

# A EVOLUÇÃO DA MICROESTRUTURA, PROPRIEDADES MECÂNICAS E TEXTURA CRISTALOGRÁFICA NA FABRICAÇÃO DO VERGALHÃO CA-60\*

Pedro Guilherme do Nascimento Pereira<sup>1</sup>

Iuri Araújo Abreu<sup>2</sup>

Dário Freire Arrais<sup>3</sup>

Gilvania Kátia Cruz Pinheiro<sup>4</sup>

Luís Flávio Gaspar Herculano<sup>5</sup>

Hamilton Ferreira Gomes de Abreu<sup>6</sup>

## Resumo

O aço é um material presente em vários setores da economia atual. Seu uso abrange desde o setor industrial, como o automobilístico, ao setor alimentício, como o de embalagens. Existem vários processos de conformação para moldar e adequar as propriedades da liga metálica às suas variadas necessidades de aplicação, como a trefilação e a laminação a frio. Apesar dos dois métodos visarem o aumento de resistência, há diferenças entre eles que influenciam no resultado final. Este trabalho utiliza fio máquina de diâmetro 5,50 mm de aço baixo carbono a fim de comparar trefilação e laminação a frio em termos de ensaios mecânicos e microestrutura para produção de vergalhões CA-60 de diâmetro 4,2mm e evolução da textura cristalográfica entre os passes dos processos. Ao fim dos testes, constatou-se que os produtos laminados apresentaram maiores resultados nos ensaios de tração, a microestrutura demonstrou o alongamento dos grãos na superfície e os dois métodos apresentaram textura nas mesmas direções finais, mas com intensidades diferentes.

**Palavras-chave:** Laminação a Frio; Trefilação; Orientação Preferencial; CA-60.

## THE EVOLUTION OF MICROSTRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES AND CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE IN THE MANUFACTURE OF CA-60 BARS.

### Abstract

Steel is a material present in various sectors of the current economy. Its use ranges from the industrial sector, such as the automotive, to the food sector, such as packaging. There are different metalworking processes for shaping and matching the alloy's properties to the application needs, such as drawing and cold rolling. Although the two methods have the same purpose of increasing resistance, there are differences between them that influence the final product. This work uses wire rod of 5.5mm diameter of low carbon steel comparing drawing and cold rolling in terms of mechanical tests and microstructure for the production of CA-60 bars of diameter 4,2mm and evolution of the crystallographic texture between the passes of the processes. At the end of the tests, the rolled products showed higher results in the tensile tests, the microstructure demonstrated the stretching of the grains on the surface and the two methods presented texture in the same final directions with different intensities.

**Keywords:** Cold Rolling; Drawing; Preferential Orientation; CA-60.

<sup>1</sup> Engenharia Metalúrgica, Estudante, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará e Brasil.

<sup>2</sup> Engenharia Metalúrgica, Estudante, Bolsista, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará e Brasil.

<sup>3</sup> Engenharia Metalúrgica, Estudante, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará e Brasil.

<sup>4</sup> Engenharia Metalúrgica, Estudante, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará e Brasil.

<sup>5</sup> Engenharia Mecânica, Professor Doutor, Engenheiro, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará e Brasil.

<sup>6</sup> Engenharia Naval, Professor Doutor, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará e Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Um processo de conformação mecânica possui como objetivo adequar as propriedades de um material para uma aplicação, inclusive a forma. Dois métodos bastante aplicados na indústria são a laminação e a trefilação, visto que cada um possui suas particularidades e destinação específica dependendo do material a ser conformado.

Na laminação, os fios passam por rolos giratórios que os comprimem, de forma que a espessura é diminuída e o comprimento aumentado. O conjunto desses rolos constitui o trem de laminação e cada etapa é conhecida como passe.

O processo de laminação pode ser feito a frio ou a quente. Na laminação a quente, a temperatura utilizada é maior que a temperatura de recristalização do material e a frio ocorre abaixo dessa temperatura de recristalização. Para laminação de fios e barras é usado tanto o processo a quente com uso de laminadores de rolos ranhurados como a frio com finalidade de acabamento de peças que passaram por um processo a quente. [4]

Na trefilação, o material é passado por uma ferramenta que possui uma matriz, visto que o material é puxado através dessa matriz, conhecida como fieira, e quem causa a conformação são forças compressivas, resultantes da reação entre a matriz e o material [3]. Existem uma gama de aplicações para trefilados, como fios elétricos, cabos, cliques de papel, cordas para instrumentos musicais, etc.

A velocidade em que o fio deve ser trefilado varia de acordo com o material e a dimensão da redução. O fato de tracionar o material sem aquecimento prévio exige maior força da máquina [5]. Assim, pode causar exaustão antecipada do equipamento e fadigas no metal. Para diminuir os efeitos da exaustão, existe a lubrificação.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais

O material utilizado para a realização da pesquisa foi o fio-máquina, com diâmetro de 5,50 mm, laminados a quente do próprio processo de fabricação e a matéria-prima foi fornecida por uma grande empresa do setor metalomecânico no Ceará.

**Tabela 1.** Composições químicas e informações sobre as propriedades mecânicas do material.

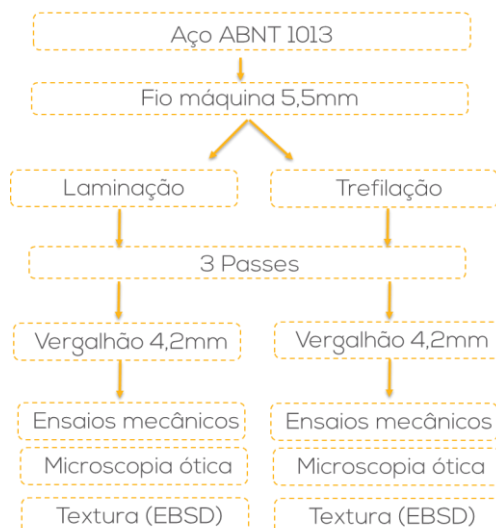
Aço ABNT	C	Si	Mn	S	P	Cu	LR (MPa)	Along %
5,50 mm	0,13	0,10	0,53	0,024	0,014	0,11	472	28,60

Fonte: Certificado de qualidade do fornecedor.

### 2.2 Método

#### 2.2.1 Processamento do Fio máquina

Na figura 1, representada por um fluxograma, é expressa todas as etapas as quais o material é processado.



**Figura1.** Fluxograma das atividades realizadas. Fonte: Elaborada pelo autor

O primeiro processo a ser realizado foi a laminação. Inicialmente, fez-se necessária a utilização do equipamento conhecido como *pay-off* que são estruturas que facilitam o desenrolamento de grandes bobinas a fim de que o fio seja tracionado em processos seguintes.

Ao ser desenrolado, o fio-máquina é levado com uma determinada velocidade por meio de roldanas, de forma que essas polias também realizam o processo de decapagem mecânica, removendo óxidos e impurezas.

Após a retirada dos óxidos, a matéria-prima é passada por uma substância conhecida como sabão, onde o material é lubrificado (normalmente em formato de pó), facilitando o escorregamento do fio no trem de laminação. Após tudo isso, é iniciada a etapa de conformação para redução da seção.

O processo de laminação foi feito em 3 passes, sendo cada passe com uma velocidade média de 6m/s. Foi cortada 1 espira de cada passe, com média de 3 voltas de fio para o material transcorrido.

Para realizar a trefilação, foram utilizados o rolo de fio máquina de 5,50mm, sendo alocado horizontalmente no aparato mecânico apropriado para a decapagem mecânica. Nesse processo, a decapagem também ocorre por passagem do fio em roldanas e durante quase todo o processo. As reduções são realizadas nas fieiras, onde se localizam os lubrificantes sólidos. Na produção dos vergalhões, as trefiladoras utilizaram velocidade média análoga de 6m/s, produzindo o vergalhão de 4,2mm, com retirada de 2 espiras para divisão de amostras.

### 2.2.2 Ensaio Mecânicos

Foram realizados ensaios de tração segundo a norma ABNT NBR 6892 [1] à temperatura ambiente e em uma máquina da marca Panambra. Os corpos de prova possuíam cerca de 200 mm a 250 mm, com comprimento útil de 100mm indicado pelo extensômetro. Através do ensaio de tração, foi possível obter o limite de resistência, limite de escoamento e alongamento. Há como obter um parâmetro para esses dados através da norma ABNT NBR 7480 [2].

### 2.2.3 Caracterização Microestrutural

Foram analisadas as microestruturas, tanto do fio-máquina como do vergalhão trefilado e laminado, a fim de comparar antes e pós-processo. Para a

metalografia necessária, foram utilizadas lixas d'água de 80, 100, 220, 400, 600 e 1200 mesh. Além disso, um polimento com alumina de 1  $\mu$  e posteriormente, de 0,5  $\mu$ . Por último, foi realizado um ataque químico com nital 2% com tempo variável de 6 a 10 segundos. As imagens das microestruturas foram obtidas através do equipamento Zeiss com auxílio do software *Axiovision* pertencente ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) - UFC.

### 2.2.4 Caracterização microestrutural para Textura Cristalográfica

Com o propósito de obter a evolução cristalográfica do material, foi realizada a difração de elétrons retro espalhados, EBSD, que é uma técnica empregada no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Tal técnica foi empregada nas amostras dos passes intermediários e no produto final, além da matéria prima, utilizando linescans.

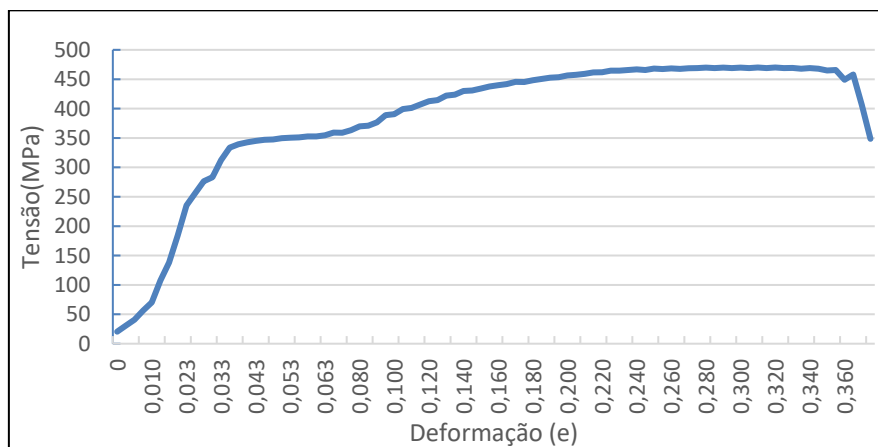
A metalografia foi análoga à empregada na caracterização microestrutural, com a diferença de que foram empregados, além das lixas d'água mencionadas anteriormente, as lixas de 2000 e 2500 mesh. Ademais, fez-se necessário o polimento com sílica coloidal em uma politriz automática.

## 3.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

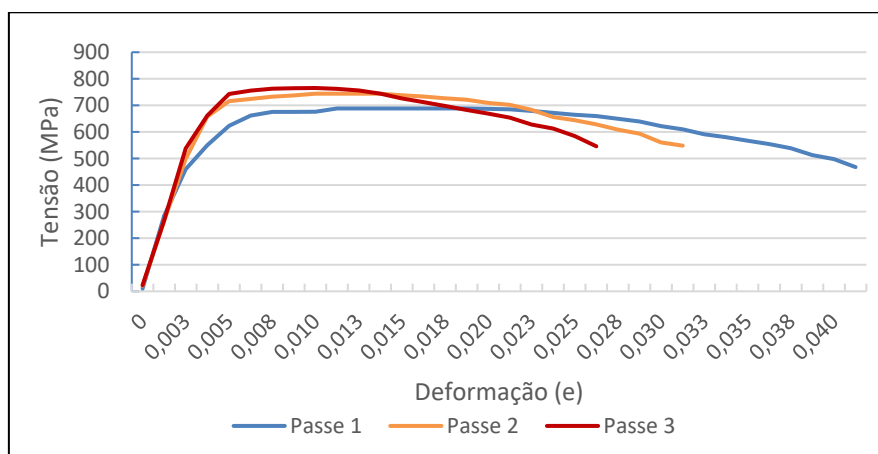
### 3.1.1 Ensaios Mecânicos

Foram feitos ensaios de tração a fim de ser analisado o comportamento da resistência mecânica do material durante o processo de conformação. A figura 2 mostra os gráficos de tensão-deformação obtidos.

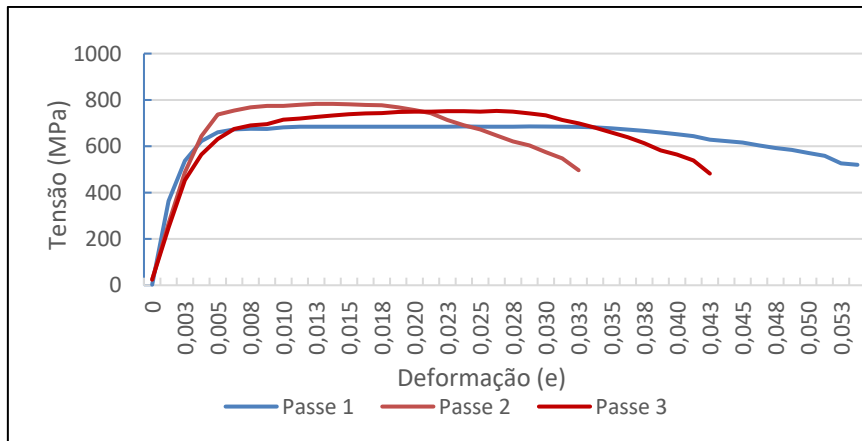
a)



b)



c)



**Figura 2.** Comparação das curvas tensão deformação entre (a) fio máquina (b) sequência de passes de laminação (c) sequência de passes de trefilação

É possível perceber, comparando os dois métodos de conformação, um aumento significativo do limite de resistência e do limite de escoamento após cada passe em relação ao fio máquina.

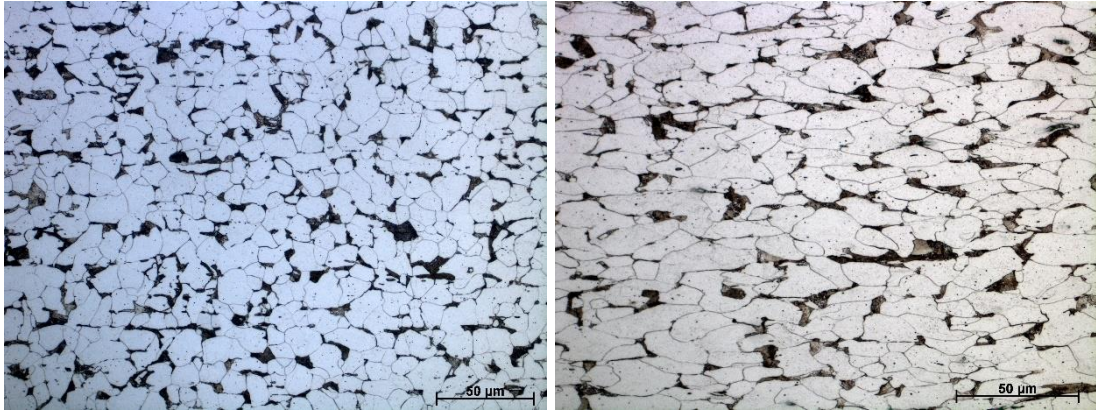
Na tabela 2 estão contidos os valores destes Limites de Escoamento e de Resistência do material após os dois processos e antes de ser conformado, permitindo uma comparação mais visível.

**Tabela 2.** Limite de escoamento e limite de resistência pré e pós-conformação em MPa.

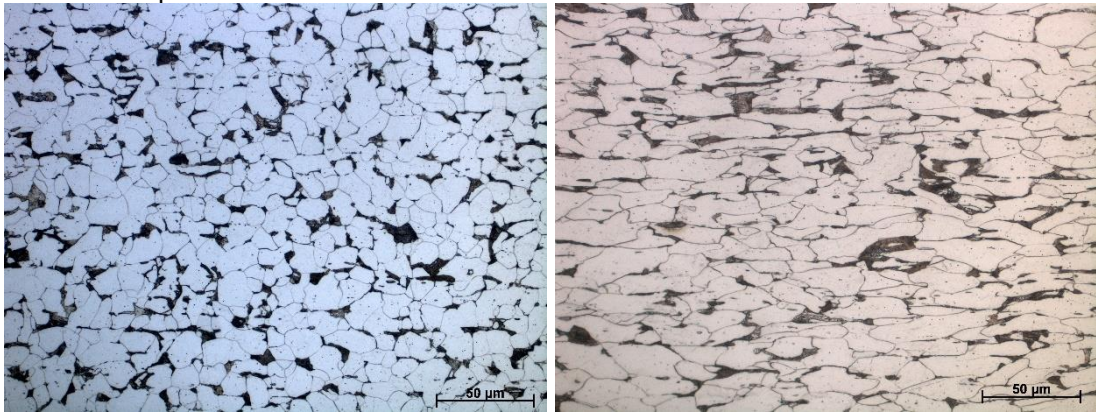
PROCESSO	LIMITE DE ESCOAMENTO	LIMITE DE RESISTÊNCIA	RELAÇÃO LR/LE
FIO MÁQUINA 5,5mm	333	470	1,41
LAMINAÇÃO	733,1	769,5	1,05
TREFILAÇÃO	644,7	752,7	1,17

### 3.1.2 Microestrutura

Ao analisar a microestrutura do material, ficou bastante perceptível o alongamento dos grãos na direção de deformação devido aos esforços de cisalhamento e compressão indireta na laminação e trefilação, respectivamente. Nas imagens 3 e 4 estão retratadas as microestruturas do aço ABNT 1013 antes e depois dos processos de conformação.



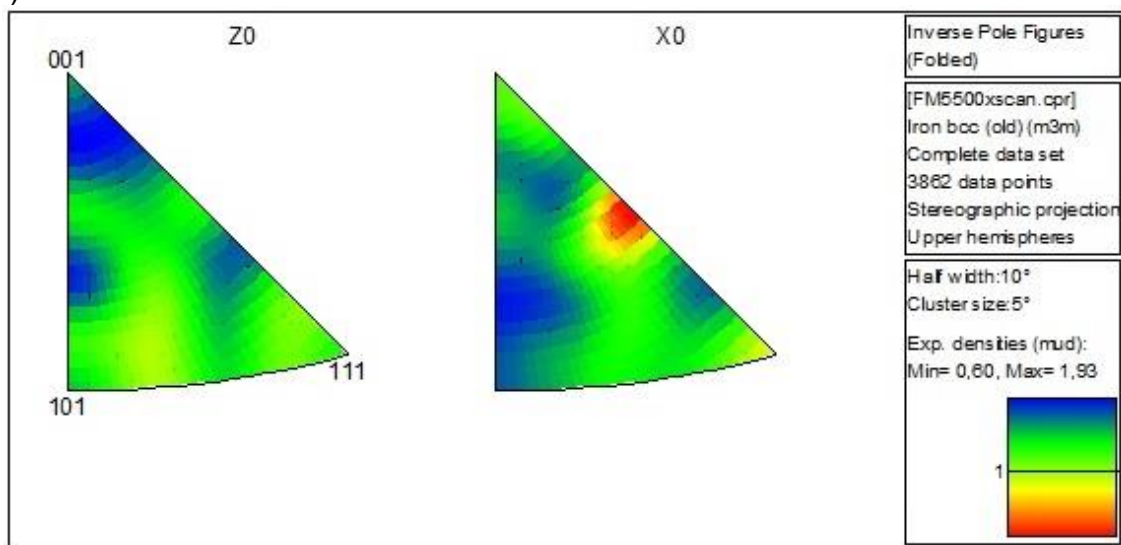
**Figura 3.** Micrografia de aço ABNT 1013 como recebido (esquerda 500x) e laminado (direita 500x).  
Fonte: Elaborada pelo autor.



**Figura 4.** Micrografia de aço ABNT 1013 como recebido (esquerda 500x) e trefilado (direita 500x).  
Fonte: Elaborada pelo autor.

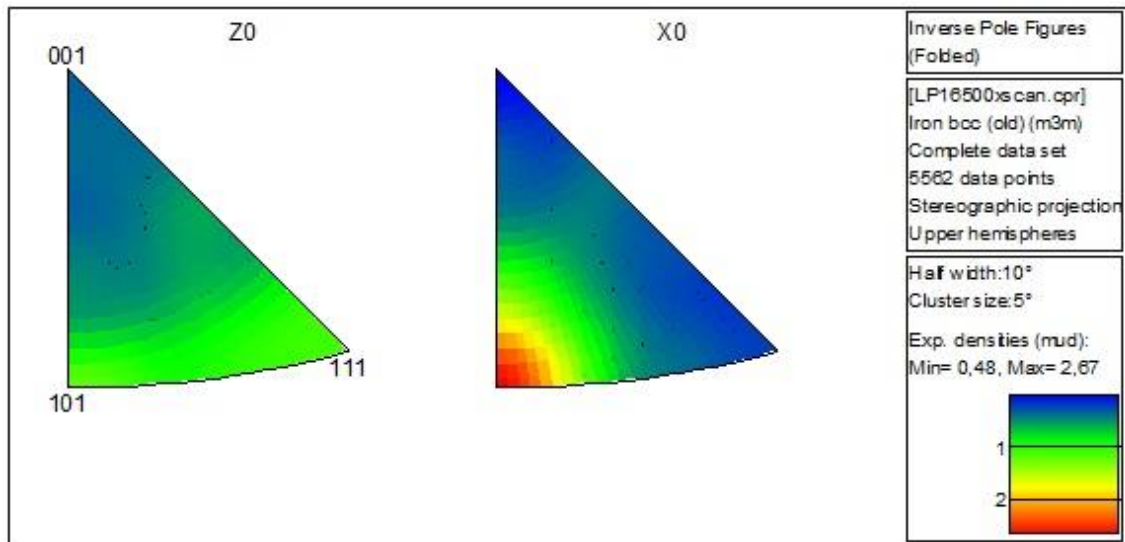
### 3.1.3 Textura Cristalográfica

As figuras 5 a 11 representam a evolução da textura cristalográfica em cada passe, tanto da laminação como na trefilação, lembrando que intensidade igual a 1 remete à ausência de textura. Inicialmente, tinha-se ausência de textura no eixo z ou vertical e com intensidade de 1,93 no eixo x ou horizontal caracterizado pelo plano (112).

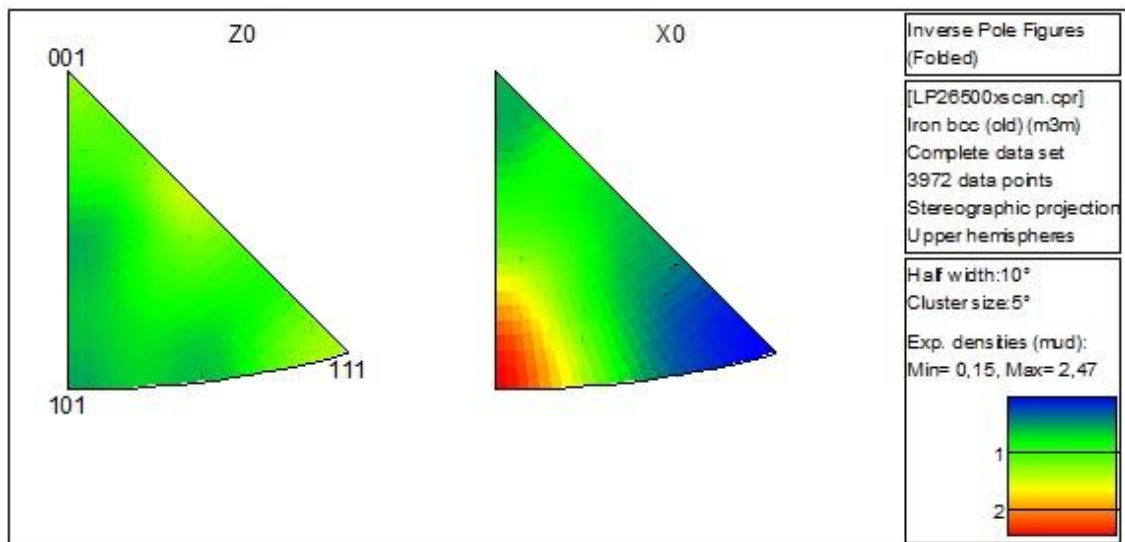


**Figura 5.** Textura cristalográfica do aço ABNT 1013 fio máquina com dimensão de 5,50 mm.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

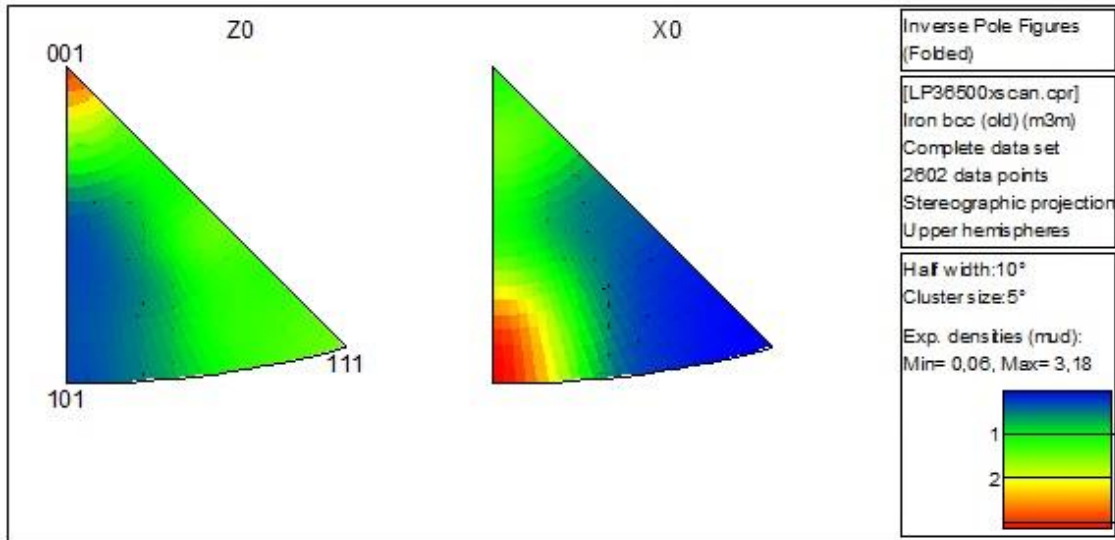
Nas figuras 6 a 8, analisando primeiramente a evolução da textura na laminação, é possível observar no primeiro passe a mudança no eixo x para o plano (101) e uma intensidade de 2,67, assim como um gradiente mais uniforme no eixo z. No segundo passe houve uma queda de intensidade para 2,47 e um pequeno aumento no eixo z. No produto final há uma intensidade de 3,18 no eixo horizontal e formação da textura no eixo vertical, caracterizado pelo plano (001).



**Figura 6.** Textura cristalográfica do aço ABNT 1013 após 1º passe da laminação. Fonte: Elaborada pelo autor.

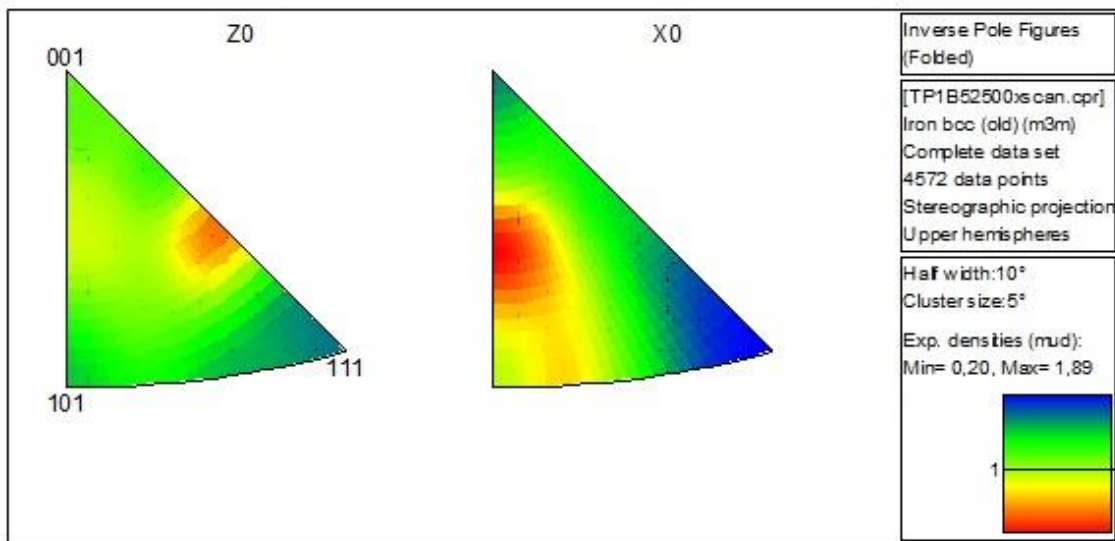


**Figura 7.** Textura cristalográfica do aço ABNT 1013 após 2º passe da laminação. Fonte: Elaborada pelo autor.



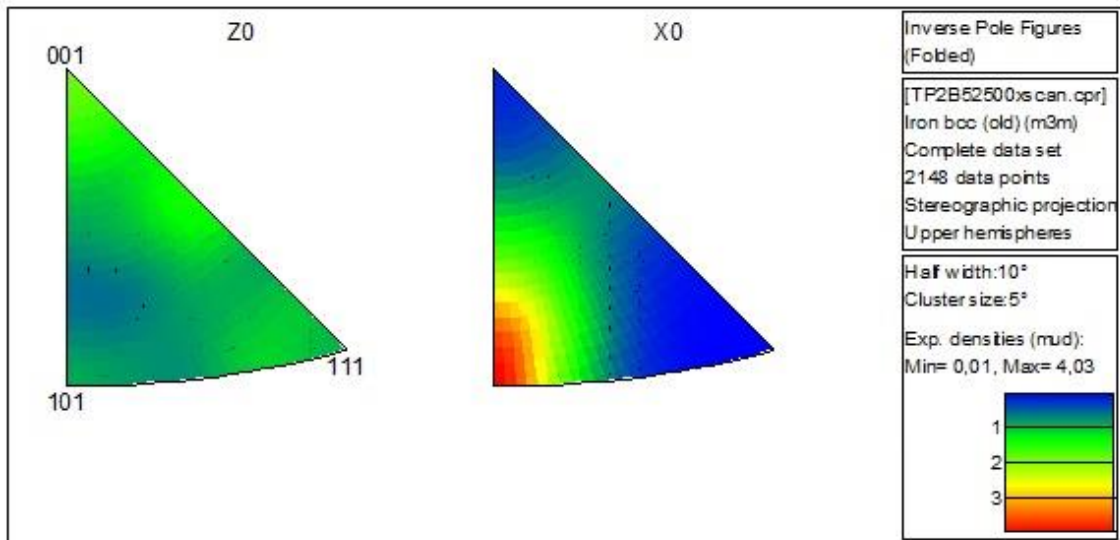
**Figura 8.** Textura cristalográfica do aço ABNT 1013 após 3º passe da laminação. Fonte: Elaborada pelo autor.

Utilizando o mesmo fio de 5,50 mm para a trefilação, foi visto que houve uma forte reorientação tanto nos eixos horizontais como nos verticais logo no primeiro passe, de forma que inicialmente tinha-se uma textura no plano (102) com nível de 1,89 e em seguida já se obteve um gradiente uniforme e uma orientação na região do plano (112) de intensidade 1,60. No segundo passe há uma ausência de orientação preferencial no eixo z, assim como uma alta intensidade de 4,03 no eixo x no plano (101). Já no produto final, uma intensidade de 3,0 na horizontal em (101) e de 3,62 no eixo vertical no plano (001). As figuras 9 a 11 apresentam o cenário citado.

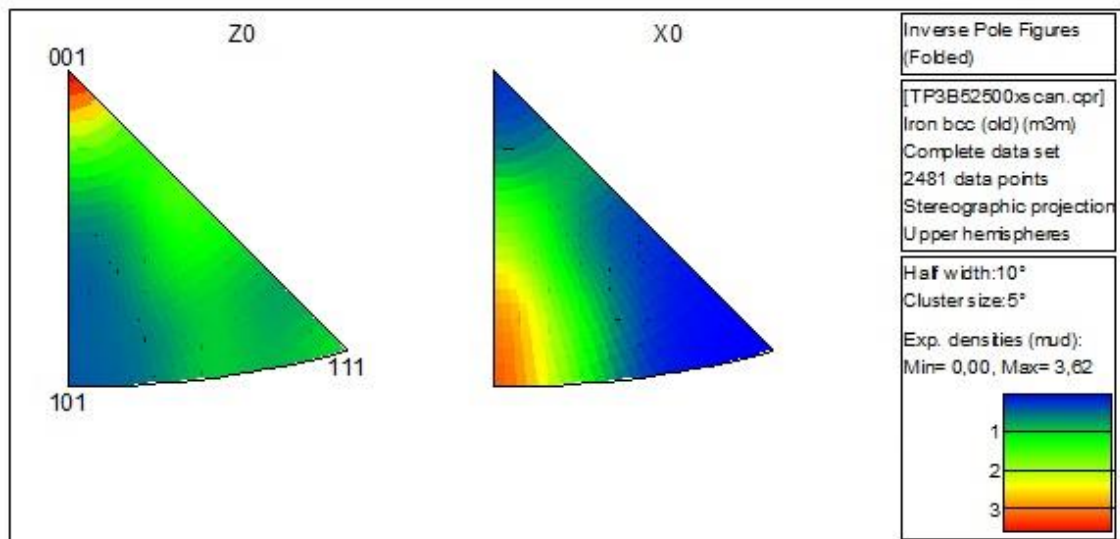


**Figura 9.** Textura cristalográfica do aço ABNT 1013 após 1º passe da trefilação. Fonte: Elaborada pelo autor.





**Figura 10.** Textura cristalográfica do aço ABNT 1013 após 2º passe da trefilação. Fonte: Elaborada pelo autor.



**Figura 11.** Textura cristalográfica do aço ABNT 1013 após 3º passe da trefilação. Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante salientar que, analisando os resultados dos produtos finais de trefilação e laminação, é possível perceber que na trefilação, a textura possui intensidade maior no eixo z, perpendicular ao ensaio de tração, enquanto que na laminação, a região de maior nível é no eixo x, paralelo à superfície do material.

Este fato pode explicar os maiores valores encontrados de limite de escoamento e resistência para laminação em vez da trefilação, devido à orientação preferencial em intensidades diferentes.

#### 4 Conclusão

Ao analisar a microestrutura no material laminado e trefilado, foi visível o alongamento dos grãos nas superfícies longitudinal e transversal. Assim, por definição, pôde-se constatar que houve encruamento. A tabela 2 com os respectivos aumentos de limite de resistência e de escoamento, obtidas após o ensaio de tração, também ajudaram a confirmar o encruamento do material. Ademais, pôde-se

visualizar que o aço laminado adquiriu maior resistência se comparado ao aço trefilado.

No que tange à orientação cristalográfica, os dois métodos apresentaram uma evolução semelhante, de forma que a textura se fez presente nos mesmos planos. O que diferiu na laminação e trefilação foram as intensidades, pois a laminação apresentou maior intensidade no eixo x e a trefilação no eixo z. Esse fato possibilita relacionar o porquê de no ensaio de tração a laminação possuir um maior limite de resistência, visto que ele ocorre ao longo do eixo do corpo de prova, o qual corresponde ao eixo x.

### **Agradecimentos**

Agradecemos ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) por disponibilizarem os microscópios ópticos e infraestrutura para a realização dos ensaios. Ao Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS) pelos equipamentos disponibilizados.

### **Referências**

- 1 ABNT NBR 6892. Materiais metálicos. Ensaio de tração à temperatura ambiente. **ABNT NBR 6892**, 2002.
- 2 ABNT NBR 7480. Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado. **ABNT NBR 7480**, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007.
- 3 BRESCIANI, E. et al. **Conformação Plástica dos Metais**. 6ª. ed. Campinas: Unicamp, 2011.
- 4 CALLISTER JR, W. D.; RETHWISH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- 5 DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. 3ª. ed. Singapore: McGraw-Hill Book, 1988.
- 6 HISSANAGA, B. M. M. D. S. **VARIÁVEIS DO PROCESSO TERMOMECÂNICO QUE INFLUENCIAM NA RELAÇÃO ELÁSTICA DO VERGALHÃO CA-60**. IME. Rio de Janeiro. 2013.
- 7 PADILHA, A. F.; SICILIANO JR., F. **Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura**. 3ª. ed. São Paulo: ABM, 2005.