

# **Análise Microestrutural de Pontos Fundidos na Superfície de Aços por LASER**

## **(Microstructural Analysis of Melted Spots in the Surface of Steels by LASER)**

Roger Navarro Verástegui<sup>1</sup>, Ivan Guerra Machado<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais (PPGEM), Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LS&TC), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, roger.verastegui@ufrgs.br, welder@ufrgs.br

### **Resumo**

O presente trabalho tem como objetivo investigar os efeitos microestruturais em aços (SAE 1020, SAE 1045 e AISI 52100), sobre cujas superfícies foram incididos feixes laser com três níveis diferentes de potência (energia), resultando em “pontos” (pequenas áreas) com muito altas taxas de resfriamento nas suas regiões fundidas e correspondentes zonas afetadas pelo calor (ZAC). A análise foi desenvolvida por detalhada verificação de microdureza (Vickers), metalografia através de microscopia de luz e microscópio eletrônico de varredura (MEV), medições da ZAC e estimativas matemáticas para fontes instantâneas concentradas de calor. Observou-se que as superfícies fundidas e as correspondentes ZACs apresentaram significativo endurecimento e conveniente microestrutura, tais como aquelas tipicamente obtidas por tratamentos térmicos superficiais. Além do mais, a homogeneidade da microestrutura originalmente existente é um fator positivo, pois resulta em menor gradiente de dureza na ZAC, como mostrado pelo aço esferoidizado AISI 52100.

**Palavras-chave:** LASER. Endurecimento Superficial. Fontes Instantâneas de Calor.

**Abstract:** The present work has as objective to search for microstructural effects in steels (SAE 1020, SAE 1045 and AISI 52100), on which surfaces laser beams were impinged with three different power (energy) levels, resulting “spots” (small areas) with very high cooling rates in their melted regions and corresponding heat affected zones (HAZ). The analysis was developed through detailed microhardness (Vickers) verification, metallography through light microscopy and scanning electron microscope (SEM), HAZ measurements and mathematical estimates for instantaneous concentrated heat sources. It was noticed that the melted surfaces and corresponding HAZs have shown expressive hardening and suitable microstructure, like those typically obtained by surface heat treatments. Moreover, the previously existing microstructure homogeneity is a positive factor, as showed by the spheroidised steel AISI 52100.

**Key-words:** LASER. Surface Hardening. Instantaneous Sources of Heat.

### **1. Introdução**

Neste trabalho foram detalhadamente investigadas as transformações microestruturais dos aços SAE 1020, SAE 1045 e AISI 52100, quando laser (tipo CO<sub>2</sub>) com diferentes energias, foi aplicado sobre suas superfícies para fundir “pontos” (regiões muito pequenas). Da maneira aqui utilizada, esse processo provoca muito altas taxas de resfriamento, tanto no metal fundido, quanto na zona afetada pelo calor (ZAC).

O interesse sobre esse assunto deve-se, essencialmente,

ao fato do endurecimento por refusão superficial ser uma das tecnologias mais inteligentemente empregadas para produzir específicas regiões resistentes a variados tipos de desgaste. Entretanto, faltam informações minuciosas com relação às transformações microestruturais que os materiais base sofrem, inclusive com embasamento na (micro) dureza.

Então, após a produção dos pontos foi analisada a microestrutura dos mesmos, utilizando-se microscopia de luz e microscópio eletrônico de varredura (MEV), verificação da microdureza e empregadas equações matemáticas para estimativa das taxas de resfriamento nas ZACs produzidas. A partir dos resultados obtidos é possível se ter noção dos efeitos de tratamentos térmicos de endurecimento superficial com processos que alcancem muito altas taxas de resfriamento.

---

(Recebido em 22/04/2007; Texto Final em 09/11/2007).

## 2. Materiais e Métodos

O sistema de geração do laser (cavidade ressonante) é marca Rofin Sinar modelo RS 2000 SM, sendo CO<sub>2</sub> o meio ativo, operando no modo TEM<sub>10\*</sub> e lente com distância focal de 7,5 polegadas (190,5 mm). O feixe foi focado nas superfícies dos corpos de prova (sem preaquecimento), com diâmetro calculado de 0,77 mm, sendo argônio o gás de proteção utilizado, na vazão aproximada de 20 l/min. As potências empregadas foram de 2000 W, 1500 W e 1000 W, com tempo de aplicação do feixe (ajustado no aparelho) de 0,1 s, resultando em energias nos pontos produzidos, portanto, de 200 J, 150 J e 100 J, respectivamente.

Os aços foram cuidadosamente usinados em corpos de prova com geometria de um cubo com 10 mm de aresta, assegurando-se assim, extração tridimensional de calor. Os mesmos encontravam-se nos estados esferoidizado (AISI 52100) e normalizados (SAE 1020 e SAE 1045), sendo que as suas composições químicas estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Composições Químicas dos Aços

Aço	Elemento Químico (% em massa)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
SAE 1020	0,22	0,25	0,46	0,019	0,013	-	-
SAE 1045	0,48	0,21	0,72	0,022	0,031	0,16	-
AISI 52100	0,93	0,24	0,31	0,014	0,01	1,39	0,14

A análise metalográfica foi realizada através de microscópio de luz marca Olympus modelo BX60M e em microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca Jeol modelo JSM 5800. Todos os corpos de prova foram preparados com lixas e polidos com pasta de diamante de 6 µm e 1 µm, sendo o ataque químico realizado com Nital (concentração de 1%).

A microdureza foi verificada através de um microdurômetro marca Shymadsu, modelo M-92080, com carga de 50 g e tempo de 15 s. Realizaram-se perfis de dureza na seção transversal do ponto, desde a sua superfície fundida, até o metal base inalterado, verificando-se a mesma em intervalos de 0,03 mm. Para maior confiabilidade, foram realizados três perfis de dureza para cada aço e para cada energia empregada nos experimentos, utilizando-se as médias destes valores.

Os ciclos térmicos e as taxas de resfriamento foram estimados a partir da Equação 1, ou de Fourier [1].

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \left( \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) \quad (1)$$

onde T = temperatura (°C); t = tempo (s); (x, y, z) = coordenadas do ponto considerado (m); α = difusividade térmica (m<sup>2</sup>/s) = k/(ρ.c); k = condutividade térmica (W.m<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>); ρ = massa específica (kg.m<sup>-3</sup>); c = calor específico (J.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>), sendo o produto ρ.c usualmente denominado “capacidade térmica volumétrica”.

Essa relação é satisfeita pela Equação 2 [1, 2], pois nos metais a transmissão da energia do feixe laser ocorre num extremamente curto intervalo de tempo (cerca de 10<sup>-13</sup> s), fato que permite considerá-la como proveniente de uma fonte posicionada na superfície do material [3].

$$\Delta T = \frac{Q}{4 \cdot \rho \cdot (\pi \cdot l \cdot \alpha)^{3/2}} \cdot \exp\left[-\frac{R^2}{4 \cdot l \cdot \alpha}\right] \quad (2)$$

onde ΔT = T-T<sub>0</sub>; T = temperatura do ponto de interesse num dado instante de tempo (°C); T<sub>0</sub> = temperatura de preaquecimento (°C); Q = quantidade de calor (J); R = posição do ponto de interesse na peça (m) = (x<sup>2</sup>+y<sup>2</sup>+z<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup>.

Derivando-se a Equação 2 em relação ao tempo, obtêm-se as taxas de resfriamento nas diferentes posições relativas, conforme a Equação 3, para temperatura de preaquecimento igual a zero [2].

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{T}{t} \left( \frac{R^2}{4t\alpha} - \frac{3}{2} \right) \quad (3)$$

Os coeficientes físicos do material devem ser conhecidos para solucionar as Equações 2 e 3. Como os mesmos praticamente não variam entre os aços utilizados, optou-se por aqueles valores geralmente adotados para aços ao carbono [citados em 2], i. e., ρ.c = 4,5.10<sup>6</sup> J.m<sup>-3</sup>.°C<sup>-1</sup> e α = 9,1.10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s, com temperatura de fusão igual a 1530 °C. Apesar desses coeficientes físicos se alterarem em função da temperatura, esses valores fornecem estimativas úteis para várias aplicações de engenharia da soldagem.

Por outro lado, através da Equação 3 foram estimadas as taxas de resfriamento na temperatura de 650 °C para diferentes posições nas ZACs dos pontos produzidos. Justifica-se a escolha dessa temperatura, devido a mesma encontrar-se na média do intervalo (800/500 °C) onde geralmente ocorrem as mais importantes transformações de fase dos aços ao carbono e baixa liga (quando aquecidos e resfriados sob elevadas taxas).

## 3. Resultados e Discussões

Para todos os aços, verificou-se que as variações produzidas com as diferentes energias empregadas na fusão dos pontos foram apenas nos aspectos da microdureza e, em menor escala, da extensão da ZAC. Foi impossível medir precisamente a (máxima) penetração dos pontos, uma vez que os mesmos são extremamente pequenos, indicados na Figura 1 (diâmetro médio de 1,6 mm) e não existiam facilidades para cortá-los exatamente no centro geométrico.

Em cada corpo de prova produzido, a extensão da ZAC foi avaliada no plano da sua superfície (após polida), enquanto verificou-se a microdureza na seção transversal; portanto, não coincidem os valores medidos da extensão da ZAC e aqueles que poderiam ser inferidos pela microdureza. Na

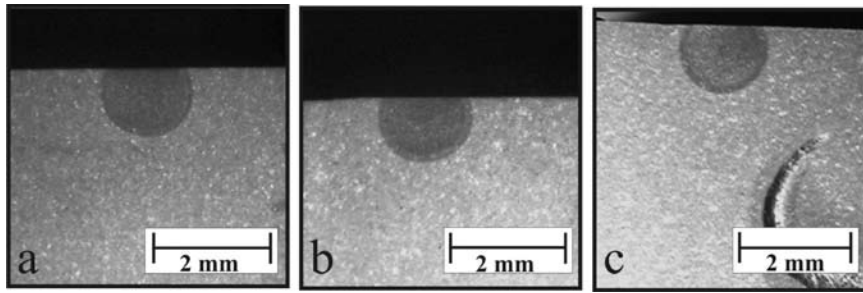


Figura 1 – Macrofotografias dos pontos produzidos com diferentes potências do feixe laser, em vista de topo: (a) aço SAE 52100, com 2000W; (b) aço SAE 52100, com 1500W; (c) Aço SAE 52100, com 1000W.

Tabela 2 – Extensão da ZAC em Função da Energia do LASER e do Metal Base

Aço	Extensão da ZAC (mm) para o LASER, com energia de:		
	(200 J)	(150 J)	(100 J)
SAE 1020	0,18 / 0,18 / 0,19	0,17 / 0,16 / 0,17	0,16 / 0,15 / 0,15
SAE 1045	0,17 / 0,18 / 0,17	0,17 / 0,16 / 0,16	0,15 / 0,15 / 0,15
AISI 52100	0,17 / 0,17 / 0,18	0,16 / 0,15 / 0,16	0,15 / 0,16 / 0,15

Tabela 2 observa-se que é pequena a variação da extensão da ZAC, considerando-se as diferentes energias do laser, como mencionado. Porém, essa questão deve ser analisada com muita cautela, pois envolve diversos e complexos aspectos, entre os quais a possibilidade do feixe laser não ter tido idêntico acoplamento com o metal base (MB) em todos os casos.

Os resultados serão apresentados por tipo de aço (seqüência SAE 1020, SAE 1045 e AISI 52100). Essa ordem facilita na percepção da influência do carbono, uma vez que é crescente o conteúdo desse elemento químico (os elementos químicos estão aqui expressos por suas % em massa). Além disso, como será visto, para um mesmo aço não ocorreu significativa alteração microestrutural com a energia. Então, a seguir será descrita a evolução da microestrutura e microdureza para cada MB e condição de incidência do laser.

### 3.1 Aço SAE 1020

O aço SAE 1020 encontrava-se no estado normalizado e na Figura 2 estão as microdurezas verificadas nas regiões do

ponto fundido, ZAC e MB inalterado, bem como as taxas de resfriamento na ZAC calculadas na temperatura de 650 °C.

Nesse caso, para todas as energias a maior microdureza verificada não foi na superfície, mas na ZAC. Isso ocorreu pelo fato da microdureza na superfície resultar, provavelmente, de martensita com baixo teor de carbono, pois essa região sofreu fusão e dessa forma este elemento foi solubilizado, resultando metal homogêneo com aproximadamente 0,22% C (conforme Tabela 1). Nos pontos que apresentaram elevada microdureza, devido às altas taxas de condução do calor na ZAC, a perlita não se difunde na ferrita que a circunda durante o aquecimento, mas forma sítio de material solubilizado com a concentração da perlita (aproximadamente 0,77% de C) [4]. No resfriamento este sítio transforma-se, possivelmente, em martensita (com alto teor de carbono), formando-se assim uma região mais dura do que todo o material restante. A Figura 3(a) indica essa região, na qual encontram-se as endentações da pirâmide do microdurômetro (quanto menor a endentação maior a dureza), bem como as taxas de resfriamento (a 650 °C) calculadas na ZAC. A endentação indicada por seta está sobre um sítio cuja fase era originalmente perlita, o que justifica

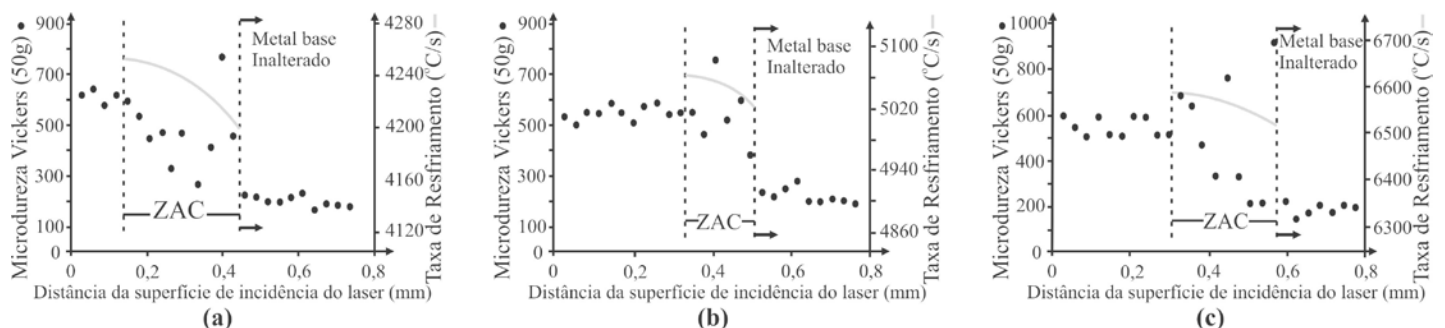


Figura 2 – Aço SAE 1020, taxas de resfriamento (a 650 °C) calculadas na ZAC e microdurezas verificadas em relação à distância da superfície de incidência do laser com energias de: (a) 200 J; (b) 150 J; (c) 100 J.

a mais elevada dureza desse ponto. A máxima microdureza é apresentada pela estrutura anteriormente perlita; porém, para que se verifique a mesma, a endentação deverá estar somente sobre este sítio, caso contrário, o valor medido será “mascarado”, i.e., existirão contribuições de regiões menos duras que circundam a estrutura de maior dureza.

Por outro lado, principalmente nas Figuras 2(a, b) existem “picos” de microdurezas na ZAC. Isto ocorre porque as mesmas foram verificadas nos sítios com mais elevado teor de carbono, ou em parte dos mesmos, sendo que para as menores durezas os pontos de verificação foram posicionados em regiões ferríticas, ou esferoidizadas.

Além disto, na Figura 3(b) observa-se o efeito da taxa de resfriamento sobre a microdureza da ZAC (considerando-se todas as condições). Pode-se verificar que ocorre grande variação da microdureza para uma mesma taxa de resfriamento,

além de existirem durezas idênticas mesmo para taxas de resfriamento com diferença maior do que 2000 °C/s. Esse fato é de grande importância, por demonstrar a heterogeneidade da microestrutura produzida na ZAC do SAE 1020.

A evolução microestrutural está mostrada nas Figuras 4(a-d). Na Figura 4(a) a região acima da ZAC ilustra o MB inalterado; no centro, antigas perlitas, agora sítios (S) e na parte inferior da imagem, mais próxima da fonte de energia, estes sítios começam a esferoidizar (E), ou seja, inicia a solubilização do carbono para os arredores de ferrita (F), como mostra a Figura 4(b). Assim, é aumentado o teor de carbono da matriz ferrítica permitindo que ocorra formação martensítica, uma vez que a ferrita original (teoricamente 0,02% C) não tem teor suficiente desse elemento químico para formar essa fase. A Figura 4(c) ilustra os sítios anteriormente perlitas na sua origem; na

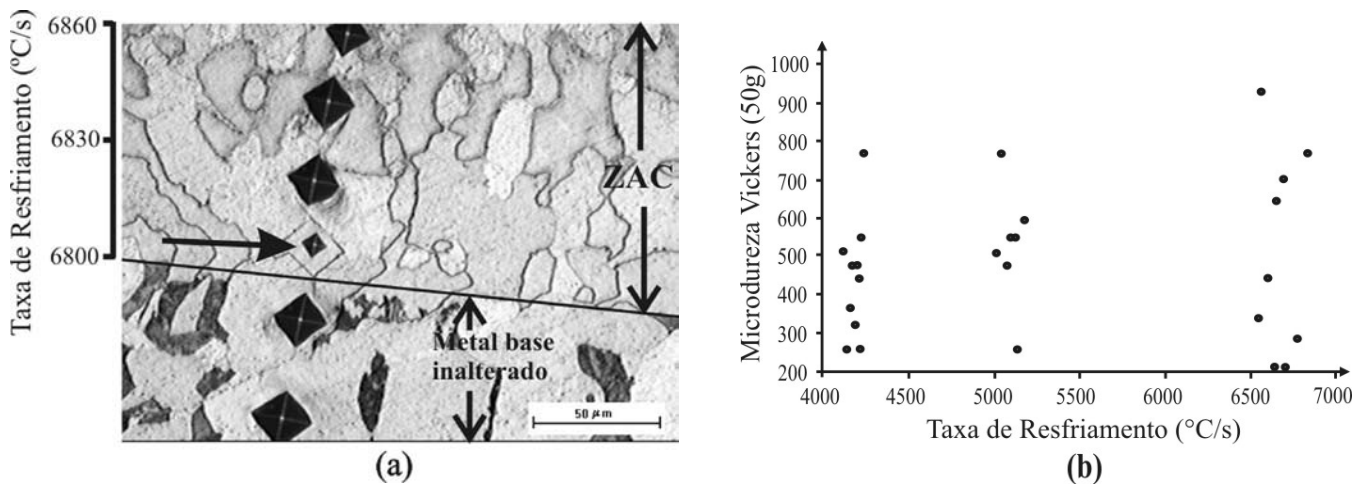


Figura 3 – Aço SAE 1020: (a) microfotografia (microscópio de luz), com as endentações do ensaio de microdureza e as taxas de resfriamento (a 650 °C) calculadas para diferentes posições na ZAC; (b) microdureza da ZAC em função da taxa de resfriamento.

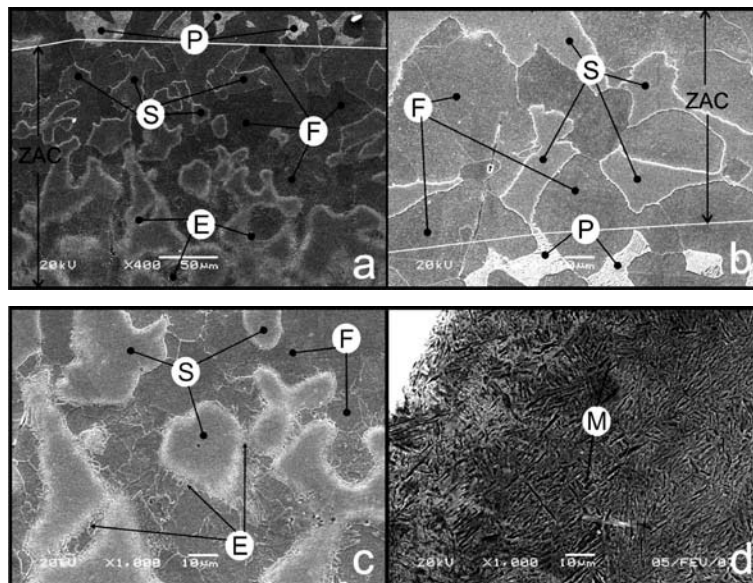


Figura 4 – Microfotografias (MEV) do aço SAE 1020: (a) ZAC e MB inalterado; (b) região da ZAC mais próxima ao metal fundido; (c) região da ZAC mais próxima ao MB inalterado; (d) região fundida, com, provável, martensita caracterizada por “agulhas”. (E: carbono se dissolvendo na ferrita; F: ferrita; M: martensita; P: perlita; S: anteriormente perlitas).

parte superior esquerda é mostrado uma estrutura dividida na parte superior em ferrita (F) e a região solubilizada (S). Na Figura 4(d) está apresentada a estrutura, provavelmente, martensítica (M) na superfície, a qual possui 0,22% C para esse aço (conforme Tabela 1), pois foi fundida, desta forma solubilizando todo o carbono presente no material, homogeneizando-o.

A microestrutura simbolizada por “S” nessas figuras representa sítios ricos em carbono, pois apresentam a composição do eutetóide de aço carbono (teoricamente 0,77% C). Devido à aplicação da energia ser extremamente breve, não há possibilidade de que a perlita (eutetóide) dissolva-se na ferrita (caso dos aços SAE 1020 e SAE 1045), desta forma criando sítios com a concentração de carbono do eutetóide. O resfriamento é rápido o suficiente para formação martensítica, a qual foi verificada pela dureza e por metalografia, não havendo tempo para difusão do carbono.

### 3.2 Aço SAE 1045

O aço SAE 1045 encontrava-se no estado normalizado e na Figura 5 estão as microdurezas verificadas nas regiões do ponto fundido, ZAC e MB inalterado, bem como as taxas de resfriamento na ZAC calculadas na temperatura de 650 °C.

Tal como no aço SAE 1020, para todas as energias a

maior microdureza verificada não foi na superfície, mas na ZAC. Isso ocorreu devido a microdureza na superfície resultar, possivelmente, de martensita com relativamente baixo teor de carbono, pois essa região fundiu e, dessa forma, esse elemento foi solubilizado, resultando metal, homogêneo, com aproximadamente 0,48% C (conforme Tabela 1). Devido às altas taxas de condução do calor na ZAC, no aquecimento a perlita não consegue se difundir com a ferrita que a circunda, formando um sítio de material solubilizado com a composição da perlita, aproximadamente 0,77% C para aços carbono [4]. No resfriamento este sítio transforma-se, provavelmente, em martensita com maior teor de carbono, formando-se, assim, uma região mais dura do que todo o material restante.

A Figura 6(a) ilustra as endentações da pirâmide do microdurômetro sobre o aço SAE 1045, bem como as taxas de resfriamento (a 650 °C) calculadas na ZAC. A endentação indicada por seta mostra a menor dureza desta região; note-se que a mesma está sobre uma ferrita (regiões mais claras na imagem). Esta endentação apresenta-se maior do que as outras que encontram-se mais abaixo na ZAC; se existisse suficiente área com ferrita neste ponto, a endentação seria ainda maior, porém a microestrutura que a circunda apresenta mais elevada dureza e não permitiu aumento da endentação. Em relação à máxima microdureza, os valores serão semelhantes a da martensita com 0,77% C; porém, para que se

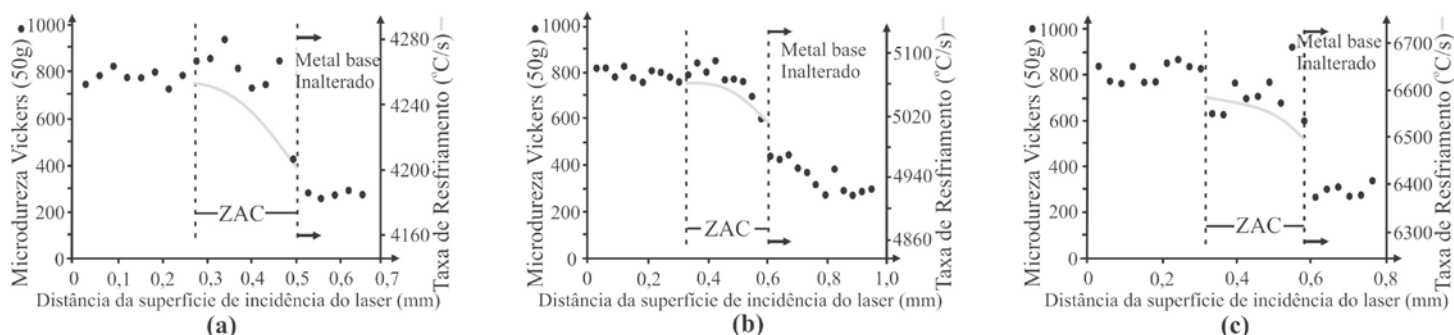


Figura 5 – Aço SAE 1045, taxas de resfriamento (a 650 °C) calculadas na ZAC e microdurezas verificadas em relação à distância da superfície de incidência do laser com energias de: (a) 200 J; (b) 150 J; (c) 100 J.

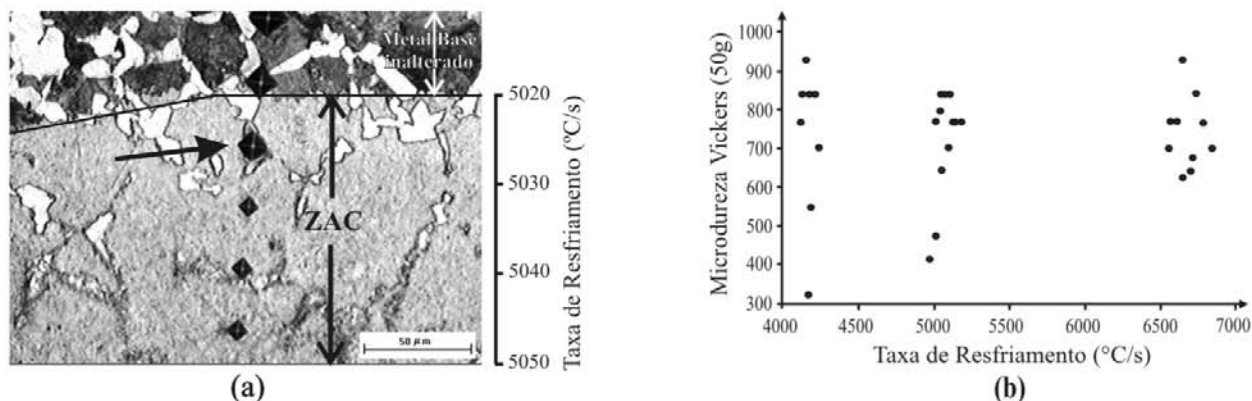


Figura 6 – Aço SAE 1045: (a) microfotografias (microscópio de luz) do aço, com as endentações do ensaio de microdureza e as taxas de resfriamento (a 650 °C) calculadas para diferentes posições na ZAC; (b) microdureza da ZAC em função da taxa de resfriamento.

verifique esta máxima microdureza a endentação deverá ser somente sobre este sítio de elevada dureza. Caso contrário, o valor verificado será mascarado.

Por outro lado, na Figura 6(b) observa-se o efeito da taxa de resfriamento sobre a microdureza da ZAC (considerando-se todas as condições). Tal como no caso do SAE 1020, verifica-se que ocorre grande variação da microdureza para uma mesma taxa de resfriamento, além de existirem durezas idênticas, mesmo para taxas de resfriamento com diferença maior do que 2500 °C/s. Esse fato é de grande importância, por demonstrar a heterogeneidade da microestrutura produzida na ZAC do SAE 1045.

A evolução microestrutural está ilustrada nas Figuras 7(a-d). Na Figura 7(a) acima da ZAC está o MB inalterado; no centro, originalmente perlitas, agora sítios (S), cujo significado foi anteriormente comentado, na parte inferior da imagem, esses sítios começam a esferoidizar (E). A Figura 7(b) mostra os sítios anteriormente perlitas na sua origem e braços de ferrita (F), mesmo estando na ZAC. Como ilustrado na Figura 7(c), os sítios anteriormente perlitas começam a solubilizar esse elemento para seus arredores de ferrita (F), aumentando assim o teor do mesmo nessa fase. Isso proporciona a ocorrência de martensita (M), uma vez que, a ferrita (teoricamente 0,02% C) não tem teor suficiente de carbono para formá-la. Na Figura 7(d) está mostrada a estrutura, provavelmente, martensítica na superfície, a qual possui 0,48% C para esse aço (conforme Tabela 1), pois foi fundida, desta forma solubilizando todo o carbono presente

no material o homogeneizando, estando caracterizada pelas “agulhas” e alta dureza verificada.

### 3.3 Aço AISI 52100

O aço AISI 52100 apresentava-se no estado esferoidizado e as microdurezas verificadas, bem como as taxas de resfriamento (a 650 °C) calculadas para a ZAC estão nas Figuras 8(a-c). Para todos os casos foram atingidos valores geralmente desejáveis de microdureza para tratamentos térmicos superficiais, além de ser pequeno o gradiente da microdureza na região endurecida. Por outro lado, houve uma grande diferença de dureza entre a região endurecida e o MB inalterado.

As endentações da pirâmide do microdurômetro sobre o aço AISI 52100 indicaram distribuição geralmente desejável de microdureza para tratamentos térmicos superficiais, com durezas maiores na superfície do material e menores na região do MB inalterado. Em relação à máxima microdureza na ZAC e superfície fundida, todos os valores foram similares, diferentemente dos aços normalizados, os quais podiam ter valores mascarados devido a microestruturas que apresentavam maior dureza do que outras na ZAC.

A evolução microestrutural está ilustrada nas Figuras 9(a-d). A Figura 9(a) mostra na parte inferior metal sem variação microestrutural; no centro esferas ricas em carbono (C) começam a se dissolver na matriz ferrítica, aumentando assim o teor desse elemento (C'). A figura 9(b) mostra com

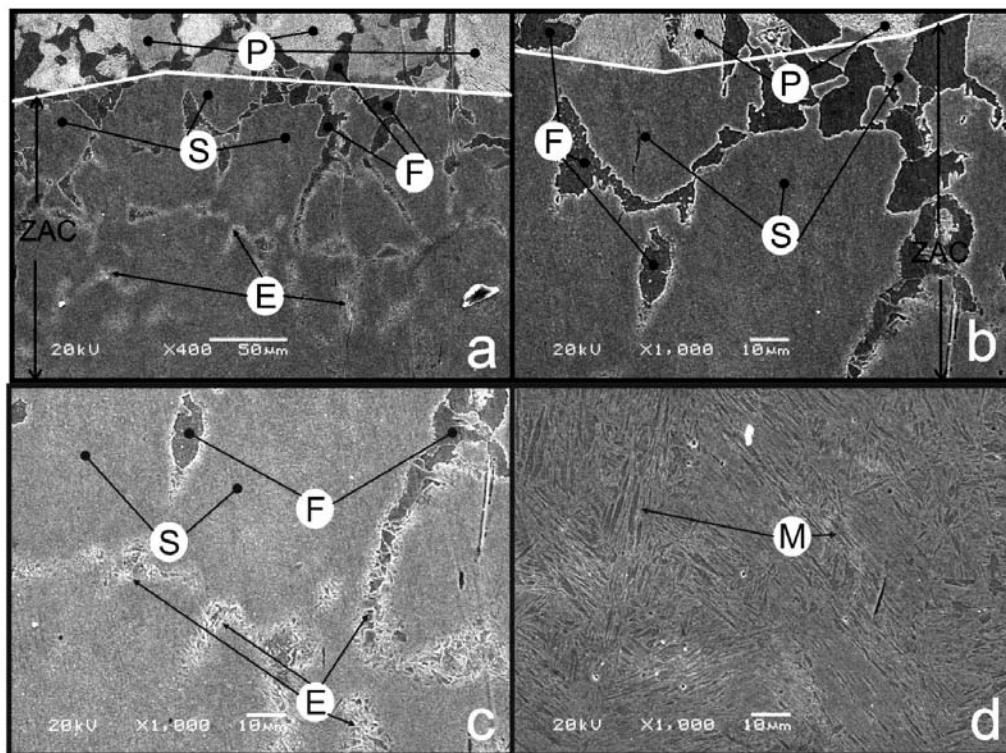


Figura 7 – Microfotografias (MEV) do aço SAE 1045 (a) ZAC; (b) região da ZAC mais próxima ao MB inalterado; (c) região da ZAC mais próxima ao metal fundido; (d) região fundida, com martensita caracterizada por “agulhas”. (E: carbono se dissolvendo na ferrita; F: ferrita; M: martensita; P: perlita; S: sítios anteriormente perlitas).

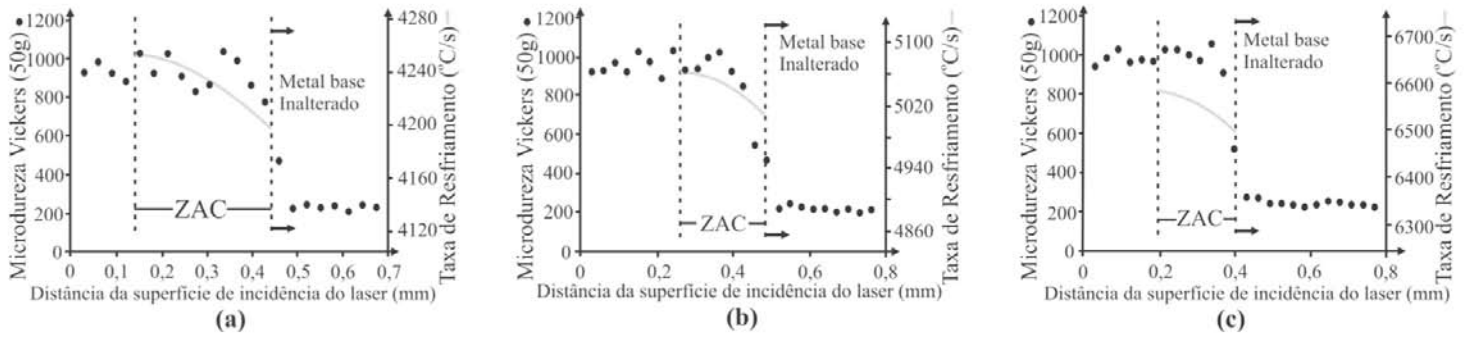


Figura 8 – Aço AISI 52100, taxas de resfriamento (a 650 °C) calculadas na ZAC e microdurezas verificadas em relação à distância da superfície de incidência do laser com energias de: (a) 200 J; (b) 150 J; (c) 100 J.

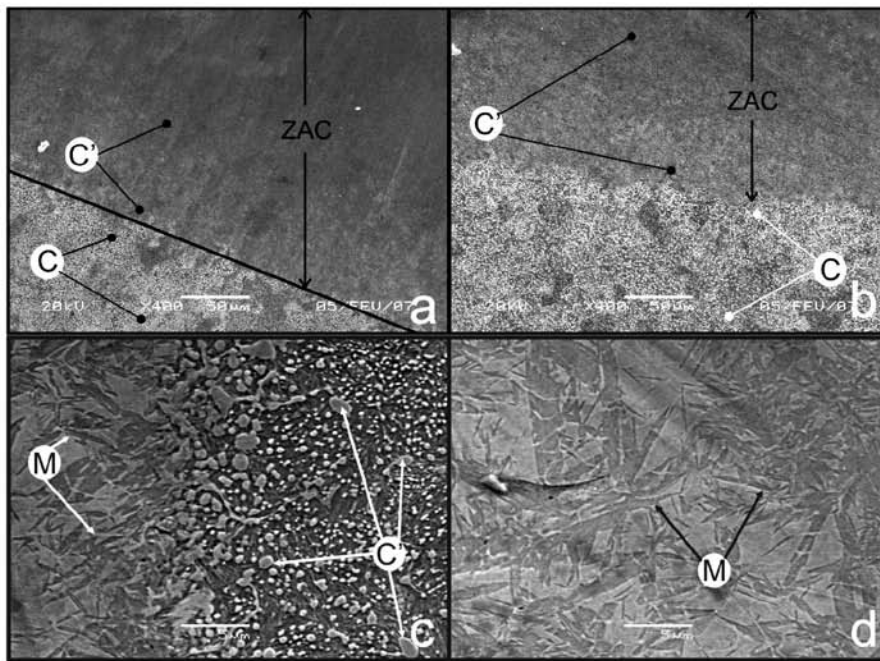


Figura 9 – Microfotografias (MEV) do aço AISI 52100: (a) ZAC; (b) região da ZAC mais próxima ao MB inalterado, parte inferior; (c) região da ZAC mais próxima ao metal fundido com martensita na área à esquerda; (d) região fundida caracterizando agulhas de martensita. (C: carbonetos; C': carbonetos, conforme explanado no texto; M: martensita.).

maior aumento esta região, sendo que essa microestrutura C' indica os carbonetos C com 6,67% de carbono em massa, dissolvendo-se na matriz ferrítica, enriquecendo com soluto a matriz e, assim, endurecendo-a. Como o aquecimento é extremamente breve e localizado, não há possibilidade de dissolução total dos carbonetos, existindo assim uma região onde os mesmos são inicialmente dissolvidos, permanecendo posteriormente como tal, porém com menor tamanho. O enriquecimento com carbono e a maior temperatura induzem a formação martensítica (M), como indicado na Figura 9(c). Na Figura 9(d) está ilustrada a microestrutura martensítica na superfície, a qual possui 0,93% C para esse aço (conforme

Tabela 1), pois foi fundida, desta forma solubilizando todo o carbono presente no material, estando caracterizada pela microestrutura e alta dureza verificada.

Por outro lado, na Figura 10 observa-se o efeito da taxa de resfriamento sobre a microdureza da ZAC (considerando-se todas as condições). Diferentemente dos aços SAE 1020 e SAE 1045, pouco varia a distribuição da dureza numa dada taxa de resfriamento e é pequena a diferença para taxas de resfriamento com valores tão distintos quanto 2500 °C/s. Isso demonstra, além do mostrado nas Figuras 8(a-c), que é muito mais homogêneo o gradiente de dureza através da ZAC produzida sobre o AISI 52100.

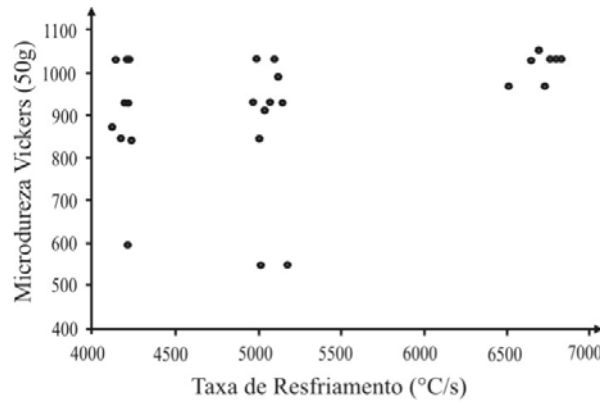


Figura 10 – Microdureza da ZAC em função da taxa de resfriamento para o aço AISI 52100.

### 3.4 Efeito do Teor de Carbono e Carbono Equivalente sobre a Microdureza Verificada

A máxima dureza verificada pode ser mascarada para os aços normalizados (SAE 1020 e SAE 1045), devido às variadas microestruturas (com diferentes valores de microdureza) presentes na ZAC e, portanto, a inspeção deve ser cuidadosa para as suas determinações. Na Tabela 3 apresenta-se as mesmas, as quais sempre ocorreram na ZAC, em função do MB e da energia do processo.

Tabela 3 – Máxima Microdureza Verificada na ZAC, em Função da Energia do LASER e do Metal Base

Aços	Máxima Dureza (HV) para o LASER, com energia de		
	200 J	150 J	100 J
SAE 1020	766	766	927
SAE 1045	927	927	927
AISI 52100	1027	1027	1049

Além do teor de carbono, o conceito de carbono equivalente pode oferecer maiores esclarecimentos quanto ao endurecimento da ZAC. Nas Figuras 11(a, b) estão ilustrados os efeitos sobre a máxima microdureza de ambos estes fatores, para diferentes energias do laser, com o carbono equivalente obtido desde a Equação 4 [5].

$$C_{equivalente} = \%C + \%Mn / 6 + (\%Cr + \%Mo + \%V) / 5 + (\%Ni + \%Cu) / 15 \quad (4)$$

O efeito do carbono e do carbono equivalente sobre a dureza é similar para todos os aços, conforme pode-se verificar nessa Figura 10, a qual reflete, além disso, o bem conhecido fato de que quanto maior o teor desse elemento, mais elevada é a dureza da martensita, uma vez que todos os valores máximos de microdureza foram verificados nessa fase. Outrossim, os elevados valores da microdureza indicam

que, provavelmente houve transformação martensítica, inexistindo ou ocorrendo minimamente austenita retida, ou outra transformação [4]. Observe-se, ainda, que com elevadas taxas de resfriamento, tal como as empregadas nesse trabalho, são evitadas transformações que dependem do tempo (difusão); porém, pode ocorrer a transformação martensítica (a qual é função da temperatura). Essa transformação é desejável para endurecimento dos aços; entretanto, apresenta relativamente reduzida tenacidade quando não revenida.

Por outro lado, para cada condição as taxas de resfriamento variam muito pouco nas (extremamente pequenas) ZACs e isto pode ser percebido no aço que apresenta maior homogeneidade (AISI 52100), onde nessa região a microdureza é praticamente homogênea. Nos aços normalizados as microestruturas são mais heterogêneas, resultando em grandes diferenças de microdureza. Por exemplo, no aço SAE 1045 com energia de 200 J o valor mais elevado de dureza foi no início da ZAC; entretanto, quando a energia é de 100 J a máxima microdureza está localizada no final da ZAC. Isto ocorre nos sítios de elevado carbono que estão dispostos de forma heterogênea ao longo da ZAC, mas as condições para que ocorra a transformação nos mesmo foram satisfeitas tanto no início, quanto no final desta região. Note-se, também, que as diferentes energias (como era de se esperar) alteraram consideravelmente os valores das taxas de resfriamento (a 650°C); porém, não influenciaram significativamente as microdurezas, indicando que tanto a menor (cerca de 4200 °C/s), quanto a maior (aproximadamente 6600 °C/s) taxa de resfriamento no laser é suficiente para evitar que ocorra difusão, pelo menos na maioria das regiões da ZAC.

Outrossim, não houve correlação entre as máximas durezas e as taxa de resfriamento, uma vez que as essas máximas durezas não localizaram-se em regiões semelhantes (início ou fim da ZAC) para os aços analisados nem para as diferentes condições; observe-se que para as pequenas ZACs a taxa de resfriamento pouco varia na sua extensão.



#### 4. Conclusão

A partir dos resultados e das discussões apresentadas, pode-se concluir o seguinte:

- As equações de condução de calor, para fontes instantâneas concentradas, são úteis para estimar as elevadas taxas de resfriamento e indicar suas pequenas variações para ZAC de curta extensão;
- Há a formação de um sítio originado de perlita com teor de carbono, teoricamente, de 0,77% que apresenta microdureza elevada na ZAC, em aços SAE 1020 e SAE 1045, com dureza superior àquela da superfície;
- É possível aumentar consideravelmente a microdureza na superfície dos aços SAE 1020, SAE 1045 e AISI 52100, utilizando-se um processo tal como laser;
- O aço AISI 52100 apresentou menor gradiente de microdureza, a qual foi máxima na sua superfície, objetivo de um tratamento térmico superficial. Este fato é, muito provavelmente, devido ao mesmo encontrar-se originalmente no estado esferoidizado.

#### 5. Agradecimentos

Um dos autores (RNV) agradece ao CNPq pela bolsa de estudos concedida durante seu Mestrado no PPGEM, realizado no LS&TC.

Os autores agradecem o apoio da empresa ZIEMANN-LIESS Máquinas e Equipamentos Ltda. pela permissão de uso do seu equipamento LASER.

#### 6. Referências Bibliográficas

- [1] CARSLAW, H. S., JAEGER, J.C. Conduction of Heat in Solids. Oxford University Press. 2<sup>nd</sup> Ed., 1960.
- [2] MACHADO, I. G. Condução do Calor na Soldagem: Fundamentos e Aplicações. Imprensa Livre S.A., 2000.
- [3] MODEST, M. F. Radiative Heat Transfer. McGraw-Hill, NY, 1993.
- [4] CAHN, R. W., HAASEN, P. Physical Metallurgy. North-Holland. 4<sup>th</sup> Ed., Vol 2, 1996.
- [5] METALS HANDBOOK. Welding, Brazing, and Soldering. American Society for Metals, 8<sup>th</sup> Ed., Vol. 6, 1976.