

# Caracterização da microestrutura e propriedades mecânicas do aço SAE 1080 patenteado e laminado a frio


Marcelo Gomes de Vasconcelos<sup>1</sup> 

Gabriel Curvelo Ferreira<sup>1</sup> 

Antenor Ferreira Filho<sup>2</sup> 

Gisele Fabiane Costa Almeida<sup>1\*</sup> 

Larissa Otubo<sup>3</sup> 

Rene Ramos de Oliveira<sup>3</sup> 

Nelson Batista de Lima<sup>3</sup> 

Antonio Augusto Couto<sup>1,3</sup> 

## Resumo

O presente trabalho aborda o processo de obtenção de uma tira de aço SAE 1080 com microestrutura constituída por perlita fina encruada para aplicação em serras e molas planas de força constante. O aço SAE 1080 obtido nacionalmente foi submetido a dois procedimentos de tratamento térmico e de passes de laminação a frio e suas propriedades mecânicas e suas microestruturas foram comparadas com a serra e a mola importadas. Nos procedimentos 1 e 2 o aço SAE 1080 foi austenitizado nas temperaturas de 920 °C e 940 °C respectivamente e resfriado até a temperatura de 540 °C. Após o tratamento térmico, o aço SAE 1080 foi laminado a frio até as espessuras próximas da serra ( $\approx 0,60$  mm) e da mola ( $\approx 0,25$  mm). Foi realizada a caracterização microestrutural por microscopia ótica e eletrônica de varredura e determinação da textura cristalográfica do aço SAE 1080 obtido segundo os procedimentos 1 e 2 e do aço da serra e da mola importadas. Foram determinadas as propriedades mecânicas em tração e a dureza Vickers dos mesmos aços. A microestrutura mais deformada, com ausência de carbonetos e uma orientação cristalográfica mais pronunciada conferiu melhores propriedades para aplicações como serra e mola ao aço SAE 1080 importado em relação ao aço produzido nacionalmente segundo os procedimentos 1 e 2.

**Palavras-chave:** Aço SAE 1080; Patenteamento; Perlita fina; Laminação a frio; Textura cristalográfica; Propriedades mecânicas.

## Microstructural characterization and mechanical properties of patented cold-rolled SAE 1080 steel

## Abstract

The present work approaches the obtaining process of a SAE 1080 steel strip with a microstructure consisting of fine hardened pearlite for application in saws and constant force flat springs. The SAE 1080 steel obtained nationally was subjected to two heat treatment procedures and cold rolling passes and its mechanical properties and microstructures were compared with the imported saw and spring. In procedures 1 and 2, SAE 1080 steel was austenitized at temperatures of 920 °C and 940 °C respectively and cooled to a temperature of 540 °C. After heat treatment, SAE 1080 steel was cold rolled to near saw ( $\approx 0.60$  mm) and spring ( $\approx 0.25$  mm) thicknesses. Microstructural characterization was carried out by optical and scanning electron microscopy and determination of the crystallographic texture of the SAE 1080 steel obtained according to procedures 1 and 2 and of the imported saw and spring steel. The tensile mechanical properties and Vickers hardness of the same steels were determined. The more deformed microstructure, with the absence of carbides and a more pronounced crystallographic orientation, gave better properties for applications such as saws and springs to the imported SAE 1080 steel concerning the steel produced nationally according to procedures 1 and 2.

**Keywords:** SAE 1080 steel; Patenting; Fine pearlite; Cold rolling; Crystallographic Texture; Mechanical properties.

<sup>1</sup>Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup>Maxime Ferrum, Vinhedo, SP, Brasil.

<sup>3</sup>Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, SP, Brasil.

\*Autor correspondente: gisele\_fab@hotmail.com



## 1 Introdução

O aço é um material versátil presente em diversas aplicações. Suas propriedades variam de acordo com a sua composição química, microestrutura e processamentos pelos quais foram submetidos [1]. O aço carbono é o material metálico mais produzido no mundo [2]. Segundo dados do Instituto Aço Brasil [3], a produção brasileira de aços laminados tem superado 20 milhões de toneladas por ano. O aço carbono SAE 1080 é um aço com composição próxima à eutetóide e, devido à sua dureza e resistência mecânica, é candidato a ser utilizado para fabricação de serras, para corte de carcaças de animais em frigoríficos e molas automotivas retráteis, onde é exigida uma elevada resistência mecânica e ao desgaste, boa planicidade, retilineidade e baixa rugosidade [4]. A microestrutura que apresenta melhor combinação de resistência mecânica e ductilidade é a perlítica fina, sendo adequada para as aplicações como serra e mola. Segundo Feng et al. [5], o aço perlítico com uma microestrutura refinada não só apresenta uma resistência a tração elevada (da ordem de 2.000 MPa) como também boa ductilidade e dureza. A distância interlamelar as lamelas de cementita e ferrita da perlita tem relação direta com a temperatura na qual a austenita se transforma em perlita e, conseqüentemente, com as propriedades do aço. Quanto mais baixa a temperatura de resfriamento da austenita, menor é o coeficiente de difusão do carbono gerando uma perlita mais fina [6]. Silva [7] aponta que a temperatura na qual se realiza a etapa de aquecimento também influencia o espaçamento interlamelar final da perlita e que quanto mais alta a temperatura de austenitização menor é o espaçamento interlamelar da perlita.

Camargo [1] e Morales et al. [8] realizaram tratamento térmico e posteriormente diversos passes de laminação a frio em um aço eutetóide buscando obter uma microestrutura perlítica fina com elevada resistência mecânica. Li et al. [9] realizaram uma têmpera para obtenção

de martensita e, posterior tratamento térmico que resultou em uma perlita extremamente fina. Koptseva et al. [10] realizaram o processo de patenteamento em arames de aço alto carbono, com obtenção de uma microestrutura perlítica fina, seguido de laminação e aplicações de esforços de flexão e torção no material. A combinação entre laminação, flexão e torção diminuiu o espaçamento interlamelar da perlita, aumentando sua resistência mecânica. Uma alternativa para se obter aço com microestrutura perlítica extremamente fina é a adição de elementos de liga. Wu e Bhadeshia [11] verificaram a influência dos elementos cobalto e alumínio em um aço perlítico, resultando em uma aceleração da formação da perlita, reduzindo o espaçamento interlamelar e obtendo assim uma perlita fina. Cornejo [12] relata que com a adição de cromo e molibdênio as temperaturas de início e fim da transformação perlítica foram reduzidas. O espaçamento interlamelar também foi reduzido resultando em uma perlita mais fina na microestrutura final do aço. O aço SAE 1080 com microestrutura perlítica fina ainda não é produzido nacionalmente para as aplicações de serra para máquinas de corte de frigoríficos e mola retrátil para sistemas de cintos de segurança de automóveis. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo obter o aço SAE 1080 com microestrutura perlítica fina e propriedades mecânicas adequadas para as aplicações citadas.

## 2 Materiais e métodos

O material utilizado no presente trabalho foram bobinas de tiras de aço SAE 1080 com 2 mm de espessura obtido por laminação a quente cuja composição química é apresentada na Tabela 1. O processo de patenteamento foi realizado em uma linha contínua num equipamento mostrado na Figura 1. Trata-se de uma linha adaptável que pode realizar diversos tratamentos térmicos como a têmpera, como a austêmpera e o patenteamento. Neste equipamento,

**Tabela 1.** Composição química do aço 1080 patenteado e laminado a frio (porcentagem em peso)

Elem.	C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni	Ti	Sn
%	0,7429	0,33	0,008	0,0003	0,14	0,0309	0,0161	0,41	0,01	0,0029	0,0045



**Figura 1.** Linha contínua utilizada para realizar o tratamento térmico de patenteamento no aço SAE 1080.

a tira de aço de 2 mm de espessura percorre uma zona do forno numa temperatura entre 900 e 950 °C para ocorrer a transformação austenítica.

Após a austenitização ocorre um resfriamento em banho metálico de chumbo bismuto até a temperatura de 540 °C (próximo ao “nariz” da curva T-T-T), mantendo no banho nesta temperatura até a obtenção da perlita fina. Dois procedimentos de patenteamento e laminação de tiras do mesmo aço SAE 1080 foram executados, caracterizados microestruturalmente e determinadas as propriedades mecânicas em tração e dureza. Todo material foi submetido ao tratamento térmico de patenteamento e posterior laminação a frio. O procedimento 1 a temperatura de austenitização foi de 920 °C e uma velocidade da tira de 3 m/min. No procedimento 2 o aço SAE 1080 foi submetido a uma austenitização a 940 °C e velocidade de 2 m/min. O aumento da temperatura de austenitização e a diminuição da velocidade da passagem do material no forno teve como objetivo dissolver os carbonetos, que afetam diretamente nas propriedades de mecânicas do aço.

Após o tratamento térmico, o aço foi submetido a dez passes de laminação a frio como objetivo de encruar o material, obtendo tiras de aço em diversas espessuras, com atenção às tiras com espessuras aproximadas de 0,60 mm e de 0,25 mm, que correspondem às espessuras para fabricação

da serra e da mola, respectivamente. A Figura 2 mostra o laminador utilizado nas deformações a frio das tiras. Em cada passe de laminação foram coletadas amostras para determinação das propriedades mecânicas e caracterização da microestrutura. A Tabela 2 apresenta os passes de laminação a frio dos procedimentos 1 e 2 do aço SAE 1080, os quais foram executados de acordo com a capacidade do laminador até as espessuras mencionadas para a fabricação da serra e da mola.

Para a análise por microscopia óptica (MO) foram preparadas amostras metalográficas utilizando técnicas convencionais de embutimento, lixamento, polimento e ataque químico com Nital 2%. As amostras foram analisadas no microscópio óptico Olympus BX60, com sistema de captura e análise de imagens. As mesmas amostras foram observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando um microscópio JSM-7800F da JEOL. Os ensaios de tração foram executados em um equipamento modelo Z100 da Zwick Roell com velocidade do travessão de 1 mm/min. Os ensaios de dureza Vickers foram realizados em um durômetro EMCO-TEST da Zwick Roell. A análise de textura cristalográfica foi executada utilizando um difratômetro de raios X da Rigaku com tubo de Cr, operando com 40 kV e 20 mA. Nessa análise foi utilizado um goniômetro de textura e o método de reflexão de Schulz. As condições de



**Figura 2.** Laminador de seis cilindros utilizado para a deformação a frio do aço SAE 1080.

**Tabela 2.** Passes de laminação a frio realizados no aço SAE 1080, segundo os procedimentos 1 e 2, a partir da espessura de 2 mm na condição como recebido

Procedimento 1 (mm)	Deformação Relativa (%)	Procedimento 2 (mm)	Deformação Relativa (%)
2,00	-	2,00	-
1,80	10,0	1,85	7,5
1,58	12,22	1,65	12,43
1,30	17,72	1,38	14,81
1,10	15,38	1,17	15,22
0,87	20,91	0,83	29,06
0,73	16,09	0,70	15,66
0,56	23,29	0,63	10,00
0,42	25,00	0,45	28,57
0,30	28,57	0,37	17,78
0,25	16,67	0,22	40,54

varredura foram: ângulo  $\alpha$  com passo de  $5^\circ$  na faixa de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  e ângulo  $\beta$  com passo  $5^\circ$  na faixa de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ . Os planos de difração medidos foram: (110), (200) e (211).

### 3 Resultados e discussão

Os resultados obtidos nas medidas de dureza Vickers foram compilados no gráfico apresentado na Figura 3. Como esperado, foi possível verificar o aumento da dureza das amostras do aço SAE 1080 conforme foram sendo realizados os passes de laminação. Após dez passes de laminação a frio em ambos os procedimentos, a amostra mais encruada do procedimento 2 apresentou uma dureza de 521,40 HV que é aproximadamente 2% maior que o valor medido na amostra mais encruada no procedimento 1 que apresentou uma dureza de 511,65 HV. Esses valores estão um pouco abaixo do valor da dureza apresentada pela mola retrátil importada, que possui dureza de 550 HV. A amostra do procedimento 2 com 0,63 mm de espessura apresentou uma dureza de 444,58 HV que é cerca de 2,2% maior do que a dureza apresentada pela amostra com 0,56 mm de espessura do procedimento 1 que possui 434,84 HV. Como na mola, as durezas do aço 1080 nas espessuras próximas à utilizada para a serra obtidas segundo os 2 procedimentos

apresentaram valores um pouco abaixo da dureza de 490 HV da serra importada. Feng et al. [5] e Wu e Bhadeshia [11] obtiveram valores de dureza da ordem de 425 HV e 422 HV, respectivamente, apenas com a adição de elementos de liga (alumínio e cobalto) e tratamento térmico, sem o encruamento do material. Camargo [1] relata que o aço SAE 1080 com microestrutura perlítica fina e não encruada apresentou uma dureza de 335 HV e, após cerca de onze passes de laminação a frio, a dureza foi de 567 HV. Morales et al. [8] realizaram um procedimento semelhante de patenteamento e laminação a frio em aço eutetóide, partindo de amostras com uma dureza de 353 HV e, após cinco passes de encruamento, atingiram uma dureza de 565 HV.

Os valores do limite de escoamento (LE), limite de resistência a tração (LRT) e alongamento obtidos de ensaios de tração do aço SAE 1080 tratados termicamente na condição como recebido, com 2 mm de espessura foram 778 MPa, 1100 MPa e 32%, respectivamente. Os resultados de limite de escoamento (LE), de limite de resistência a tração (LRT) e de alongamento obtidos de ensaios de tração do aço SAE 1080 tratados termicamente e laminados a frio até as espessuras próximas à da serra e da mola, segundo os procedimentos 1 e 2, são apresentados na Tabela 3. Nessa mesma tabela foram incluídos também os resultados dos ensaios de tração da serra e da mola importadas. Os resultados dos ensaios de tração indicam que quanto maior o grau de deformação a frio das tiras do aço SAE 1080 maior é o limite de escoamento e de resistência a tração e menor o alongamento, coerente com as medidas de dureza. Após todos os passes de laminação, as amostras de ambos os procedimentos apresentaram alongamento entre 5% e 6%. Os valores de limite de escoamento e de limite de resistência do aço SAE 1080 obtido segundo os procedimentos 1 e 2 nas espessuras da serra e da mola estão um pouco abaixo dos valores dessas mesmas propriedades na serra e na mola importadas. Camargo [1] obteve em seus ensaios de tração um LRT de 2352,6 MPa, um LE de 2300,64 MPa e alongamento de 3,9% em sua amostra mais encruada. Já Morales et al. [8] encontraram no aço SAE 1080 tratado termicamente, com microestrutura perlítica fina e encruado, LRT de 2353,6 MPa, LE 2304,56 MPa e alongamento de 3,8%. Portanto, pode-se considerar que o aço SAE 1080 laminado segundo os procedimentos 1 e 2 apresentou resultados de resistência mecânica menor do que o esperado. A caracterização microestrutural desses

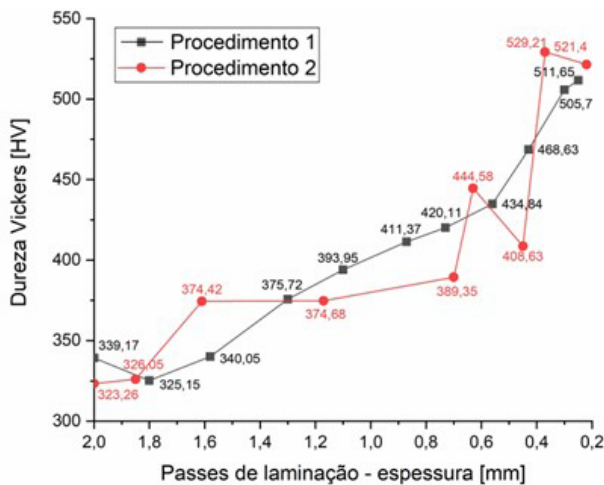


Figura 3. Gráfico com medidas de dureza Vickers das amostras do aço SAE 1080 em relação aos passes de laminação realizados segundo os procedimentos 1 e 2.

Tabela 3. Valores das propriedades mecânicas obtidos nos ensaios de tração realizados nas espessuras da serra e da mola do aço SAE 1080 importado e dos obtidos segundo os procedimentos 1 e 2

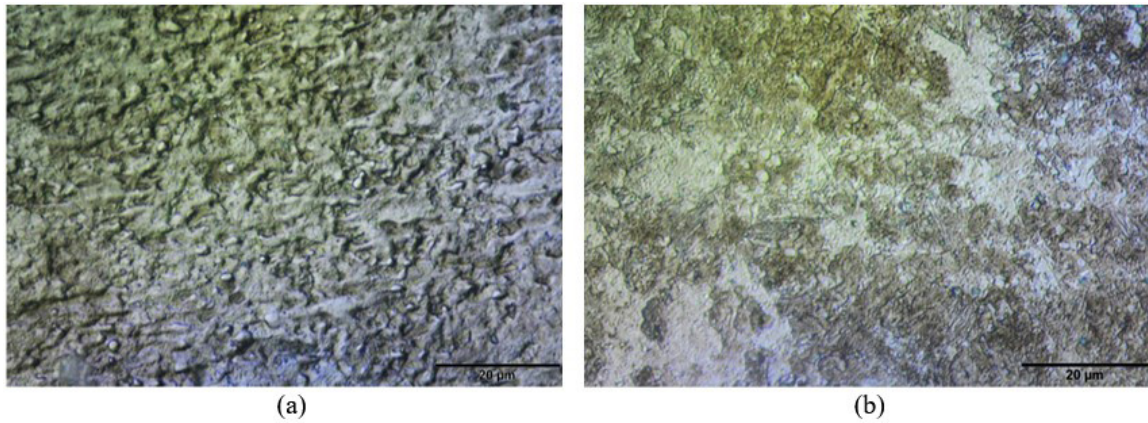
Lote	Espessura (mm)	LE (MPa)	LRT (MPa)	Alongamento (%)
Importado	0,56	1610	1730	20
	0,20	2390	2430	11
1	0,56	1150	1661	5,4
	0,25	1000	1919	6,2
2	0,63	1298	1629	8,3
	0,22	1974	2062	5,3



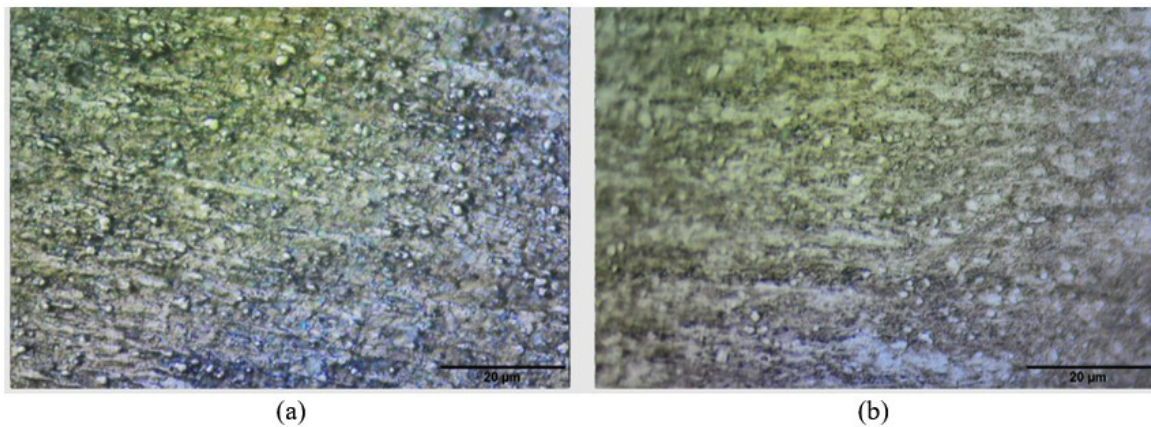
materiais é apresentada a seguir e pode contribuir para o entendimento dessa menor resistência mecânica.

As Figuras 4 a 6 apresentam micrografias ópticas de ambos os procedimentos antes e após a deformação a frio nas

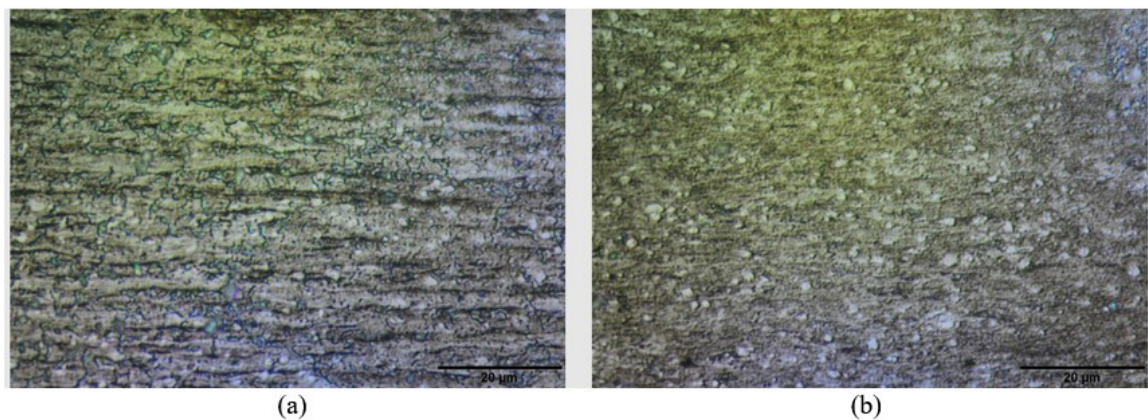
espessuras próximas da serra (0,56 mm) e da mola (0,25 mm). Na Figura 4 pode ser observada uma microestrutura perlítica de uma amostra do aço SAE 1080 antes do processo de laminação a frio. Nota-se nestas micrografias uma significativa



**Figura 4.** Micrografia óptica das microestruturas das amostras do aço SAE 1080 sem laminação a frio, com espessura de 2,0 mm e tratadas termicamente nas condições a) 920°C e velocidade da tira de 3 m/min e b) 940°C e uma velocidade da tira de 2 m/min.



**Figura 5.** Micrografia óptica das microestruturas das amostras do aço SAE 1080 laminadas a frio, com espessuras próximas das serras, conforme os procedimentos 1 (a) e 2 (b).



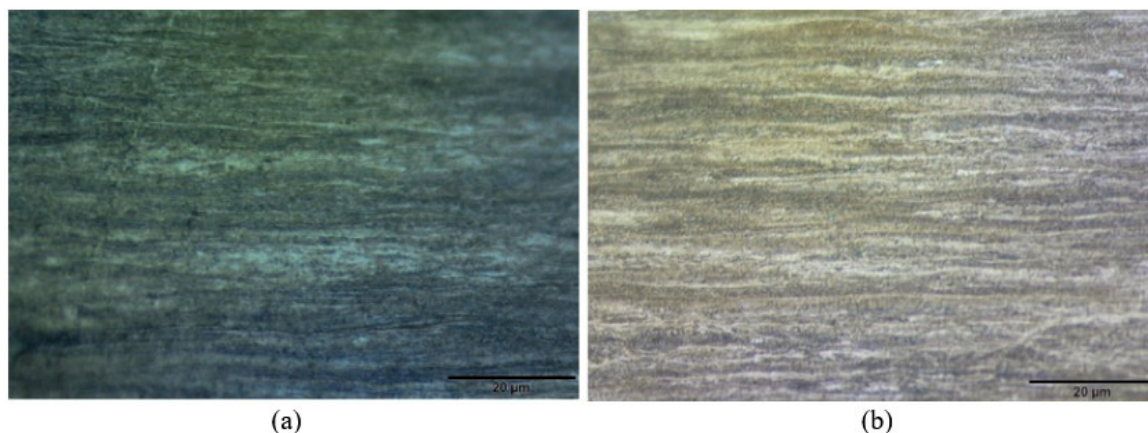
**Figura 6.** Micrografia óptica das microestruturas das amostras do aço SAE 1080 laminadas a frio, com espessuras próximas das molas, conforme os procedimentos 1 (a) e 2 (b).



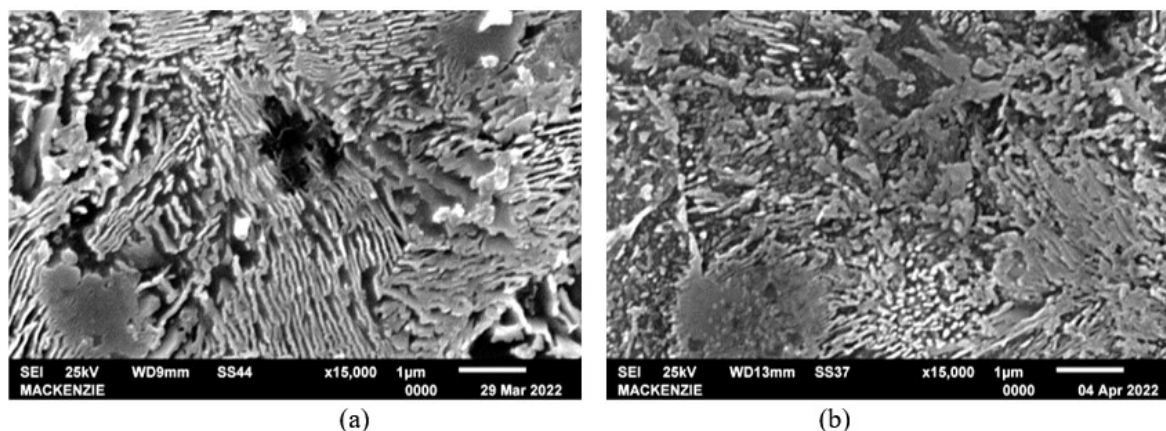
presença de carbonetos primários. Nas Figuras 5 e 6 são apresentadas as micrografias do aço SAE 1080 laminado até as espessuras da serra e da mola segundo os procedimentos 1 e 2. Nestas micrografias observa-se também uma microestrutura perlítica com carbonetos primários, porém deformada como consequência dos passes de laminação a frio realizados. Aparentemente a concentração de carbonetos presentes das amostras tratadas termicamente e laminadas segundo o procedimento 2 é menor em relação ao procedimento 1. Este fato ocorreu provavelmente em consequência da alteração nos parâmetros de patenteamento descritos anteriormente (maior temperatura na austenitização e menor velocidade no tratamento térmico do procedimento 2 em relação ao procedimento 1). Esta menor quantidade de carbonetos parece estar relacionada com a maior resistência mecânica das amostras obtidas segundo o procedimento 2. Leite et al. [13] também verificaram que o aumento da temperatura do tratamento térmico diminuiu a proporção dos carbonetos primários na microestrutura do aço. Os aços que passaram por tratamento

térmico em temperaturas mais elevadas apresentaram valores de dureza superiores, reforçando o fato de que a presença de carbonetos primários na microestrutura resulta em uma queda nos valores de dureza. Na Figura 7 são apresentadas as micrografias da serra e da mola do aço importado. Observa-se uma microestrutura perlítica fina altamente deformada e ausência de carbonetos primários. A ausência de carbonetos primários e a microestrutura mais deformada do aço importado justificam os maiores valores de dureza e de resistência mecânica à tração em relação ao nacional.

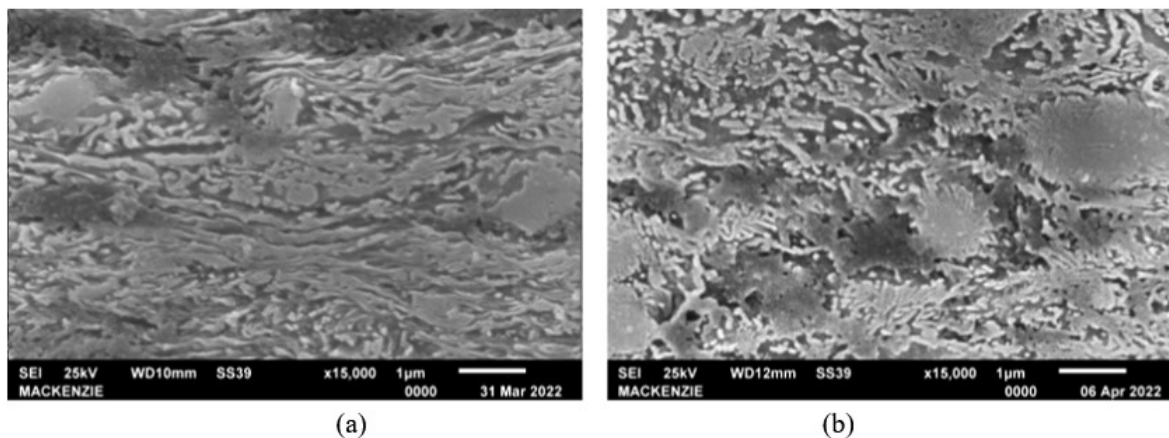
As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) são apresentadas nas Figuras 8 a 10. As amostras foram as mesmas utilizadas nas análises por microscopia óptica. É possível observar as lamelas de perlita próximas umas das outras, característica presente na microestrutura perlítica fina. Conforme os passes de laminação foram sendo realizados, foi possível observar o direcionamento da microestrutura no sentido longitudinal da amostra, evidenciado pelas linhas de deformação presentes



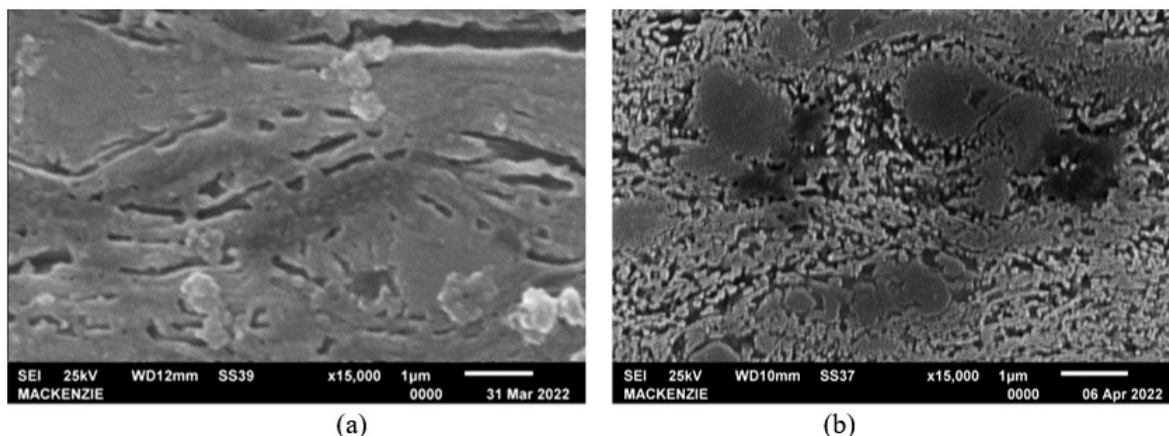
**Figura 7.** Micrografia óptica das microestruturas das amostras do aço SAE 1080 importado laminadas a frio, com espessuras da serra (a) e da mola (b).



**Figura 8.** Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras do aço SAE 1080 sem laminação a frio, com espessura de 2,0 mm e tratadas termicamente nas condições a) 920 °C e velocidade da tira de 3 m/min e b) 940 °C e uma velocidade da tira de 2 m/min.



**Figura 9.** Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura das amostras do aço SAE 1080 laminadas a frio, com espessuras próximas das serras, conforme os procedimentos 1 (a) e 2 (b).



**Figura 10.** Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura das amostras do aço SAE 1080 laminadas a frio, com espessuras próximas das molas, conforme os procedimentos 1 (a) e 2 (b).

nas Figuras 9 e 10. As imagens provenientes do microscópio eletrônico de varredura, assim como as imagens obtidas por microscopia óptica, evidenciam a presença de carbonetos na microestrutura do aço SAE 1080. Apesar do material produzido ser um aço alto carbono sem elemento de liga, existe uma concentração considerável de cromo em sua composição (0,41% Cr), conforme mostrado na Tabela 1.

É possível que alguns dos carbonetos encontrados nas imagens por MO e por MEV sejam carbonetos de cromo que se formaram durante o tratamento térmico. Cornejo [12], em seu trabalho estudou o processo de obtenção de aço alto carbono perlítico sem adição de elementos de liga, mas com uma concentração de 0,24% a 0,32% de cromo, ficando evidente a presença de carboneto de cromo.

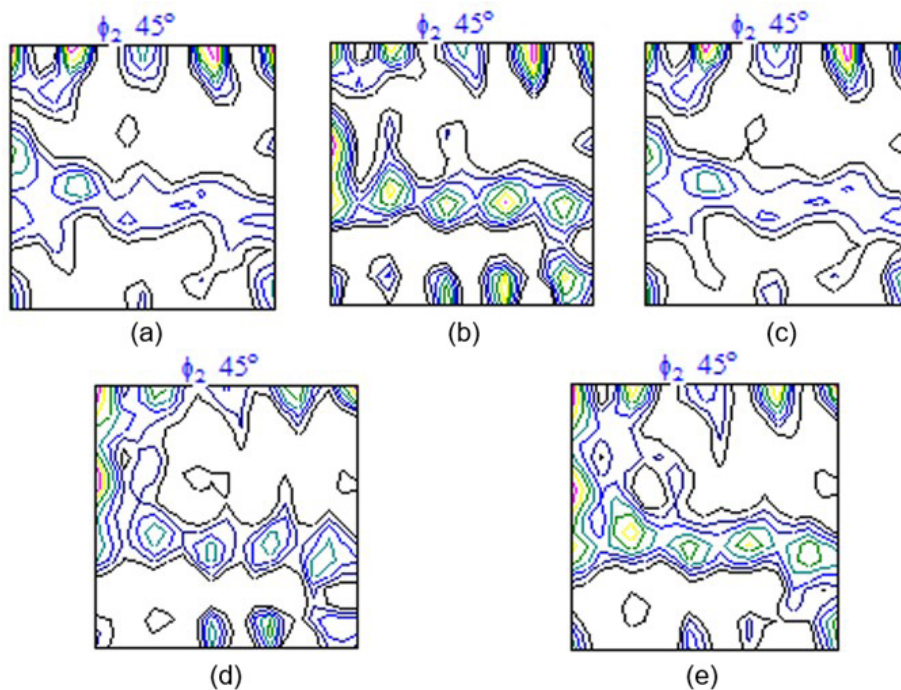
Estudos de Wu e Bhadeshia [11] e Feng et al. [5] notaram que os elementos de liga cobalto e alumínio aumentam a força motriz da transformação de austenita para a perlita e aceleram a transformação da perlita. Como resultado obtiveram um aço com espaçamento lamelar médio de

45 nm. Morales et al. [8] e Koptseva et al. [14] verificaram uma diminuição no distanciamento interlamelar da perlita com a realização dos passes de laminação a frio. No começo do processo de laminação, as lamelas na perlita tendem a se orientar no sentido do encruamento. Conforme o grau de laminação aumenta, ocorre o refinamento da lamela e uma diminuição do espaçamento interlamelar.

Na Figura 11 são apresentadas as funções distribuição de orientações (fdos) na seção  $\phi=45^\circ$  das amostras em diferentes graus de deformação do aço SAE 1080 laminado a frio. Na Figura 11a observa-se a fdo de uma amostra na condição como recebida, com espessura de 2,0 mm.

Nas Figuras 11b e 11c são apresentadas as fdos na condição laminada a frio em espessuras próximas da utilizada na aplicação como serra (0,60 mm), segundo os procedimentos 1 e 2 respectivamente. As fdos das amostras laminadas em espessura próxima à utilizada como mola (0,25 mm) são mostradas nas Figuras 11d e 11e, relativo aos procedimentos 1 e 2 respectivamente. Nota-se nas fdos na seção  $\phi=45^\circ$  da



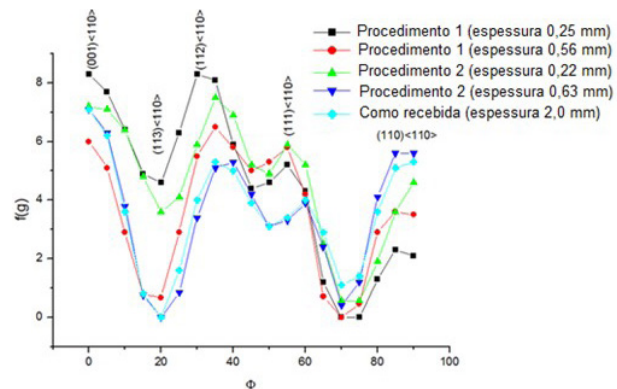


**Figura 11.** Funções distribuição de orientações na seção  $\phi_2=45^\circ$  das amostras do aço SAE 1080 na condição (a) como recebida, com espessura de 2,0 mm e laminadas a frio na espessura aplicada para a serra segundo os procedimentos (b) 1 (0,56 mm) e (c) 2 (0,63 mm); e na espessura aplicada para a mola segundo os procedimentos (d) 1 (0,25 mm) e (e) 2 (0,22 mm).

chapa de aço SAE 1080 nas condições como recebida, com espessura de 2,0 mm e laminada segundo o procedimento 2 com espessura de 0,63 mm (Figuras 11a e 11c) muita semelhança, indicando que a laminação a frio da espessura inicial até a espessura da aplicação da serra segundo o procedimento 1 não alterou as orientações cristalográficas do material. Diferentemente do ocorrido no procedimento 2, as orientações cristalográficas do procedimento 1 são alteradas em decorrência da laminação a frio (Figura 11b). Na laminação até a espessura da mola as orientações cristalográficas são próximas, sendo mais acentuada e mais apropriada para estampagem no procedimento 2.

Nas Figuras 12 e 13 são apresentadas as fibras alfa e gama do aço SAE 1080 em diferentes espessuras e condições: como recebida, laminada a frio até espessuras de serra (cerca de 0,60 mm) e de mola (cerca de 0,25 mm), obtidas das varreduras em  $\phi$  com  $\phi_1=0^\circ$  e  $\phi_2=45^\circ$  e em  $\phi_1$  com  $\phi=55^\circ$  e  $\phi_2=45^\circ$ , respectivamente. Nota-se que o aumento do grau de deformação na laminação a frio aumenta, de uma maneira geral, a orientação preferencial das chapas do aço SAE 1080. Conforme aumenta o grau de deformação na laminação a frio, as orientações preferenciais que se destacam são:  $(001)\langle 110 \rangle$ ;  $(121)\langle 110 \rangle$  e  $(113)\langle 110 \rangle$ ; além do aumento da fibra gama. Contudo, ocorre a redução da orientação  $(110)\langle 110 \rangle$  com o aumento do grau de deformação na laminação a frio.

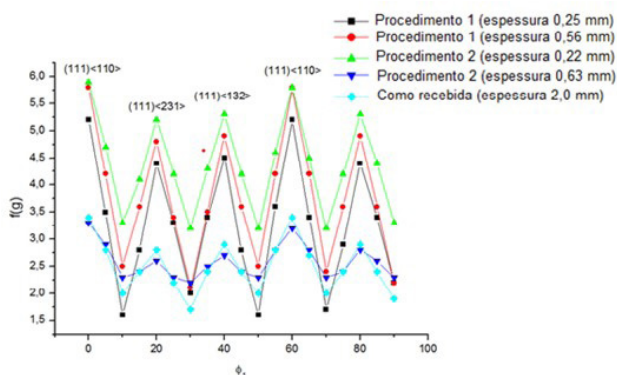
Nas Figuras 14 e 15 é mostrada a fibra gama do aço SAE 1080 somente na espessura final da serra ( $\approx 0,60$  mm) e da mola ( $\approx 0,25$  mm) separadamente. Nessas figuras



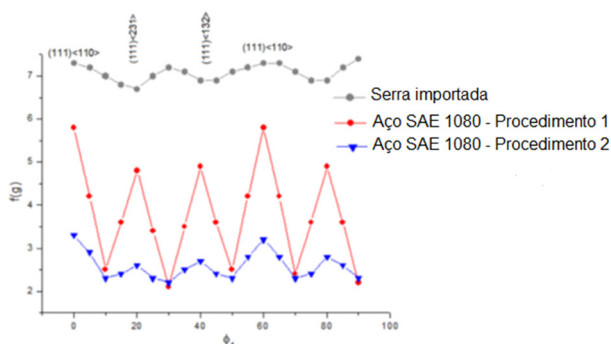
**Figura 12.** Fibra alfa obtida da varredura em  $\phi$  com  $\phi_1=0^\circ$  e  $\phi_2=45^\circ$  do aço SAE 1080 em diferentes espessuras e condições: como recebida, laminada a frio até espessuras da serra (cerca de 0,60 mm) e da mola (cerca de 0,25 mm).

foi também incluída a fibra gama da serra e da mola importadas para efeito de comparação. Analisando a fibra gama nos gráficos das Figuras 14 e 15 é possível verificar que os materiais importados apresentaram uma orientação cristalográfica muito elevada em comparação ao material nacional. A serra importada apresentou “times random” em torno de 7 e a mola importada apresentou “times random” em torno de 10. Em ambos, serra e mola importadas, os materiais apresentaram pouca variação dos “times random” ao longo da fibra gama.

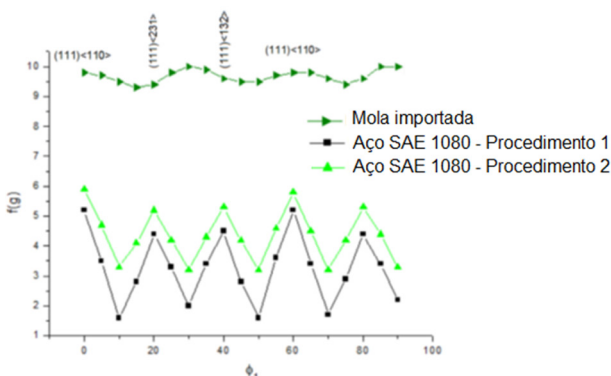




**Figura 13.** Fibra gama obtida da varredura em  $\phi_1$  com  $\phi = 550$  e  $\phi_2 = 450$  do aço SAE 1080 em diferentes espessuras e condições: como recebida, laminada a frio até espessuras da serra (cerca de 0,60 mm) e da mola (cerca de 0,25 mm).



**Figura 14.** Fibra gama obtida da varredura em  $\phi_1$  com  $\phi = 55^\circ$  e  $\phi_2 = 45^\circ$  da serra importada e de amostras do aço SAE 1080 na espessura da serra ( $\approx 0,60$  mm) obtida segundo os procedimentos 1 e 2.



**Figura 15.** Fibra gama obtida da varredura em  $\phi_1$  com  $\phi = 55^\circ$  e  $\phi_2 = 45^\circ$  da mola importada e de amostras do aço SAE 1080 na espessura da mola ( $\approx 0,25$  mm) obtida segundo os procedimentos 1 e 2.

De uma maneira geral, a diferença entre as propriedades da serra e da mola importadas em relação às tiras de aço SAE 1080 obtidas pelos procedimentos 1 e 2 estão relacionadas às

variações microestruturais entre os materiais. No aço SAE 1080 importado a microestrutura apresenta características de deformação mais intensa do que os obtidos nacionalmente, tanto seguindo o procedimento 1 quanto o 2. Diferentemente do aço SAE obtido nacionalmente, cuja microestrutura mostra uma razoável quantidade de carbonetos, a microestrutura do aço importado não apresenta carbonetos. Além disso, a textura cristalográfica do aço SAE importado mais intensa e pouca variação dos “times random” em comparação com o aço nacional obtido pelos procedimentos 1 e 2. A microestrutura mais deformada, com ausência de carbonetos primários e uma orientação cristalográfica mais pronunciada conferiu melhores propriedades para aplicações como serra e mola ao aço SAE 1080 importado em relação ao aço produzido nacionalmente segundo os procedimentos 1 e 2.

#### 4 Conclusões

O estudo da caracterização da microestrutura e das propriedades mecânicas do aço SAE 1080 patenteado e laminado a frio permitiu concluir que:

- As amostras do aço SAE 1080 fabricado nacionalmente após laminação a quente, tratamento térmico de patentamento e subsequente laminação a frio apresentam uma microestrutura perlítica fina texturizada e com a presença de carbonetos. Em temperaturas mais elevadas de austenitização e menor velocidade do material na linha de tratamento térmico aparentemente induziu à formação de menos carbonetos e conseqüente maiores dureza e resistência mecânica à tração.
- A laminação a frio reduziu a espessura do aço para aproximadamente 0,25 mm para a aplicação como mola. Os resultados de dureza e de limite de resistência à tração das amostras do aço SAE 1080 produzido nacionalmente na espessura da mola foram de 511,65 HV e 1919 MPa segundo o procedimento 1 e 521,40 HV e 2062 MPa para o procedimento 2, respectivamente. Em ambos os procedimentos a dureza e a resistência mecânica ficaram abaixo do material importado que apresentou valores de 550 HV e de 2430 MPa, respectivamente.
- O aço SAE 1080 fabricado nacionalmente apresentou uma microestrutura constituída por perlita fina deformada com a presença de carbonetos primários em ambos os procedimentos. O aço da serra e da mola importada apresenta uma microestrutura perlítica fina altamente deformada e ausência de carbonetos primários.
- De uma maneira geral, o aumento do grau de redução na laminação a frio induziu a um aumento da orientação cristalográfica das chapas do aço SAE 1080. Com o aumento do grau de redução na laminação a frio ocorre o aumento acentuado das orientações

preferenciais (001)<110>, (121)<110> e (113)<110> e a diminuição da orientação (110)<110>. O aço importado apresentou uma orientação cristalográfica muito elevada em comparação ao material nacional e pouca variação dos “times random” ao longo da fibra gama.

- A microestrutura mais deformada, com ausência de carbonetos primários e uma orientação cristalográfica mais pronunciada conferiu melhores propriedades para aplicações como serra e mola ao aço SAE 1080

importado em relação ao aço produzido nacionalmente segundo os procedimentos 1 e 2.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq o apoio à pesquisa por meio do programa MAI/DAI do Edital 2020. Os autores também agradecem à empresa Maxime Ferrum pelo apoio na fabricação do aço SAE 1080 e por toda a parceria na pesquisa.

### Referências

- 1 Camargo LFD. Estudo da deformação a frio dos aços eutetóides com microestrutura perlítica fina e perlítica grosseira [monografia]. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie; 2012.
- 2 Ferreira Filho, A., Cumino, R. S. Tiras de aço médio e alto teor de carbono para estampagem profunda utilizadas em componentes automotivos. In: Seminário de laminação, processos e produtos laminados e revestidos, 40, 2003, Vitória. São Paulo: ABM e Tec Art Editora Ltda, 2003. p. 34-46.
- 3 Instituto Aço Brasil. A siderurgia em números. 2020 [acesso em 16 dez. 2022]. Disponível em: [https://institutoacobrasil.net.br/site/wp-content/uploads/2019/08/AcoBrasil\\_Mini\\_anuario\\_2019.pdf](https://institutoacobrasil.net.br/site/wp-content/uploads/2019/08/AcoBrasil_Mini_anuario_2019.pdf)
- 4 Filho, Antenor Ferreira; Asamer, Norbert. Tiras de aço carbono não ligados e de baixa liga produzidas em linhas contínuas de têmpera e revenimento, p. 112-124. In: 42º Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Bahia, 2005. ISSN: 2594-5297 , DOI 10.5151/2594-5297-0012
- 5 Feng L, Hu F, Zhou W, Ke R, Zhang G, Wu K, et al. Influences of alloying elements on continuous cooling phase transformation and microstructures of extremely fine pearlite. *Metals MDPI*. 2019;9(1):1-8.
- 6 Vatauvuk J, Vendramim JC, Canale LCF. Termos metalúrgicos selecionados no contexto metalomecânico. São Paulo: Fontenele Publicações; 2022.
- 7 Silva EXBD. Influência do espaçamento interlamelar da perlita nas propriedades mecânicas do aço ABNT-1080 (dissertação). Fortaleza: Universidade Federal do Ceará; 2022.
- 8 Morales C, Goldenstein H, Lopes MMG. Aços Sae 1080 para molas. In: 49 Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos. São Paulo: ABM 2012. p. 613-628.
- 9 Li S, He M, Hu G, Tian Y, Wang C, Jing B, et al. Pearlite formation via martensite. *Composites. Part B, Engineering*. 2022;238:109859. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109859>.
- 10 Koptseva NV, Efimova YY, Gulin AE, Narasimyan K, Prasad MJ. Behavior of fine pearlite plates in the deformation of high-carbon steel. *Steel in Translation*. 2019;49(4):286-290.
- 11 Wu K, Bhadeshia H. Extremely fine pearlite by continuous cooling transformation. *Scripta Materialia*. 2012;67(1):53-56.
- 12 Cornejo MSL. Modelo de la formación de perlita bajo condiciones de enfriamiento continuo (thesis). Morelia: Instituto Tecnológico de Morelia; 2021.
- 13 Leite PAC, Silva NAN, Lopes W, Corrêa ECS. Caracterização mecânica e microestrutural de um aço inoxidável martensítico de médio teor de carbono após têmpera e revenimento. In: 71º Congresso Anual - ABM week. São Paulo: ABM; 2016. p. 1132-1140.
- 14 Koptseva NV, Efimova YY, Chukin MV. Deformation behavior of finely-lamellar pearlite during multiple cold plastic deformation of eutectoid steel. *Metal Science and Heat Treatment*. 2019;61(5-6):267-273.

Recebido em: 16 Dez. 2022

Aceito em: 8 Fev. 2024