm^2$ e $\phi_f=1,5mm$. (a) antes de ataque químico, (b) depois de ataque químico com nital 2%.

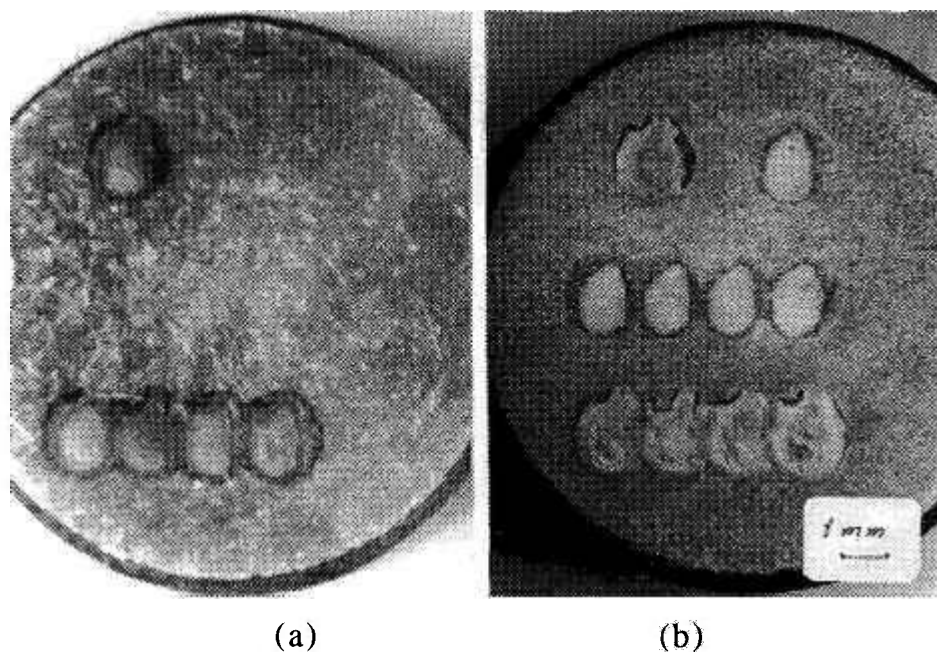


Fig.32 - Macrografia da superfície de amostra irradiada via laser com $We=2,80J/mm^2$, $Wp=450W/mm^2$ e $\phi_f=2mm$. (a) antes de ataque químico, (b) depois de ataque químico com nital 2%.

Uma análise cuidadosa das figuras permite verificar que nos pontos resultantes da incidência da radiação laser em atmosfera ambiente ocorre uma ligeira oxidação da amostra e uma pequena modificação na rugosidade da superfície. Por outro lado, tanto nos pontos isolados como nas trilhas de pontos, resultantes da irradiação laser em atmosfera controlada, não é observada oxidação local da amostra e a rugosidade da superfície somente é alterada quando a irradiação laser é feita com valores de densidade de energia e de potência elevados ($We>2,80J/mm^2$ e $Wp>450W/mm^2$).

De um modo geral, a observação de modificações na superfície da amostra, quando esta é irradiada sob atmosfera controlada, só é possível após o ataque químico com nital. O ataque químico delinea claramente a área modificada pelo calor, eliminando dúvidas quanto à real alteração da superfície e permitindo, se necessário, medidas mais precisas do diâmetro da área afetada.

Os resultados ilustrados nas figuras evidenciam claramente que todas as condições de irradiação empregadas neste trabalho afetam termicamente a superfície do material irradiado. Além disso, pela comparação das figuras 28 a 30 é possível constatar que as alterações na superfície aumentam em intensidade com o aumento das densidades de energia e potência da radiação laser empregada.

Observa-se também, que a variação do diâmetro do feixe laser incidente na superfície do material provoca o mesmo tipo de alterações na

superfície das amostras irradiadas, independente do diâmetro. A única variação verificada é a ocorrência de um aumento da área da região modificada pela radiação com o aumento do diâmetro do feixe laser incidente.

6.3 - Microdureza da Superfície na Região dos Pontos Isolados

Os resultados de microdureza obtidos são apresentados em função da posição na superfície da amostra nos gráficos das figuras de número 33 a 42, para as várias condições investigadas.

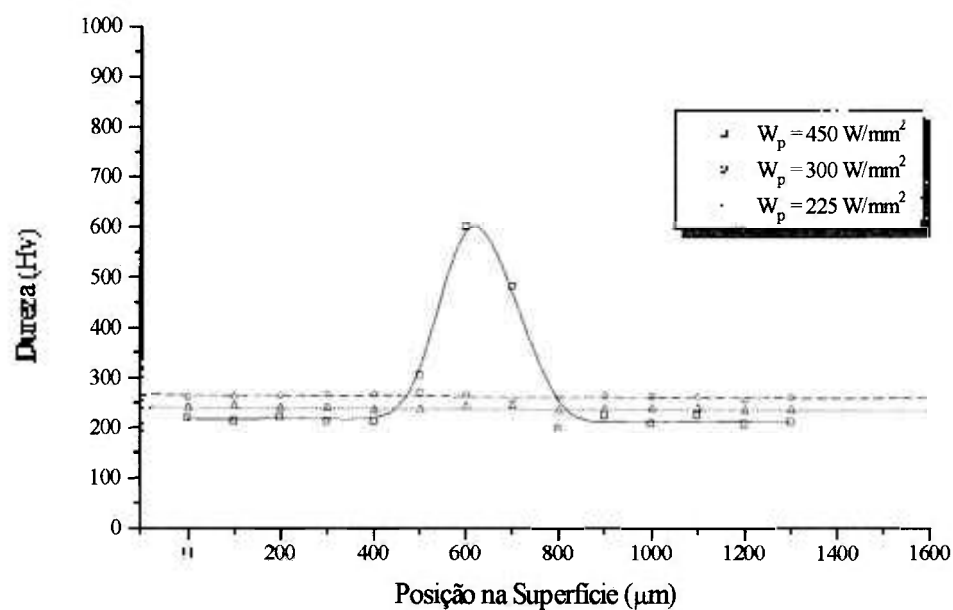


Fig.33 - Gráfico de microdureza da superfície na região do ponto isolado para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We = 1,40 \text{ J/mm}^2$, atmosfera ambiente e diâmetro do feixe de 1 mm.

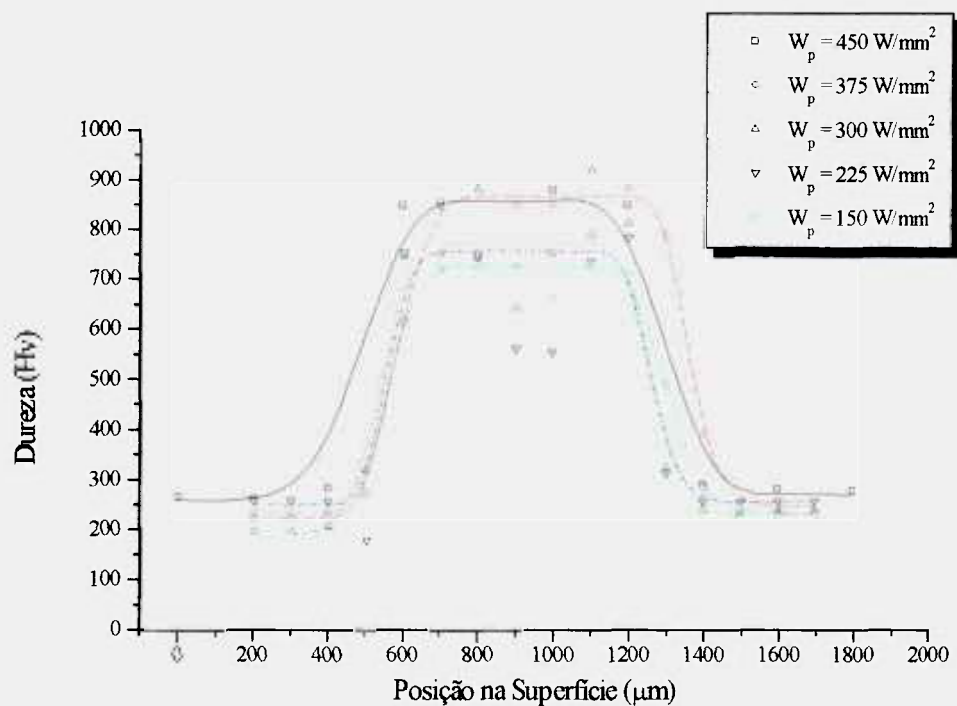


Fig. 34 - Gráfico de microdureza da superfície na região do ponto isolado para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We=2,36\text{J/mm}^2$, atmosfera ambiente e diâmetro do feixe de 1 mm.

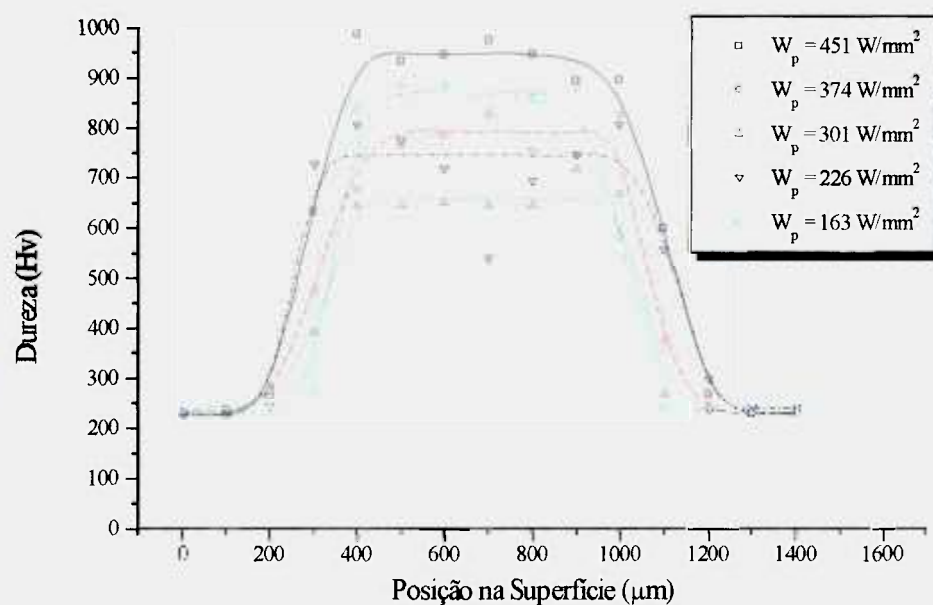


Fig. 35 - Gráfico de microdureza da superfície na região do ponto isolado para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We=3,25\text{J/mm}^2$, atmosfera ambiente e diâmetro do feixe de 1 mm.

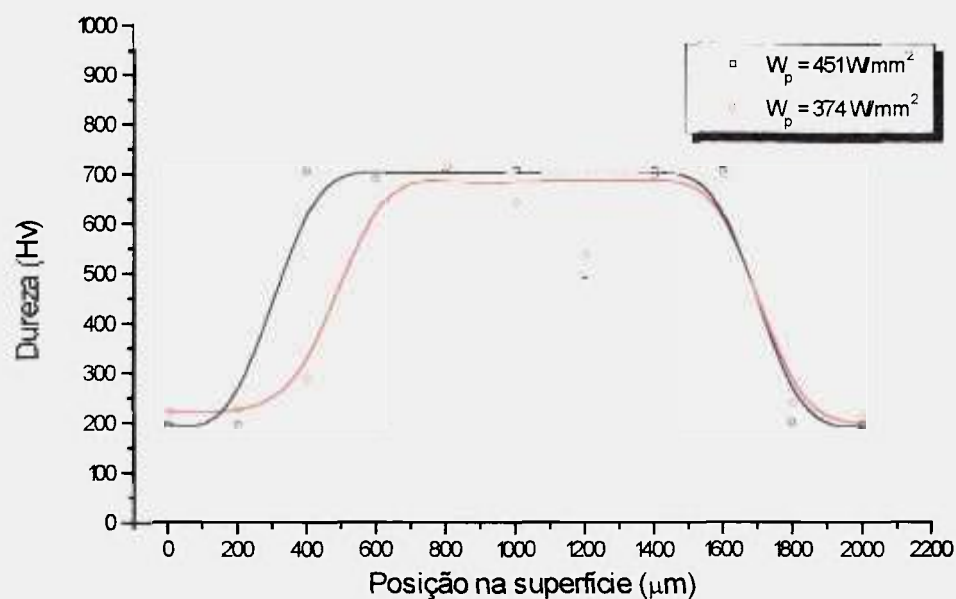


Fig. 36 - Gráfico de microdureza da superfície na região do ponto isolado para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We = 3,25 \text{ J/mm}^2$, atmosfera ambiente e diâmetro do feixe de 1,5 mm.

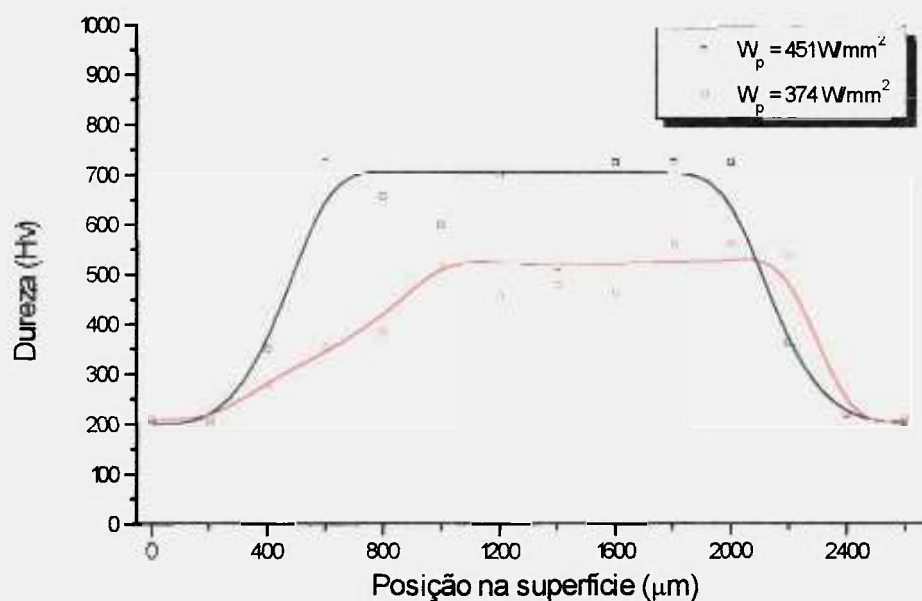


Fig. 37 - Gráfico de microdureza da superfície na região do ponto isolado para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We = 3,25 \text{ J/mm}^2$, atmosfera ambiente e diâmetro do feixe de 2 mm.

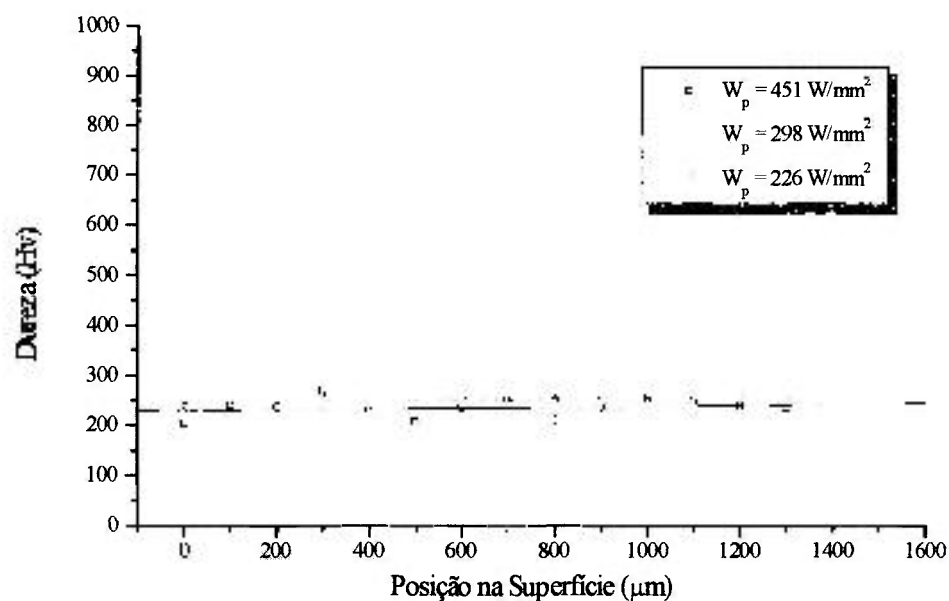


Fig.38 - Gráfico de microdureza da superfície na região do ponto isolado para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We=1,40\text{J/mm}^2$, atmosfera controlada e diâmetro do feixe de 1 mm.

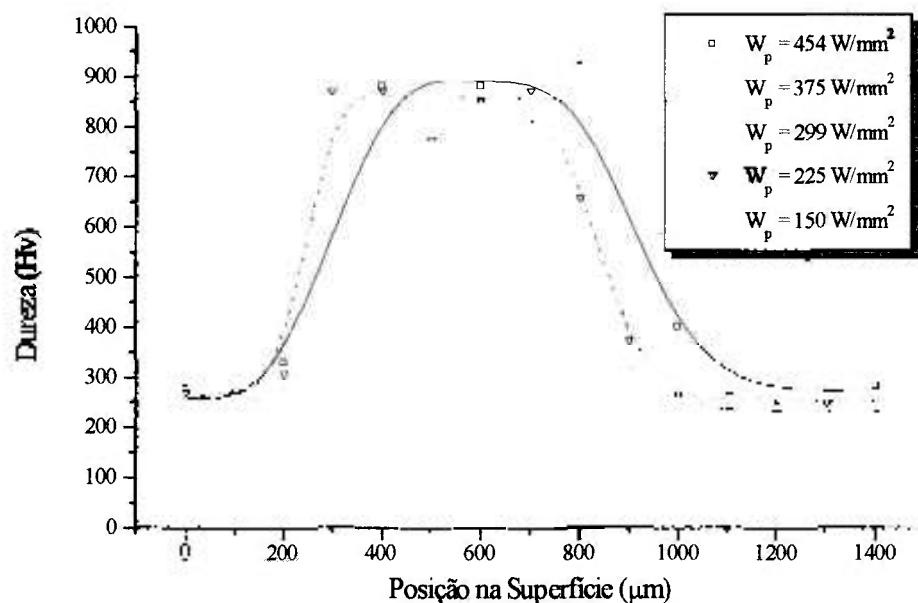


Fig.39 - Gráfico de microdureza da superfície na região do ponto isolado para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We=2,36\text{J/mm}^2$, atmosfera controlada e diâmetro do feixe de 1 mm.

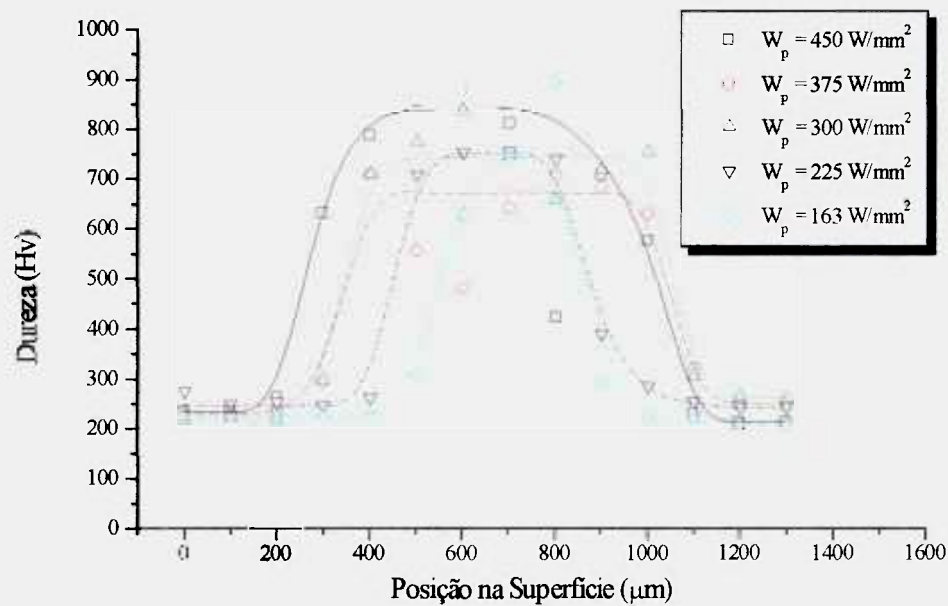


Fig.40 - Gráfico de microdureza da superfície na região do ponto isolado para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We=3,25\text{J/mm}^2$, atmosfera controlada e diâmetro do feixe de 1 mm.

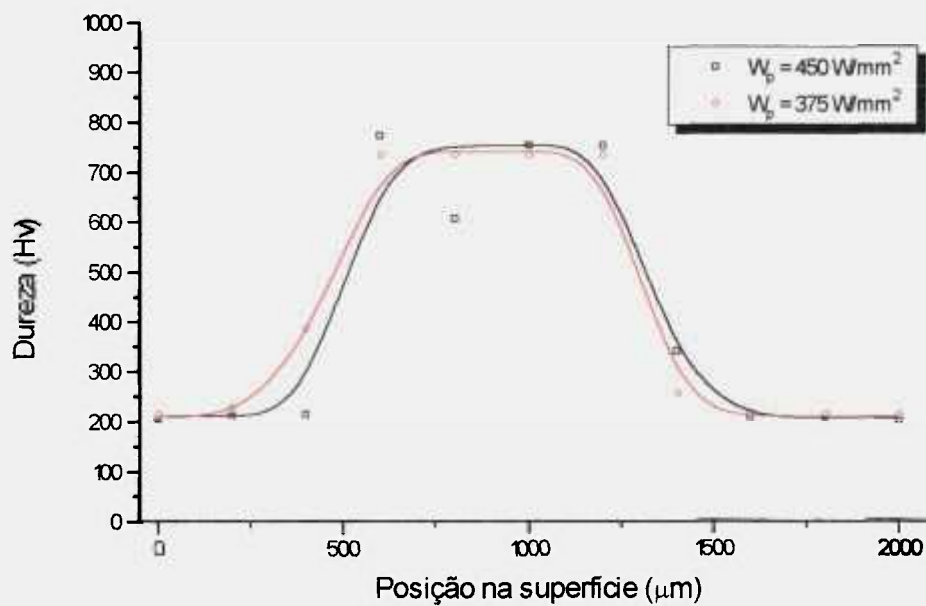


Fig.41 - Gráfico de microdureza da superfície na região do ponto isolado para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We=3,25\text{J/mm}^2$, atmosfera controlada e diâmetro do feixe de 1,5 mm.

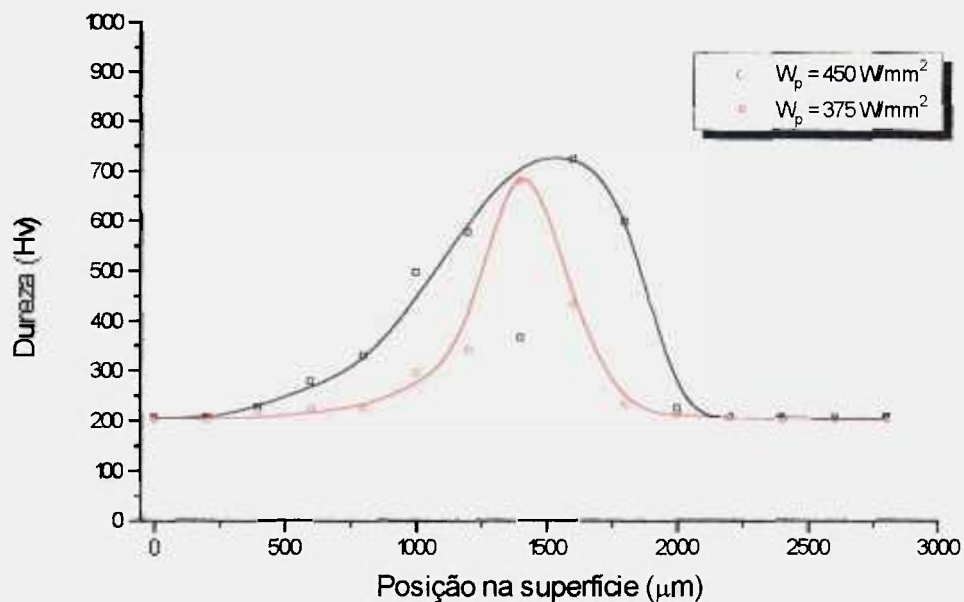


Fig.42 - Gráfico de microdureza da superfície na região do ponto isolado para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $W_e = 3,25 \text{ J/mm}^2$, atmosfera controlada e diâmetro do feixe de 2 mm.

A análise das figuras 33 a 42 permite verificar que, de um modo geral, a microdureza é máxima na zona central da região irradiada decrescendo rapidamente para os valores do material não irradiado na interface. Embora todas as condições de irradiação empregadas tenham provocado alterações térmicas na superfície da amostra, detectadas após ataque químico com nital 2%, nem sempre estas alterações são acompanhadas de endurecimento superficial do material. É o caso das irradiações com baixa densidade de energia ($W_e = 1,40 \text{ J/mm}^2$ e com densidade de potência W_p menor ou igual a 300 W/mm^2 em atmosfera ambiente e W_p menor ou igual a 450 W/mm^2 em atmosfera controlada) do feixe incidente, como pode ser concluído, por exemplo, da análise das figuras 28, 33 e 38.

Com o intuito de investigar a influência dos parâmetros de feixe na variação do diâmetro da região modificada pela radiação laser, utilizar-se-á o símbolo ϕ_p para indicar o diâmetro da região afetada pela radiação laser, definido como ilustrado na figura 43.

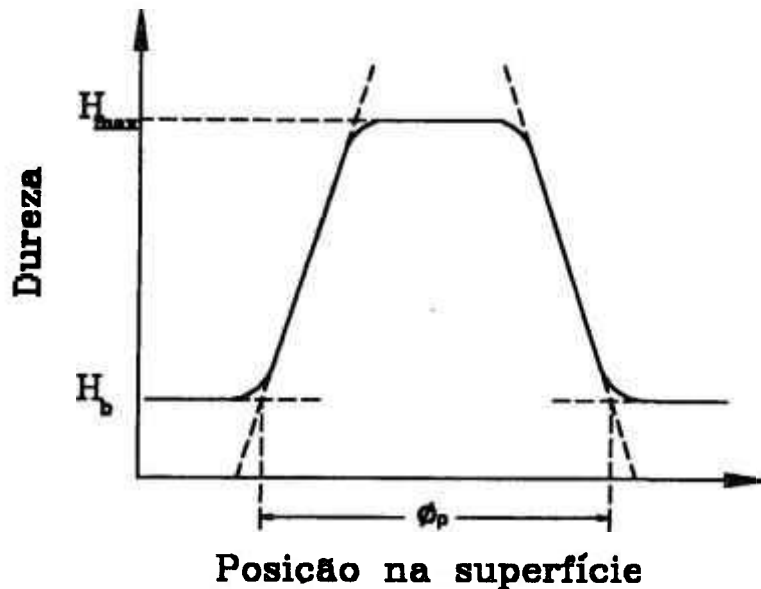


Fig.43 - Esquema para definição e medida do diâmetro da região afetada pela radiação laser. H_{max} dureza máxima na superfície, H_b dureza do material de base, ϕ_p diâmetro da região afetada pela radiação laser.

Utilizando este procedimento e os dados apresentados nas figuras de número 33 a 42, foram determinados os valores de ϕ_p para as várias condições de irradiação utilizadas. Os valores da razão ϕ_p/ϕ_f , onde ϕ_f é o diâmetro do feixe laser incidente, são apresentados em função da densidade de energia nas figuras 44 e 45, para as várias condições de densidade de potência e para as duas condições de atmosfera empregadas. A análise destes resultados permite verificar que, em geral:

—o diâmetro do feixe incidente não garante que a área afetada pela radiação laser, que tem variação dos valores de dureza, tenha o mesmo diâmetro que o feixe, pois o diâmetro dessa área sofre influência de todos os outros parâmetros.

—a razão ϕ_p/ϕ_f , cresce com o aumento da densidade de energia atingindo um valor máximo e constante.

—quanto maior for a densidade de potência, maior será a razão ϕ_p/ϕ_f , ou seja, o diâmetro da região afetada pela radiação mais se aproximará do diâmetro do feixe incidente na superfície.

—a razão ϕ_p/ϕ_f é maior em atmosfera ambiente do que em atmosfera controlada. Nesta atmosfera, os valores de energia, para darem início à formação de uma área com modificações no material, são maiores do que em atmosfera ambiente. Isso acontece porque ocorre oxidação da superfície durante a interação do feixe com o material em atmosfera ambiente, e consequentemente há o aumento da absorção da radiação pela superfície do material.

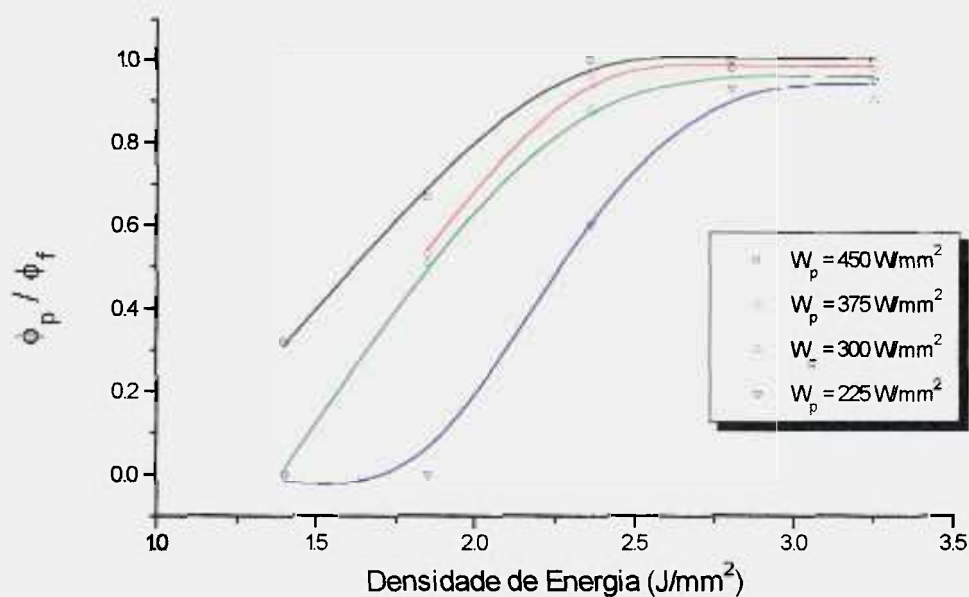


Fig.44 - Gráfico da variação do diâmetro da região afetada pela radiação laser em relação ao diâmetro do feixe laser (ϕ_p / ϕ_f) em função da densidade de energia, para diversas densidades de potência, em atmosfera ambiente.

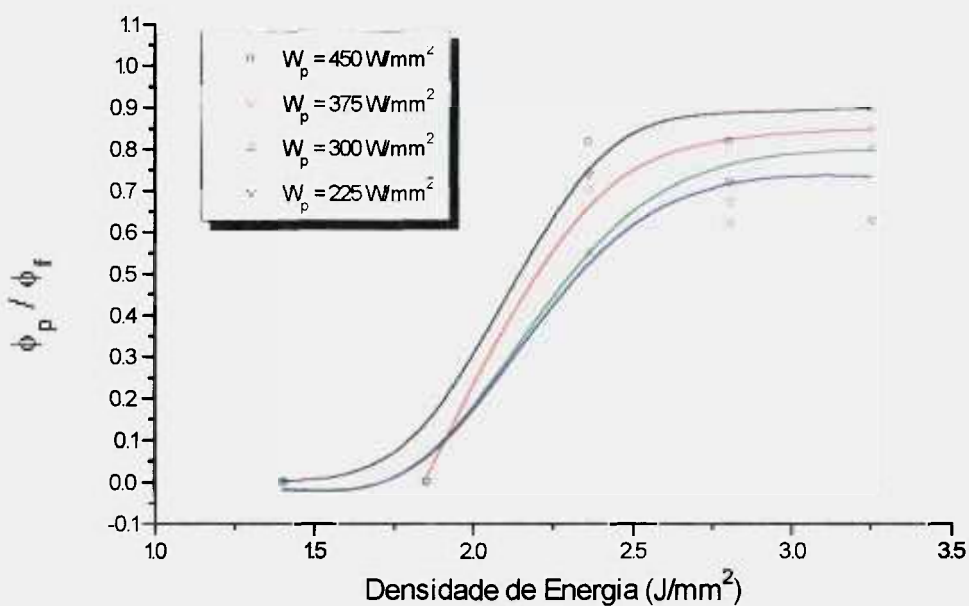


Fig.45 - Gráfico da variação do diâmetro da região afetada pela radiação laser em relação ao diâmetro do feixe laser (ϕ_p / ϕ_f) em função da densidade de energia, para diversas densidades de potência, em atmosfera controlada.

Para melhor observar as alterações de dureza nas amostras irradiadas, foram construídos gráficos da dureza máxima, obtida a partir das figuras de 33 a 42, em função da densidade de energia, para as diversas densidades de potência e para os dois tipos de atmosfera utilizadas. Estes resultados estão ilustrados nas figuras 46 e 47.

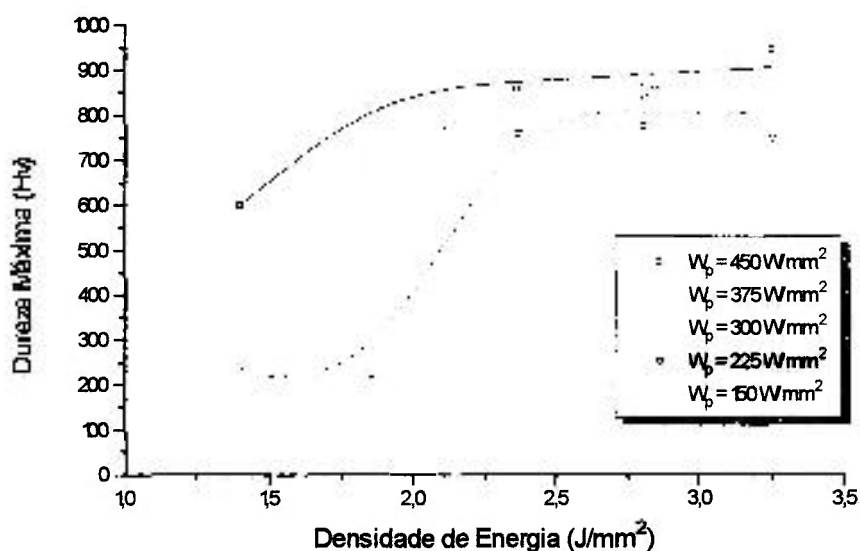


Fig. 46 - Gráfico da variação da dureza máxima da região afetada pela radiação laser em função da densidade de potência, para diversas densidades de energia, em atmosfera ambiente.

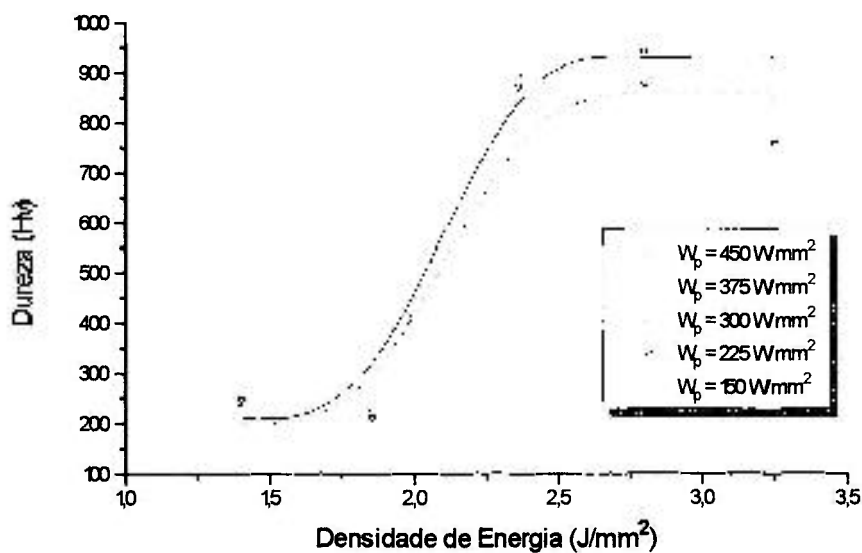


Fig. 47 - Gráfico da variação da dureza máxima da região afetada pela radiação laser em função da densidade de potência, para diversas densidades de energia, em atmosfera controlada.

Na figura 47 observa-se que a densidade de energia tem um valor mínimo para que ocorra a transformação de fase do material e conseqüentemente o aumento de dureza. Além disso, nota-se que a partir da energia que provoca a transformação de fase, a dureza máxima sofre pouca influência dos parâmetros de irradiação, tanto da densidade de energia como da densidade de potência, tendo seus valores uma faixa entre 750 e 850 HV.

A atmosfera que envolve a região de irradiação influencia no valor mínimo da densidade de energia para que ocorra a transformação de fase. Quando a irradiação é feita em atmosfera ambiente os valores são menores do que na irradiação em atmosfera controlada, isto explica-se devido ao aumento da absorção da radiação laser pela oxidação que ocorre quando se trabalha em atmosfera ambiente.

6.4 - Metalografia da Seção Transversal na Região do Ponto Isolado

As seções transversais passando pelo centro dos pontos isolados foram analisadas em um microscópio metalográfico. Nas figuras de número 48 a 55 são apresentadas micrografias típicas destas seções.

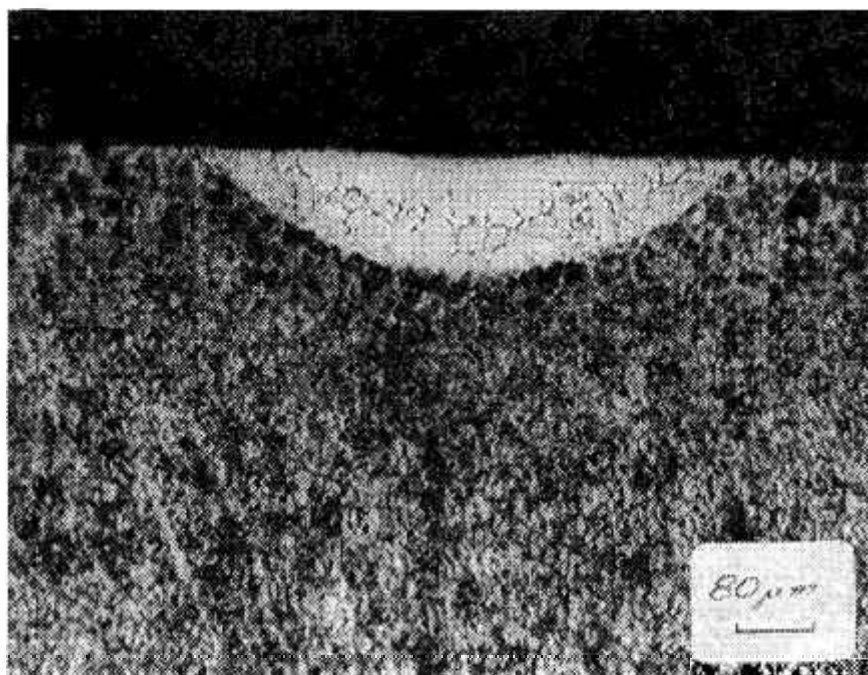


Fig.48 - Micrografia de corte transversal do ponto de irradiação via laser em atmosfera ambiente, com $We=2,36J/mm^2$, $Wp=150W/mm^2$ e $\phi_f=1mm$, ataque de nital 2%.

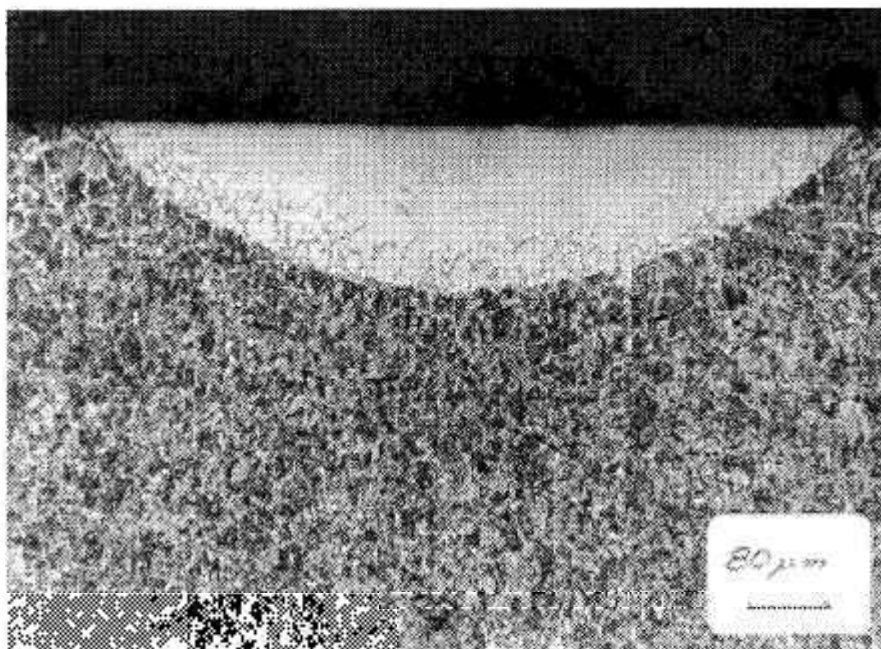


Fig.49 - Micrografia de corte transversal do ponto de irradiação via laser em atmosfera ambiente, com $We=3,25\text{J/mm}^2$, $Wp=375\text{W/mm}^2$ e $\phi_f=1\text{mm}$, ataque de nital 2%.

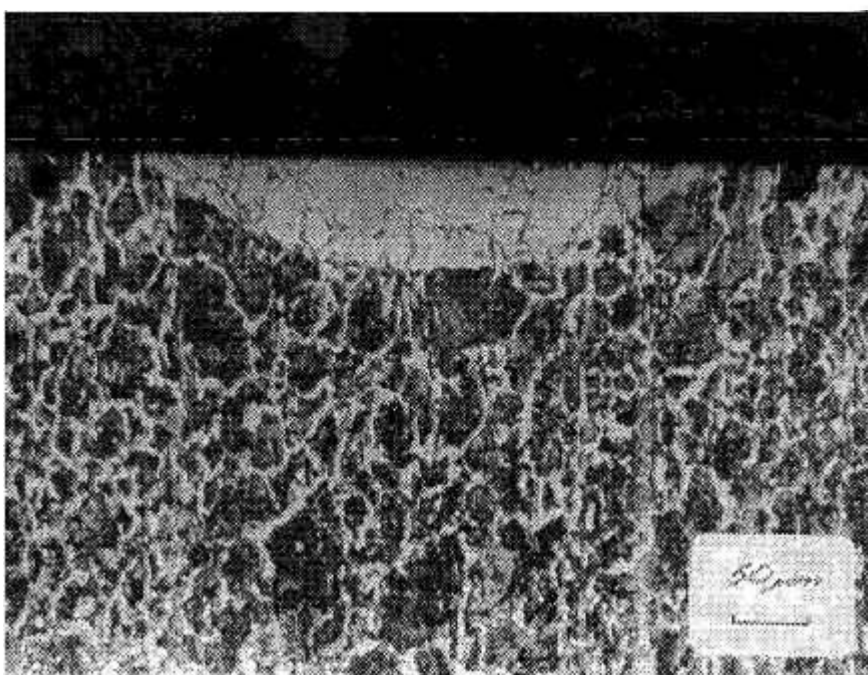


Fig.50 - Micrografia de corte transversal do ponto de irradiação via laser em atmosfera controlada, com $We=2,36\text{J/mm}^2$, $Wp=225\text{W/mm}^2$ e $\phi_f=1\text{mm}$, ataque de nital 2%.

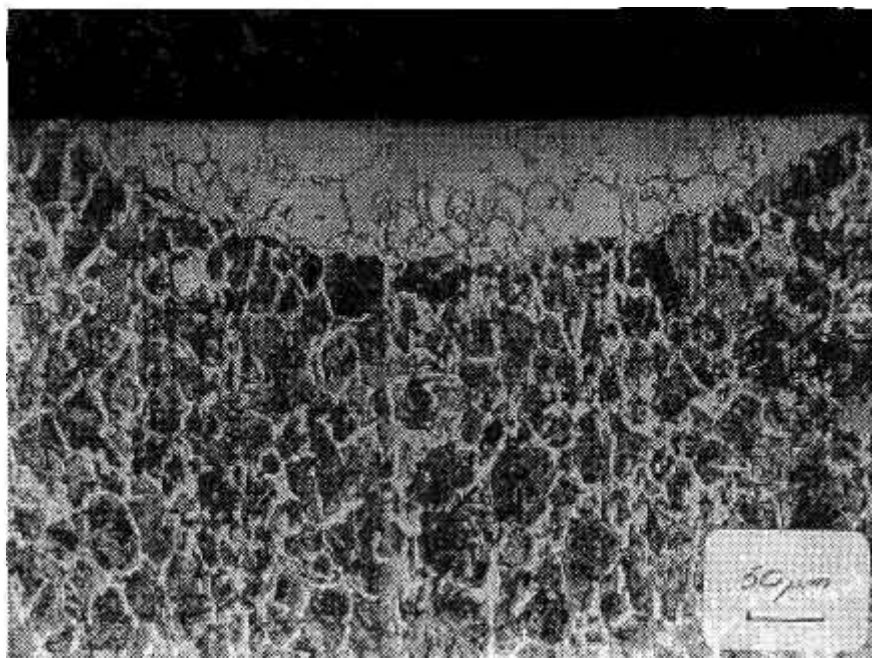


Fig.51 - Micrografia de corte transversal do ponto de irradiação via laser em atmosfera controlada, com $We=3,25J/mm^2$, $Wp=300W/mm^2$ e $\phi_f=1mm$, ataque de nital 2%.



Fig.52 - Micrografia de corte transversal do ponto de irradiação via laser em atmosfera ambiente, com $We=3,25J/mm^2$, $Wp=375W/mm^2$ e $\phi_f=1,5mm$, ataque de nital 2%.

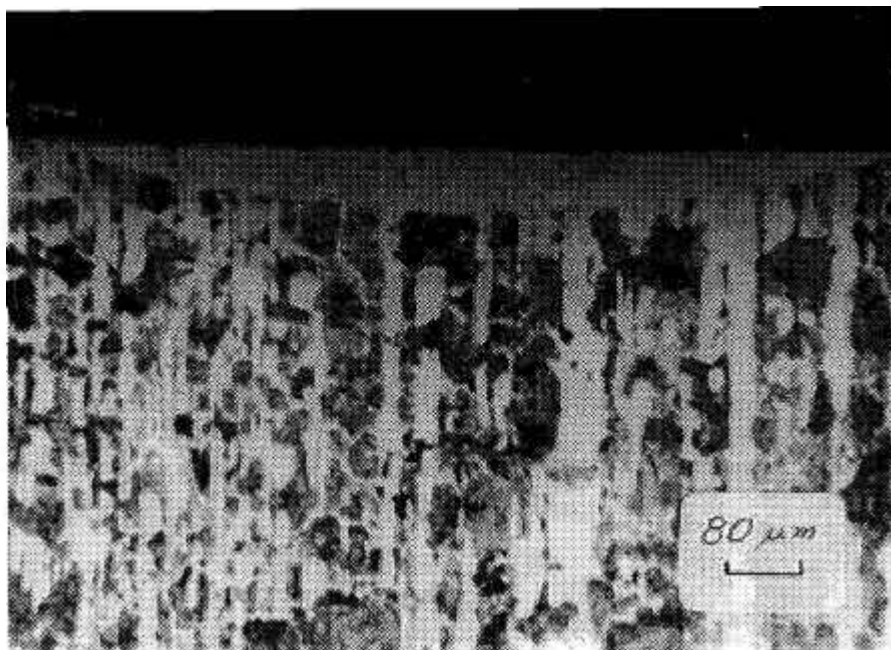


Fig.53 - Micrografia de corte transversal do ponto de irradiação via laser em atmosfera controlada, com $We=3,25J/mm^2$, $Wp=300W/mm^2$ e $\phi_f= 1,5mm$, ataque de nital 2%.

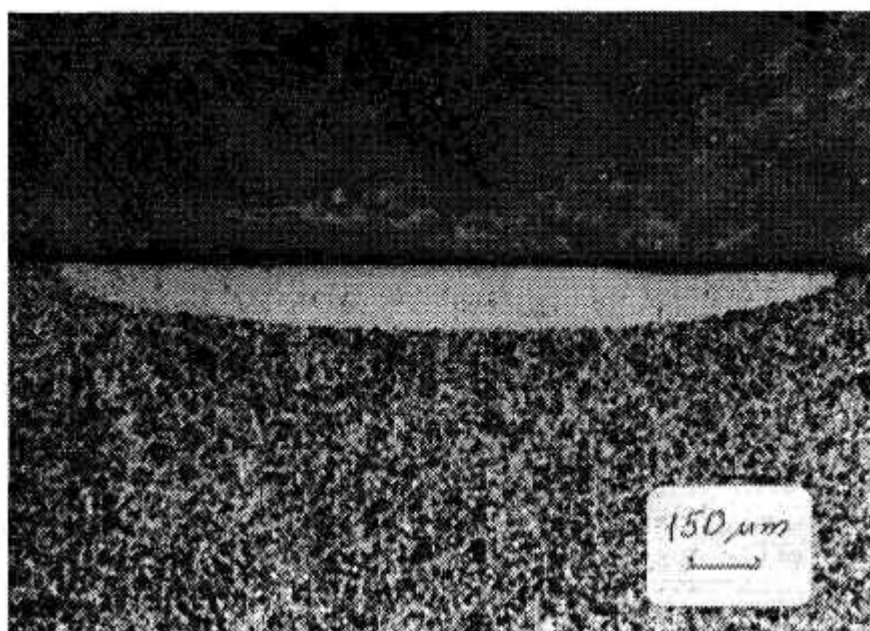


Fig.54 - Micrografia de corte transversal do ponto de irradiação via laser em atmosfera ambiente, com $We=3,25J/mm^2$, $Wp=375W/mm^2$ e $\phi_f= 2mm$, ataque de nital 2%.

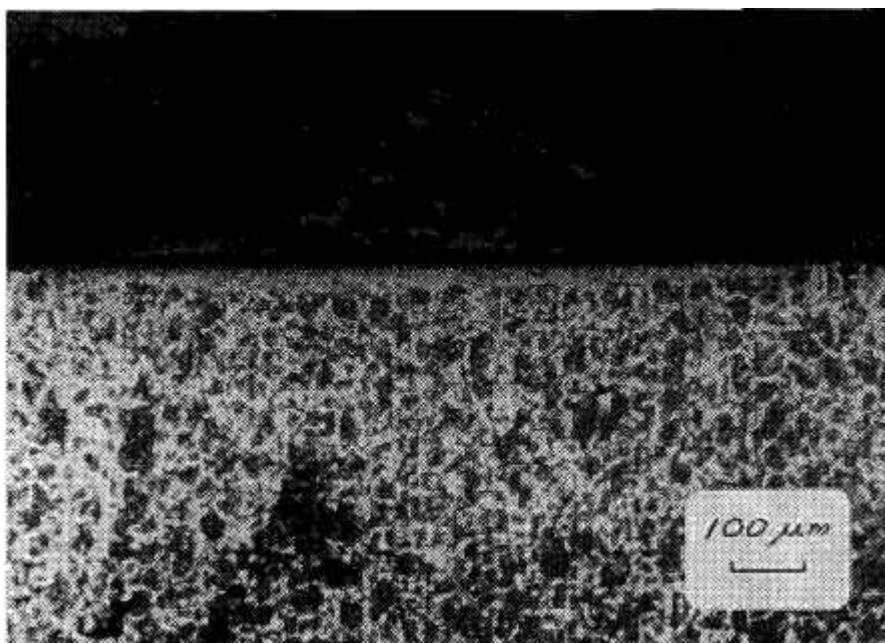


Fig.55 - Micrografia de corte transversal do ponto de irradiação via laser em atmosfera controlada, com $We=3,25J/mm^2$, $Wp=300W/mm^2$ e $\phi_f= 2mm$, ataque de nital 2%.

Verifica-se nas figuras de 48 a 55 que não é possível identificar a microestrutura que constitui a região afetada pelo laser pelo método de metalografia óptica utilizado. Somente o contorno da região afetada pela radiação laser onde ocorreu modificação na estrutura do material e a profundidade atingida por esta região, para os diversos parâmetros de irradiação a laser, são identificados.

Nota-se também nessas micrografias que as dimensões da região modificada, tanto o diâmetro como a profundidade, aumentam com o aumento da densidade de energia e potência da radiação laser incidente.

Quanto à influência da atmosfera que envolve o local onde o feixe laser está sendo incidido, observa-se nas fotos que as regiões modificadas por uma mesma radiação laser tem dimensões bem maiores em atmosfera ambiente do que em atmosfera controlada.

6.4.1 - Microestrutura da Região Alterada pela Radiação Laser

O aço AISI 1045, contendo 0,45% em massa de Carbono é um aço hipoeutectóide. No estado inicial, recozido, sua estrutura é caracterizada por uma perlita lamelar fina e ferrita. Quando o aço é submetido a uma irradiação com laser, uma zona afetada pelo calor na forma de uma concha se estabelece no material. Na figura 56 é apresentada uma micrografia típica da seção transversal da região

submetida a um pulso laser com densidade de energia $3,25 \text{ J/mm}^2$ e densidade de potência 375 W/mm^2 . Nota-se claramente na figura a zona afetada pela irradiação com o feixe laser (região clara) tendo como fundo o material não afetado. De um modo geral a microestrutura da seção transversal do material irradiado sob outras condições de densidade de potência e densidade de energia, apresenta características semelhantes às observadas na figura 56, como foi apresentado anteriormente. De modo a melhor ilustrar o que ocorre após a irradiação com laser, uma ampliação da região delimitada pelo retângulo na figura 56 é apresentada na figura 57. Também, na figura 58, são apresentadas micrografias resultantes da análise desta mesma área em um microscópio eletrônico de varredura.

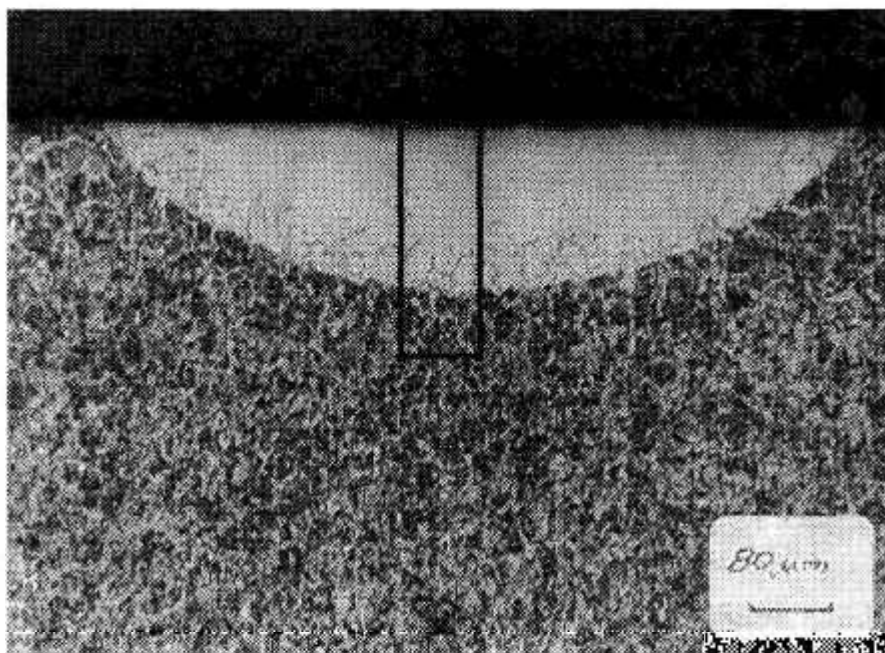


Fig.56 - Micrografia de corte transversal do ponto de irradiação via laser em atmosfera ambiente, com $We=3,25 \text{ J/mm}^2$, $Wp=375 \text{ W/mm}^2$ e $\phi_f=1 \text{ mm}$, ataque de nital 2%. Observa-se uma região delimitada por um retângulo, que será observada com uma maior ampliação para ilustrar melhor o que ocorre após a irradiação com laser.

A análise, dos resultados apresentados nas figuras 57 e 58, permite verificar que:

— a zona afetada pelo laser é constituída de duas regiões, notadas A e B nas figuras. A região A, próxima à superfície da amostra é uma região branca, uniforme, caracterizada pela presença de uma martensita extremamente fina, com dureza na faixa de 700 a 900 HV. O elevado refinamento da estrutura martensítica presente na amostra, não permite sua elucidação em microscópio óptico. Já nas micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da superfície, atacada com o reagente de Villela, é possível se observar a presença de finas agulhas de

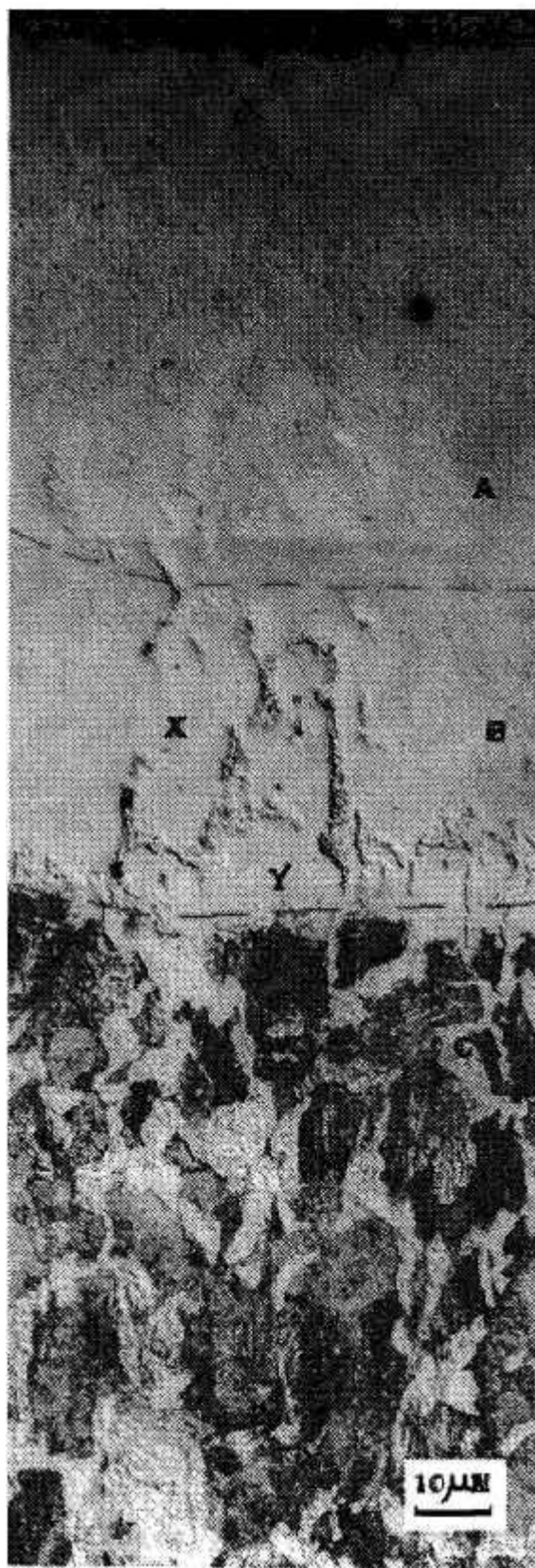


Fig.57 - Micrografia óptica da região delimitada por um retângulo na figura 56 com uma maior ampliação para ilustrar melhor o que ocorre após a irradiação com laser.

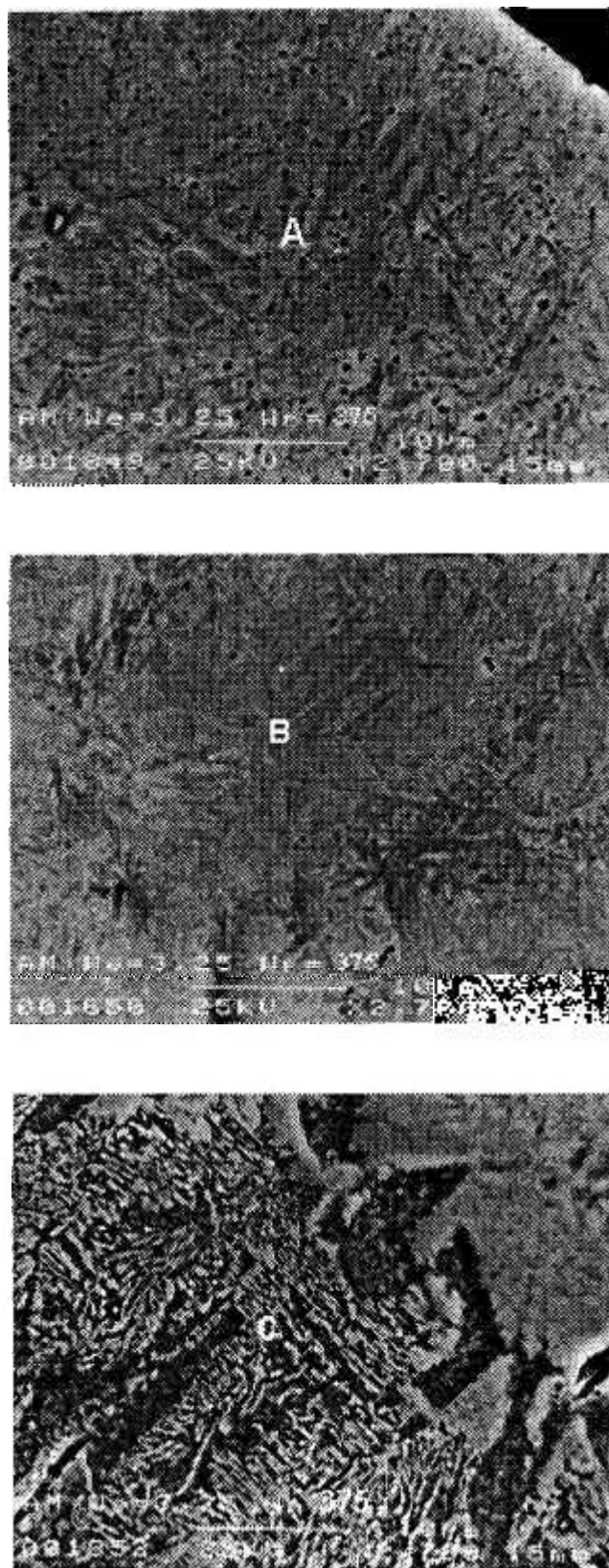
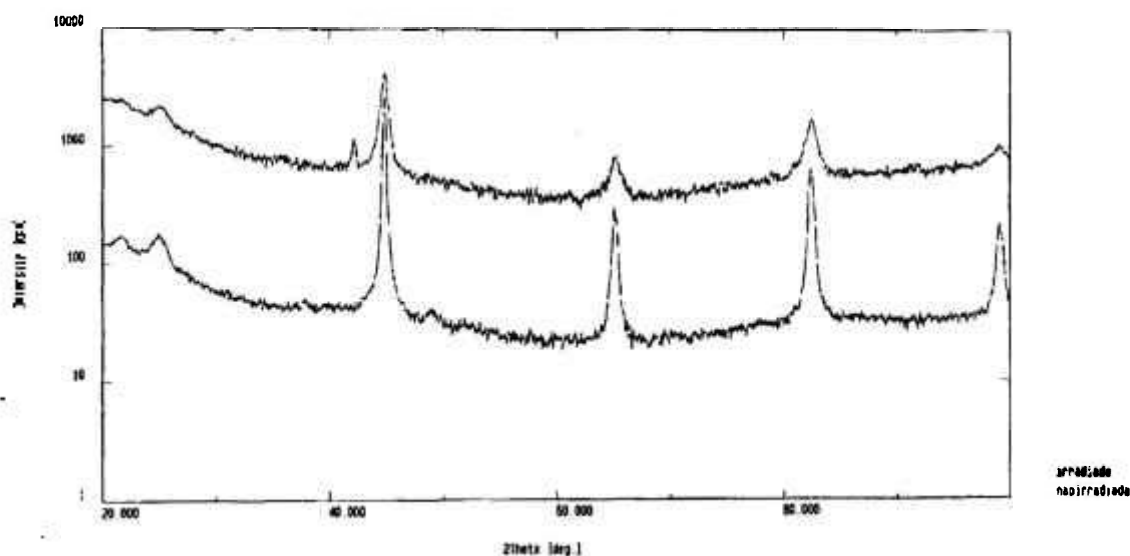


Fig.58 - Micrografia eletrônica de varredura da região delimitada por um retângulo na figura 56 com uma maior ampliação para ilustrar melhor o que ocorre após a irradiação com laser.

martensita, embora não muito claramente delineadas (figura 58). Uma confirmação da presença da martensita foi tentada através da análise por difratometria de raios X da área irradiada. O resultado dessa análise é apresentado na figura 59. Os difratogramas obtidos para as amostras, irradiada e não irradiada, contém apenas as raia características da estrutura cúbica de corpo centrado do ferro (Ferro α - Ferrita). As raia da cementita não são observáveis devido ao espaçamento das lamelas e à baixa fração volumétrica desta fase. Além disso, segundo Kurdjumow, a relação axial do reticulado tetragonal da martensita presente no aço AISI 1045, é $c/a = 1 + 0,0467 \cdot (\%C) \cong 1$, o que implica, praticamente, na igualdade entre os difratogramas da martensita e da ferrita. Entretanto, verifica-se um grande alargamento dos picos de difração (vide FWHM da figura 59), fato este que constitui uma clara indicação da existência de uma martensita altamente refinada.



Amostra	Não Irradiada					Irradiada				
Pico n°	2 θ	FWHM	d	I/I ₀	(hkl)	2 θ	FWHM	d	I/I ₀	(hkl)
1	44,720	0,212	2,0248	100	(110)	44,760	0,506	2,0231	100	(110)
2	65,010	0,318	1,4334	10	(200)	65,090	0,753	1,4319	11	(200)
3	82,330	0,318	1,1702	25	(211)	82,410	0,565	1,1693	32	(211)
4	98,940	0,212	1,0134	8	(220)	99,050	0,447	1,0126	7	(220)

Fig.59 - Difratograma de raio-X de amostras do aço AISI 1045 antes e depois de irradiação com laser. Feixe de raio-X: Cu K-alpha 1 / 40 kV / 30 mA.

— a região B, mais profunda, é caracterizada pela presença de ferrita proeutetóide não dissolvida. A perlita inicialmente presente é dissolvida pelo efeito do calor resultando numa martensita bastante refinada, na região mais próxima à superfície (notado X na figura 57). Pode-se notar na figura, que alguns grãos da perlita inicial contém tanto martensita como perlita (notado Y na figura 57) ilustrando uma transformação incompleta. Nesta região de transição, a dureza do material decresce gradualmente do valor de aproximadamente 800 HV, para o valor da dureza do material recozido 200 HV. Esta região de transição, ocupa de 20% a 30% do volume da zona afetada pelo calor.

— a região C corresponde ao material de base cuja microestrutura se caracteriza basicamente pela presença da ferrita proeutectóide e de uma perlita constituída de finas lamelas de cementita numa matriz de ferrita.

A explicação das alterações ocorridas na microestrutura do material irradiado com laser pressupõe o conhecimento da distribuição de temperatura, no espaço e tempo, imediatamente após a incidência do feixe. Os estudos teóricos e experimentais do estado de temperatura da região do material irradiado com laser e as alterações de microestrutura associadas [Arecchi, 1972; Carslaw, 1986; Kovalenco, 1988], evidenciaram que o gradiente de temperatura e as taxas de aquecimento e resfriamento do material são fortemente afetados pelo parâmetro de energia da radiação, da distribuição de intensidade no feixe, das características termofísicas e dimensões geométricas da área irradiada. No caso geral, o gradiente de temperatura na camada sob irradiação laser é extremamente elevado podendo atingir valores de 10^4 a 10^6 °C/cm na imediação da superfície e gradualmente decresce para o interior do material. Estes fortes gradientes de temperatura propiciam o surgimento de elevadas taxas de resfriamento do material, podendo atingir valores usuais de 10^4 a 10^6 °C/s e em algumas situações até 10^8 °C/s. As taxas de aquecimento pelo feixe laser (10^5 a 10^8 °C/s) são aproximadamente da mesma ordem de magnitude.

Estas elevadas taxas de aquecimento e resfriamento de uma pequena região do material vão provocar notáveis transformações de fase com grandes alterações da microestrutura. A estrutura do material, formada sob estas condições, deve conter uma apreciável densidade de discordâncias, devido às ondas de tensão associadas ao ciclo térmico, assim como uma distribuição não usual de elementos de liga e outras características.

É uma questão bem estabelecida que para endurecer os aços ferro-carbono, estes materiais necessitam ser aquecidos até as temperaturas de austenitização (A_{C3} e A_{cm} para aços hipoeutectóides e hipereutectóides, respectivamente) e em seguida, resfriados sob taxas de resfriamento superiores a uma taxa crítica V_{cr} , de forma a não cortar o nariz da Curva C de transformação. A título de ilustração, na figura 60 é

apresentado o diagrama de transformação isotérmica da austenita para um aço contendo 0,5% em peso de carbono, bastante próximo da composição do aço utilizado neste trabalho. Nota-se do diagrama que a taxa de resfriamento crítica de aproximadamente $250\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ necessária para a obtenção de martensita, é muito inferior às taxas de 10^4 a $10^6\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ envolvidas no tratamento com laser. Portanto, deve-se esperar o surgimento de uma martensita altamente refinada, impossível de ser obtida pelos processos convencionais.

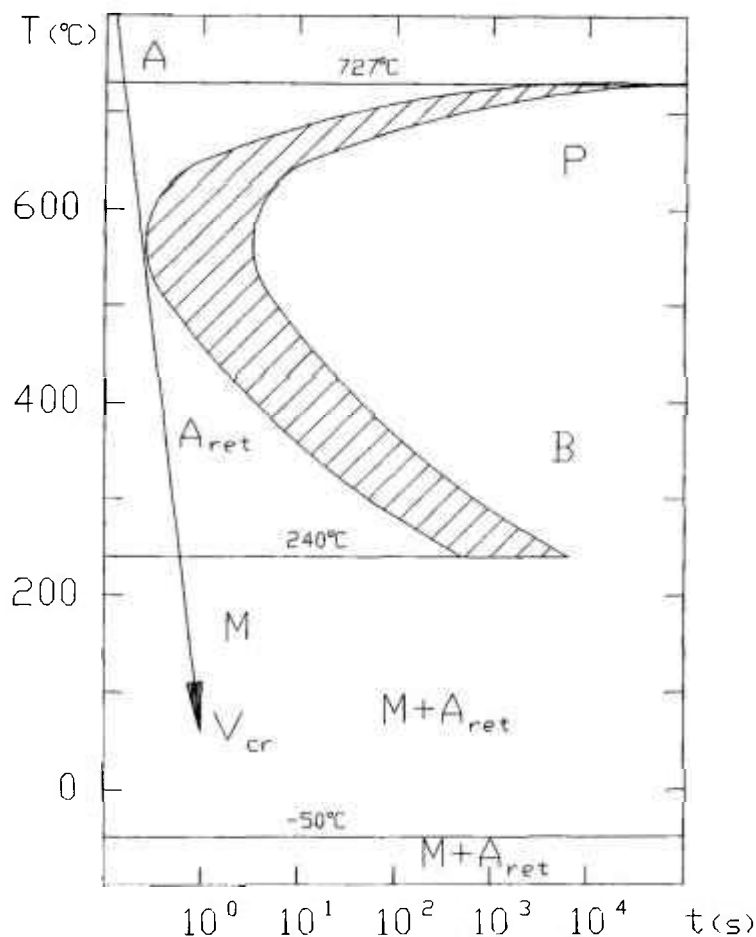


Fig.60 - Diagrama da transformação austenítica isotérmica, para o aço com 0,5% em massa de carbono. (A) austenita; (B) bainita; (P) perlita; (M) martensita; (V_{cr}) velocidade crítica.

Além dos aspectos relacionados ao resfriamento da austenita, deve-se ter em conta que as elevadas taxas de aquecimento envolvidas vão alterar também substancialmente a cinética das transformações de fase envolvidas. No caso específico dos aços, os estudos efetuados para o aço eutectóide evidenciam um deslocamento das temperaturas críticas A_{C3} e A_{cm} para a direita como ilustrado no gráfico da figura 61 [Kovalenco, 1988].

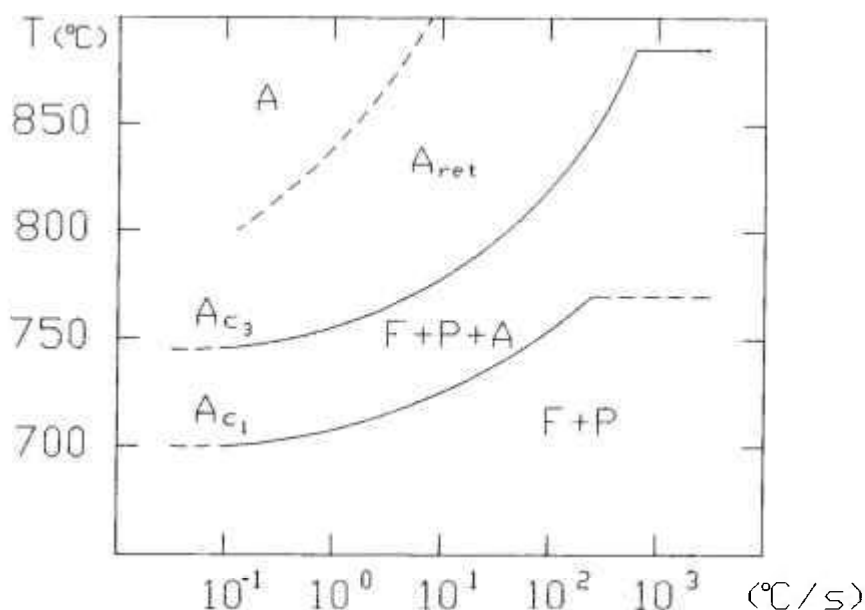


Fig.61 - Efeito da taxa de aquecimento na posição dos pontos críticos A_{C1} e A_{C3} no aço com 0,8% em massa de carbono.

Em resumo, as elevadas taxas de aquecimento e resfriamento envolvidas na irradiação do material com um feixe laser, promovem a ocorrência de transformações de fase sob condições não usuais dando origem a microestruturas não convencionais, extremamente refinadas, de difícil resolução quando a metalografia óptica é empregada. Um aprofundamento da análise da microestrutura resultante somente pode ser obtida a partir da utilização de microscopia eletrônica de transmissão. Entretanto, consideradas as pequenas dimensões da região do material modificada pelo feixe, a utilização desta técnica envolverá a superação de algumas dificuldades experimentais.

6.5 - Microdureza da Seção Transversal dos Pontos Isolados

Nas seções transversais também foram feitas medidas de microdureza para se verificar a variação desta em função da profundidade e investigar a influência dos parâmetros da radiação laser mencionados anteriormente. Os resultados serão mostrados em forma de gráficos apresentando as curvas de dureza em função da profundidade, figuras 62 a 71, onde em cada gráfico os parâmetros de densidade de energia, diâmetro do feixe e atmosfera são constantes, sendo somente variável o parâmetro de densidade de potência.

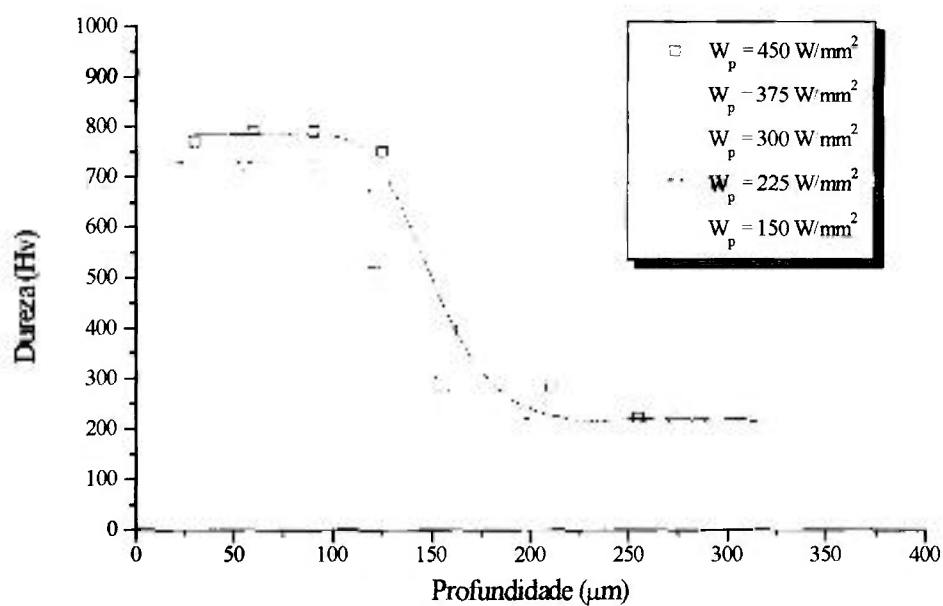


Fig. 62 - Gráfico de microdureza em função da profundidade para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We=2,36\text{J/mm}^2$, atmosfera ambiente e diâmetro do feixe de 1 mm.

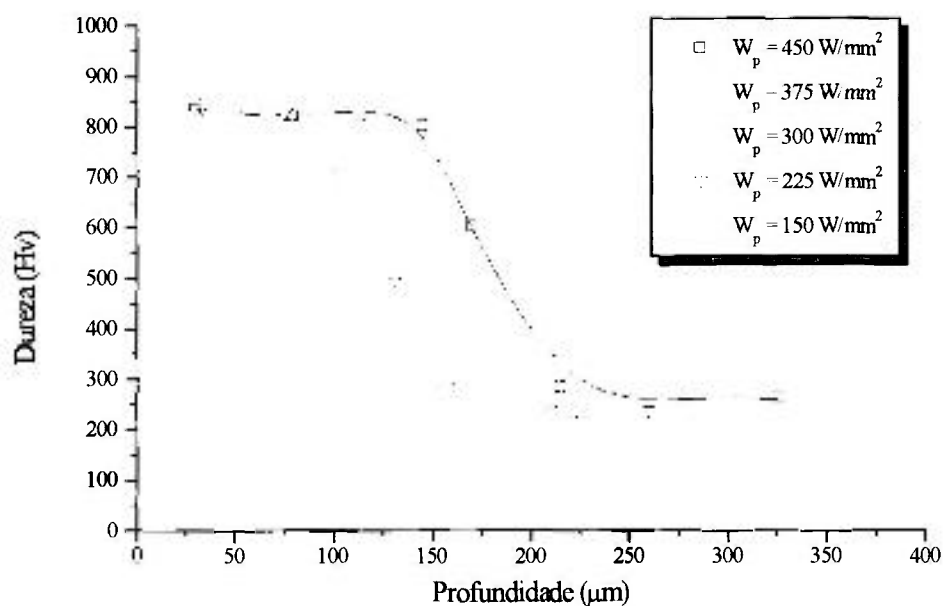


Fig. 63 - Gráfico de microdureza em função da profundidade para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We=2,80\text{J/mm}^2$, atmosfera ambiente e diâmetro do feixe de 1 mm.

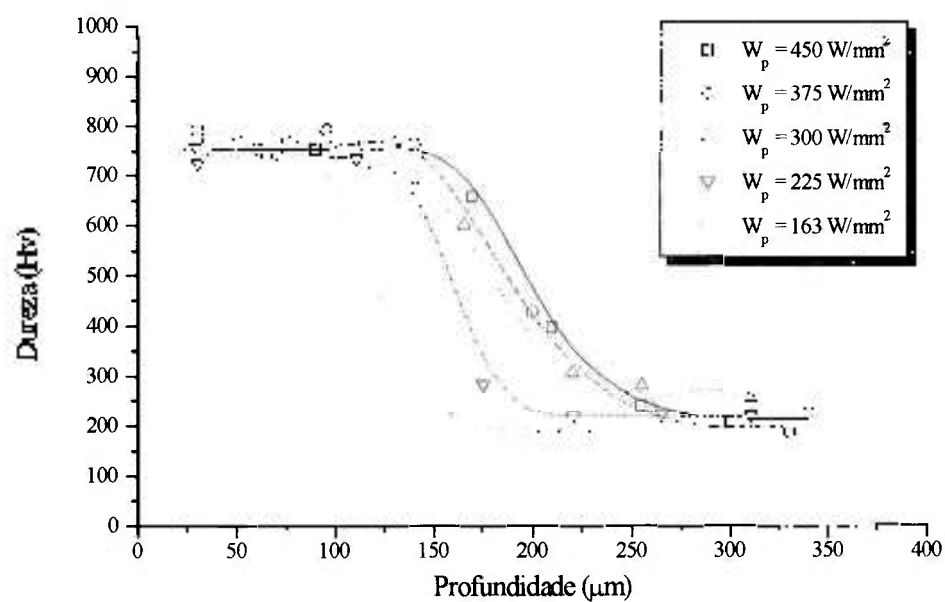


Fig. 64 - Gráfico de microdureza em função da profundidade para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We=3,25\text{J/mm}^2$, atmosfera ambiente e diâmetro do feixe de 1 mm.

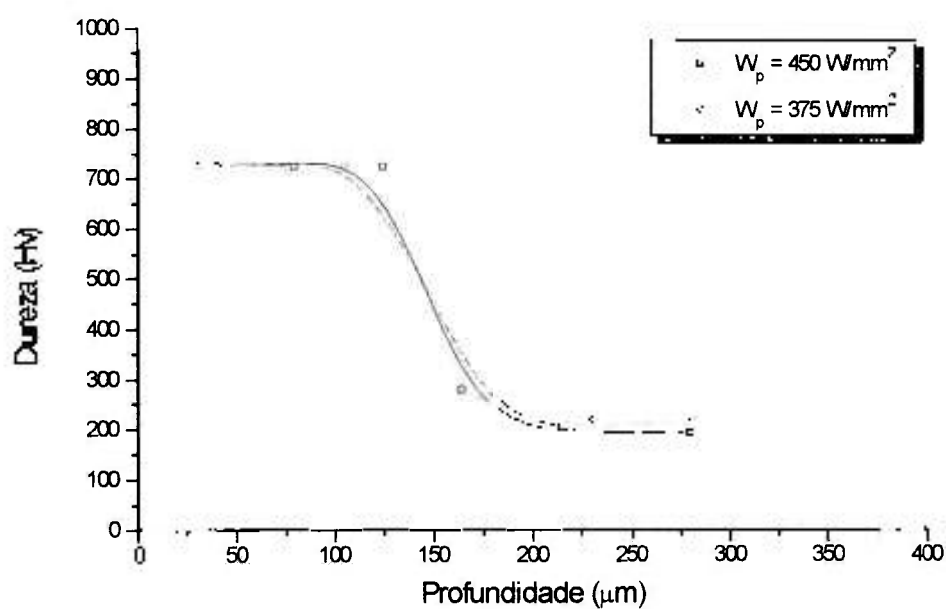


Fig. 65 - Gráfico de microdureza em função da profundidade para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We=3,25\text{J/mm}^2$, atmosfera ambiente e diâmetro do feixe de 1,5 mm.

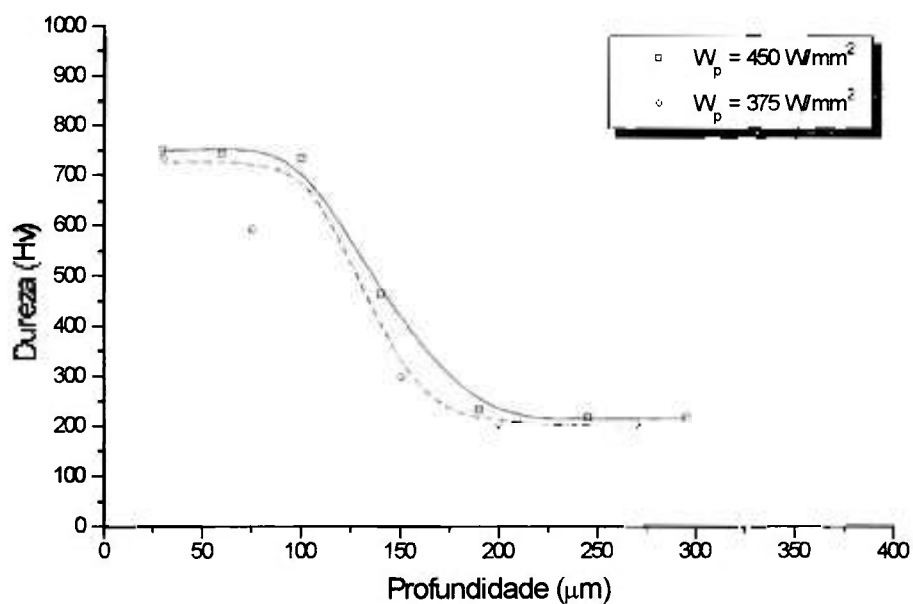


Fig. 66 - Gráfico de microdureza em função da profundidade para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We=3,25\text{J/mm}^2$, atmosfera ambiente e diâmetro do feixe de 2 mm.

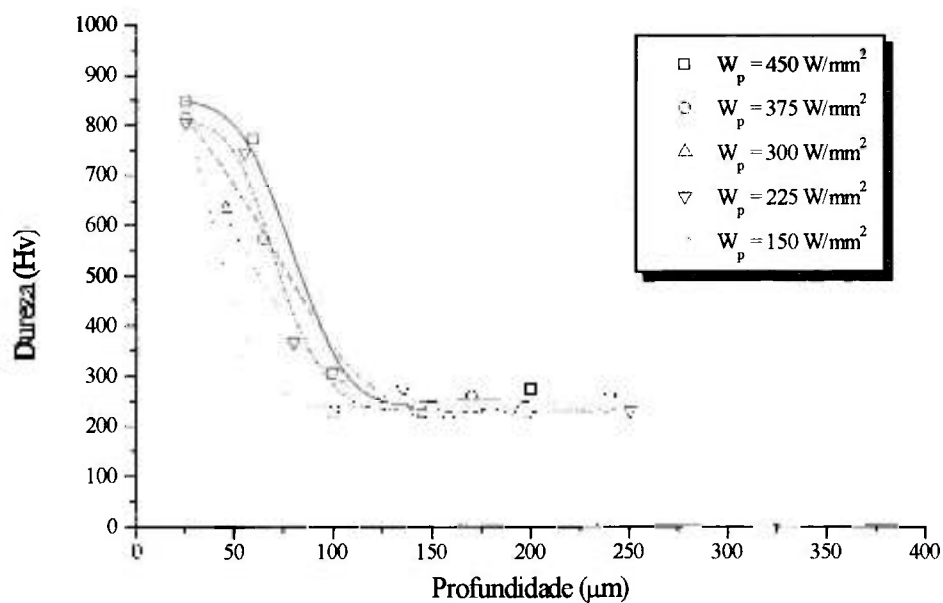


Fig. 67 - Gráfico de microdureza em função da profundidade para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We=2,36\text{J/mm}^2$, atmosfera controlada e diâmetro do feixe de 1 mm.

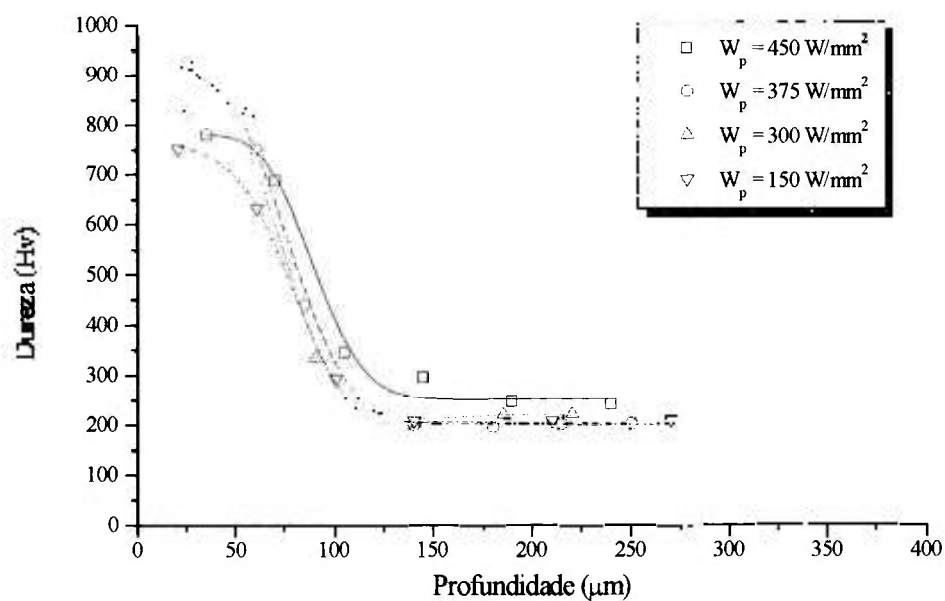


Fig. 68 - Gráfico de microdureza em função da profundidade para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We=2,80\text{J/mm}^2$, atmosfera controlada e diâmetro do feixe de 1 mm.

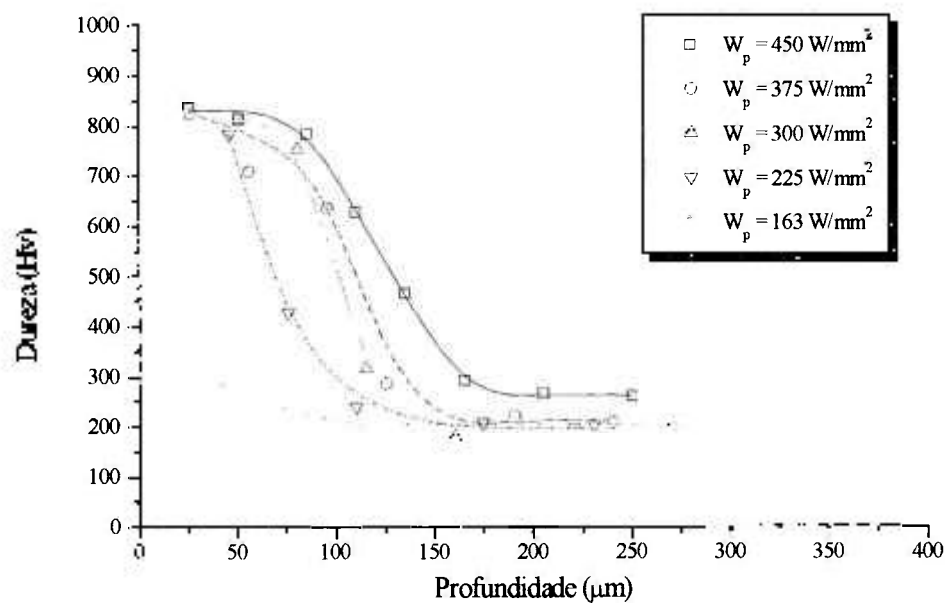


Fig. 69 - Gráfico de microdureza em função da profundidade para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We=3,25\text{J/mm}^2$, atmosfera controlada e diâmetro do feixe de 1 mm.

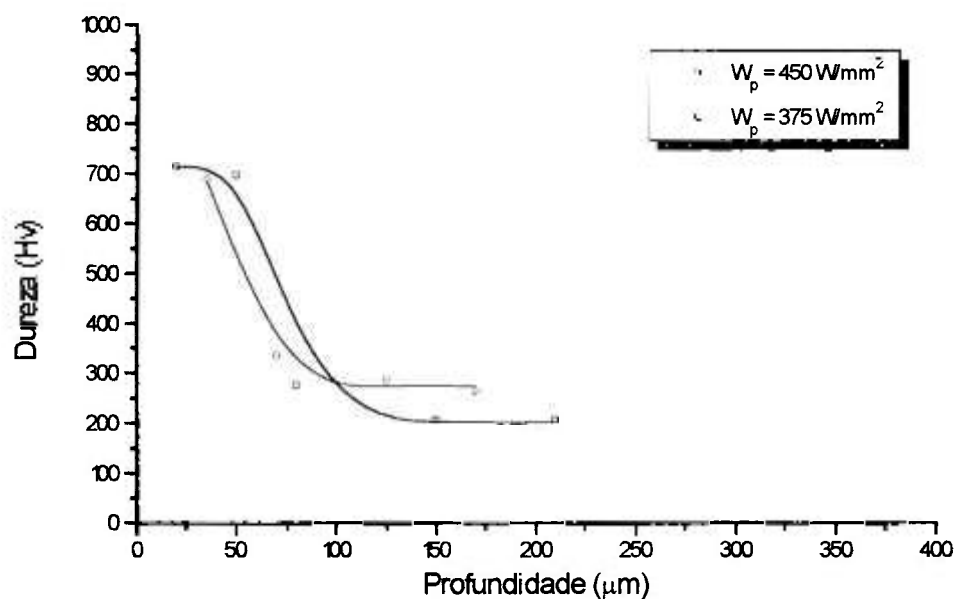


Fig.70 - Gráfico de microdureza em função da profundidade para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We = 3,25 \text{ J/mm}^2$, atmosfera controlada e diâmetro do feixe de 1,5 mm.

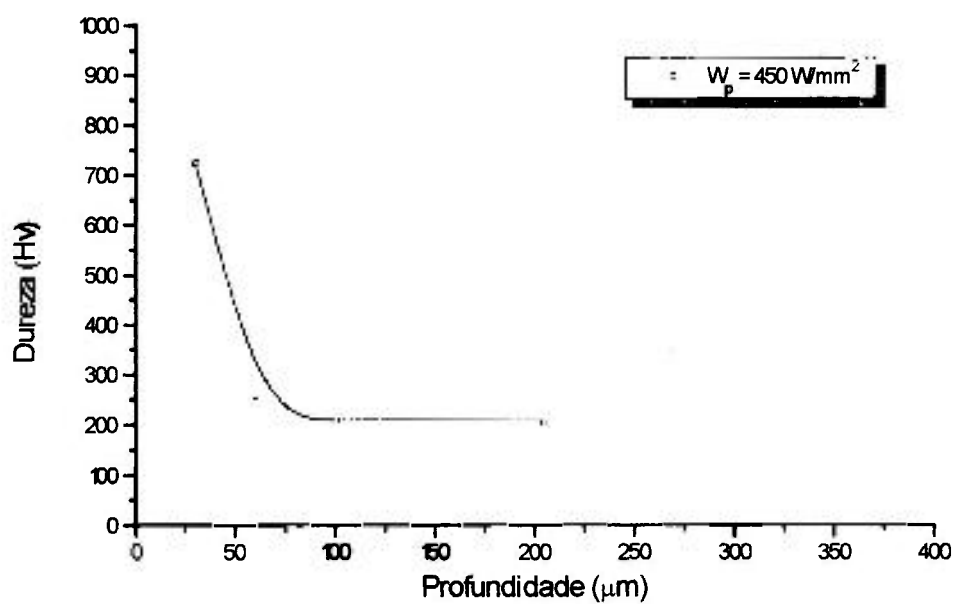


Fig.71 - Gráfico de microdureza em função da profundidade para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We = 3,25 \text{ J/mm}^2$, atmosfera controlada e diâmetro do feixe de 2 mm.

Nota-se que os resultados de dureza obtidos em função da profundidade, para todas as condições de radiação laser utilizadas, têm o mesmo comportamento. A dureza atinge valores médios de 800 HV nas proximidades da superfície, e segue, aproximadamente constante, na profundidade enquanto está na região modificada. Os valores de dureza caem rapidamente em função da profundidade na região de transição da região modificada para o material original, ficando constante nos valores de dureza do material inicial nas profundidades superiores a da região de transição.

Com o intuito de investigar a variação da profundidade da região modificada pela radiação laser em função dos parâmetros em estudo, a profundidade máxima (z_{max}) será definida conforme o esquema da figura 72.

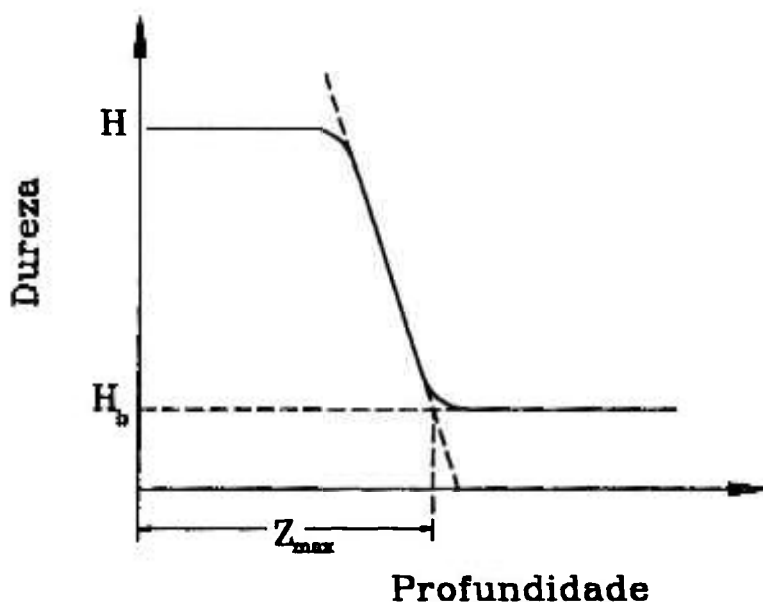


Fig.72 - Esquema para definição e medida da profundidade da região afetada pela radiação laser. H_{max} dureza na região afetada pela radiação laser, H_b dureza do material de base, Z_{max} profundidade máxima da região afetada pela radiação laser.

Utilizando este procedimento e os dados apresentados nas figuras de número 62 a 71, foram determinados os valores de Z_{max} e estes foram relacionados com os parâmetros estudados: densidade de energia (Tabela 10) e diâmetro do feixe de irradiação (Tabela 11) para cada condição de atmosfera que envolve a região de irradiação.

Tab.10 - Valores da profundidade máxima em função dos parâmetros de densidade de energia, para as diversas densidades de potência e as duas atmosferas utilizadas, com diâmetro do feixe incidente de 1 mm.

Atmosfera	Ambiente			Controlada		
W_e (J/mm ²)	2,36	2,80	3,25	2,36	2,80	3,25
W_p (W/mm ²)	Profundidade (μm)					
450	180	215	240	110	130	165
375	165	195	230	105	125	150
300	150	180	215	95	110	130
225	140	160	190	85	-	115
150	130	145	165	75	100	105

Tab.11 - Valores da profundidade máxima em função do diâmetro do feixe incidente, para as diversas densidades de energia e as duas atmosferas utilizadas, com densidade de potência de 450 W/mm².

Atmosfera	Ambiente			Controlada		
W_e (J/mm ²)	2,36	2,80	3,25	2,36	2,80	3,25
ϕ_f (mm)	Profundidade (μm)					
1	180	215	240	110	130	165
1.5	170	175	185	65	80	115
2	165	165	175	60	70	80

O desenvolvimento teórico apresentado no capítulo 4 demonstrou que a profundidade máxima de penetração de uma determinada isoterma T depende dos parâmetros do feixe laser e de constantes físicas do material segundo a equação 27. Usando o valor de $T_{(0,t_p)}$ (temperatura na superfície do material ao final do pulso laser) dado pela equação 21, a equação 27 pode ser reescrita.

$$Z_{\text{isot}} = 1,24 \cdot \left(1 - \frac{T}{T_{(0,t_p)}} \right)$$

ou

$$z_{\text{isot}} = 1,24 \left(1 - \frac{T \cdot k \cdot \sqrt{\pi}}{2 \cdot \sqrt{a}} \cdot \frac{1}{\sqrt{W_p} \cdot \sqrt{W_e}} \right) \quad (29)$$

Para que ocorra o endurecimento do material deve-se exigir que a temperatura T na região a endurecer atinja valores iguais ou superiores à temperatura necessária para a austenitização do material. Satisfeita esta condição, é de se esperar que o comportamento da profundidade máxima de endurecimento seja similar ao comportamento da profundidade da isoterma T_h (temperatura de austenitização) ou seja:

$$z_{\text{max}} = A \cdot \left(1 - \frac{B}{\sqrt{W_p} \cdot \sqrt{W_e}} \right) \quad (30)$$

onde A e B são parâmetros que dependem do material.

Esta equação prevê a existência de um limiar para a densidade de energia, W_e^l , dependente de W_p , abaixo do qual não ocorrerá qualquer modificação no material irradiado.

$$W_e^l = \frac{B^2}{W_p} \quad (31)$$

Na tabela 12 são apresentados os valores dos parâmetros A e B resultantes do ajuste dos pontos experimentais à equação (30) e os correspondentes valores de W_e^l , para as duas condições de atmosfera empregadas neste trabalho.

Tab.12 - Valores dos parâmetros A e B da equação (30) obtidos do ajuste dos pontos experimentais e os correspondentes valores de W_e^l , para as duas atmosferas utilizadas.

Atmosfera	Ambiente			Controlada		
W_p (W/mm ²)	A (mm)	B (J/s ^{1/2} mm ²)	W_e^l (J/mm ²)	A (mm)	B (J/s ^{1/2} mm ²)	W_e^l (J/mm ²)
450	0,613	23,099	1,186	0,395	23,260	1,203
375	0,613	21,878	1,277	0,395	21,889	1,278
300	0,613	20,270	1,369	0,395	20,648	1,422
225	0,613	18,281	1,486	0,395	18,541	1,528

Na figura 73 e 74 são apresentadas as curvas construídas utilizando-se a equação (30) com os valores de $\underline{A}$ e $\underline{B}$ da tabela 12, e os pontos experimentais. Como pode-se verificar, obteve-se um bom ajuste dos pontos experimentais à equação (30). Nota-se que o parâmetro $\underline{A}$ é fortemente dependente da atmosfera empregada, enquanto que o parâmetro $\underline{B}$ não é sensível ao meio mas aumenta ligeiramente com o aumento do valor de W_p . Uma interpretação física mais aprofundada dos parâmetros $\underline{A}$ e $\underline{B}$ somente poderia ser avançada a partir da análise de um número maior de casos envolvendo materiais variados, com propriedades físicas diferentes e outras atmosferas. É importante mencionar que a região varrida pela isoterma de austenitização não necessariamente será austenitizada na sua totalidade, já que os tempos envolvidos no aquecimento e resfriamento durante a irradiação com laser são extremamente curtos.

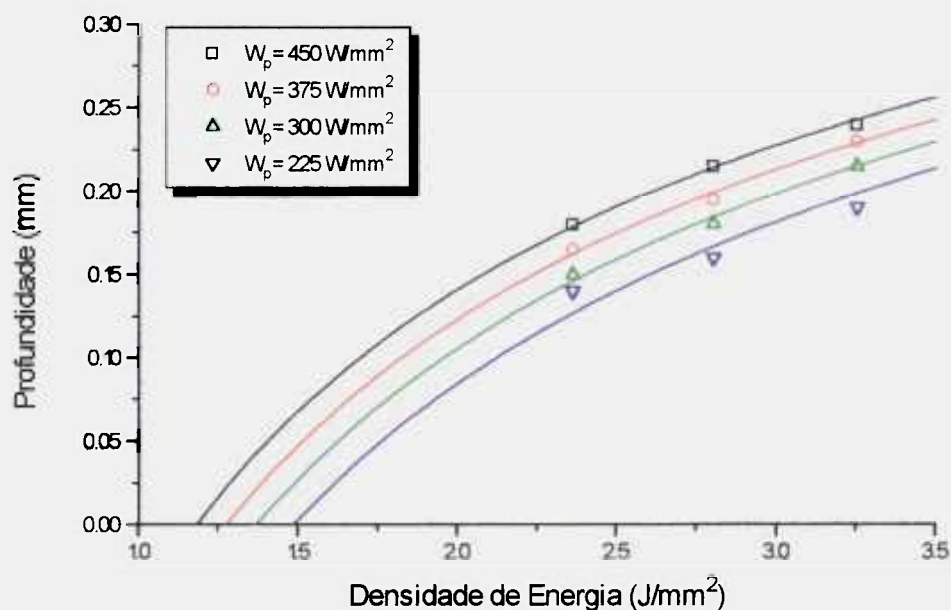


Fig.73 - Gráfico da profundidade máxima em função da densidade de energia para diversas densidades de potência da radiação laser, em atmosfera ambiente. Onde pode se ver os pontos experimentais e as curvas da equação 30.

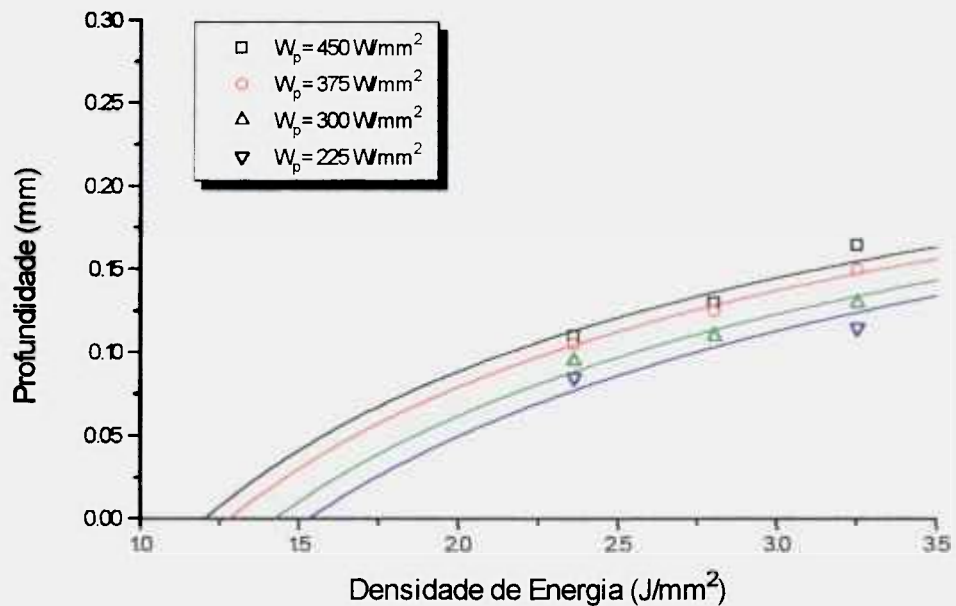


Fig.74 - Gráfico da profundidade máxima em função da densidade de energia para diversas densidades de potência da radiação laser, em atmosfera controlada. Onde pode se ver os pontos experimentais e as curvas da equação 30.

As curvas de profundidade máxima obtidas podem ser usadas para o estabelecimento de um procedimento tecnológico a ser empregado no endurecimento superficial do aço AISI 1045. Por intermédio destas curvas é possível se determinar previamente a profundidade máxima de endurecimento que será atingida para um determinado conjunto de valores de W_p e W_e .

É possível também a solução do problema inverso, ou seja: quais devem ser os valores dos parâmetros de feixe (energia, diâmetro e tempo) para se obter uma determinada profundidade de endurecimento?

Como
$$W_e = \frac{E}{\Lambda} = \frac{4 \cdot E}{\pi \cdot \phi_f^2}$$
 logo,

$$\phi_f = \sqrt{\frac{4 \cdot E}{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{W_e}} \quad (32)$$

Assim, curvas de $\phi_f \times W_e$ (para diferentes valores de E) podem ser construídas conjuntamente com as curvas de $Z \times W_e$ num monograma (ábaco) como apresentado na figura 75, que pode ser empregado em operações rotineiras.

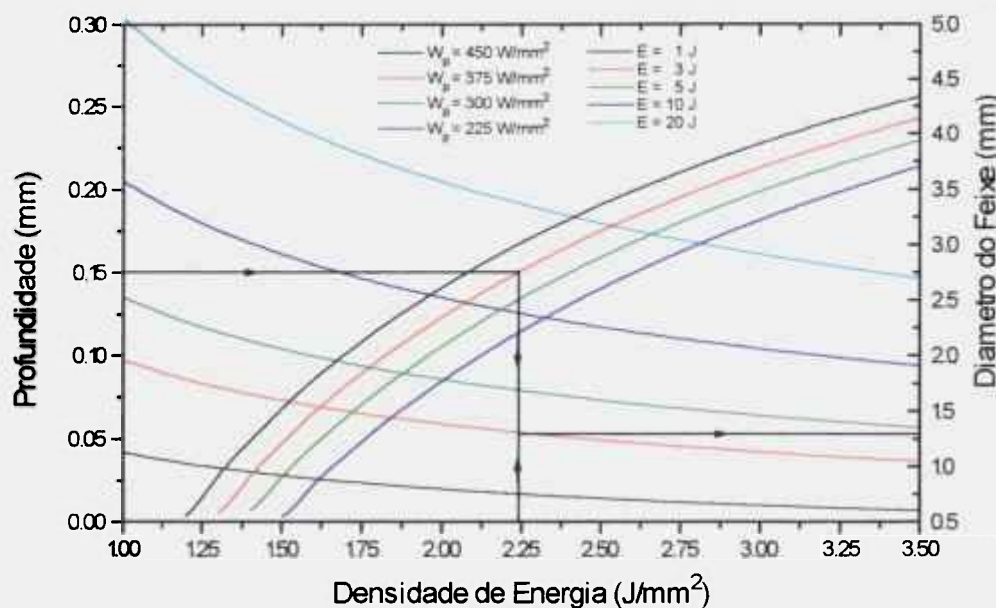


Fig. 75 - Monograma da profundidade máxima para diversas densidades de potência da radiação laser, e do diâmetro do feixe laser, ambos em função da densidade de energia, em atmosfera controlada para o aço AISI 1045.

Por exemplo, para se obter uma camada endurecida com uma profundidade de $z = 150 \mu\text{m}$ no aço AISI 1045, pode se escolher uma das várias curvas de densidade de potência. Escolhida uma destas curvas (por exemplo $W_p = 375 \text{ W/mm}^2$) o valor de densidade de energia necessário pode ser encontrado na abcissa ($W_e = 2,24 \text{ J/mm}^2$).

A escolha do valor de energia a ser utilizado dependerá das características do equipamento laser disponível. No caso do Laser Lasag empregado neste trabalho a energia do feixe pode variar de 0 a 200 J, o tempo de pulso de 0,1 a 20 ms e a frequência de pulsos de até 100 Hz.

Se um valor de energia for escolhido ($E = 3 \text{ J}$), o diâmetro do feixe a ser utilizado será obtido na ordenada da direita ($\phi_f = 1,3 \text{ mm}$). A razão W_e/W_p fornece o tempo de pulso, no exemplo, $t_p = 6\text{ms}$. Obtem-se, assim, os parâmetros do equipamento laser (E , ϕ_f e t_p) a serem fixados para o trabalho de endurecimento desejado.

É importante mencionar que a abordagem empregada neste trabalho, para se estabelecer o procedimento tecnológico de endurecimento superficial do aço AISI 1045, é passível de ser utilizada para qualquer material endurecível. O estudo de um número maior de materiais endurecíveis, com composições e microestruturas variadas, seguindo esta óptica poderá permitir uma interpretação física adequada dos parâmetros A e B.

Além disso, se a investigação for ampliada para conter um número maior de materiais endurecíveis, pode-se obter um monograma mais geral que permitirá ao projetista de equipamentos laser uma melhor escolha da faixa de variação dos parâmetros, energia e tempo de pulso, resultando na concepção de equipamentos laser, dedicados ao endurecimento, mais econômicos.

6.6 - Análise da Trilha de Pontos

Na prática do endurecimento superficial, de um modo geral, busca-se ter uma determinada camada endurecida ao longo de toda a superfície da peça. Uma possível maneira de se obter este tratamento superficial é por intermédio de um feixe laser. Esta técnica consiste em submeter a superfície do material a uma sucessão de pulsos (ou pontos) de modo a estabelecer uma trilha (ou linha de pontos). Estabelecidas as condições de irradiação de uma trilha, a superfície poderá ser tratada em sua plenitude pela varredura desta por uma sequência de trilhas paralelas.

Afim de investigar este aspecto, foram geradas trilhas pela incidência de pulsos controlados com um espaçamento equivalente a $0,7 \phi_f$. Foram medidas a dureza na superfície e a uma profundidade de $50 \mu\text{m}$ conforme descrito nos itens 5.6.2 e 5.6.4b, respectivamente, e analisada a microestrutura da seção longitudinal. Todas as condições de W_e e W_p e atmosfera das tabelas 6 e 7 foram analisadas, mas como os resultados, de um modo geral, apresentaram similaridades, apenas os dados mais típicos serão apresentados.

Nas figuras 76 e 77 são apresentados gráficos ilustrativos da dureza na superfície ao longo da trilha de pontos para a condição de irradiação com densidade de energia $W_e = 3,25 \text{ J/mm}^2$, $\phi_f = 1 \text{ mm}$, mantidos fixos, e densidade de potência variável, para as atmosferas ambiente e controlada, respectivamente.

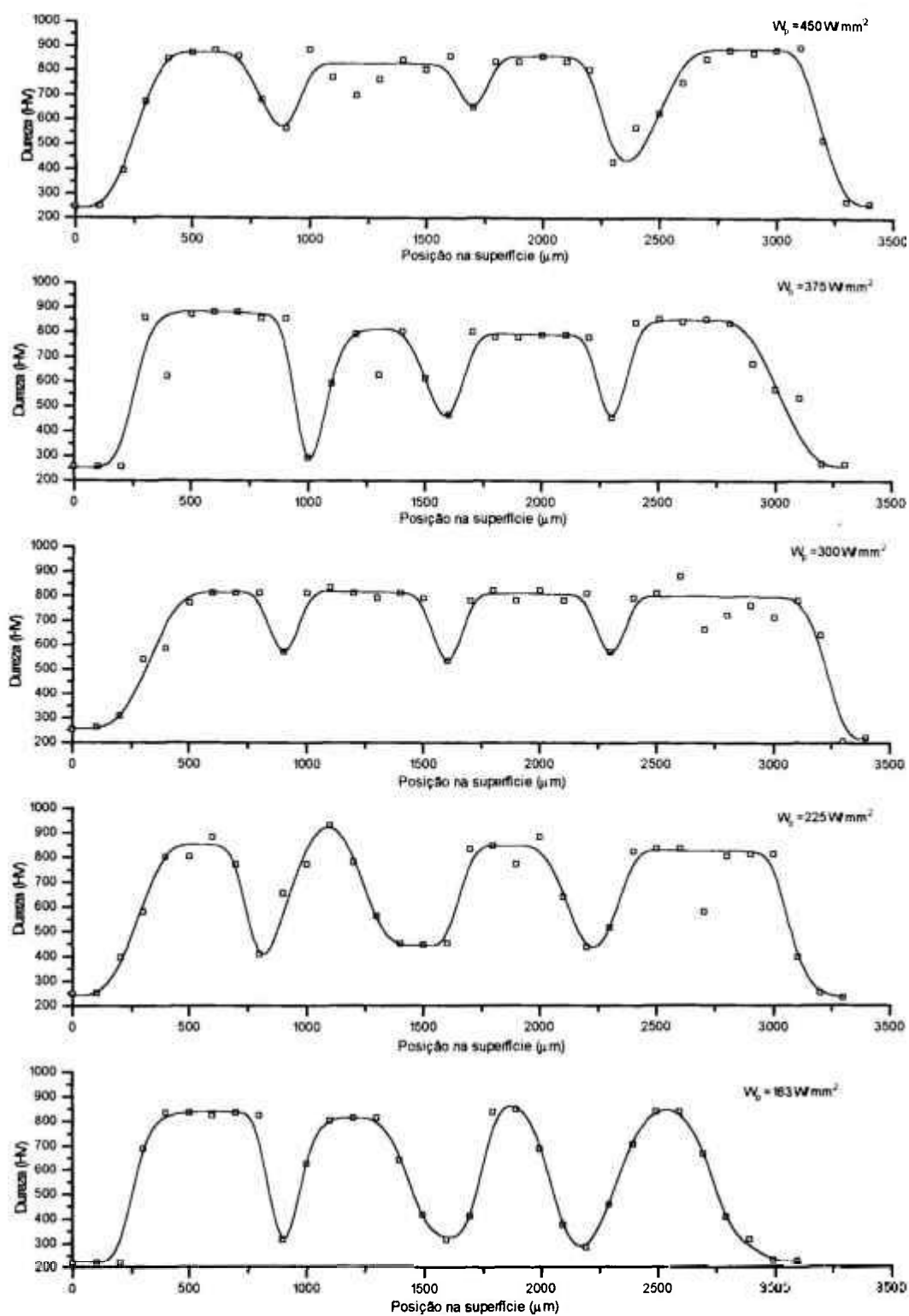


Fig.76 - Gráfico de microdureza da superfície para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $W_e = 3,25 \text{ J/mm}^2$, atmosfera ambiente e diâmetro do feixe de 1 mm.

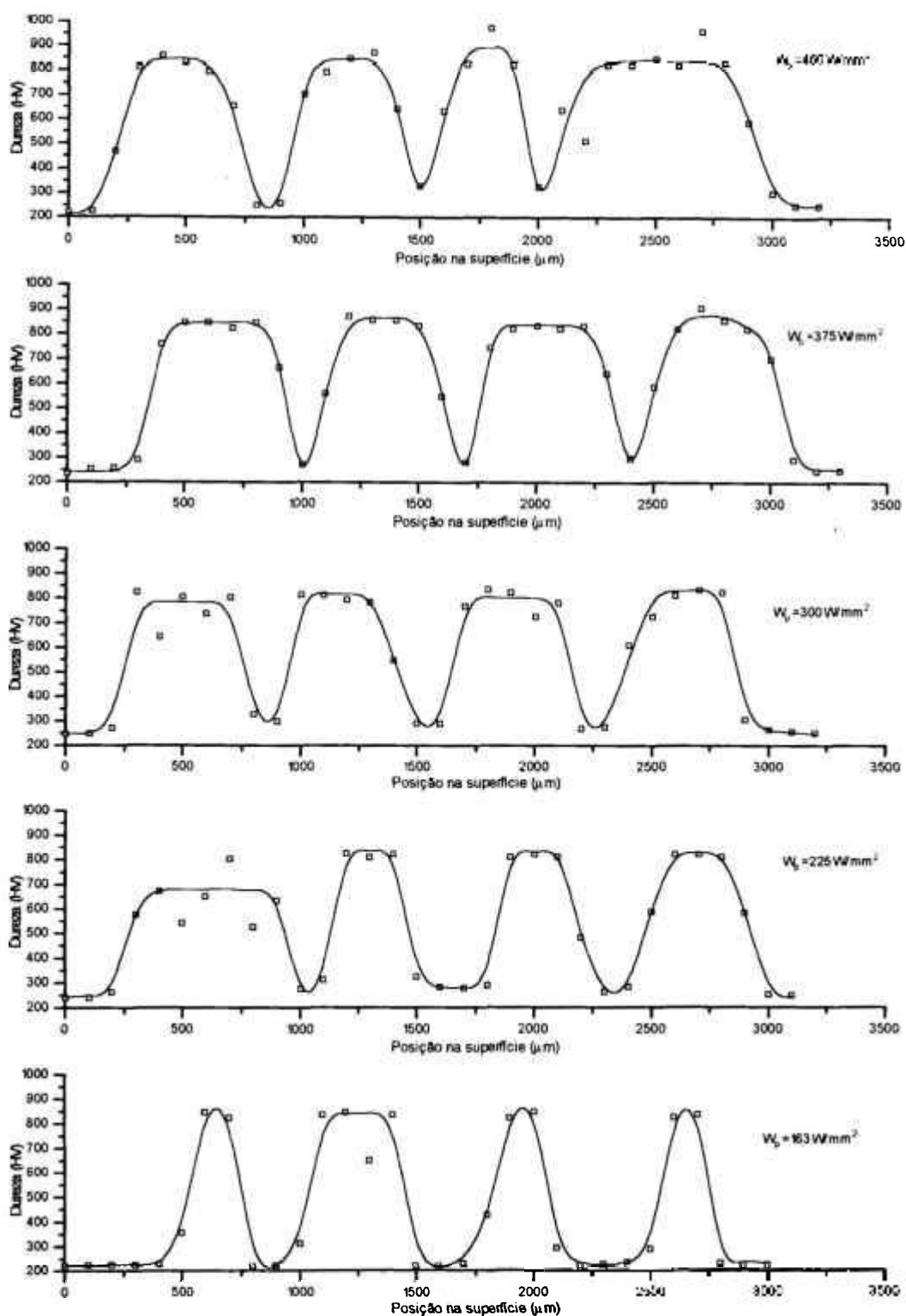


Fig.77 - Gráfico de microdureza da superfície para diversas densidades de potência da radiação laser, com densidade de energia de $We=3,25 \text{ J/mm}^2$, atmosfera controlada e diâmetro do feixe de 1 mm.

Pode-se observar dos dados das figuras 76 e 77 que o perfil de microdureza ao longo da superfície de um ponto componente da trilha tem um comportamento similar àquele verificado para o ponto isoladamente (figura 43).

O perfil de microdureza ao longo da superfície da trilha tem sua forma similar a "dentes de serra": valores máximos no centro dos pontos componentes e valores mínimos na região de transição entre um ponto e seu vizinho. A amplitude de variação de microdureza ΔH , equivalente à "altura do dente", aumenta com a diminuição da densidade de potência, no caso das irradiações realizadas em atmosfera ambiente. No caso das irradiações em atmosfera controlada esta amplitude é máxima independentemente do valor de W_p .

O perfil em "dente de serra" é resultante de dois fatores:

— não sobreposição das zonas modificadas pelo laser. Embora uma sobreposição de $0,3 \phi_f$ tenha sido utilizada para o feixe incidente, se o diâmetro da zona afetada resultante for inferior a $0,7 \phi_f$ não ocorrerá efetiva sobreposição e a dureza na região de transição cai para o valor do material de base. Este é o caso das irradiações em atmosfera controlada e da irradiação em atmosfera ambiente com densidade de potência de $W_p = 163 \text{ W/mm}^2$.

— ocorre a sobreposição das zonas modificadas pelo feixe laser. A incidência de um segundo pulso sobre a região inicialmente alterada pelo primeiro pulso, provoca uma modificação na estrutura martensítica presente, ou seja, um revenimento, resultando em durezas intermediárias de 400 a 650 HV típicas da martensita revenida. É o caso das irradiações realizadas em atmosfera ambiente com densidade de potência superiores a 225 W/mm^2 .

Na figura 78 são apresentadas micrografias obtidas para as seções transversais de trilhas geradas por irradiações do material em atmosfera ambiente para a condição de densidade de potência $W_p = 450 \text{ W/mm}^2$, $\phi_f = 1 \text{ mm}$ e densidades de energia $W_e = 2,36; 2,80$ e $3,25 \text{ J/mm}^2$, que ilustram as duas situações acima descritas.

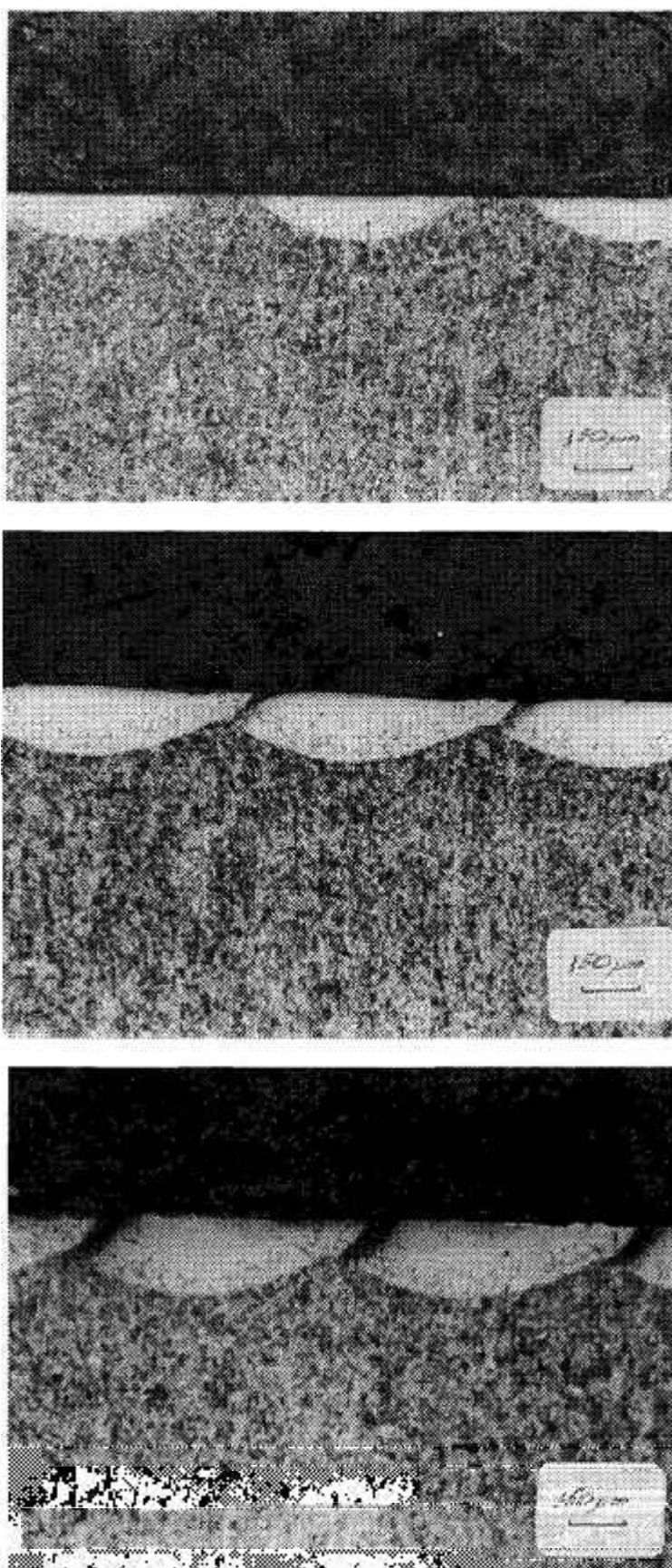


Fig.78 - Micrografias de corte transversal da trilha de pontos de irradiação via laser em atmosfera ambiente, com $W_p=451\text{W/mm}^2$ e $\phi_f=1\text{mm}$, ataque de nital 2%. Para as respectivas densidades de energia $We=2,36\text{J/mm}^2$, $We=2,80\text{J/mm}^2$ e $We=3,25\text{J/mm}^2$

O efeito da variação do diâmetro do feixe na microdureza superficial da trilha para a condição de irradiação $W_p=450\text{W/mm}^2$, $W_e=3,25\text{J/mm}^2$, em atmosfera ambiente e controlada, respectivamente, é ilustrado nas figuras 79 e 80. O aumento no diâmetro do feixe provoca, com era de se esperar, um alargamento do "dente de serra". Uma ligeira redução nos valores máximos e mínimos da microdureza é notado, mas a amplitude da variação desta, entretanto, se mantém.

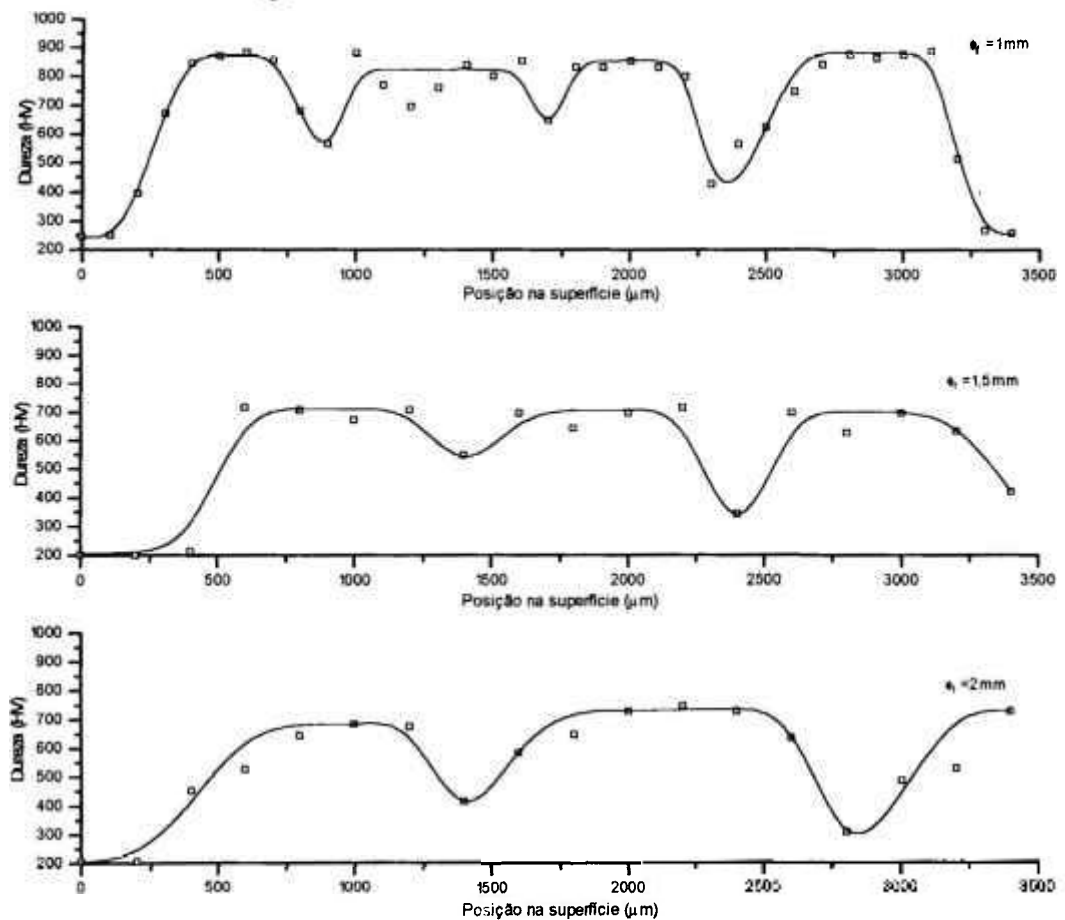


Fig.79 - Gráficos de microdureza da superfície na trilha com densidade de potência de $W_p=450\text{W/mm}^2$, densidade de energia de $W_e=3,25\text{J/mm}^2$, atmosfera ambiente, para diâmetro do feixe de 1; 1,5 e 2 mm.

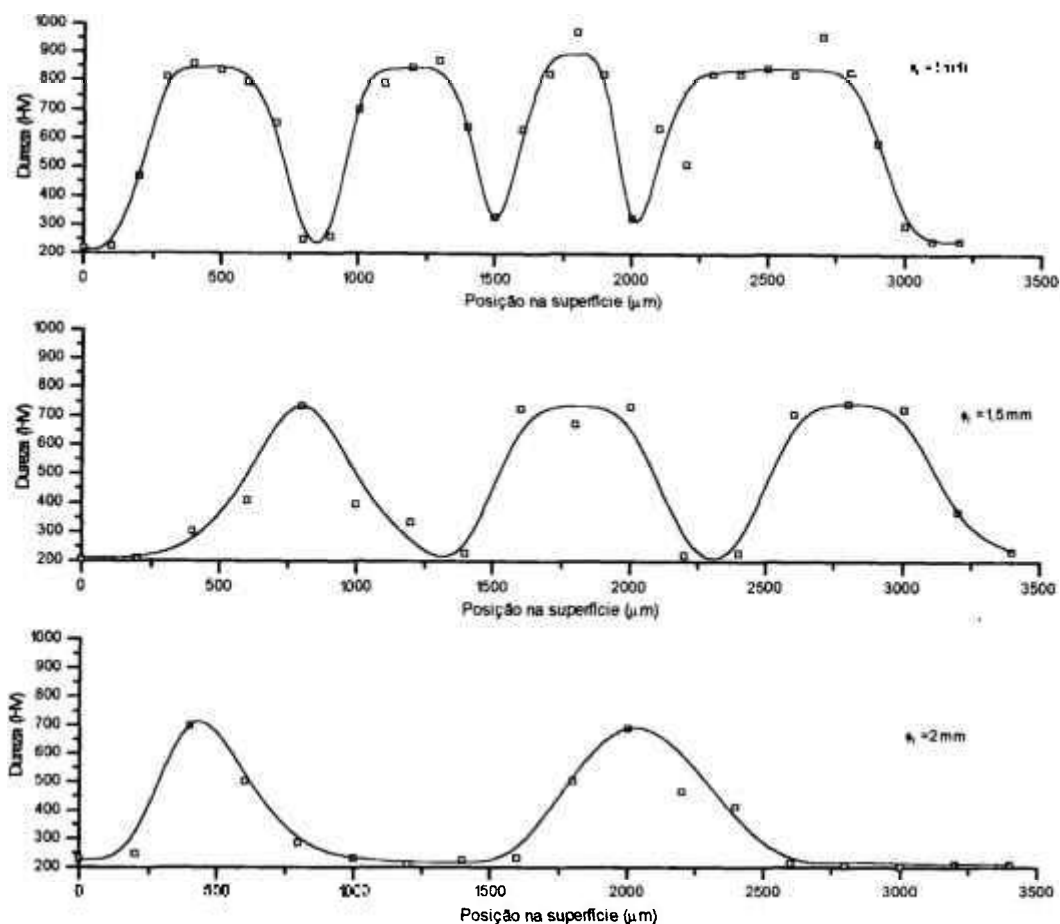


Fig.80 - Gráficos de microdureza da superfície na trilha com densidade de potência de $W_p=450\text{W/mm}^2$, densidade de energia de $W_e=3,25\text{J/mm}^2$, atmosfera controlada, para diâmetro do feixe de 1; 1,5 e 2 mm.

Nas figuras 81 e 82 são apresentados os perfis de microdureza na superfície e na seção longitudinal da trilha a uma profundidade de $50 \mu\text{m}$, para a condição de irradiação de $W_p=450\text{W/mm}^2$; $W_e=3,25 \text{ J/mm}^2$ e $\phi_f=1 \text{ mm}$ para os dois tipos de atmosfera (ambiente e controlada). A profundidade de $50 \mu\text{m}$ corresponde a cerca de 25% da profundidade máxima endurecida, quando o ponto irradiado nas mesmas condições é analisado. Como esperado, os perfis de dureza são semelhantes. Em atmosfera controlada nota-se que, a esta profundidade, já ocorre uma não sobreposição considerável.

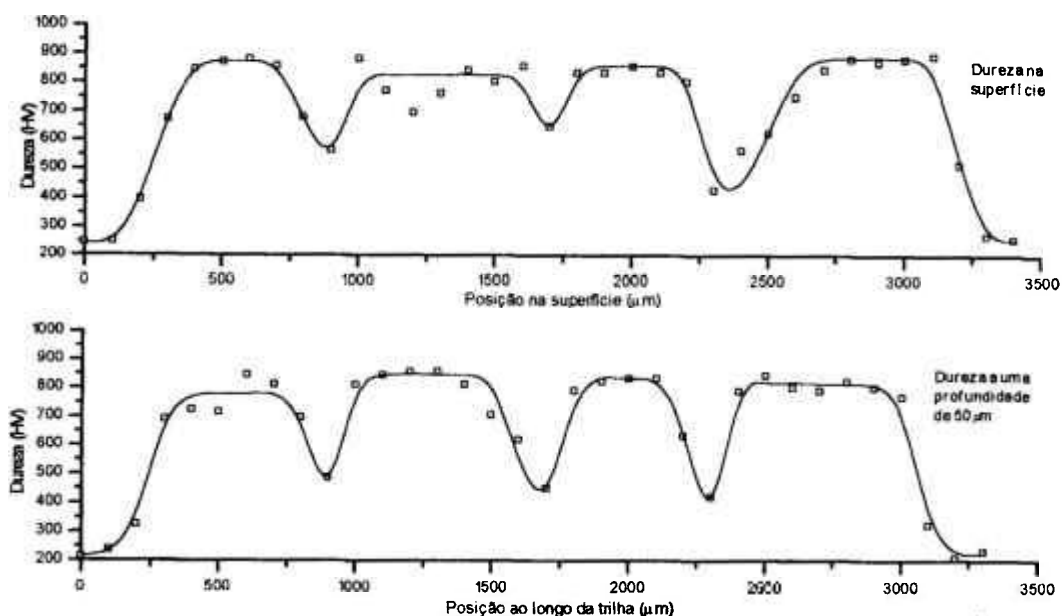


Fig. 81 - Gráficos de microdureza da superfície e de uma profundidade de 50 μm na trilha com densidade de potência de $W_p=450\text{W}/\text{mm}^2$, densidade de energia de $We=3,25\text{J}/\text{mm}^2$, atmosfera ambiente e diâmetro do feixe de 1 mm.

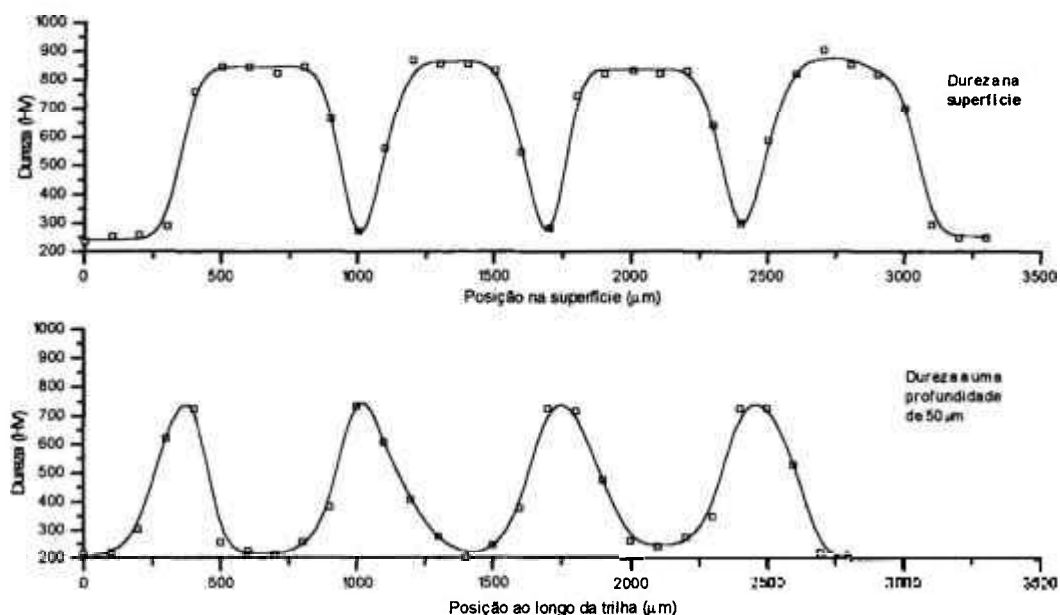


Fig. 82 - Gráficos de microdureza da superfície e a uma profundidade de 50 μm da trilha com densidade de potência de $W_p=450\text{W}/\text{mm}^2$, densidade de energia de $We=3,25\text{J}/\text{mm}^2$, atmosfera controlada e diâmetro do feixe de 1 mm.

A investigação das trilhas de pontos feita neste trabalho fornece os subsídios iniciais para se definir como deve ser o processo de endurecimento superficial de uma peça, quanto aos parâmetros do laser e a geometria da distribuição dos pulsos.

Para se definir com maior segurança a melhor geometria da distribuição dos pulsos no endurecimento superficial de uma peça, deveriam ser feitos ainda, outros estudos de avaliação. Como o estudo da influência: da porcentagem de sobreposição dos pulsos e de uma trilha paralela a outra já feita anteriormente com espaçamentos diversos e ensaios de resistência ao desgaste para a comparação de peças irradiadas com diversas geometrias de distribuição de pulsos. Estudos estes que se pretende dar prosseguimento mais adiante.

7 - CONCLUSÕES

O estudo conduzido neste trabalho mostra que o método de tratamento térmico via laser para têmpera superficial de materiais sem fusão da superfície é possível de ser executado. Controlando-se o laser dentro da faixa de densidade de energia e densidade de potência adequada, obtém-se um alto endurecimento de aproximadamente 800 HV em uma camada superficial com espessura entre 75 e 230 μm .

Podem ser observadas variações nos resultados de endurecimento do material em função dos vários parâmetros investigados, como: a densidade de energia, a densidade de potência, o diâmetro do feixe laser incidente e a atmosfera que envolve a região onde o feixe laser incide.

Os resultados obtidos em função da variação dos parâmetros estudados permitem algumas conclusões:

Na absorção da radiação laser em função do acabamento da superfície do material, observou-se que para valores de rugosidade média da superfície abaixo de 1 μm ocorre grande variação nos valores de absorção. Já para valores acima de 1 μm os valores de absorção são os mais altos e tendem a um valor constante.

Assim, os valores de rugosidade acima de 1 μm são os melhores para se trabalhar. Pois, se a absorção do material é maior, é necessário um feixe laser de menor energia e potência para se atingir o objetivo desejado. O laser a ser utilizado, portanto, pode ser de menor porte e, conseqüentemente, de menor custo. No caso do equipamento já estar definido, ele estará fornecendo um feixe de pequena energia e potência. Desta maneira poderá trabalhar com taxas de repetição maiores. Isso será possível se o acabamento final da peça, quando usada em uma determinada aplicação, permitir uma rugosidade média acima de 1 μm ou o tratamento não ser a operação final dessa peça.

Para que não haja influência na medida de microdureza, uma superfície de baixa rugosidade é necessária. Portanto, neste trabalho as amostras foram preparadas com superfície de $R_a = 0,20 \mu\text{m}$ e o tratamento térmico de endurecimento superficial foi utilizado como operação final.

Quando este método for usado como operação final em uma peça, é necessário o emprego de uma atmosfera controlada na região onde o feixe incide. Em todo processo onde a energia térmica seja utilizada para modificação de um material, o emprego de atmosfera controlada (vácuo ou introdução de diferentes gases) propicia sempre um melhor resultado (evitando, por exemplo, a formação de carepa) e com melhor rendimento.

As amostras irradiadas em atmosfera controlada não sofrem nenhuma alteração no acabamento da superfície em praticamente todos os valores da faixa de densidade de energia e potência estudadas. Somente quando esses valores de densidade de energia e potência estão próximos do máximo é que se nota pequena formação de fusão na superfície.

Já nas amostras irradiadas em atmosfera ambiente, para quaisquer valores de densidade de energia e potência, observa-se oxidação na superfície e, conseqüentemente, alteração no acabamento da peça. Esta alteração é maior quanto maior forem os valores de densidade de energia e potência do feixe laser. O processo de oxidação se inicia imediatamente após o início da radiação com o feixe laser. Esta oxidação acarreta em um aumento na absorção da energia pelo material durante a irradiação e portanto o diâmetro e profundidade da região afetada também aumentam quando comparadas à irradiação com atmosfera controlada. Assim, dependendo da aplicação da peça que será tratada, esta deve passar por uma usinagem posterior a irradiação.

Na observação em microscópio óptico do corte da seção transversal dos pontos de irradiação verifica-se que não é possível identificar a estrutura da região modificada, pois esta contém uma estrutura martensítica muito refinada, o que só permite a análise da sua geometria. Nota-se que com o aumento dos valores de densidade de energia e potência, a profundidade e o diâmetro da região modificada aumentam, para o mesmo diâmetro de feixe laser incidente. Nota-se também que para uma dada densidade de energia e potência a profundidade da região modificada diminui com o aumento do diâmetro do feixe. Além disso, observou-se também, que para o processamento em atmosfera controlada, tem-se como resultado uma menor profundidade da região modificada do que quando processada em atmosfera ambiente (aproximadamente 60%). Isto é decorrente da oxidação formada na superfície da peça durante a incidência do feixe, pois, essa oxidação provoca aumento na absorção da radiação laser.

A comprovação da estrutura martensítica muito refinada na região irradiada somente pode ser feita por microscopia eletrônica de varredura e por difração de raio X.

Na investigação da microdureza na superfície após a irradiação nota-se que, na região modificada, a microdureza atinge valores próximos aos valores máximos que o material pode alcançar quando submetido a tratamento térmico convencional de têmpera, via um procedimento muito mais simples.

As medidas de dureza em função da profundidade mostraram que a dureza é aproximadamente constante na profundidade enquanto se está na região modificada. Existe uma região de transição muito estreita ($<50\text{ }\mu\text{m}$) onde os valores de dureza caem rapidamente em função da

profundidade, estabilizando-se nos valores de dureza do material inicial nas profundidades superiores a região de transição.

Uma equação com características práticas foi desenvolvida para se estimar a profundidade da região modificada pela radiação laser em função dos parâmetros estudados neste experimento. Trata-se de uma equação simples, mas de grande valia para guiar uma operação de endurecimento de material via laser, pois, com uma conta simples envolvendo os parâmetros de regulação do equipamento se tem idéia do resultado que será obtido.

As curvas de profundidade máxima em função da densidade de energia fornecidas pela equação desenvolvida neste trabalho foram construídas conjuntamente com as curvas da relação entre diâmetro de feixe e densidade de energia (para diferentes valores de energia) num monograma (ábaco), que pode ser empregado, com grande facilidade, em operações rotineiras. As possibilidades de uso deste monograma têm limites muito estreitos no momento, pois a investigação feita neste trabalho não possibilita a montagem de um monograma geral para o endurecimento de materiais via laser. Este, porém, terá sua faixa de uso ampliada conforme forem feitos novos experimentos.

Além disso, a ampliação da investigação para conter um número maior de materiais, e consequentemente um monograma mais geral, fornecerá ao projetista de lasers informações para uma melhor escolha da faixa de variação de parâmetros, energia e tempo de pulso, resultando na concepção de equipamentos laser, dedicados ao endurecimento de materiais, mais econômicos.

A investigação das trilhas de pontos feita neste trabalho fornece os subsídios iniciais para se definir como deve ser o processo de endurecimento superficial de uma peça, quanto aos parâmetros do laser e a geometria da distribuição dos pulsos.

Na medida de dureza das trilhas de pontos na superfície nota-se que a dureza sofre grandes variações, principalmente nos locais onde ocorre a sobreposição dos pontos, devido a um revenimento neste local. Este fato poderia desqualificar o método, mas como a avaliação deve ser feita levando-se em conta a aplicação, isto pode ser um ponto positivo.

Apesar da ocorrência de resultados variados neste trabalho, não se pode afirmar qual é o melhor sem que se associe ao emprego que a peça submetida ao tratamento térmico via laser terá.

Com o conhecimento adquirido neste trabalho da influência das diversas variáveis estudadas no resultado final do tratamento térmico superficial pode-se, hoje neste Instituto, determinar parâmetros de processo para uma peça que necessita ter características específicas para uma dada aplicação.

Para se definir com maior segurança a melhor geometria da distribuição dos pulsos, para o endurecimento superficial de uma peça, futuramente devem ser feitos estudos:

- da influência da porcentagem de sobreposição dos pulsos e de uma trilha paralela a outra já feita anteriormente com espaçamentos diversos.
- ensaios de resistência ao desgaste para a comparação de peças irradiadas com diversas geometrias de distribuição de pulsos.
- investigação deste processo em outros materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - ABBOUD, J.H.; WEST, D.R.F. Laser surface alloying of titanium with aluminium. *J. Materials Science letters*, v.9, p. 308-310, 1990.
- 2 - ABBOUD, J.H.; WEST, D.R.F. Oxidation of titanium aluminides produced by laser surface alloying. *J. Materials Science letters*, v.11, p. 1479-1482, 1992.
- 3 - AIHUA, W.; ZENGYI, T.; BEIDI, Z. Laser beam cladding os seating surfaces on eshaust valves. *Welding Research Supplement*, p. 106s-109s, april, 1991.
- 4 - ALTSHULIN, S.; ZAHAVI, J.; ROSEN, A.; NADIV, S. The interaction between a pulsed laser beam and a steel surface. *J. Materials Science*, v.25, p. 2259-2263, 1990.
- 5 - ANDRIYAKHIN, V.M.; ZVEREV, S.E., CHEKANOVA, N.T. Laser Hardening of U10 Steel. *Avtomob. Prom-st*, n. 5, p. 28-29, 1980.
- 6 - ANDRIYAKHIN, V.M.; CHEKANOVA, N.T. Effect of higt-power CO₂ laser on the structure and properties of cast irons. *Fiz. Khim. Mekh.*, n. 3, p. 129-137, 1983.
- 7 - ARECCHI, F.T.; SCHULZ-DUBOIS, E.O. *Laser Handbook*, v.2, ed. North-Holland Publishing Company, 1972.
- 8 - BAGDASAROV, Kh.S.; D'YACHENKO, V.V.; KOVSH, I.B.; STREKALOVA, M.S. High-power quasi-cw YAG:Nd laser and its use in surface hardening of steel 45. *Sov. J. Quantum Electron.*, v. 20, n. 2, p. 194-195, 1990.
- 9 - BERRETTA, J.R.; FERREIRA, P.I.; LIMA, E.A.; ROSSI, W.; VIEIRA, N.D. Estudos do tratamento térmico superficial de materiais via laser. *V Simp. Est. de Lasers e Aplicações*, São Paulo, 1992.
- 10 - BLAES, L.; BAUER, P.; GONSER, U.; KERN, R. Depth profile of a laser irradiated steel. *Z. Metallkunde*, v.79, n. 5, p. 278-281, 1988.
- 11 - BRANSDEN, A.S.; MEGAW, J.H.P.C.; BALKWILL, P.H.; WESTCOTT, C. Metal surface treatment and reduction in pitting corrosion of 304L stainless steel by excimer laser. *J. Modern Optics*, v. 37, n. 4, p. 813-828, 1990.
- 12 - CARSLAW, H.S.; JAEGER, J.C. *Conduction of heat in solids*, ed. Clarendon press, 1986.

- 13 - CHANDE, T.; GHOSE, A.; MAZUMDER, J. Surface properties and microstructures of AISI 1016 steel laser surface alloyed with chromium and nickel. *AIME Conf. Proceedings*, p. 117-130, 1984.
- 14 - CHARSEHAN, S.S. *Lasers in Industry*, ed. Van Nostrand Reinhold Company, 1972.
- 15 - COSTA, A. R. Modificações micro-estruturais induzidas por tratamentos superficiais com laser de alta potência. *no 49 Congresso Anual da ABM*, out, 1994.
- 16 - DAHOTRE, N.B.; MUKHERJEE, K. Development of microstructure in laser surface alloying of steel with chromium. *J. Materials Science*, v. 25, p. 445-454, 1990.
- 17 - D'ANNA, E.; LEGGIERI, G.; LUCHES, A.; MARTINO, M.; MENGUCCI, P.; MIHAILESCU, I.N.; ZEMEK, J. Surface nitridation by multipulse excimer laser irradiation. *Progress in Surface Science*, v. 35, p. 129-142, 1991.
- 18 - DAVIS, J.R.; *et al.* *Metal Handbook*, v. 1, ed. 10, ASM Intern. Handbook Committee, 1990.
- 19 - FASTOW, M.; BAMBERGER, M.; NIR, N.; LANDKOF, M. Laser surface melting of AISI 4340 steel. *Materials Science and Technology*, v.6, p. 900-904, 1990.
- 20 - FETZER, Cs.; GRANASY, L.; KEMENY, T.; KOTAI, E.; TEGZE, M.; VINCZE, I.; HOVING, W.; Van Der WOUDE, F. Laser-melted amorphous and crystalline Fe-B alloys. *Physical Review B*, v. 42, n.1, p. 548-554, 1990.
- 21 - FETZER, Cs.; GRANASY, L.; TEGZE, M.; VINCZE, I. Laser melted Fe-B alloys. *J. Non-Crystalline Solids*, v. 117-118, p. 160-163, 1990.
- 22 - GALERIE, A.; PONS, M.; CAILLET, M. Surface modification using lasers and ion beams. *Materials Science and Technology*, v.5, p. 806-812, 1989.
- 23 - GOLOVKO, L.F.; *et al.* Characteristic features of the hardening of iron-carbon alloys by high-power continuous CO₂ laser radiation. *Elektron. Obrab. Mater.*, n. 6, p. 26-30, 1980.
- 24 - GORYACHEV, N.S. *et al.* Study of laser-induced increase in hardness and wear resistance of steels. *Fiz. Khim. Obrab. Mater.*, n. 2, p. 42-44, 1974.
- 25 - GURKOVSKY, S.S. Characteristic features of steel substructure by laser irradiation. *J. Materials Science letters*, v.9, p. 1338-1340, 1990.

- 26 - GURKOVSKY, S.S. Study of non-homogeneous martensite by pulsed-laser hardening of steel. *J. Materials Science letters*, v.10, p. 87-90, 1990.
- 27 - GURKOVSKY, S.S. Influence of the residual stresses on the strength characteristics of steel by laser hardening. *J. Materials Science letters*, v.10, p. 491-493, 1991.
- 28 - HEGGE, H.J.; De BEURS, H.; NOORHUIS, J.; De HOSSON, J.Th.M. Tempering of steel during laser treatment. *Metallurgical Transactions A*, v.21A, p. 987-995, 1990.
- 29 - HEGGE, H.J.; BOETJE, J.; De HOSSON, J.Th.M. Oxidation effects during laser cladding of aluminium with SiC/Al powders. *J. Materials Science*, v.25, p. 2335-2338, 1990.
- 30 - HEGGE, H.J.; De HOSSON, J.Th.M. Solidification structures during laser treatment. *Scripta Metallurgica et Materialia*, v.24, p. 593-599, 1990.
- 31 - HIRANO, K.; MORISHIGE, N.; IRISAWA, T. Development of laser surface cladding with energy in optical fiber. *IHI Engineering Review*, v. 24, n. 1, p. 24-30, 1991.
- 32 - IERUSALIMSKAYA, A.N.; SAMOILOV, V.I. ; ULYAKOV P.I. Structure and change in materials induced by laser light pulses. *Fiz. Khim. Obrab. Mater.*, n. 4, p. 26-34, 1968.
- 33 - ION, J.C.; MOISIO, T.; PEDERSEN, T.F.; SORENSEN, B.; HANSSON, C.M. Laser surface modification of a 13,5% Cr, 0,6% C steel. *J. Materials Science*, v.26, p. 43-48, 1991.
- 34 - JACKSON, J.D. *Classical Eletrodynamics*, ed. Wiley, 1962.
- 35 - KEAR, B.H.; BREINAN, E.M.; THONPSON, E.R. Laser processing of materials. *AIME Conf. Proceedings*, p. 45-78, 1984.
- 36 - KIM, T.H.; SEONG, B.G. Titanium nitride laser-beam surface-alloying treatment on carbon tool steel. *J. Materials Science*, v.25, p. 3583-3591, 1990.
- 37 - KOECHNER, W. *Solid-State Laser Enginnering*, ed. Springer-Verlag, 1988.
- 38 - KOVALENCO, V.S.; VERKHOTTUROV, A.D.; GOLOVKO L.F.; PODCHERNYAEVA, I.A. Laser surface hardening and eletric-spark surface hardening. *J. Soviet Laser Research*, v. 9, n. 1, p. 2-77, 1988.
- 39 - KRAPOSHIN, V.S. Treatment of the surface of metallic materials with laser radiation. *Fiz. Khim. Mekh.*, n. 3, p. 1-12, 1982.
- 40 - KULKARNI, A.V.; LAL, R.; KANETKAR, S.M.; CHAUDHARI, S.M.; GHASIAS, S.V. Corrosion behaviour of pulsed laser treated

- maraging steel: mössbauer spectroscopy and scanning electron microscopy study. *Radiation Effects*, v.107, p. 139-145, 1989.
- 41 - LEVINE, A.K.; JOHNSON, L.F. *Lasers*, v.1, ed. New-York, 1966.
 - 42 - LIKOV, A.V. *Theory of Heat Conduction*, ed. Vysshaya Shkola, 1967.
 - 43 - MAILLET, H. *O Laser Principios e Técnicas de Aplicação*, ed. Manole, 1987.
 - 44 - MEHROTRA, U.S.; GUPTA, S.K.; SINGH, K.P. X-ray photoelectron spectroscopic studies of the effect of laser irradiation on the oxidation behaviour of modified 9Cr-1Mo ferritic steel. *J. Materials Science letters*, v.9, p. 473-475, 1990.
 - 45 - MOULIN, G.; SIFFRE, J.M.; MARCUS, P. Influence of laser melting treatment on surface composition of Fe-17Cr- 13Ni single crystal alloy. Part 1 Oxidation during laser treatment. *Materials Science and Technology*, v.6, p. 100-106, 1990.
 - 46 - MOULIN, G.; MARCUS, P. Influence of laser melting treatment on surface composition of Fe-17Cr- 13Ni single crystal alloy. Part 2 Surface segregation of nitrogen and sulphur. *Materials Science and Technology*, v.6, p. 107-112, 1990.
 - 47 - PELLETIER, J.M.; PERGUE, D.; FOUQUET, F. Laser surface melting of low and medium carbon steel: influence on mechanical and electrochemical properties. *J. Materials Science*, v.24, p. 4343-4349, 1989.
 - 48 - READY, J.F. *Effects of high-power laser radiation*, ed. Academic press, 1971.
 - 49 - READY, J.F. Treatment of materials. *Trans IEEE*, v. 70, n. 6, p. 7-20, 1982.
 - 50 - RIEKER, C.; MORRIS, D.G.; STEFFEN, J. Formation of microcrystalline layers on stainless steel by laser alloying. *Materials Science and Technology*, v.5, p. 590-594, 1989.
 - 51 - RIEKER, C.; MORRIS Heterogeneous nucleation during rapid solidification by laser surface melting. *Acta Metall. Mater.*, v.38, n. 6, p. 1037-1043, 1990.
 - 52 - RYKALIN, N.N.; UGLOV, A.A.; SMUROV, I.Y. Three-dimensional nonlinear problems of heating of metals with laser radiation", *Fiz. Khim. Obrab. Mater.*, n. 2, p. 3-13, 1979.
 - 53 - SCHAWLOW, A.L. *Lasers and light, readings from Scientific American*, ed. W.H. Freeman and Company, 1969.
 - 54 - SCHIFF, L.I. *Quantum Mechanics*, ed. Mc. Graw-Hill, 1968.

- 55 - SCHNEEWEISS, O.; ZAK, T.; VOLENIK, K. Coercivity changes in low carbon steels with laser treated surfaces. *J. Magnetism and Magnetic Materials*, v. 81, p. 273-276, 1989.
- 56 - SCOTT, D.A.; BRANDT, M.; DORIEN-BROWN, B. Laser modification of metal surfaces. *Optics and lasers in engineering*, v. 18, p. 1-13, 1993.
- 57 - SHVETS, Y.I. Basic directions in research on nonlinear mathematical models of heat-transfer processes accompanying the action of concentrated energy fluxes on materials. *Fiz. Khim. Mekh. Mater.*, n. 3, p. 70-73, 1986.
- 58 - SINGH, J. The constitution and microstructure of laser surface-modified metals. *JOM*, p. 8-14, set. 1992.
- 59 - SUBRAMANIAN, R.; SIRCAR, S.; MAZUMDER, J. Laser cladding of zirconium of magnesium for improved corrosion properties. *J. Materials Science*, v.26, p. 951-956, 1991.
- 60 - VOLGIN, V.I. Effect of laser alloying of a surface on the hardness of the aluminium alloy Al-25. *Fiz. Khim. Mekh.*, n. 1, p. 125-128, 1983.
- 61 - YARIV, A. *Introduction to Optical Eletronics*, ed. Holt, 1971.