

## **XXIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 11 a 15/09/2017 – Rio Grande - RS**

# **CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E DEFINIÇÃO DO PERCENTUAL DE CARBONO DE UM AÇO POR MEIO DA METALOGRAFIA QUANTITATIVA**

**Felipe Gomes dos Santos, Lioudmila Aleksandrovna Matlakhova**

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF)

Avenida Alberto Lamego, 2000 – CEP: 28013-602 – Parque Califórnia – Campos dos Goytacazes, RJ

felipe\_gs93@yahoo.com.br, lioudmila@uenf.br

**RESUMO:** O presente trabalho teve como objetivos realizar a caracterização microestrutural de um aço por meio da metalografia qualitativa e quantitativa, definir o percentual de carbono da amostra, verificar se há anisotropia no material e determinar os valores de microdureza das fases presentes. Para tal, preparou-se a amostra metalograficamente e utilizou-se de microscópio ótico e microdurômetro para analisar a mesma. Esta análise constituiu-se na aplicação de técnicas de caracterização quantitativa pelo método do padrão linear, reticulado e pontual, método do gráfico polar e ensaio de microdureza Vickers. Os resultados obtidos na caracterização qualitativa mostraram a presença de duas regiões distintas, uma de grãos claros e outra de grãos escuros. Sabendo-se que se tratava de um aço e através da comparação com microestruturas presentes em literaturas, assumiu-se que os grãos claros se tratavam de ferrita e que os grãos escuros eram perlita. Por fim, constatou-se através da proporção de ferrita e perlita, tendo a perlita uma fração volumétrica média de 21,36%, que a amostra do aço estudado é de um aço hipoeutetóide com valor aproximado de 0,17% de carbono.

**Palavras-Chave:** Aço carbono, microestrutura, metalografia quantitativa

**ABSTRACT:** The present study objectives were to perform a microstructural characterization of a steel by qualitative and quantitative metallography, to determine the carbon percentage of the sample, to verify if the material is anisotropy and to determine the microhardness values of the phases. For this, the sample was metallographically prepared and analyzed by optical microscope and microhardness tester. This analysis consisted in the application of quantitative characterization techniques by the linear, square and point counting grids methods, polar graph method and Vickers microhardness test. The results obtained in the qualitative characterization showed the presence of two distinct regions, one of light grain and the other of dark grains. Knowing that the sample was a steel and by comparing with microstructures present in literatures, it was assumed that the light grains were ferrite and the dark grains were perlite. Finally, it was verified by the ferrite (average volumetric fraction of 21.36 %) and perlite proportion that the steel sample studied is a hypoeutectoid steel with approximately 0.17 % of carbon.

**Keywords:** Carbon steel, microstructure, quantitative metallography

## **INTRODUÇÃO**

O aço é uma liga amplamente utilizada nos diversos segmentos industriais e no cotidiano de todos nós. Este é uma liga cujos principais elementos são o ferro e o carbono, contudo, elementos secundários também estão presentes (em menor quantidade) devido aos processos de fabricação, chamados impurezas, ou para fornecer alguma propriedade específica, chamados elementos de liga. O aço contém entre 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono (pode variar de acordo com a quantidade de impurezas e elementos de liga), correspondentes a máxima solubilidade do carbono no ferro à temperatura ambiente e a máxima solubilidade de carbono no ferro que ocorre a 1149 °C, respectivamente. Acima de 2,11 %C a liga é chamada de ferro fundido (Chiaverini, 2008).

Os aços podem ser classificados de acordo com o seu percentual de carbono. Chamam-se hipoeutetóides aqueles com porcentagem de carbono inferiores a 0,77%, já os hipereutetóides são os que possuem porcentagem superior a 0,77% (acima de 2,11% chama-se ferro fundido), e aqueles com o percentual de carbono igual a 0,77% são os chamados eutetóides. Para um mesmo regime de resfriamento esses três tipos de aço terão microestruturas distintas. Para os aços hipoeutetóides, espera-se uma microestrutura formada primordialmente por ferrita e perlita (lamelas de ferrita e cementita). Uma maior quantidade de ferrita (menor %C) concede ao aço uma característica mais dúctil. Já a

microestrutura de um aço hipereutetóide é basicamente formada por grãos perlíticos envolvidos pela cementita, com predominância da perlita. Os aços eutetóides apresentam um aspecto microestrutural formado exclusivamente pela perlita (Chiaverini, 2008).

Para observar e caracterizar a estrutura de materiais, pode-se utilizar a técnica de microscopia ótica, que usa microscópios óticos para gerar imagens ampliadas de um objeto. A imagem nos microscópios óticos é gerada através de processos físicos luminosos resultantes da interação da luz branca visível com o material examinado, transmitindo assim, aos olhos do observador, um contraste estrutural, ou seja, uma imagem da estrutura, oriundo do efeito da luz na superfície observada (Matlakhov, 2010).

Para que a caracterização do material seja realizada, é necessário que uma amostra seja retirada do mesmo, passando pelo processo de preparação metalográfica, ou seja, deve-se remover a camada estruturalmente danificada e a superfície deve estar plana e limpa, expondo a estrutura original do material a ser examinado. A preparação metalográfica consiste nas seguintes etapas: corte, montagem, lixamento, polimento e ataque químico. Na caracterização de um material, utiliza-se a metalografia qualitativa e quantitativa. O objetivo da metalografia qualitativa é analisar e interpretar os aspectos estruturais gerais visíveis com o aumento oferecido pelos microscópios óticos, são eles: morfologia dos cristaltos, tipo microestrutural, fases presentes, heterogeneidade química, inclusões não metálicas e descontinuidades. Já a metalografia quantitativa tem como objetivo, através dos padrões metalográficos, determinar características numéricas das estruturas dos materiais, tais como: número de grãos por unidade de área, tamanho médio de grão, área média de grão e fração volumétrica dos constituintes (Colpaert, 1974; Matlakhov, 2010).

## **METODOLOGIA**

### **Preparação da amostra**

Uma barra de aço foi cortada no aparelho Mesotom da Estruers-Panabra com o objetivo de seccionar a peça em dimensões adequadas para a análise metalográfica, sem danificar de maneira grosseira a estrutura original do material. Realizou-se a montagem através do embutimento a quente, utilizando-se a prensa de embutimento Arotec Pre-30 automática juntamente com o desmoldante Arotec D-30 (para facilitar a retirada da amostra embutida da prensa) e a resina de baquelite amarela também da Arotec.

Para minimizar a espessura da amostra danificada estruturalmente pelo corte e preparar a amostra para a etapa do polimento foi realizado o lixamento úmido na lixadeira manual, utilizando as lixas com as seguintes granulometrias (em mesh): inicialmente a de #100 em que executou-se o lixamento na direção perpendicular aos rios de corte até o completo desaparecimento destes e, sequencialmente, as lixas de #220, #320 #400, #600 e #1200, mantendo sempre o lixamento na direção perpendicular aos riscos deixados pela lixa anterior. Os riscos foram controlados por observações em microscópio ótico Olympus. Antes de iniciar o polimento, removeu-se as impurezas presentes na superfície da amostra por meio de limpeza ultrassônica no Ultra Sonic Cleaner USC-1450A. Para tal, introduziu-se a amostra, imersa em água destilada, em um Becker de vidro no equipamento de ultrassom, onde ficou por cerca de 7 minutos. Em seguida, realizou-se o polimento manual utilizando pasta abrasiva de alumina, sequencialmente, de granulometria igual a 1  $\mu$ m, 0,3  $\mu$ m e 0,05  $\mu$ m respectivamente, sobre um pano adequado à pasta utilizada.

Para revelar a microestrutura a ser analisada, utilizou-se o ataque químico. Este baseia-se na dissolução seletiva da amostra pelos reagentes químicos, ou seja, alguns grãos e fases são mais atacados que os demais. Dessa forma, cada grão e fase reflete a luz de uma forma diferente de seus vizinhos, gerando assim realce nos contornos de grão e diferentes tonalidades às fases, o que permite a identificação destas com o auxílio do microscópio (Rohde, 2010). O ataque químico foi realizado com uma solução de Nital 2% (98% de álcool etílico + 2% de ácido nítrico). Este reagente é o mais efetivo para aços, pois ataca a ferrita, perlita, martensita e contornos de grão. Realizou-se o ataque através da técnica conhecida como pincelamento (que consiste em molhar um pedaço de algodão no Nital e através de movimentos de pinceladas passá-lo na amostra a ser atacada) durante aproximadamente 20 segundos. Deste modo, obteve-se micrografias da amostra em diferentes aumentos e métodos de observação. As imagens foram transferidas para o computador através da videocâmera acoplada ao microscópio Neophot-32 e um software para captura de imagens.

### **Metalografia quantitativa**

O objetivo da metalografia quantitativa é determinar características numéricas em relação a estrutura analisada, tais como: número de grãos por unidade de área (n), tamanho médio do grão (d), área média do grão (A) e fração volumétrica dos constituintes (Cv). No presente trabalho a quantificação foi realizada pelo padrão linear, reticulado, pontual e pelo método do gráfico polar.

O método do padrão linear consistiu na aplicação de cinco linhas de teste horizontais, calibradas com o auxílio do micrômetro objeto, em duas regiões distintas e aleatoriamente escolhidas da amostra. Para uma estrutura bifásica não

uniforme (constituída de  $\alpha$  e  $\beta$ ), pode-se determinar algumas características da fase  $\alpha$  de acordo com as equações abaixo:

$$d_a = \frac{L_{ta}}{n_{ta}} \quad (1)$$

$$A_a = d_a^2 \quad (2)$$

$$C_{Va} = \frac{L_{ta}}{L} \quad (3)$$

Sendo:

- $n_{ta} = n_i + 0,5 n_p$ : representa o número de todos os grãos- $\alpha$  interceptados pelo padrão  $k$ -vezes aplicado à estrutura;
- $n_i$  e  $n_p$ : número de grãos- $\alpha$  inteiramente e parcialmente interceptados pelo padrão; para os grãos- $\beta$  o método é análogo;
- $L_{ta}$ : comprimento de todos os grãos- $\alpha$  inteiramente e parcialmente interceptados pelo padrão; para os grãos- $\beta$  o método é análogo;
- $L = kl$ : comprimento total das linhas de teste;  $k$ : número das linhas de teste;  $l$ : comprimento de uma linha de teste;
- $d_a$ : tamanho médio dos grãos da fase  $\alpha$ ;
- $A_a$ : área média dos grãos da fase  $\alpha$ ;
- $C_{Va}$ : fração volumétrica dos grãos da fase  $\alpha$ ;

Para realizar o método do padrão reticulado, aplicou-se uma malha quadrática, previamente calibrada com o auxílio do micrômetro objeto, sobre uma região aleatória da amostra para medir a área de todos os grãos de uma fase de interesse contidos no interior do padrão. As características da fase  $\alpha$  em uma estrutura bifásica não uniforme são obtidas pelas equações:

$$A_a = \frac{A_t}{n_t} \quad (4)$$

$$n_a = \frac{n_t}{A_t} \quad (5)$$

$$n_a = \sqrt{A_a} = \frac{1}{\sqrt{n_a}} \quad (6)$$

$$C_{Va} = \frac{A_t}{A_p} \quad (7)$$

Sendo:

- $A_t = \sum A_{ai}$ : área de todos os grãos- $\alpha$  contidos no interior do padrão;  $A_{ai} = a(n_{ni} + 0,5 n_i)$ : área de cada grão- $\alpha$ ;  $a = m^2$  e  $m$ : menor área e menor divisão do padrão;  $n_{ni}$  e  $n_i$ : número dos quadrados do padrão não interceptados e interceptados pelo contorno do grão- $\alpha$ ; para os grãos- $\beta$  o método é análogo;
- $n_t = n_{ni} + 0,5 n_i + 0,25 n_a$ : número de todos os grãos- $\alpha$  contidos no interior do padrão;  $n_{ni}$  e  $n_i$ : número dos grãos- $\alpha$  não interceptados e interceptados pelos lados do padrão;  $n_a$ : número dos grãos- $\alpha$  que permanecem nos ângulos do padrão; para os grãos- $\beta$  o método é análogo;
- $A_p = L^2$ : área do padrão previamente calibrado;  $L$ : comprimento do lado do padrão;
- $n_a$ : número de grãos por unidade de área referente à fase  $\alpha$ ;

No método do padrão pontual, aplicou-se uma malha contendo 100 pontos sobre duas regiões distintas e aleatoriamente determinadas da amostra e contou-se a quantidade de pontos de teste localizados sobre as fases. Para determinar a fração volumétrica de  $\alpha$  utilizou-se a seguinte equação:

$$C_{Va} = \frac{V_a}{V_a} = \frac{N_a}{N_p} \quad (8)$$

Sendo:

- $V_\alpha$  e  $V_a$ : volume da fase  $\alpha$  e da amostra;
- $N_\alpha$  e  $N_p$ : número dos pontos de teste localizados nos grãos- $\alpha$  e número total de pontos de teste;

Para realizar o método do gráfico polar, contou-se o número de contornos de grãos interceptados em cada linha, de mesmo comprimento, traçadas com espaçamento de  $\Delta\theta = 10^\circ$  até completar um círculo que foram aplicadas sobre a microestrutura do material. A partir destes valores, construiu-se um gráfico tendo como coordenadas o número dos contornos de grãos interceptados e o ângulo de inclinação das linhas de teste ( $\theta$ ). Quando a estrutura é isotrópica a curva polar é um círculo, mas se a estrutura for anisotrópica a curva fica em um formato de 8 com seu mínimo indicando na direção preferencial de orientação dos grãos.

### Microdureza

Realizou-se o ensaio de microdureza da amostra através do microdurômetro Shimadzu HVM-2T na escala Vickers (HV) com uma carga de 10 gramas durante 10 segundos. Um penetrador de diamante com formato de pirâmide de base quadrada realizou a carga sobre a microrregião desejada, marcando-a com uma impressão quadrada, e a medida dessa impressão é utilizada juntamente com a carga para o cálculo da microdureza Vickers através da Eq. (9).

$$HV \left( \frac{kgf}{mm^2} \right) = \frac{1854 \cdot F}{d^2} \quad (9)$$

Sendo:

- F: carga aplicada em gramas;
- d: diagonal da impressão regular quadrática em  $\mu m$ ;

### Tratamento estatístico

A análise quantitativa da microestrutura da amostra gerou uma grande quantidade de dados, portanto, para conseguir valores representativos, os resultados foram tratados estatisticamente através das seguintes fórmulas:

$$x_m = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (10)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} - (x_m)^2} \sqrt{\frac{n}{n-1}} \quad (11)$$

$$\delta = \frac{\sigma}{x_m} 100 \quad (12)$$

$$\epsilon = t\sigma \quad (13)$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{x_m} 100 \quad (14)$$

$$x = x_m \pm \epsilon \quad (15)$$

Sendo:

- $x_m$ : média aritmética;
- $\sigma$ : desvio-padrão;
- $\delta$ : coeficiente de variação;
- $\epsilon$ : erro absoluto;
- t: coeficiente de Student, que está relacionado com a probabilidade P na Tab. (1);
- $\epsilon_r$ : erro relativo;
- x: nível de confiança;

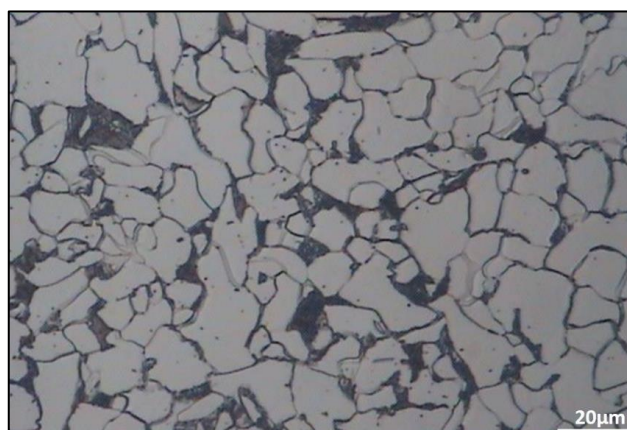


**Tabela 1.** Probabilidade (P) em função do coeficiente de Student (t) (Matlakhov, 2010)

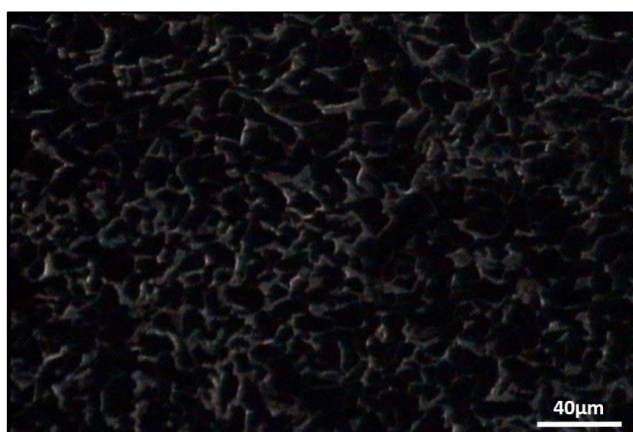
P	t	P	t	P	t	P	t	P	t
0,0796	0,1000	0,5160	0,7000	0,7698	1,2000	0,9108	1,7000	0,9836	2,4000
0,1586	0,2000	0,5762	0,8000	0,8000	1,2816	0,9282	1,8000	0,9900	2,5758
0,2358	0,3000	0,6000	0,8416	0,8064	1,3000	0,9426	1,9000	0,9906	2,6000
0,3108	0,4000	0,6318	0,9000	0,8384	1,4000	0,9500	1,9600	0,9948	2,8000
0,3830	0,5000	0,6826	1,0000	0,8664	1,5000	0,9544	2,0000	0,9973	3,0000
0,4514	0,6000	0,7000	1,0364	0,8904	1,6000	0,9722	2,2000	0,9980	3,0902
0,5000	0,6745	0,7286	1,1000	0,9000	1,6449	0,9800	2,3263	0,9999	4,0000

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da caracterização qualitativa, identificou-se que a micrografia da amostra é constituída majoritariamente por grãos claros não uniformes e sem uma direção preferencial, com uma menor quantidade de grãos escuros também não uniformes e sem uma direção preferencial presentes principalmente em regiões de contorno de grão. Comparou-se as micrografias obtidas com as disponíveis na literatura (Rodrigues et al., 2014; Chiaverini, 2008; Colpaert, 1974; ASM, 1972) e presumiu-se que a amostra analisada trata-se de um aço hipoeutetóide, no qual a fase de grãos claros é a ferrita e a fase de grãos escuros representa a perlita. Identificou-se por comparação, devido à proporção ferrita-perlita, que a amostra contém entre 0,1 e 0,2% de carbono. As Figuras (1) e (2) apresentam algumas das micrografias obtidas e utilizadas na caracterização qualitativa.

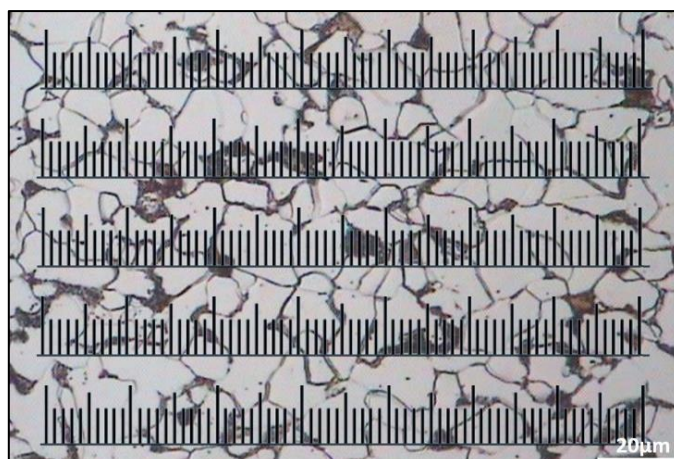


**Figura 1.** Micrografia da amostra. Campo claro. Aumento 400x. Ataque Nital 2%



**Figura 2.** Micrografia da amostra. Campo escuro. Aumento 200x. Ataque Nital 2%

Utilizando-se da caracterização quantitativa pelo método do padrão linear, após a calibração, obteve-se a menor divisão da escala (m) igual a  $2\ \mu\text{m}$ , sendo o comprimento de cada uma das cinco linhas de  $140\ \mu\text{m}$ , o que resultou em um comprimento total (L) de  $700\ \mu\text{m}$ . A quantificação se baseou em duas regiões diferentes da amostra, a Fig. (3) apresenta a imagem obtida na região 1 com as linhas de teste. As Tabelas (2) e (3) apresentam os resultados obtidos com este método e o respectivo tratamento estatístico, sendo  $\alpha$  a ferrita e  $\beta$  a perlita.



**Figura 3.** Método do padrão linear aplicado à região 1. Campo claro. Aumento 400x

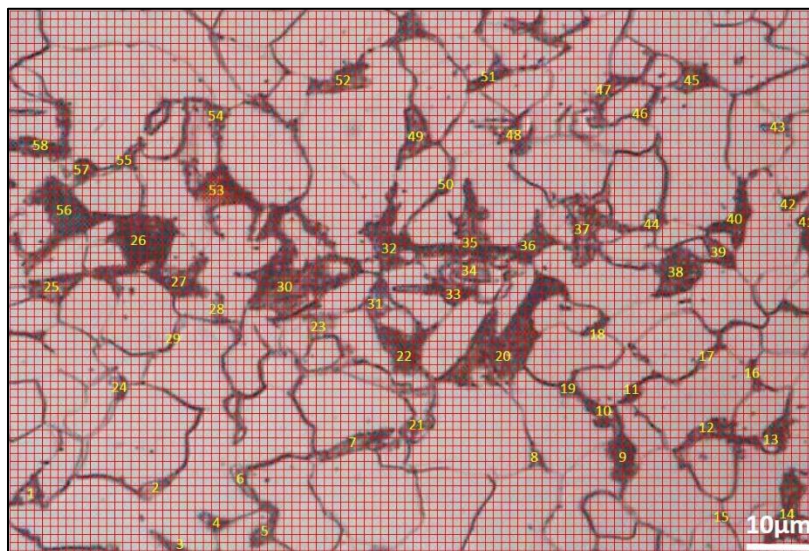
**Tabela 2.** Resultados obtidos pelo método do padrão linear

Área 1	Área 2
$L = 700\ \mu\text{m}$	$L = 700\ \mu\text{m}$
$n_{t\alpha} = 57,5$	$n_{t\alpha} = 52$
$L_{t\alpha} = 0,536\ \text{mm}$	$L_{t\alpha} = 0,552\ \text{mm}$
$d_{\alpha} = 9,32 \times 10^{-3}\ \text{mm}$	$d_{\alpha} = 1,061 \times 10^{-2}\ \text{mm}$
$A_{\alpha} = 8,689 \times 10^{-5}\ \text{mm}$	$A_{\alpha} = 1,1268 \times 10^{-4}\ \text{mm}$
$C_{v\alpha} = 76,57\%$	$C_{v\alpha} = 78,86\%$
$n_{t\beta} = 35,5$	$n_{t\beta} = 31$
$L_{t\beta} = 0,164\ \text{mm}$	$L_{t\beta} = 0,148\ \text{mm}$
$d_{\beta} = 4,62 \times 10^{-3}\ \text{mm}$	$d_{\beta} = 4,77 \times 10^{-3}\ \text{mm}$
$A_{\beta} = 2,134 \times 10^{-5}\ \text{mm}$	$A_{\beta} = 2,279 \times 10^{-5}\ \text{mm}$
$C_{v\beta} = 23,43\%$	$C_{v\beta} = 21,14\%$

**Tabela 3.** Tratamento estatísticos dos valores obtidos pelo método do padrão linear

	$d_{\alpha}\ (\text{mm})$	$A_{\alpha}\ (\text{mm}^2)$	$C_{v\alpha}\ (\%)$	$d_{\beta}\ (\text{mm})$	$A_{\beta}\ (\text{mm}^2)$	$C_{v\beta}\ (\%)$
<b>Média</b>	$9,97 \times 10^{-3}$	$1,07 \times 10^{-4}$	77,72	$4,70 \times 10^{-3}$	$2,21 \times 10^{-5}$	22,29
<b>Desvio Padrão</b>	$9,12 \times 10^{-4}$	$2,82 \times 10^{-5}$	1,62	$1,06 \times 10^{-4}$	$1,03 \times 10^{-6}$	1,62
<b>Coefficiente de variação</b>	9,15	26,4	2,0836	2,26	4,65	7,2662
<b>Erro absoluto</b>	$1,50 \times 10^{-3}$	$4,64 \times 10^{-5}$	2,66	$1,74 \times 10^{-4}$	$1,69 \times 10^{-6}$	2,66
<b>Erro relativo (%)</b>	15,06	43,45	3,43	3,72	7,64	11,95
<b>Nível de confiança</b>	$9,97 \times 10^{-3} \pm 1,50 \times 10^{-3}$	$1,07 \times 10^{-4} \pm 4,64 \times 10^{-5}$	$77,72 \pm 2,66$	$4,70 \times 10^{-3} \pm 1,74 \times 10^{-4}$	$2,21 \times 10^{-5} \pm 1,69 \times 10^{-6}$	$22,29 \pm 2,66$

No método do padrão reticulado, conforme observado na Fig. (4), calibrou-se a malha utilizando-se um aumento de 500x. Sendo assim, a menor distância entre dois traços adjacentes “m” foi igual a  $1,25 \times 10^{-3}$  mm, e a área “a” ( $a = m^2$ ) igual a  $1,5625 \times 10^{-6}$  mm<sup>2</sup>. Tendo na horizontal um total de 100 reticulados e na direção vertical 67, podemos definir o valor de  $A_p = (100 \times 1,25 \times 10^{-3}) \times (67 \times 1,25 \times 10^{-3}) = 0,01046875$  mm<sup>2</sup>. Após contabilizar o número dos quadrados do padrão não interceptados e interceptados pelo contorno de cada grão de perlita, aplicou-se as fórmulas da Eq. (4) a (7) e obteve-se os resultados demonstrados na Tab. (4).

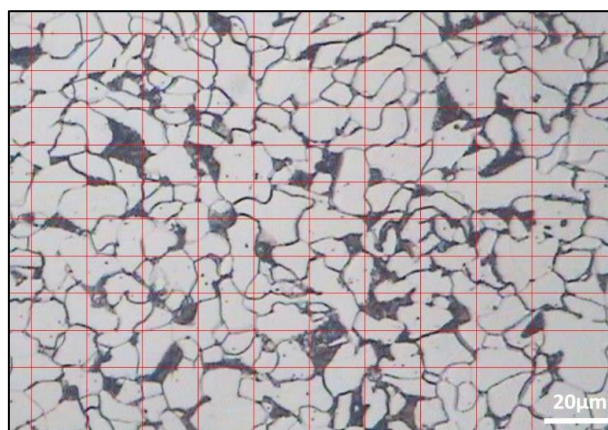


**Figura 4.** Aplicação do método do padrão reticulado. Campo claro. Aumento 500x. Ataque Nital 2%

**Tabela 4.** Resultados obtidos pelo método do padrão reticulado

$n_{ni}$	$n_i$	$n_\beta$	$n_t$	$A_p$ (mm <sup>2</sup> )	$A_\beta$ (mm <sup>2</sup> )	$n_\beta$ (mm <sup>-2</sup> )	$d_\beta$ (mm)	$Cv_\beta$ (%)	$Cv_\alpha$ (%)
83	44	4	106	$1,046875 \times 10^{-2}$	$2,0526 \times 10^{-5}$	48718,13	$4,53 \times 10^{-3}$	20,78	79,22

O método do padrão pontual constituiu-se na contagem da quantidade de pontos de teste localizados nos grãos de ferrita e de perlita com o aumento de 320x, sendo utilizadas duas regiões distintas da amostra para um melhor resultado. A Figura (5) apresenta a imagem obtida com a aplicação da malha na região 2 e os resultados de fração volumétrica de ferrita ( $Cv_\alpha$ ) e perlita ( $Cv_\beta$ ) na Tab. (5).



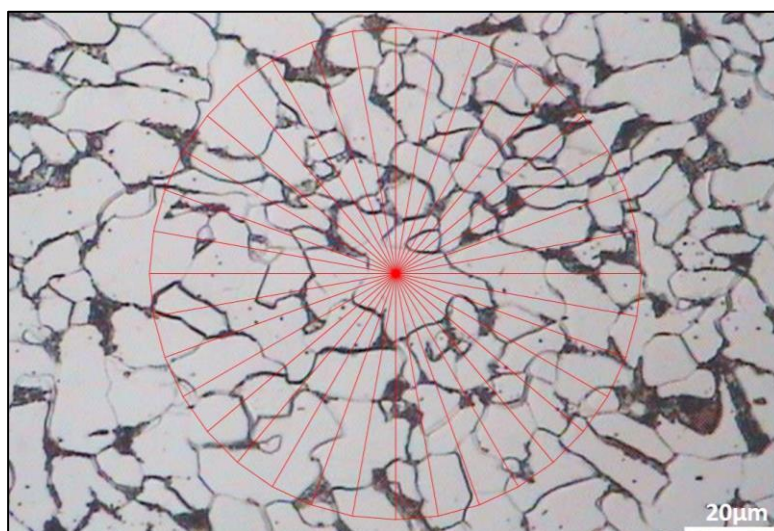
**Figura 5.** Método do padrão pontual aplicado à região 2. Campo claro. Aumento 300x



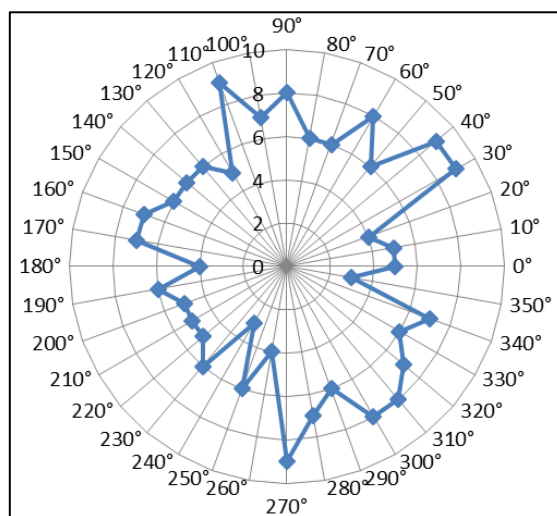
**Tabela 5.** Frações volumétricas de ferrita e perlita pelo método do padrão pontual

	$Cv_{\alpha}$	$Cv_{\beta}$
<b>Área 1</b>	78%	22%
<b>Área 2</b>	80%	20%
<b>Média</b>	79%	21%

Através do método do gráfico polar, verificou-se que a amostra não possui uma direção preferencial para a orientação dos grãos. A Figura (6) apresenta a aplicação das linhas de teste com espaçamento entre elas de  $\Delta\theta=10^\circ$  até completar um círculo e a Fig. (7) demonstra o gráfico polar gerado de acordo com a contagem do número de grãos interceptados.



**Figura 6.** Aplicação do método do gráfico polar na amostra. Campo claro. Aumento 200x. Ataque Nital 2%



**Figura 7.** Gráfico polar da micrografia analisada

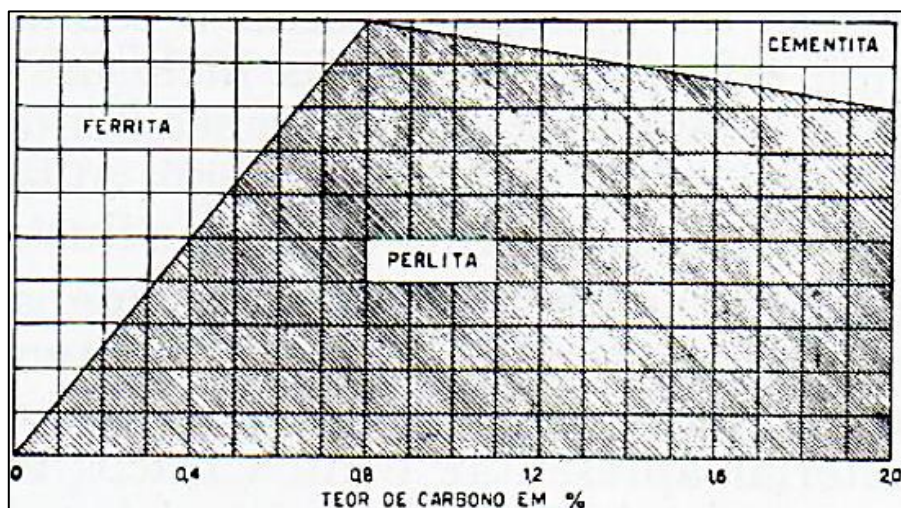
Nos aços hipoeutetóides pode-se estimar o teor de carbono em função da fração volumétrica que se observa de perlita na amostra, pois a quantidade de perlita varia de maneira linear de 0% para o ferro puro, até 100% para um aço eutetóide (0,8 %C). Realizou-se uma média da fração volumétrica de perlita obtida pelos métodos de padrão linear,



reticulado e pontual, demonstrado na Tab. (6) e com o resultado estimou-se o teor de carbono da amostra analisada, através da Fig. (8), em aproximadamente 0,17 %C.

**Tabela 6.** Valores de fração volumétrica encontrados nos diferentes métodos

	$C_{vP}$ (%)
<b>Padrão linear</b>	22,29
<b>Padrão reticulado</b>	20,78
<b>Padrão pontual</b>	21
<b>Média</b>	21,36



**Figura 8.** Diagrama mostrando aproximadamente a porcentagem com que se apresentam os constituintes das ligas ferro carbono simples, quando resfriadas lentamente (Colpaert, 1974)

Os resultados obtidos com o ensaio de microdureza da ferrita e de dureza da perlita (como esta é constituída de dois microconstituintes, ferrita e cementita, adotou-se a nomenclatura dureza) estão dispostos na Tab. (7) e Tab. (9), respectivamente. A partir dessas tabelas, realizou-se o tratamento estatístico das medidas para uma probabilidade (P) de 0,9, que de acordo com a Tab. (1) corresponde a um coeficiente de Student (t) de 1,6449. Os resultados desses tratamentos são exibidos na Tab. (8) para a ferrita e na Tab. (10) para a perlita.

**Tabela 7.** Valores de microdureza obtidos na ferrita

Grão	$d_H$ ( $\mu m$ )	$d_V$ ( $\mu m$ )	d	HV
1	10,38	10,46	10,42	171
2	10,66	10,76	10,71	162
3	10,78	10,66	10,72	161
4	10,57	10,52	10,55	167
5	11,01	10,81	10,91	156
6	10,22	10,46	10,34	173
7	10,57	10,79	10,68	163
8	10,82	10,95	10,89	156
9	10,83	11,05	10,94	155
10	10,21	10,43	10,32	174

**Tabela 8.** Tratamento estatístico da microdureza da ferrita

Média HV (kgf/mm <sup>2</sup> )	Desvio Padrão (kgf/mm <sup>2</sup> )	Coefficiente de variação (%)	Erro absoluto (kgf/mm <sup>2</sup> )	Erro relativo (%)	Nível de confiança
163,80	7,16	4,37	11,78	7,19	163,80 ± 11,78

**Tabela 9.** Valores de dureza obtidos na perlita

Grão	d <sub>H</sub> (μm)	d <sub>V</sub> (μm)	d	HV
1	8,62	8,50	8,56	253
2	7,87	7,75	7,81	304
3	7,55	7,66	7,61	321
4	8,01	8,12	8,07	285
5	8,82	8,93	8,88	235
6	8,79	8,72	8,76	242
7	8,33	8,41	8,37	265
8	8,11	8,28	8,20	276
9	8,83	8,88	8,86	236
10	7,89	7,75	7,82	303

**Tabela 10.** Tratamento estatístico da dureza na perlita

Média HV (kgf/mm <sup>2</sup> )	Desvio Padrão (kgf/mm <sup>2</sup> )	Coefficiente de variação (%)	Erro absoluto (kgf/mm <sup>2</sup> )	Erro relativo (%)	Nível de confiança
272	30,81	11,33	50,69	18,64	272 ± 50,69

## CONCLUSÃO

Por meio da caracterização quantitativa, pode-se concluir que a amostra do aço estudado é um aço hipoeutetóide com valor estimado de 0,17% de carbono. Confirmou-se então a presunção feita na avaliação qualitativa, que estimou, através de comparação com imagens disponíveis na literatura, que se tratava de um aço constituído por um percentual entre 0,1 e 0,2% de carbono. Também na análise qualitativa, identificou-se que a amostra apresentou predominância de grãos de ferrita não uniformes e sem uma direção preferencial, o que foi confirmado através do método do gráfico polar.

## REFERÊNCIAS

- ASM Handbook, 1972, “Atlas of Microstructures of Industrial Alloys”, 8ª ed., vol. 7, American Society for Metals, Metals Park, Ohio.
- Chiaverini, V., 2008, “Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos”, 7ª ed., ABM, São Paulo.
- Colpaert, H., 1974, “Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns”, 3ª ed., Edgard Blucher, São Paulo.
- Matlakhov, 2010, “Caracterização dos materiais I”, apostila LAMAV/CCT/UENF.
- Rodrigues, L. M., Santos, C. H. R., Veloso, R. R., Lemos, M. V., Santos, C., Cabral, R. F., 2014, “Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060”, Cadernos UniFOA, v. 9, n. 2 (Esp.), p. 39-44.
- Rohde, R. A., 2010, “Metalografia preparação de amostras. Laboratório de ensaios mecânicos”, 3ª ed., LEMM/URI, Rio Grande do Sul.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.