

Tema: Engenharia de superfície

## TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE DE FERRO REVESTIDO COM GRAFITA COM LASER A FIBRA\*

Ivan Kwei Liu Kam<sup>1</sup>

Milton Sergio Fernandes de Lima<sup>2</sup>

### Resumo

O presente trabalho propõe a carbonetação a laser de ferro puro para a formação de uma camada endurecida na superfície. A formação de uma camada dura permite obter peças com melhores propriedades tribológicas, mas sem alterar as propriedades volumétricas do sólido. Foram realizados experimentos em quatro condições de tratamento a laser, com uso de uma fonte do tipo fibra de Yb:vidro. Análises microestruturais e de dureza mostraram a formação de camada ledeburítica e martensítica, dependendo das condições experimentais, até cerca de 50  $\mu\text{m}$  de profundidade. Análises por calorimetria permitiram, também, verificar que a absorvidade do laser na peça variou entre 30 e 46%. Estes resultados mostram que o uso de laser para a carbonetação de peças ferrosas, com a metodologia proposta, permite um alto rendimento, alta dureza da superfície e baixo aporte térmico ao material.

**Palavras-chave:** Lasers; Endurecimento a laser; Carbonetação; Ferro.

### SURFACE TREATMENTS OF GRAPHITE COATED IRON WITH A FIBER LASER

#### Abstract

This work proposes the laser carburizing of pure iron aiming the formation of a hard surface coating. This hard coating allows better tribological properties without changing the bulk properties of the solids. Four different laser treatments were carried out using a Yb:glass fiber laser. Microstructural and hardness analyses showed the appearance of ledeburite and martensite layers up to 50  $\mu\text{m}$  depth. Calorimetric analyses shown that the laser absorptivity at the surface were on the range 30 and 46%. Accordingly to the current methodology, the laser carburizing of ferrous alloys could be accomplished with high efficiency, high surface hardness and low heat input in the material.

**Keywords:** Lasers; Laser hardening; Carburizing; Iron.

- <sup>1</sup> Graduando em Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, bolsista de Iniciação Científica, Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos, SP, Brasil.
- <sup>2</sup> Físico, mestre e doutor em engenharia metalúrgica, pesquisador/chefe da subdivisão de lasers, Divisão de Fotônica, Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos, SP, Brasil.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A engenharia de superfícies tem evoluído para propiciar o desenvolvimento de novos materiais com propriedades melhoradas, por meio da alteração da sua camada mais externa. Esta camada está sujeita aos fenômenos mais severos de emprego em serviço e, comumente, é responsável por estabelecer o tempo de vida de uma determinada peça. Em particular, os desenvolvimentos de engenharia de superfícies têm sido impulsionados pela possibilidade de usar fontes de laser para o aquecimento controlado de regiões selecionadas dos materiais.

No caso das ligas ferrosas, o emprego do laser tem sido focado em aumentar a dureza, a resistência ao desgaste e diminuir o coeficiente de atrito de peças de uso mecânico. Por exemplo, Lo et al. [1] utilizaram um laser do tipo Nd:YAG para tratar um aço AISI 440C produzindo uma camada de cerca de 100  $\mu\text{m}$  de profundidade, composta por martensita, carbonetos e austenita retida. A camada endurecida possuía uma dureza máxima de 800 HV, comparada com cerca de 300 HV do material de base.

Fernandez-Vicente et al. [2] estudaram a possibilidade de tratar ferros fundidos com laser de forma a produzir uma camada endurecida por fusão em cilindros laminadores. A maioria das peças produzidas apresentou trincas devido à baixa tenacidade do ferro fundido resolidificado. Estes autores chegaram à conclusão que, no caso dos ferros fundidos perlíticos e bainíticos, deve-se proceder ao aquecimento sem fusão (endurecimento no estado sólido) a fim de evitar o trincamento, porém, nestas condições, obtém-se uma profundidade de endurecimento muito pequena. Esta fina camada advém da baixa absorvidade da superfície do ferro, a qual pode ser aumentada com uso de uma camada absorvedora de grafita.

A possibilidade de utilizar uma camada absorvente de grafita sobre as ligas ferrosas já é conhecida há algum tempo. No início, era uma maneira de melhorar a absorvidade (fração da intensidade incidente que é efetivamente absorvida pela peça na forma de calor) das superfícies, pois o carbono absorve muito mais o feixe de laser do que uma superfície metálica [3]. Na sequência, alguns autores como Vasconcelos et al. [4] mostraram que o carbono, presente na superfície, poderia difundir melhorando as propriedades tribológicas das peças.

Yilbas et al. [5] estenderam o conceito de carbonetação dos aços inoxidáveis, classe SAE 304, pela aplicação de uma resina fenólica contendo 5% de partículas de TiC. O efeito da carbonetação, junto com a adição de partículas duras, produziu um aumento na dureza de 230 HV para 820 HV. O tratamento também resultou em uma camada com tensão residual compressiva da ordem de -400 MPa, o que confere uma tenacidade a fratura superior na superfície tratada.

A maior parte da literatura relacionada com o problema de tratamentos de superfície com laser apresenta dois problemas. Primeiramente, não se sabe a quantidade de calor disponível para o aquecimento da peça. O desconhecimento da absorvidade do laser na peça leva a parâmetros de processo que não se adequam ao tipo de material e não permitem prever as temperaturas nas quais as transformações de fase ocorrem. Segundo, como os autores já partem de ligas como ferros fundidos e aços, a análise fica complicada do ponto de vista metalúrgico. Isto porque um material ligado faz com que a diluição e a difusão do carbono sejam mais difíceis, portanto não representa um problema facilmente compreensível.

O presente estudo visa o entendimento da transferência de calor e massa durante a irradiação de peças de ferro puro, previamente revestidas de grafita, com vistas ao emprego da tecnologia para peças com superfície endurecida.

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais de partida foram obtidos de barras cilíndricas de ferro puro (99,995% Fe) com 12,3 mm de diâmetro. O cilindro foi cortado em discos com 3 mm de espessura em máquina de eletroerosão a fio. Os discos foram então lixados com papel SiC600 para obter superfícies lisas e reproduzíveis. O peso de cada disco foi 2,85 g.

O laser utilizado foi do tipo fibra de itérbio:vidro da marca IPG Photonics, modelo YLR-2000. O laser trabalha em modo contínuo, com potências de até 2000 W. Uma mesa CNC realiza a movimentação da amostra com resolução de 0,01 mm. O eixo Z, também controlado pela CNC, permite regular a focalização do laser sobre a superfície da amostra. O diâmetro mínimo do feixe é de 0,1mm. No presente estudo, não se utilizou atmosfera protetora.

Antes dos tratamentos, os discos foram aspergidos com spray de grafita coloidal da marca DNC. Não foi possível controlar a espessura da camada aplicada, mas o tempo de aplicação e a distância foram mantidos constantes nas amostras.

O porta-amostra foi especificamente desenhado para o presente trabalho, de forma a isolar termicamente a amostra. A Figura 1 apresenta o porta-amostra onde a peça fica suspensa por quatro parafusos, sendo que o parafuso de baixo não é visível na figura. O cabo preto contém o termopar que é fixado à superfície inferior da amostra de modo a monitorar a temperatura em função do tempo. A aquisição de dados foi feita por meio de termopares do tipo K (Cromel - Alumel) com transdutor da empresa Pico Technology Ltd., Modelo TC-08, que permite o monitoramento da temperatura por até 08 termopares. O software de controle é o PicoLog, instalado em um notebook padrão.

A amostra é empregada como um calorímetro, sendo a absorvidade calculada através da Equação 1 [6].

$$\beta = \frac{m.C_p(T_{\max} - T_a)}{P.\Delta t} \quad (1)$$

Onde:  $\beta$  é a absorvidade média da amostra,  $m$  é a massa do corpo de prova,  $C_p$  é o calor específico (em J/kgK),  $T_{\max}$  é a temperatura máxima atingida pela amostra,  $T_a$  é a temperatura ambiente,  $P$  é a potência do laser e  $\Delta t$  é o tempo de interação do laser.

O tempo de interação é estimado pelo tempo no qual o feixe de laser atravessa a superfície plana da amostra, conforme mostrado na Figura 2. Este tempo é função da velocidade do feixe e do diâmetro da amostra, os quais são constantes aqui, e do espaçamento das linhas paralelas do tratamento, que é uma variável.

O procedimento experimental consistiu nas seguintes etapas:

- a) Aspersão das amostras com o spray de grafita coloidal, seguido de secagem ao ar por quinze minutos;
- b) Montagem no porta-amostras e posicionamento do termopar (Figura 1);
- c) Programação da CNC: Foi realizado um padrão em forma de zig zag quadrado de 15 x 15 mm de forma a passar sobre toda a amostra (Figura 2). O espaçamento entre as linhas foi variável e, portanto, o número de trilhas do laser sobre a superfície também foi variável. O número de passes é o número de vezes que o laser faz o trajeto representado na Figura 2.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

d) Ajuste da posição focal de forma a produzir um diâmetro de feixe na superfície da amostra: Conhecendo os parâmetros do feixe, diâmetro no plano focal,  $\omega_0$ , e qualidade do feixe,  $M^2$ , é possível calcular o diâmetro  $\omega$  na posição relativa Z conforme a Equação 2, para um feixe gaussiano.

$$\omega(Z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda Z M^2}{\pi \omega_0^2} \right)^2} \quad (2)$$

Onde  $\lambda$  é o comprimento de onda do laser (1,07  $\mu\text{m}$ ). O valor de  $M^2$  obtido para este laser em trabalhos anteriores é 12 e o valor de  $\omega_0$  é 0.1 mm.

e) Realização dos tratamentos e registro das temperaturas de processo. Na sequência, os peças eram retiradas para análise.



Figura 1. Porta-amostras para tratamento.

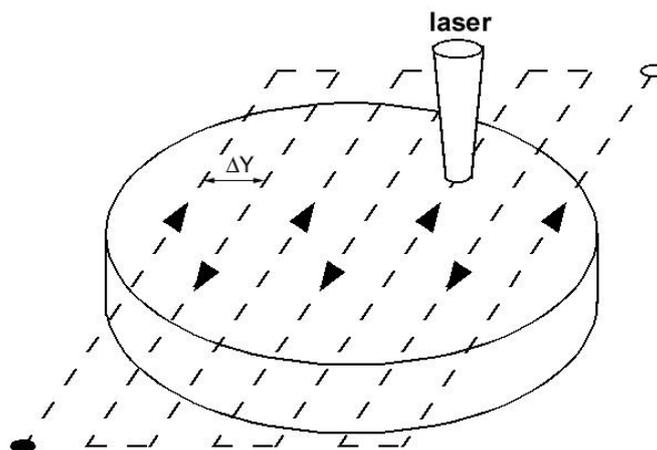


Figura 2. Representação esquemática do processo, com linhas pontilhadas representando a trajetória do feixe de laser.

Após o tratamento, as amostras foram cortadas com a máquina Precision Cutter modelo PC 10 da Imptech, usando um disco de diamante, e parte delas foi embutida no baquelite utilizando a máquina da Arotec PRE-30. Após o embutimento, foi realizado o processo de lixamento utilizando o equipamento da Arotec APL-4 juntamente com as lixas SiC 80, 100, 200, 400, 600, 800 e 1200. Depois de lixadas,

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

as amostras foram polidas utilizando a Polipan 2D da Pantec com pastas de polimento de diamante com granulometria de 6  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ . Por fim, as amostras polidas, foram atacadas de forma controlada com algodão embebido com reagente nital 2% (2%  $\text{HNO}_3$  em etanol).

As observações microscópicas foram realizadas em microscópio Zeiss modelo Imager.A2m dotado de câmera digital. As análises das imagens foram realizadas com ajuda do software ImageJ. Análises por difratometria de raios-X foram realizadas em equipamento da empresa Rigaku, modelo Ultima IV, com tubo de cobre. Ensaios de dureza foram realizados no equipamento Future Tech Microhardness Tester FM-700, utilizando uma carga de 50gf por 10 segundos.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados experimentos de aquecimento no laser, conforme visto anteriormente, com as condições dadas na Tabela 1. A velocidade e a potência foram mantidas constantes, enquanto a desfocalização ( $\Delta Z$ ), o número de passes e o deslocamento foram variados. A desfocalização apresenta a distância entre o plano focal do laser e a superfície da peça. Utilizando a Equação 2, é possível calcular o diâmetro do feixe sobre a peça  $\omega(Z)$ , sendo 0,82, 1,64 e 4,90 mm para as condições  $\Delta Z$  de 5, 10 e 30 mm, respectivamente. Com estes valores de  $\omega(Z)$  é possível estimar a intensidade do feixe sobre a peça, pela razão entre potência e área do feixe, conforme também apresentado na Tabela 1. O deslocamento  $\Delta Y$  é o espaçamento entre uma linha e outra na superfície da amostra (Figura 2).

**Tabela 1.** Condições experimentais

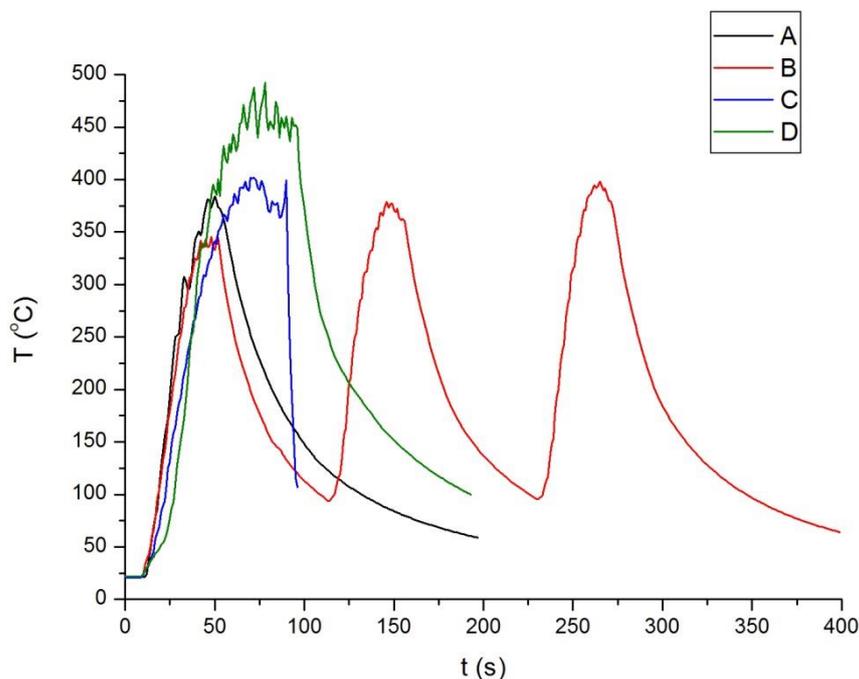
Condição	$\Delta Z$ (mm)	N.passes	$\Delta Y$ (mm)	I ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )
A	30	1	1	$4,8 \times 10^2$
B	5	3	1	$1,7 \times 10^4$
C	5	1	0.5	$1,7 \times 10^4$
D	10	1	0.5	$4,3 \times 10^3$

Condições fixas:  $V = 5 \text{ mm/s}$ ,  $P = 90 \text{ W}$

As medidas de temperatura, para cada condição, são apresentadas na Figura 3. O padrão serrilhado, observado no ápice das curvas, é oriundo das várias trilhas do laser na superfície durante o tratamento (Figura 2). O corpo de prova D apresenta três ápices, devido ao fato do número de passes ser igual a três. O corpo de prova C apresentou um problema com o posicionamento do termopar e a curva de resfriamento não pode ser registrada.

A temperatura máxima atingida no volume tratado ( $T_{\text{vol}}$ ) em cada caso está discriminada na Tabela 2. A fim de poder determinar a temperatura máxima na superfície ( $T_{\text{max}}$ ), necessária para o cálculo da absorvidade ( $\beta$ ) conforme a Equação 1, foram realizadas regressões lineares para curva. Estas regressões foram feitas para a parte do resfriamento, utilizando o conjunto de dados nos quais o erro ( $R^2$ ) ficou entre 0.9 e 1,0. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 3.** Medidas de temperatura em função do tempo para as quatro condições experimentais.

A temperatura máxima no volume ( $T_{vol}$ ), conforme observado na Tabela 2, é de  $400 \pm 50^\circ\text{C}$ . Para que se possam prever os efeitos desta temperatura na amostra, como um todo, se faz útil observar o diagrama de fases do sistema Fe-C conforme mostrado na Figura 4a [7]. O diagrama da Figura 4a mostra as fases presentes em equilíbrio termodinâmico, sendo  $\delta$ ,  $\gamma$  e  $\alpha$  as formas alotrópicas do ferro puro, G a fase grafita e L a fase líquida. O volume da amostra é composto por ferro puro e não sofre mudança de fase, pois a transição  $\alpha \rightarrow \gamma$  ocorre acima de  $740^\circ\text{C}$ . Portanto, o tratamento laser não promove mudança significativa na estrutura e nas propriedades da peça, estando esta confinada a um volume próximo à superfície da amostra.

**Tabela 1.** Resultados das temperaturas máximas medida e estimada.

Temperaturas	$T_{vol} / ^\circ\text{C}$	$T_{max} / ^\circ\text{C}$	$\beta$
Amostra A	381	584,0	39,7%
Amostra B 1º Passe	345	666,0	44,3%
Amostra B 2º Passe	379	640,3	42,1%
Amostra B 3º Passe	398	676,8	46,0%
Amostra C	402	*	*
Amostra D	493	923,9	30,3%

\* O termopar despreendeu e não foi possível realizar a medida da temperatura em função do tempo para o resfriamento.

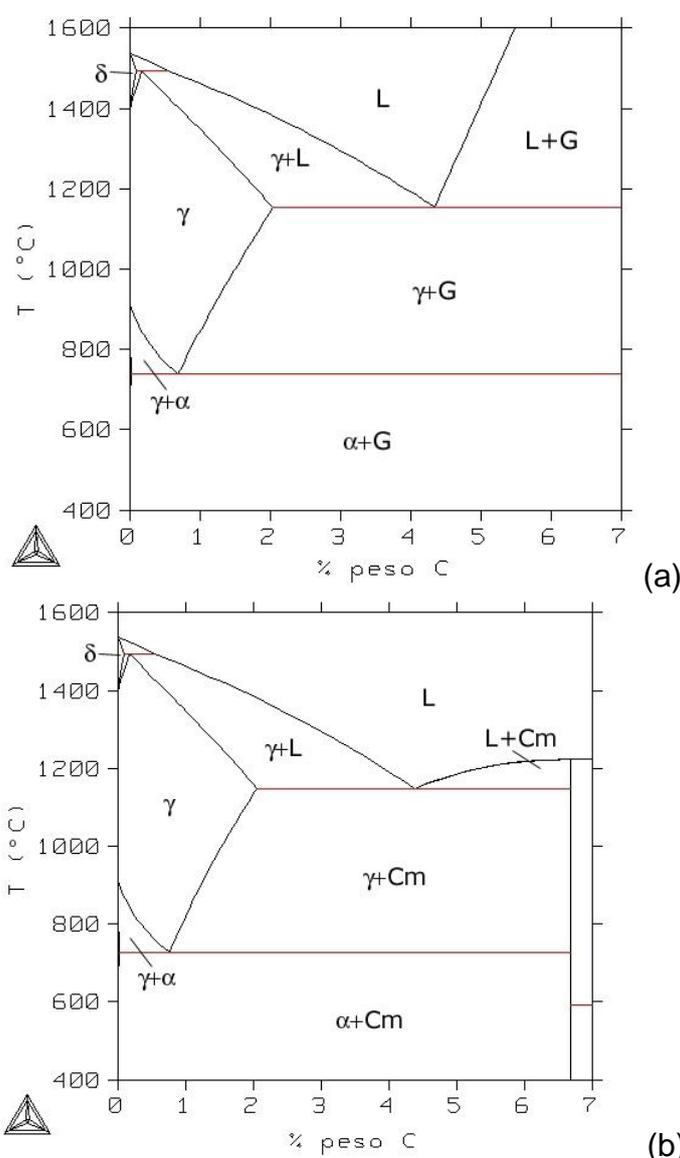
A Tabela 2 também apresenta as temperaturas máximas ( $T_{max}$ ) obtidas pela extrapolação da curva de resfriamento, conforme o formalismo já descrito. Podem-se

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

observar na superfície temperaturas maiores, entre 584,0 e 923,9°C. Estas temperaturas permitem antever algumas transformações de fases importantes, com a transformação  $\alpha \rightarrow \gamma$ , para o ferro puro, a 740°C e a formação do eutético Fe-C em cerca de 1150°C.

Devido à aplicação de carbono sobre a superfície da peça, a absorvidade do laser sobre a peça com carbono é maior do que a peça sem a aplicação de carbono. A absorvidade medida nos experimentos varia de 30,3 % a 46,0 %. A absorvidade do ferro sem revestimento de grafita se situa entre 8 e 10 % [3].

No caso da amostra B, embora tenha sido realizado três passes em uma amostra isolada termicamente, não houve um aumento exagerado na temperatura. Aumentando  $T_{vol}$  de 345°C a 398°C do primeiro ao terceiro passe, ou seja, é possível tratar a peça com vários passes sem que ocorram transformações de fase na peça sendo tratada.



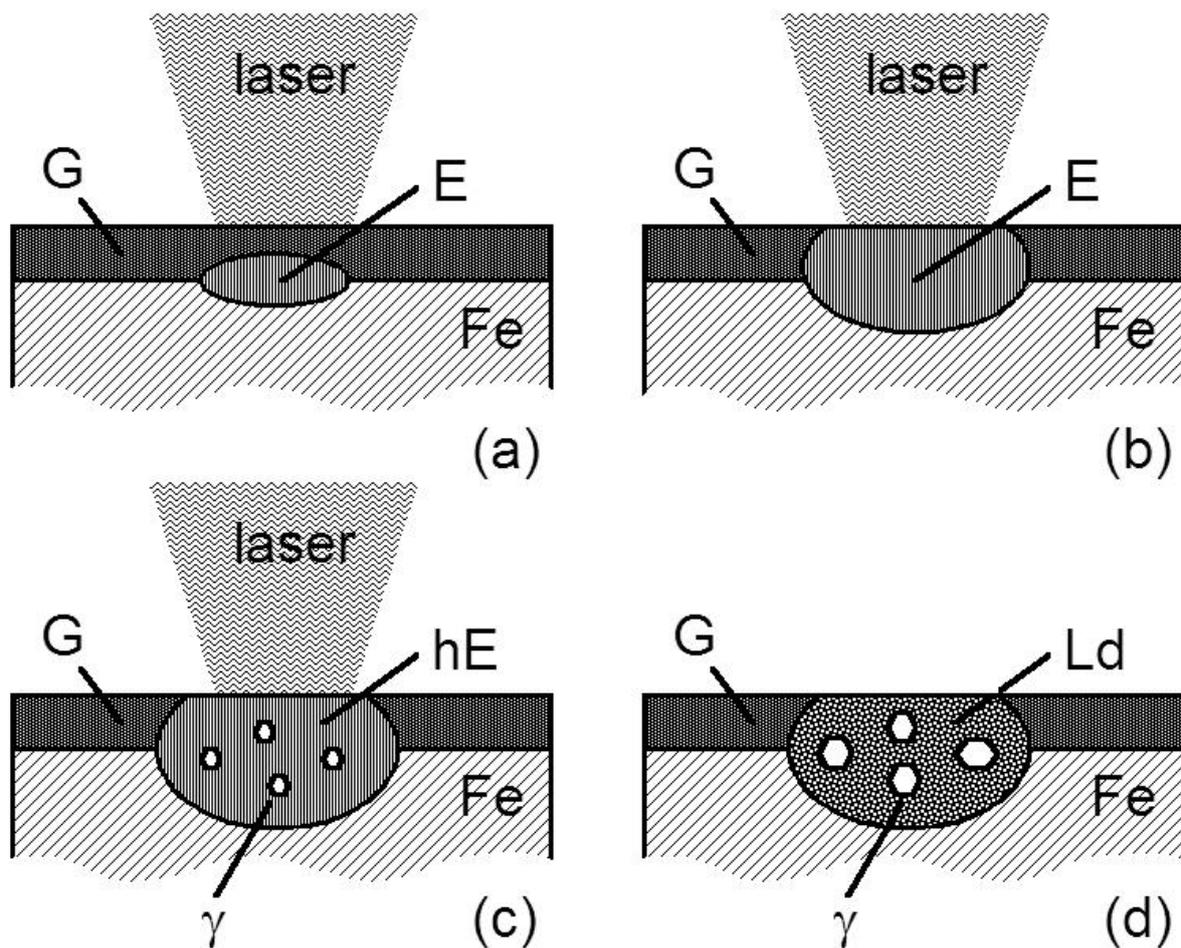
**Figura 4.** Diagrama de fases ferro-carbono: (a) equilíbrio estável e (b) equilíbrio metaestável.

A Figura 5 apresenta uma representação esquemática do processo, desde a fusão devido ao aquecimento pelo feixe de laser até a solidificação. Na Figura 5a, se vê

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

que o laser induz o surgimento do eutético (E) na interface entre o Fe e a grafita (G). Enquanto houver calor, esta região de composição eutética cresce até atingir a superfície da peça (Figura 5b). A partir do momento que a poça de fusão atinge a superfície, o balanço entre carbono e ferro para se gerar o eutético se torna desfavorável e a composição se desloca para a esquerda no diagrama de fases da Figura 4a. A composição agora é hipoeutética (hE) e começam a aparecer núcleos da fase  $\gamma$ -austenita dentro da poça.

Quando o laser deixa de atuar, inicia-se a solidificação. No entanto, isso se faz muito rapidamente e o diagrama de fases Fe-C (Figura 4a) não é mais válido. A solidificação ocorre segundo o diagrama de fases metaestável Fe-C (Figura 4b), onde o eutético é do tipo ferro mais cementita. Portanto, o que se espera é uma região ressolidificada composta por dendritas primárias de austenita numa matriz de ledeburita (Ld).

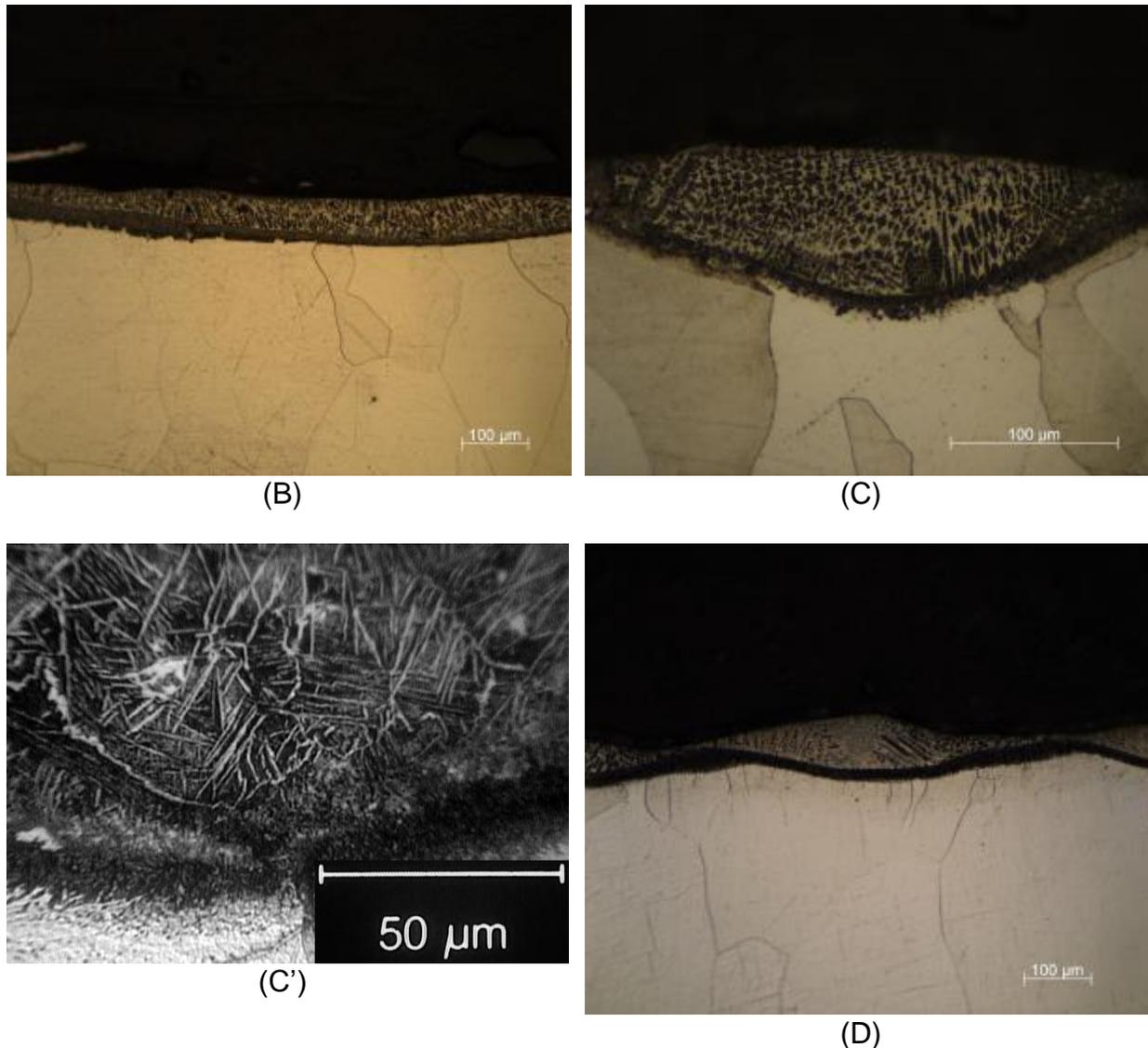


**Figura 5.** Representação esquemática do processo de fusão e solidificação no tratamento a laser.

Microestruturalmente se observa exatamente este tipo de microestrutura, conforme se vê na Figura 6. A condição A apresenta uma temperatura máxima na superfície (Tabela 2) muito pequena e não existe modificação microestrutural visível, portanto ela não é apresentada na Figura 6. Nas outras condições (B, C e D) houve alterações microestruturais evidentes, com dendritas primárias da fase austenita, circundado por ledeburita, conforme previsto anteriormente. Nas regiões de sobreposição, como aquela apresentada na Figura 6C', são observadas agulhas de

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

carbonetos. Estas agulhas se apresentam na amostra C porque neste caso a velocidade foi menor e o espaçamento entre as trilhas foi mais cerrado. Isso ocasiona um efeito de reaquescimento importante, com reações adicionais da ledeburita.



**Figura 6.** Micrografias obtidas das amostras em diferentes condições experimentais, sendo C' a mesma condição C obtida em região diferente.

A evolução microestrutural também pode ser verificada por meio de difratometria de raios-X, conforme mostrado na Figura 7. Os difratogramas apresentam as fases grafita (G), óxido de ferro (magnetita-O) e ferrita ( $\alpha$ ). A fase grafita está presente como um resquício da camada previamente depositada e tende a desaparecer com o aumento do número de passes, como é possível observar comparando-se a condição A com a B. O óxido ocorre naturalmente, pois o processo foi feito ao ar. A fase ferrita vem do material de base não transformado (cond. A) e da ledeburita. A austenita que se forma durante o processo se torna martensita no resfriamento, por isso a fase austenita não é visível nos difratogramas. Como os picos da martensita se sobrepõem à ferrita, não é possível discriminá-las nos difratogramas da Figura 7.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

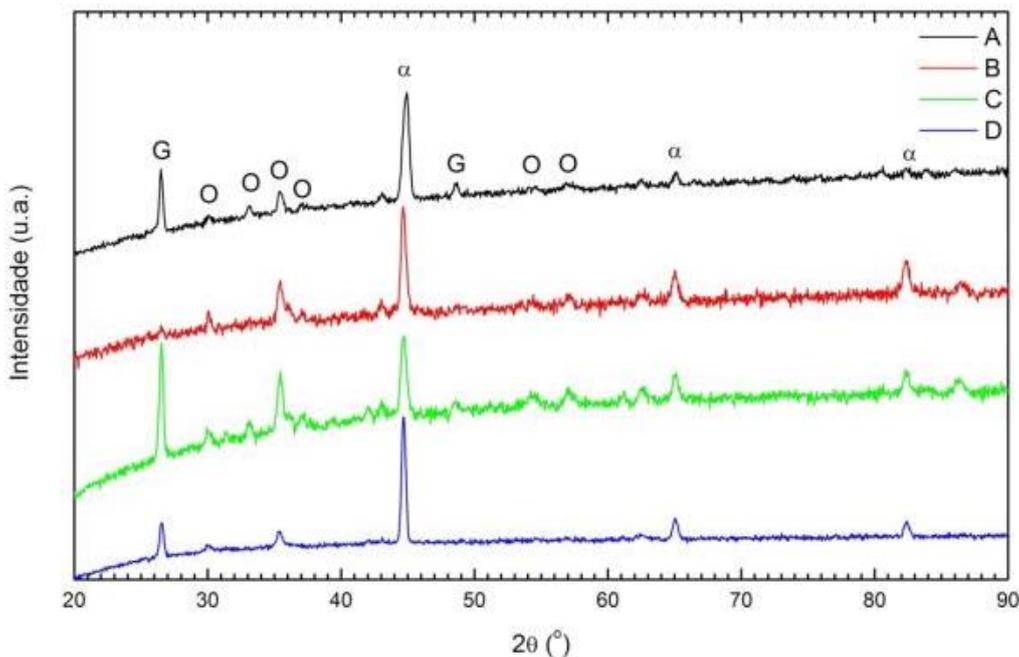


Figura 7. Difratoogramas de raios-X das amostras nas diferentes condições.

### 3.1 Endurecimento da superfície tratada

Na Figura 8 são apresentadas as curvas de dureza HV em função da profundidade ( $z$ ) para as amostras A a D. No caso da amostra A, não houve endurecimento visível. Ficando a dureza em torno de 90 HV, que é a dureza do metal base. Nos outros casos, B, C e D, a profundidade da região endurecida ficou em torno de 50  $\mu\text{m}$ . A variação na dureza próxima à superfície deve-se ao aparecimento de líquido, conforme mostrado na Figura 5, o que leva à formação de ledeburita. A ledeburita é menos dura que a martensita nesse sistema Fe-C. Portanto, a queda observada na região endurecida se deve à transição entre ledeburita e martensita próximas à superfície. Como se verifica na Figura 8, quando mais passes acontecem (cond. B), mais ledeburita é formada e a transição se faz mais visível.

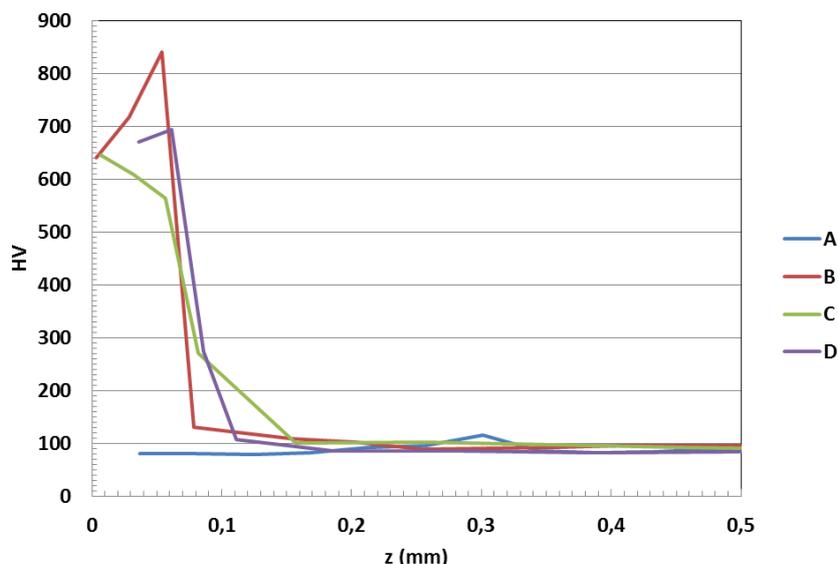


Figura 8. Gráfico de dureza (HV) em função da profundidade para as amostras em estudo.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## 4 CONCLUSÃO

O presente estudo permite concluir o que segue:

- a) O presente método de endurecimento do ferro puro recoberto com grafita se mostrou eficiente para a formação de fases duras na superfície do material.
- b) A temperatura atingida pelas amostras não ultrapassou temperaturas nas quais ocorre reação, portanto o volume das peças não sofreu modificações.
- c) Por outro lado, a temperatura da superfície foi suficientemente alta para promover a carbonetação e fusão localizada, gerando ledeburita e martensita no resfriamento.
- d) Foi possível determinar a absorvibilidade nas amostras processadas, ficando entre 30 e 46%, nos casos onde foi feito o estudo calorimétrico.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq-Conselho Nacional de Pesquisas pela bolsa de iniciação científica do aluno Ivan K.L.Kam.

## REFERÊNCIAS

- 1 Lo KH, Cheng FT, Man HC. Laser transformation hardening of AISI 440C martensitic stainless steel for higher cavitation erosion resistance. *Surface and Coatings Technology*. 2003;173: 96-104.
- 2 Fernández-Vicente A, Pellizzari M, Arias JL. Feasibility of laser surface treatment of pearlitic and bainitic ductile irons for hot rolls. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012; 212:989-1002.
- 3 Ready JF. *LIA Handbook of Laser Materials Processing*. Orlando: Laser Institute of America & Magnolia, Publishing, Inc.; 2001.
- 4 Vasconcelos G, Costa PNG, Antunes EF. Covering steel surfaces with carbon black by CO2 laser beam. *Materials Science Forum*. 2010; 660-666:249-252.
- 5 Yilbas BS, Akhtar SS, Matthews A, Karatas C. Laser treatment of carbon film coated steel surface, *Surface Engineering*. 2012;28(1):57-67.
- 6 Lima MSF, Wagniere JD. Determinação da absorção do feixe laser em ensaios de refusão em regime contínuo. *Revista de Metalurgia*. 1998; 32: 131 - 134.
- 7 ThermoCalc thermodynamic database, version J, Stockholm Royal Institute, Suécia, 1994.

---

\* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*