



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

PATRICK LUAN MELO BARBOSA

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS EFEITOS DOS PASSES DE TREFILAÇÃO
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E TEXTURA DO AÇO SAE 1008
TREFILADO**

FORTALEZA

2018

PATRICK LUAN MELO BARBOSA

ANÁLISE COMPARATIVA DOS EFEITOS DOS PASSES DE TREFILAÇÃO
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E TEXTURA DO AÇO SAE 1008
TREFILADO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B211a Barbosa, Patrick Luan Melo.

Análise comparativa dos efeitos dos passes de trefilação nas propriedades mecânicas e textura do aço SAE 1008 trefilado : análise de propriedade de materiais trefilados / Patrick Luan Melo Barbosa. – 2018.
43 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu.

Coorientação: Prof. Dr. Luis Flavio Gaspar.

1. Aço trefilado. 2. Trefilação. 3. Propriedade de trefilados. 4. Universidade Federal do Ceará. 5. Engenharia Metalúrgica - UFC. I. Título.

CDD 669

PATRICK LUAN MELO BARBOSA

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS EFEITOS DOS PASSES DE TREFILAÇÃO
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E TEXTURA DO AÇO SAE 1008
TREFILAÇÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel.

Aprovada __/__/____

Orientador: Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu
(Orientador).
Universidade Federal do Ceará

Eng^o. Msc. João Rodrigues de Barros Neto
Universidade Federal do Ceará

Eng^o. Dr. Luis Flávio Gaspar Herculano
Universidade Federal do Ceará

Fortaleza – CE
2018

A Deus;

Aos meus pais;

Ao meu irmão, que sempre me apoiou a construir minha carreira.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me deu o dom da vida e condições de sabedoria para alcançar o que eu almejei.

Aos meus pais Heliania Melo Barbosa e Luiz Carlos Barbosa, a quem devo toda minha educação, base familiar, carinho e formação de caráter.

Ao meu irmão Luiz Carlos Júnior, por todo o apoio, amizade, confiança e conselhos nos momentos de principal decisão da minha caminhada.

À minha melhor amiga e companheira Aline Dias Meneses, pela paciência, compreensão, apoio e conselhos que me motivaram a concluir meus objetivos.

Ao Professor e Orientador Dr. Hamilton Ferreira de Abreu, por proporcionar meu crescimento no estudo técnico, amizade e orientação ao presente trabalho.

À amiga e professora Dra. Sônia Maria Araújo Castelo Branco, por todo apoio, conselhos e divisão de experiências com objetivo de ajudar e crescer ao máximo nossa mentalidade profissional. Obrigado!

Ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará, por ceder todo equipamento necessário para a conclusão do presente trabalho.

Ao bolsista e colega de trabalho, João Vitor, a quem me auxiliou na obtenção dos resultados do presente trabalho.

Aos meus amigos Aldenor Pinheiro, Wesley Nascimento, Dário Arrais, Breno Bessa, Hugo Diógenes, Renardir Maciel, Nívea Rodrigues, Carlos Castro, Andrey Gomes, Caio Ítalo, Daniel Melo, Fábio Moura, Léo Néry, Júlio César, Marcelo Gonçalves, Paulo Serpa, pelo companheirismo e amizade, que, com certeza, tornou esse caminho mais fácil e divertido de ser trilhado. Também, aos meus amigos de infância Bruno Rosendo, Lucas Florentino e Diego Queiroz por todas as divisões de experiência e auxílio nas dificuldades durante essa trajetória.

“O começo da sabedoria é encontrado na dúvida; duvidando começamos a questionar, e procurando podemos achar a verdade”.

Pierre Abelard

RESUMO

A produção de vergalhões e arames industriais para a construção civil pode ser realizado por diversos processos de conformação mecânica, seja à quente ou à frio. Entretanto, hoje o mercado industrial exige máxima eficiência dos seus processos com objetivo de gerar produtos com o maior índice de qualidade e com menor custo. Logo, o processo de trefilação realizado a frio, vem sendo uma linha de produção muito escolhida, devido seu alto desempenho e estabilidade para obtenção de vergalhões CA-60 e produtos trefilados. Os vergalhões são produzidos de acordo com requisitos de qualidade e propriedades que devem atender as regulamentações normativas nacionais e internacionais. Para atender esses requisitos, são necessários estudos de melhoria e estabilidade dos processos, conhecimento das propriedades mecânicas, químicas e metalúrgicas dos aços utilizados como matéria-prima. O presente trabalho utilizou as técnicas de microscopia óptica para verificação da microestrutura dos produtos trefilados, após os passes de trefilação. Utilizou a técnica de medição de microdureza para entendimento do comportamento mecânico das amostras trefiladas, nos passes do processo e técnicas de análise de textura para verificação de orientação do aço já conformado.

Palavra-chave: Trefilação à frio, barras de aço, CA-60, textura, microdureza, trefilados, microestrutura, ferrita.

ABSTRACT

The production of rebar and industrial wires to be made available for civil construction can be carried out by various processes of mechanical conformation, either hot or cold. However, today the industrial market demands maximum efficiency of its processes with the objective of generating products with the highest quality index and with lower cost. Therefore, the cold drawing process has been a very chosen production line, due to its high performance and stability to obtain CA-60 rebar and drawn products. Rebar is produced in accordance with quality requirements and properties that must meet national and international regulatory standards. To meet these requirements, studies of process improvement and stability, and knowledge of the mechanical, chemical and metallurgical properties of steels used as raw material for these products are required. The present work uses the techniques of optical microscopy to select the microstructure of the drawn products after the drawing pass. It used the microhardness measurement technique to understand the mechanical behavior of drawn samples, in the process passes and texture analysis techniques to verify orientation of the steel already formed.

Keyword: Cold drawing, steel bars, CA-60, texture, microhardness, drawing, microstructure, ferrite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquemática da passagem do fio-máquina pela fieira e os esforços atuantes	16
Figura 2 - Layout de linha trefilação industrial	17
Figura 3 - Desenho esquemático de corte da seção transversal de barra/fio trefilado	18
Figura 4 - Variação das propriedades com relação ao material trefilado a frio Adaptada [2]	19
Figura 5 - Distribuição dos cristais de forma (a) aleatória (sem textura) e (b) preferencial (com textura).....	21
Figura 6 - Formas de orientação na superfície de chapas com e sem textura .	21
Figura 7 - Ilustração esquemática de textura de chapa em uma chapa (a) e da textura de fibra em um arame (b).....	23
Figura 8 - Configuração da técnica de difração de raios-X	25
Figura 9 - Croqui de representação de região da obtenção das amostras e face utilizada para análise nos ensaios.	29
Figura 10 - Organograma das atividades realizadas	29
Figura 11 - Micrografia das amostras a), b), c), d) e e), obtida com microscópio óptico com 200x de aumento	31
Figura 12 - Microdureza realizada da borda ao centro - amostra a)	33
Figura 13 - Microdureza realizada da borda ao centro - amostra b)	34
Figura 14 - Microdureza realizada da borda ao centro - amostra c)	34
Figura 15 - Microdureza realizada da borda ao centro - amostra d)	35
Figura 16 - Microdureza realizada da borda ao centro - amostra e)	35
Figura 17 – Figuras de polo direta da amostra a) (sem trefilação)	37
Figura 18 – Figuras de polo direta da amostra c) (segundo passe)	37
Figura 19 – Figuras de polo direta da amostra e) (terceiro passe).....	38
Figura 20 – ODF das amostras a) respectivamente, de trefilação representando a comparação entre os materiais.....	38
Figura 21 – ODF das amostras c) respectivamente, de trefilação representando a comparação entre os materiais.....	39
Figura 22 – ODF das amostras e) respectivamente, de trefilação representando a comparação entre os materiais.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados comparativos entre barras de aço da série SAE 10XX laminadas a quente com barras trefiladas à frio Adaptada	20
Tabela 2 – Identificação e descrição das amostras utilizadas para obtenção dos resultados de micrografia, microdureza e análise de textura	26
Tabela 3 – Resultados de propriedades mecânicas fornecida pelo fabricante do material através de certificado de qualidade	26
Tabela 4 – Resultados de composição química fornecida pelo fabricante do material através de certificado de qualidade	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MPa: Mega Pascal

kgf: Kilograma força

LE: Limite de Escoamento

LR: Limite de Resistência à Tração

mm: Milímetros

DRX: Difração de raios-X

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR: Norma Brasileira

LACAM: Laboratório de Caracterização de Materiais

CCC: Corpo de Corpo Centrado

CA-60: Concreto Armado 60 kgf/mm²

HV: Hardness Vickers

SAE: Society of Automotive Engineers

s: Segundos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Descrição do Problema	14
1.2 Motivação	14
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivos Gerais	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Trefilação	16
3.1.1 Deformação Trefilação à Frio.....	18
3.1.2 Propriedades Mecânicas na Trefilação	19
3.2 Textura	20
3.2.1 Textura de Fibra e Textura de Chapa.....	22
3.2.2 Figuras de Polo e Difração de Raios-X	24
3.2.3 Função de Distribuição de Orientações Cristalinas (FDOC)	25
4. MATERIAIS E METODOS	26
4.1 Materiais	26
4.2 Equipamentos	27
4.3 Métodos e Procedimentos	28
4.4 Micrografia.....	29
4.5 Microdureza.....	29
4.6 Difração de Raios-X.....	29
4.7 Organograma	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1 Micrografias.....	32
5.2 Microdureza.....	34
5.3 Análise de Textura – Figuras de Pólo e FDOC'S	38
6. CONCLUSÃO	42
7. TRABALHOS FUTUROS	43
REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

1.1 Descrição do Problema

Considerando as estatísticas analisadas nos últimos anos, a indústria siderúrgica apresentou recessão quando se leva em conta o consumo de aço em escala mundial desde 2013. Este setor sofre as consequências da pior crise econômica e a desaceleração do crescimento do consumo de aço está inteiramente ligada a alta produção e geração de estoques da China, considerada benchmark global da produção de aço.

Contudo, o ano de 2018 apresenta expectativas positivas para o consumo de aço, espera-se um crescimento de até 7,5% do consumo de aço no Brasil. Para contornar os efeitos da crise e garantir as expectativas do mercado, é necessário fabricar produtos que atendam aos requisitos de qualidade presentes nas normas técnicas relativas ao CA-60. Os parâmetros que são requisitados pelas normas e órgãos regulamentadores podem ser analisados e estudados com o auxílio de laboratórios científicos.

Para o presente trabalho, foram utilizadas amostras oriundas de fio-máquinas de SAE 1008, com bitolas de 5,00 mm, 6,30 mm e 8,00 mm, produzidas pelo processo de trefilação à frio, com o objetivo de comparação das propriedades dos materiais em etapas diferentes do processo, a fim de obter o produto final que são barras e vergalhões CA-60 (SAE 1008).

1.2 Motivação

O processo de trefilação a frio é um processo estável e de fácil controle, quando comparado com outras formas de fabricação de barras e vergalhões. Sua complexidade é baixa, gerando um processo que une produtos de qualidade com baixo custo de produção, sendo uma opção rentável para o mercado siderúrgico. Portanto, o motivo deste trabalho é analisar as propriedades do material trefilado ao longo dos passes de trefilação.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Identificar e analisar as propriedades mecânicas, propriedades microestruturais e características de textura cristalográfica do aço SAE 1008 trefilado à frio, em diferentes bitolas.

2.2 Objetivos Específicos

Utilizar técnicas de caracterização microestrutural para a identificação e quantificação das fases do material antes e após serem conformados.

Determinar a textura cristalográfica das amostras com passe de trefilação e em seu estado natural de fornecimento de origem do Fio Máquina.

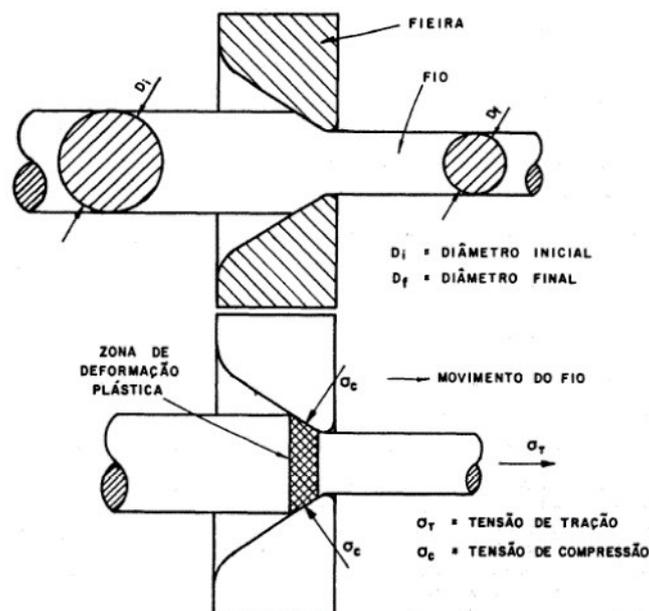
Analisar a diferença dos resultados de microdureza das amostras nos materiais antes e após serem conformados nos passes de trefilação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Trefilação

O processo de trefilação consiste em puxar o metal através de uma matriz por meio de uma força de tração a ele aplicada na saída da matriz. A maior parte do escoamento plástico é causada por esforços de compressão resultantes da reação do metal com a matriz. Consiste em submeter os rolos de fio-máquina a uma deformação à frio, através de um procedimento de estiramento do aço, como se refere a (NBR7480, 1996). Dessa forma os fios de aço são forçados a passar através de vários anéis ou fieiras, cujo diâmetro de entrada (em cada fieira) é maior que o diâmetro de saída. O resultado é uma deformação microestrutural, com alongamento dos grãos paralelamente ao esforço de tração. Geralmente os processos de trefilação são realizados à temperatura ambiente; todavia, uma vez que as deformações envolvidas são normalmente grandes, ocorre um aumento de temperatura durante a operação. É possível observar o processo de redução de bitola, através de uma fieira, conforme figura 1. [1,2,4]

Figura 1: Esquemática da passagem do fio-máquina pela fieira e os esforços atuantes



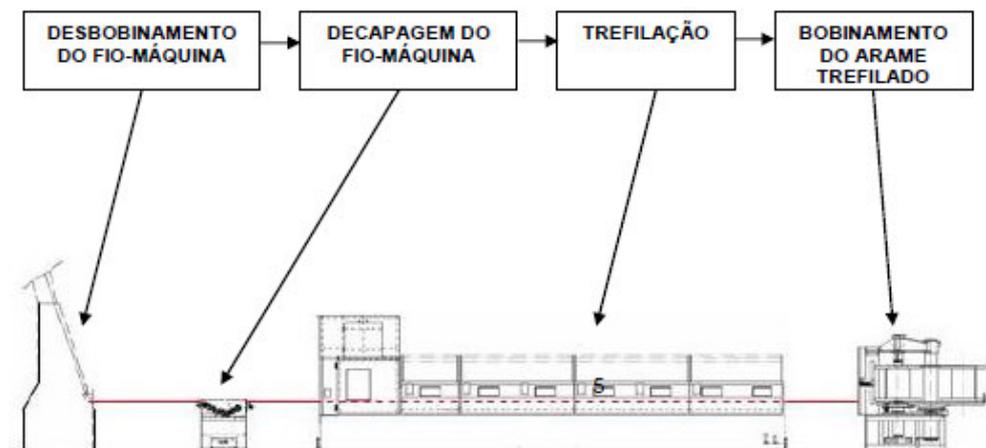
Fonte: Dieter, 2011

Para que seja realizada a fabricação de arames ou vergalhões de aço (CA-60), é possível utilizar o fio-máquina como matéria-prima, seu diâmetro é susceptível de variação em função da especificação exigida do produto final a ser fabricado. Essas especificações são limitadas pelos processos e máquinas que a indústria fabricante possui. As bitolas mais utilizadas de fio-máquina variam de 5,00 a 10,00 milímetros de diâmetro. [2,4]

O fio máquina, antes de ser trefilado, será decapado mecanicamente para retirada de carepa; antes de entrar no primeiro passe, ele passa por uma corda ou escova que visa remover o excedente de carepa. Cada máquina possui uma sequência de redução de área que é conhecida como passes de trefilação. Para cada passe, o material sofrerá uma redução de área, até que no último passe, lhe será conferido o diâmetro final. [2]

A capacidade de redução por passe depende de cada máquina/processo. Uma linha de produção por trefilação é observada na figura 2. [2,3]

Figura 2: *Layout* de linha trefilação industrial



Fonte: Gerdau Aços Longos, 2007

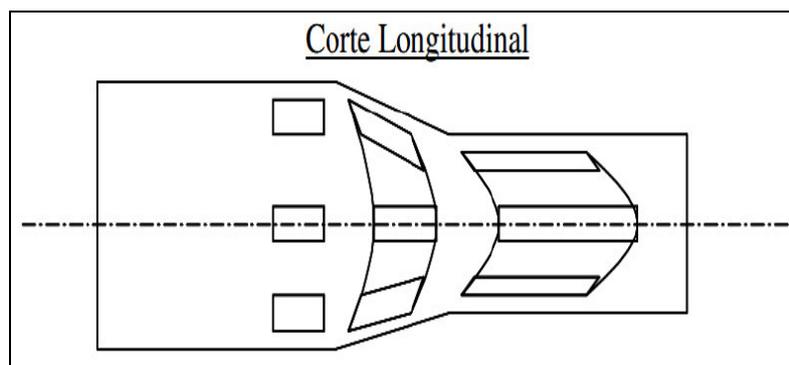
3.1.1 Deformação Trefilação à Frio

Quando se compara a geometria de um elemento próxima a superfície de fio trefilado antes de sua entrada na zona de deformação e após sua passagem pela fieira, é possível observar que o elemento passar por estiramento (alongamento) e cisalhamento. À medida que se observa na superfície do fio trefilado para o seu centro, o efeito de cisalhamento torna-se menor, enquanto o estiramento se mantém, caracterizando uma heterogeneidade da deformação ao longo da seção transversal do fio. [2]

A deformação responsável pelo estiramento do fio, é denominada deformação homogênea, enquanto a deformação que causa o cisalhamento é denominada redundante. O cisalhamento em nada contribui para as mudanças dimensionais do fio trefilado, apenas distorcendo o elemento. [2]

A deformação sofrida em um fio trefilado pode ser observada e interpretada através da análise da figura 3. [2]

Figura 3: Desenho esquemático de corte da seção transversal de barra/fio trefilado



Fonte: Silva, 2011

3.1.2 Propriedades Mecânicas na Trefilação

As propriedades mecânicas do arame aumentam no processo de trefilação, conforme aumenta o encruamento causado pela redução de área nos sucessivos passes (trabalho a frio). No entanto, o alongamento e a estricção diminuem, conforme pode ser visto na figura 4. [2]

Figura 4 – Variação das propriedades com relação ao material trefilado a frio Adaptada [2]



Fonte: Silva, 2011

Para ser calculada a redução de área por passe no processo de trefilação, lembrando que não há variação de volume envolvida, a fórmula mais usada é a verificada na Equação 1: [2]

$$r = 1 - \left(\frac{d}{d_0}\right)^2$$

Equação 1

Onde r é a redução de área, d_0 é o diâmetro inicial e d é o diâmetro final. O processo de trefilação aumenta o limite de escoamento em torno de 40% e a resistência à tração ao menos em 10%. [2]

Esse aumento de resistência acarreta em perda de ductilidade, geração de tensões residuais e distorção interna. [2]

É possível a exemplificação, através da Tabela 1 abaixo, que demonstra uma série de dados para barras/ fios de aço trefilados a frio.

Tabela 1: Dados comparativos entre barras de aço da série SAE 10XX laminadas a quente com barras trefiladas à frio Adaptada [4]

Aço	Diâmetro (mm)	Condição	σ_{ys} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	Along (LO=50mm)	Redução de área(%)	Dureza (HB)
1006	19 a 32	Laminado a quente	170	305	30	55	86
		Trefilado a frio	285	340	20	45	95
1015	19 a 32	Laminado a quente	190	345	28	50	101
		Trefilado a frio	325	385	18	40	111
1025	19 a 32	Laminado a quente	220	400	25	50	116
		Trefilado a frio	370	440	15	40	126
1030	19 a 32	Laminado a quente	260	470	20	42	137
		Trefilado a frio	440	525	12	35	149

Fonte: Silva, 2011

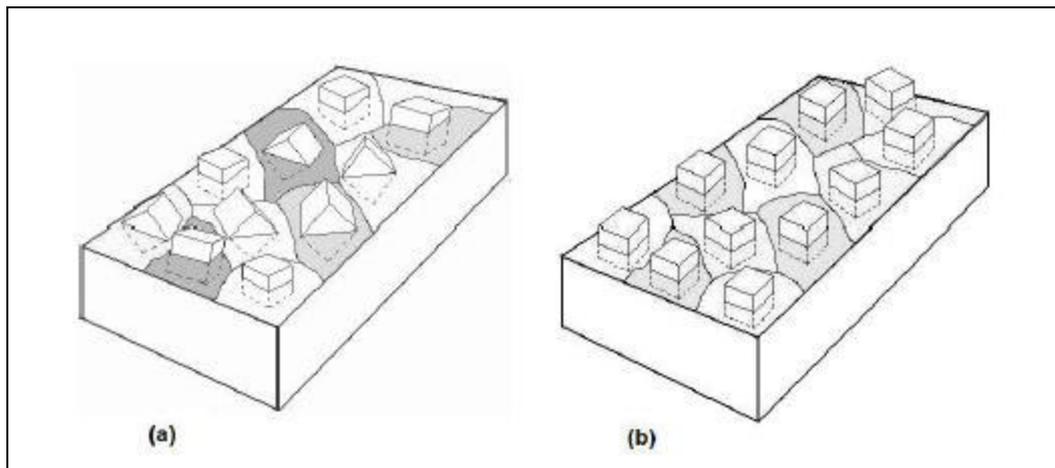
3.2 Textura

A forma de distribuição das orientações dos cristais constituintes de um material metálico, em particular do aço, é denominada textura. Considera-se um metal com ausência de textura quando a distribuição das orientações dos cristais no agregado policristalino é totalmente aleatória. Algumas diferentes etapas de processamento dos metais como solidificação, deformação plástica e recristalização, realizam uma formação de uma distribuição de orientação preferencial, onde determinados eixos cristalográficos posicionam-se de forma geométrica definida em relação às direções macroscópicas do corpo metálico. [6]

A presença de textura num agregado policristalino confere propriedades físicas e propriedades mecânicas, diferentes para as diversas direções microscópicas e macroscópicas do metal, ou seja, conduz o material metálico a um comportamento anisotrópico. [6]

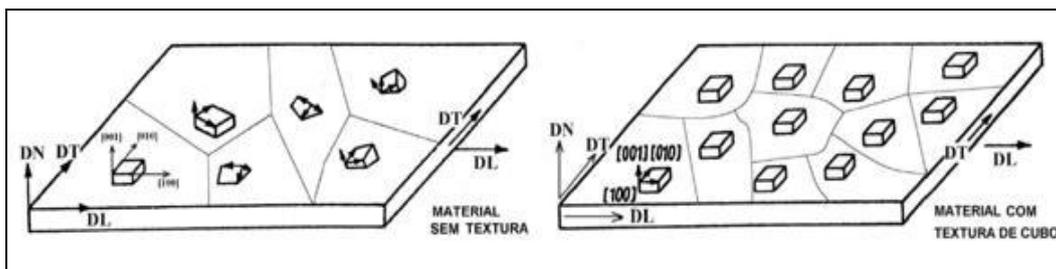
Assim a textura pode ser genericamente definida como uma condição na qual a distribuição das orientações dos grãos de um material policristalino não é aleatória. Algumas vezes utiliza-se a expressão textura aleatória para dar a definição à ausência de orientação preferencial. A figura 5, mostra a distribuição que o agregado cristalino pode assumir. [7]

Figura 5 – Distribuição dos cristais de forma (a) aleatória (sem textura) e (b) preferencial (com textura).



Fonte: Freitas, 2011

Figura 6 – Formas de orientação na superfície de chapas com e sem textura.



Fonte: Lima, 2014

A textura cristalográfica, quando considerada em materiais metálicos, pode ser decorrente de vários fatores entre os mais importantes tem-se a textura resultante da deformação plástica e a textura resultante da recristalização do metal. A orientação preferencial pode ser introduzida no material por diversos modos, podendo ser eventual ou produzida intencionalmente. [7,9]

- Solidificação direcional (gradientes de temperatura durante a solidificação);
- Deformação plástica;
- Recristalização;
- Transformação de fase.

Os cristais ou grãos, de agregados policristalinos como os materiais metálicos se orientam com a deformação plástica de maneira que determinadas direções cristalográficas posicionam-se segundo as direções principais da estrutura cristalina do metal. Essa distribuição de orientação caracteriza a textura de deformação. [7]

Vale salientar de que a textura não se refere à forma dos grãos, mas sim à forma como a rede cristalina desses grãos são arranjadas. A presença ou ausência de textura não pode ser inferida a partir da forma dos grãos. Por exemplo, grãos alongados (não equiaxiais) não indicam necessariamente presença de textura cristalográfica. Um processo que introduz textura em um material pode ou não levar à existência de grãos alongados (não equiaxiais). [10]

3.2.1 Textura de Fibra e Textura de Chapa

Existem dois tipos principais de textura: a textura de fibra e a textura de chapa. [13]

Os grãos em um arame estão orientados de maneira tal que a mesma direção cristalográfica $[uwx]$ na maioria dos grãos está paralela ou quase paralela ao eixo do arame. Devido ao fato deste tipo de orientação preferencial ocorrer tanto em fibras naturais como em fibras artificiais, ela é denominada textura de fibra e eixo do arame e chamado de eixo de fibra. [13]

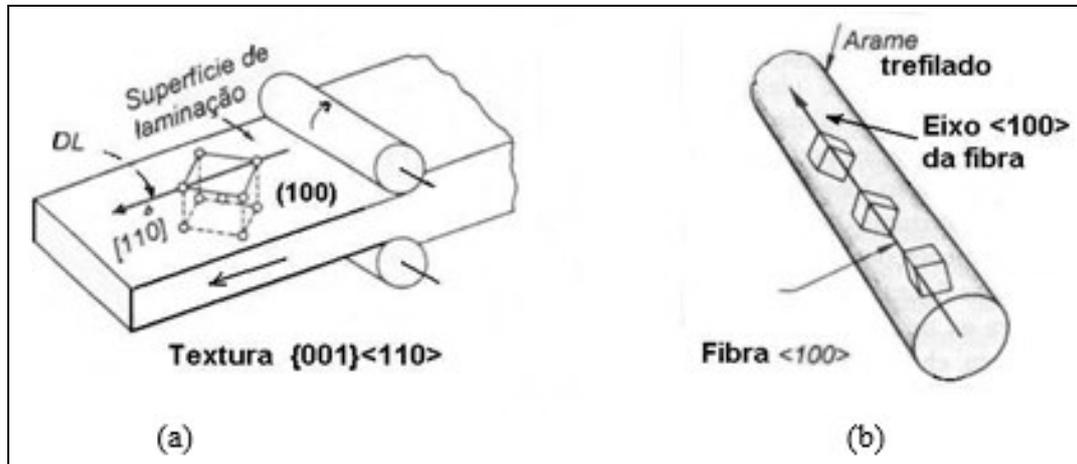
Materiais com textura de fibra apresentam simetria rotacional com relação à um eixo, de forma que todas as orientações cristalográficas com referência a este eixo são igualmente prováveis. [13]

A textura de fibra é esperada em materiais que foram conformados por processos em que as forças têm simetria rotacional com relação à um eixo, tais como fios ou barras conformadas por trefilação, forjamento ou extrusão. [13]

As texturas de fibra variam em grau de perfeição, isto é, no desvio da direção $[uwx]$ em relação ao eixo da fibra. [13]

Os metais e ligas com estrutura CCC geralmente apresentam textura de fibra $\langle 111 \rangle$. [13]

Figura 7 – Ilustração esquemática de textura de chapa em uma chapa (a) e da textura de fibra em um arame (b).



Fonte: Viana, 2005

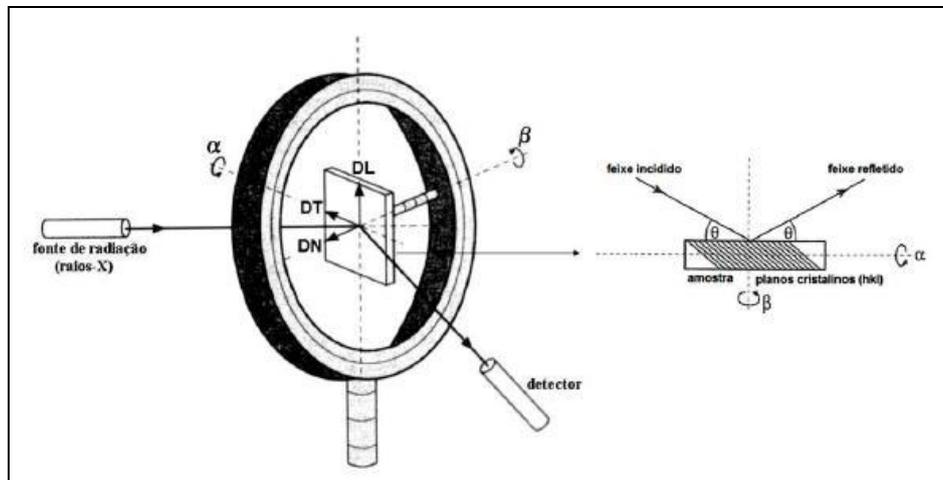
3.2.2 Figuras de Polo e Difração de Raios-X

Figura de polo é talvez o método mais comum de representação de textura. No registro de polos direta, registra-se a densidade dos polos de um plano $\{hkl\}$ específico sobre uma projeção estereográfica que tem como referência as direções dos eixos macroscópicos do material. É chamado de figura de polo direta devido ser em relação a normal do plano $\{hkl\}$ que varre o triedro formado pelos eixos associados a uma seção do material, realizando o registro da distribuição de sua densidade. A distribuição da densidade é normalizada pela densidade do mesmo plano $\{hkl\}$ de uma amostra sem textura. [9]

A descrição de textura com o auxílio de figuras de pólos diretas é bastante útil, porém as informações que estas contêm são incompletas ou semiquantitativas, já que apenas os planos $\{hkl\}$ difratados pelo material são representados. Uma descrição mais completa de textura deve incluir informação sobre a distribuição das orientações dos cristais dadas por um plano e uma direção: $\{hkl\} \langle uvw \rangle$, e a fração volumétrica de cada orientação presente. Este tipo de representação pode ser obtido com o auxílio da Função de Distribuição de Orientações Cristalinas (FDOC'S). [10]

Uma das técnicas experimentais que é utilizada de forma mais comum para determinação da FDOC é a difração de raios-X. O método consiste em obter figuras de polos, baseadas em projeções estereográficas, de acordo a configuração de um goniômetro. Um feixe de raios-X é incidido sobre a amostra e a parte da radiação refletida é coletada por um sistema de detecção que processa o sinal e fornece as figuras de polos que dão origem a FDOC. [7]

Figura 8 – Configuração da técnica de difração de raios-X. [9]



Fonte: Freitas, 2011

A técnica de difração de raios-X avalia a textura de maneira macro, leva em conta um volume considerável de cristais do material. [7]

3.2.3 Função de Distribuição de Orientações Cristalinas (FDOC)

A FDOC expressa a densidade de probabilidade de encontrar determinadas orientações (hkl) [utw] em uma amostra do material. Esta probabilidade, numa amostra sem textura, é igual à unidade. Uma intensidade 3 em uma orientação, diz que esta orientação é três vezes mais provável de estar presente na amostra do que a aleatoriedade. [9]

A orientação de um cristal, para este caso, é definida por três ângulos de Euler, os quais constituem três rotações consecutivas que, aplicadas aos eixos [100], [010] e [001] da célula cristalina do cristal, torna-os coincidentes com os eixos DL, DT e DN, respectivamente, quando considerado a amostra observada. [9]

4. MATERIAIS E METODOS

4.1 Materiais

O material utilizado em análise, foi um aço SAE 1008. Na tabela 2, encontram-se a descrição dos processos e as características das amostras utilizadas para a realização dos ensaios de micrografia, microdureza e análise de textura.

Tabela 2 – Identificação e descrição das amostras utilizadas para obtenção dos resultados de micrografia, microdureza e análise de textura

Amostras e Processos				
Figura	Máquina processada	Etapa do processo	Velocidade Máxima do Processo	Capacidade de Redução do processo (aproximado)
a)	Máquina - Trefila 02	Sem passe	4,97 m/s	15%
b)	Máquina - Trefila 02	2º passe	4,97 m/s	15%
c)	Máquina - Monobloco 03	2º passe	3,00 m/s	12%
d)	Máquina - Monobloco 03	3º passe	3,00 m/s	12%
e)	Máquina - Trefila 03	3º passe	3,68 m/s	25%

Fonte: Própria do autor

Todas as amostras são oriundas de fio máquina (bitolas de 8,00mm, 6,30mm e 5,00mm) com resultados de composição química e propriedades mecânicas de acordo com as tabelas e 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3: Resultados de composição química fornecida pela fabricante do material através de certificado de qualidade.

Composição Química (%peso)											
% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Cu	% Nb	% Sn	% N
0,090	0,120	0,470	0,011	0,015	0,040	0,010	0,040	0,110	0,002	0,010	0,003

Fonte: Própria do autor

Tabela 4: Resultados de propriedades mecânicas fornecido pelo fabricante do material através de certificado de qualidade.

Propriedades Mecânicas		
Limite de Resistência (Mpa)	Alongamento (%)	Ovalização (mm)
445,5	25,1	0,223

Fonte: Própria do autor

Foram utilizados, lixas e panos de polimento para execução de metalografia. Para a etapa de polimento foi utilizada Alumina (Al_2O_3) e Sílica (SiO_2); Para o ataque químico e revelação dos grãos e contornos de grão foram utilizados Nital 2% (2ml HNO_3 + 98ml Álcool Etilico) e Ácido Fluorídrico (HF) 5% (5ml HF + 95ml de água oxigenada H_2O_2).

4.2 Equipamentos

1. Torno Mecânico:

Utilizado para realizar corte preciso de amostras de no sentido da seção transversal do fio máquina;

2. Máquina de corte CMR-cut-off e disco de corte –

Utilizado para cortar o fio máquina em amostras menores para posterior embutimento;

3. Embutidora Arotec:

Máquina responsável por compactar baquelite de forma precisa para que seja realizada as análises no microscópio, difratometro e ensaio de microdureza;

4. Lixadeira e politriz Arotec:

Equipamentos utilizados para que se obtenção de uma superfície das amostras possíveis de analisar as fases presentes através do microscópio ótico.

5. Microscópio óptico Zeiss com software integrado AxioVision:

Utilizado para obtenção de imagens e identificação das fases e microconstituintes presentes nas amostras,

6. Microdurômetro Shimadzu HMV-2:

Utilizado para medição de perfil de dureza Vickers das amostras trabalhadas.

7. Difratômetro Philips X'Pert PW:

Equipamento utilizado para análise e obtenção de Figuras de polo das amostras.

4.3 Métodos e Procedimentos

Foram utilizadas 5 (cinco) amostras, sendo, primeiramente, torneadas para obtenção de seção transversal do fio máquina trefilado, cortadas utilizando a máquina *cut-off* e em seguida preparadas metalograficamente por embutimento em baquelite para que passassem pelo processo de lixamento, polimento, ataque químico, microscopia e análise dos resultados.

O processo de lixamento foi realizado com lixas d'água de diversas granulometrias, já o polimento foi realizado em alumina de 1 μ m e carbeto de silício (sílica).

Para o ataque químico, foi utilizado Nital 2% (2ml HNO₃ + 98ml Álcool Etílico), por imersão, com o objetivo de revelação dos contornos de grãos e grãos presente na microestrutura das amostras.

Posteriormente, foram cortadas mais 5 amostras, das mesmas bitolas, e foram lixadas até a granulometria de 400 mesh para o processo de difratometria. Em seguida, foram imersas em solução de HF 5% e 95% de H₂O₂ com o objetivo de retirar as tensões introduzidas durante o lixamento das amostras para análise em DRX.

4.4 Micrografia

As micrografias e as quantificações das superfícies das diversas fases presentes nas amostras, foram obtidas utilizando o microscópio óptico Zeiss, com auxílio do *software* AxioVision integrado, com aumentos até 200X e do *software* ImageJ.

4.5 Microdureza

A microdureza Vickers foi medida através do aparelho de microdurômetro Shimadzu, nas 5 (cinco) amostras disponíveis para o procedimento, sendo realizadas as medições da borda da amostra até seu centro, com carga de 1 kgf (9,81 N), por 10s.

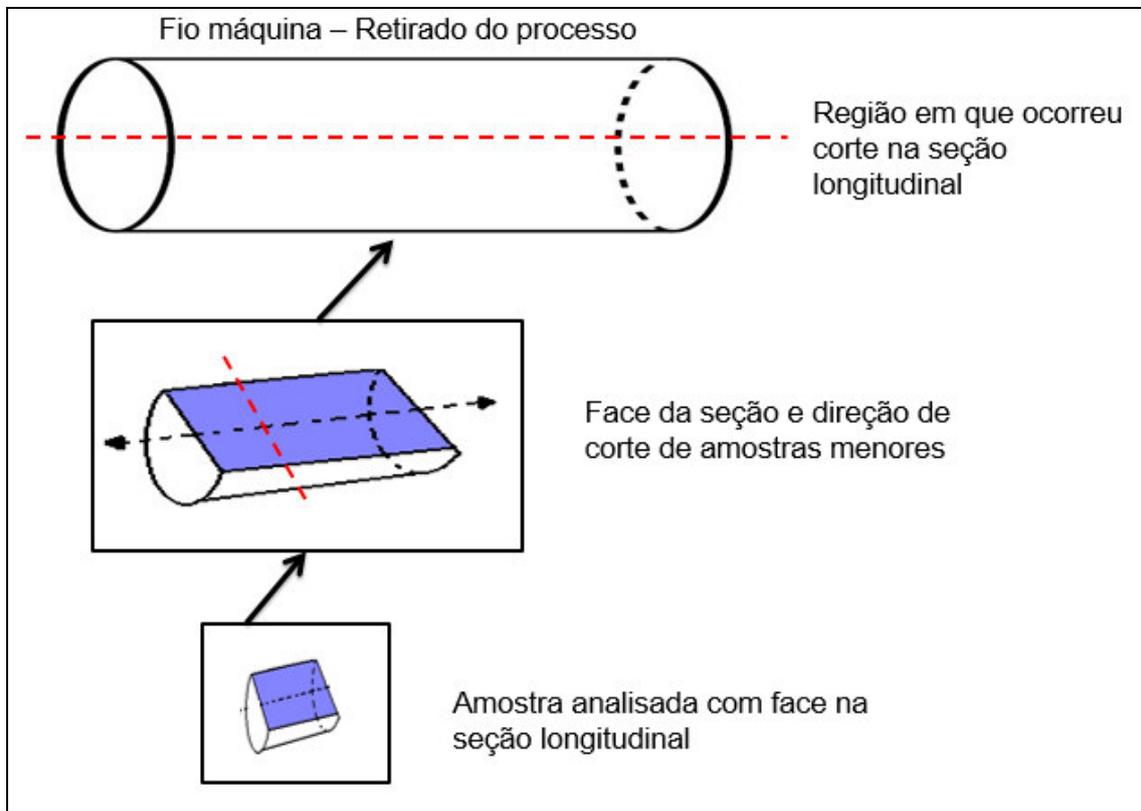
4.6 Difração de Raios-X

A difração de raios-X foi utilizada nas 5 (cinco) amostras para obtenção dos resultados de textura. Após o lixamento, as amostras foram analisadas em um difratômetro de raios-X da marca Philips X'Pert PW, com radiação de cobalto $K\alpha$ ($\lambda=1,7890 \text{ \AA}$).

Para todas as amostras, a face utilizada para análise de DRX foi a face da seção longitudinal das peças. As amostras ficaram na posição paralela ao feixe de elétrons do difratômetro.

As Figuras de polo analisadas no presente trabalho, foram as figuras de polo direta.

Figura 9 – Croqui de representação de região da obtenção das amostras e face utilizada para análise nos ensaios.

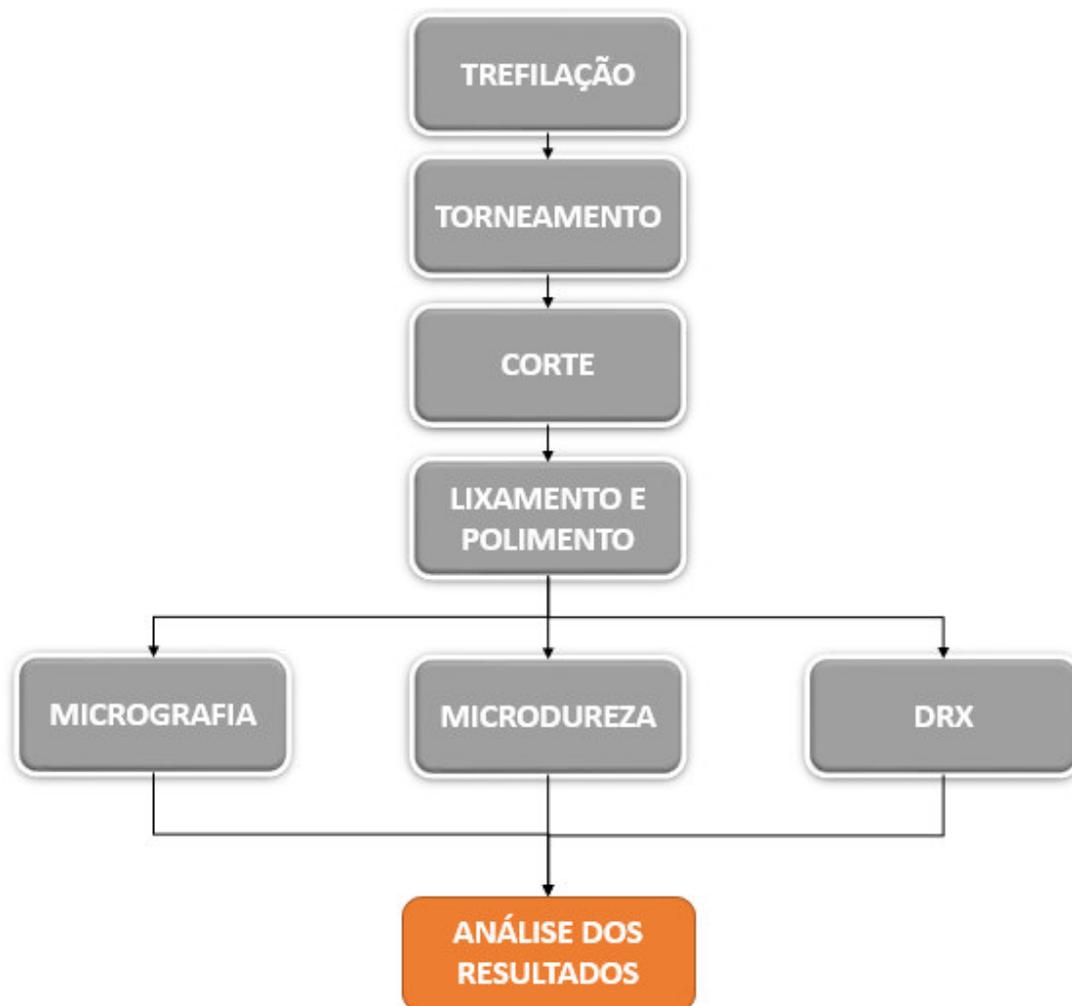


Fonte: Própria do autor

4.7 Organograma

A figura 10 apresenta o organograma de atividades que foram realizadas para obtenção dos resultados do trabalho em questão.

Figura 10 – Organograma das atividades realizadas.



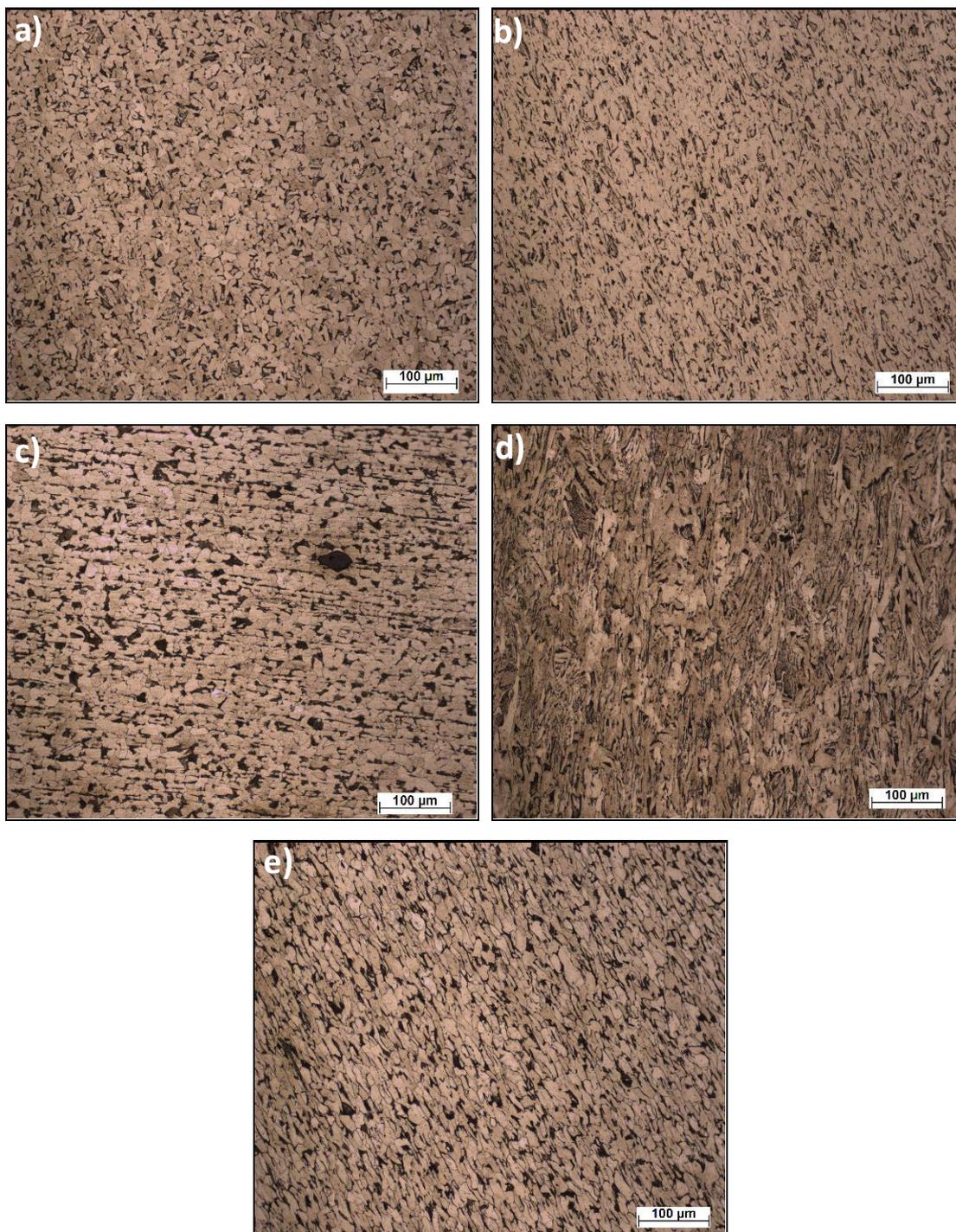
Fonte: Própria do autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Micrografias

Foram realizadas micrografias de todas as amostras. Na figura 11 observar-se a micrografia na região da borda das amostras *a*), *b*), *c*), *d*) e *e*).

Figura 11 - Micrografia das amostras *a*, *b*, *c*, *d* e *e*, obtida com microscópio óptico com 200x de aumento



Fonte: Própria do autor

As micrografias realizadas em todas as amostras, como se trata de material com baixo teor de carbono, apresentaram a predominância da fase ferrita com presença de colônias de perlita. Considerando as amostras ensaiadas, não houve diferença entre as microestruturas apresentadas. Para as amostras que foram susceptíveis a passes de trefilação, foram observados grãos alongados na direção em que ocorreu a conformação (passes de trefilação) devido a presença de encruamento no material.

As micrografias das amostras *b)* e *c)* mostram uma microestrutura pontiaguda com grãos de ferrita alongadas, com a direção em que houve a conformação e se encontra na condição de encruado. Foram amostras em que o passe de trefilação gerou uma redução de bitola de aproximadamente 15%. É evidenciado, de acordo com a literatura, de que se trata de uma morfologia característica da microestrutura perlítica na matriz ferrítica. [14]

A micrografia da amostra *d)*, observa-se a predominância de uma fase ferrítica mais alongadas do que as das amostras *b)* e *c)*. Isso ocorre, devido o material ter passado por 3 passes de trefilação, tendo uma redução de 20%, o que é evidenciado pelas lamelas mais finas e pequenas com direção preferencial na região de conformação plástica, em condição de encruado.

A micrografia da amostra *e)*, observa-se uma microestrutura pontiaguda com grãos de ferrita alongadas. O material sofreu redução de 24%, mostrando uma morfologia característica da microestrutura perlítica na matriz ferrítica em condição de encruado.

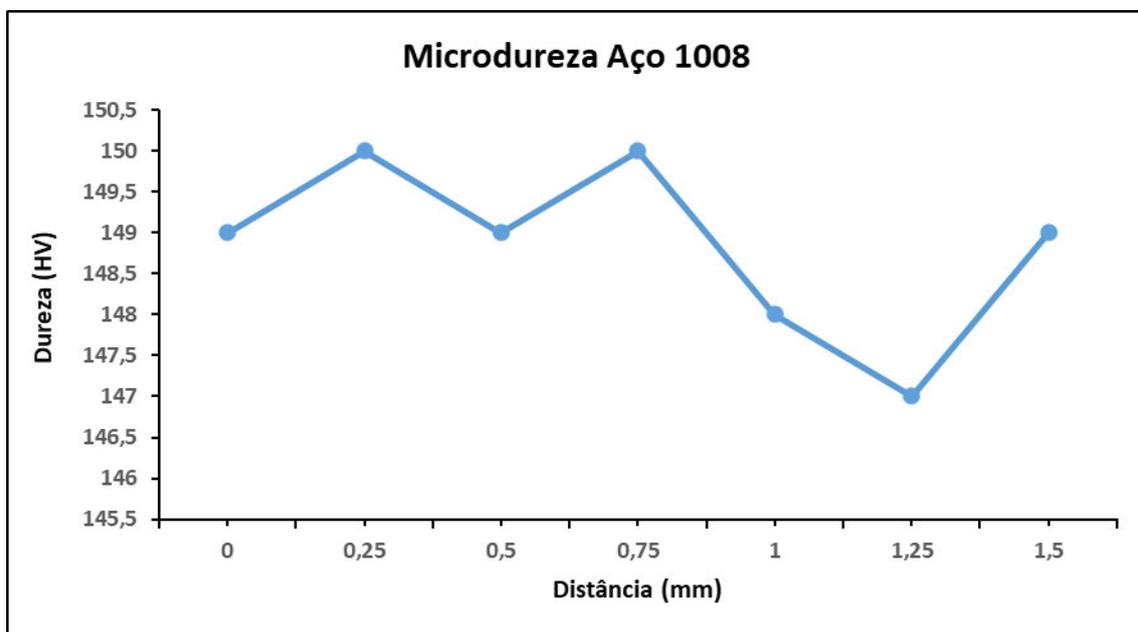
Para a micrografia da amostra *a)*, observa-se uma microestrutura com grãos granulares de perlita na matriz ferrítica. O material não sofreu conformação plástica, dessa forma não apresenta orientação dos grãos. Essa amostra é utilizada para compararmos as condições do material recebido sem processamento de conformação com relação as outras. A amostra *a)* é oriunda de aço utilizado como matéria-prima para o processo de trefilação na obtenção de vergalhões e arames industriais.

Em todas as amostras, observa-se uma variação pequena nas características microestruturais, sendo evidenciado as diferenças de conformação (redução) realizada.

5.2 Microdureza

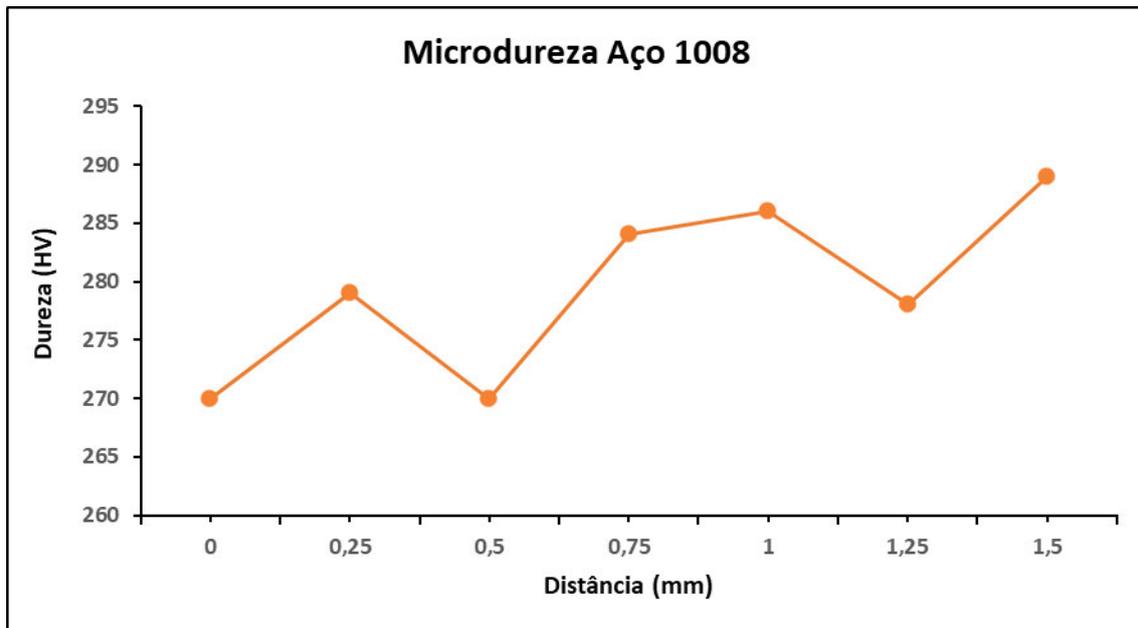
Para as figuras a seguir 12,13,14,15 e 16, encontram-se os gráficos com os resultados dos ensaios de microdureza realizadas nas 5 (cinco) amostras, através da metodologia ponto a ponto, tendo o início do ensaio na borda da amostra até o centro do material.

Figura 12 – Microdureza realizada da borda ao centro - amostra a)



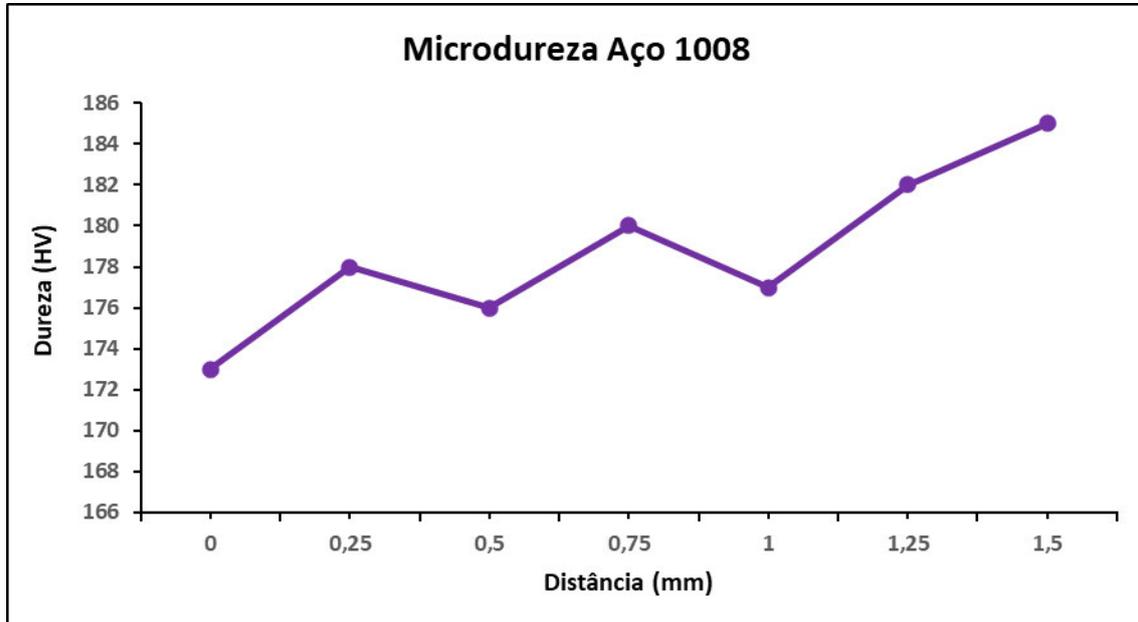
Fonte: Própria do autor

Figura 13 – Microdureza realizada da borda ao centro - amostra b)



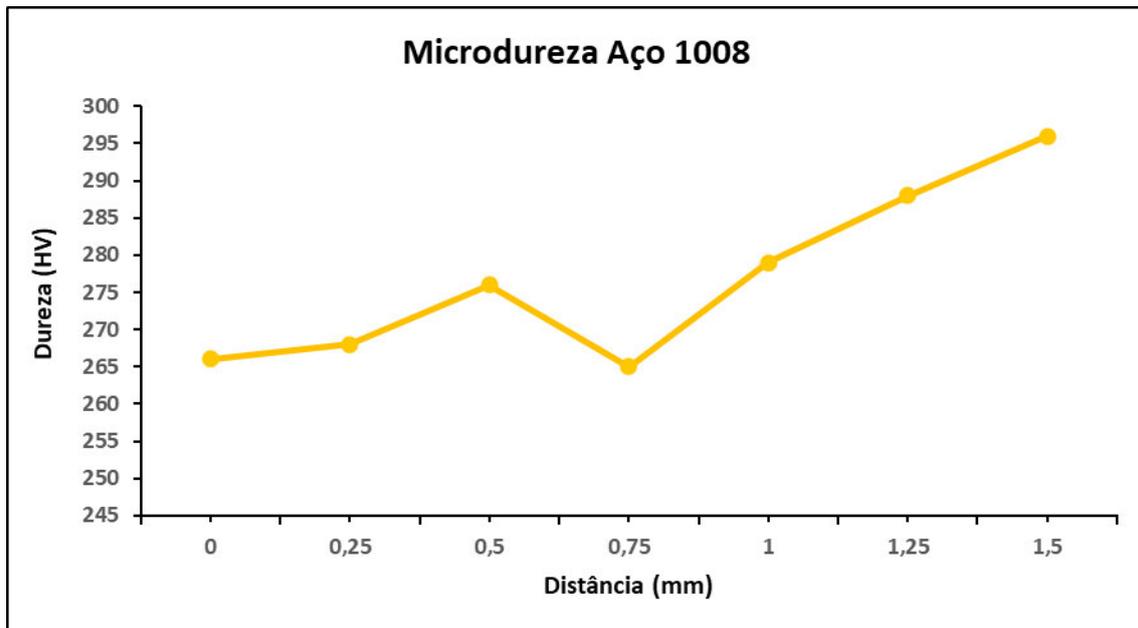
Fonte: Própria do autor

Figura 14 – Microdureza realizada da borda ao centro - amostra c)



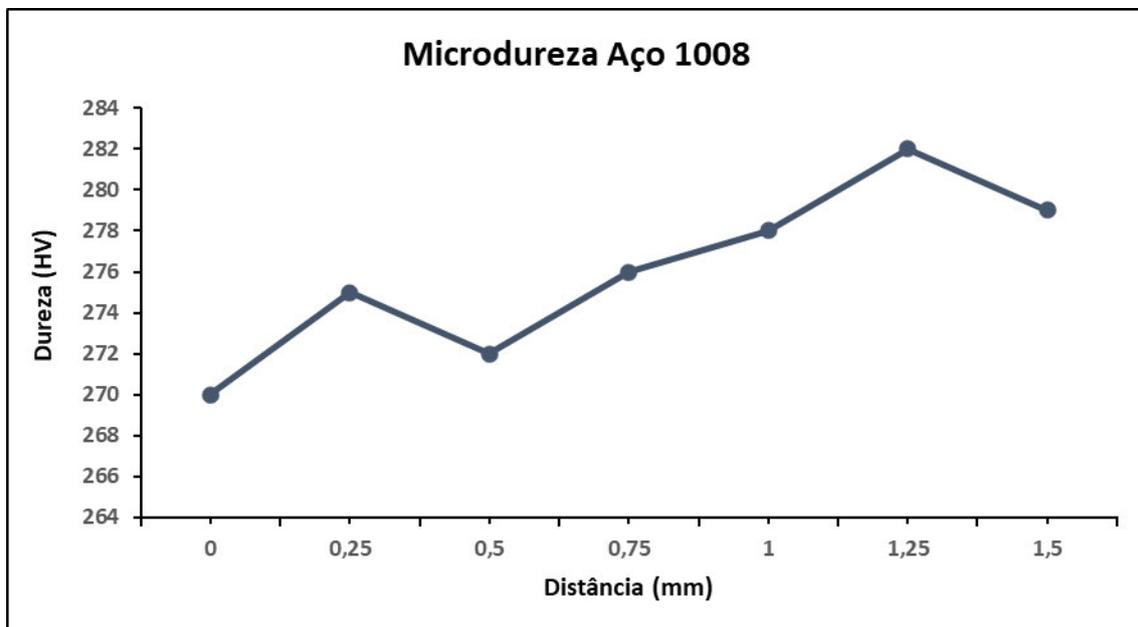
Fonte: Própria do autor

Figura 15 - Microdureza realizada da borda ao centro - amostra d)



Fonte: Própria do autor

Figura 16 – Microdureza realizada da borda ao centro - amostra e)



Fonte: Própria do autor

Para as amostras, é evidenciado de que a região de escoamento do material é descontínuo. Característica comum do aço de baixos teores de carbono, que foram utilizados para elaboração deste trabalho.

Na amostra *a)*, o resultado obtido para os valores de dureza são os menores de todas as amostras, isso ocorre devido o material não ter passado pelo processo de conformação e não estar em condição de encruado.

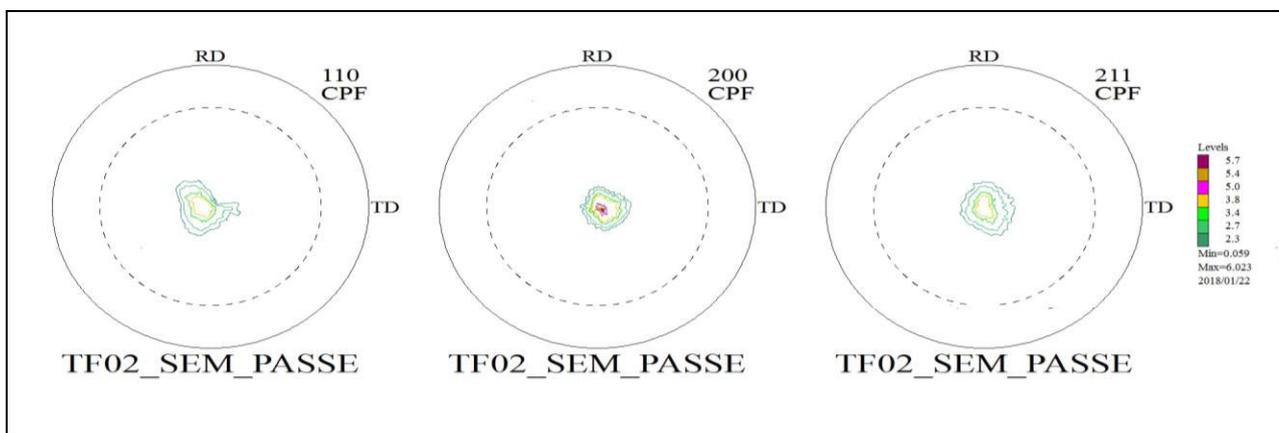
A amostra *b)* e *c)*, apresentou resultados de dureza elevadas quando comparada as outras amostras, isso ocorre devido o material apresentar-se em condição de encruado, o que gera aumento em sua dureza.

As camadas *d)* e *e)* possuem durezas praticamente iguais, se diferindo pouco. Isso ocorre em função de ambos os materiais terem passado pelo 3º passe de trefilação e o grau de encruamento serem semelhantes para ambos e mais elevado que as demais amostras.

5.3 Análise de Textura – Figuras de Pólo e FDOC'S

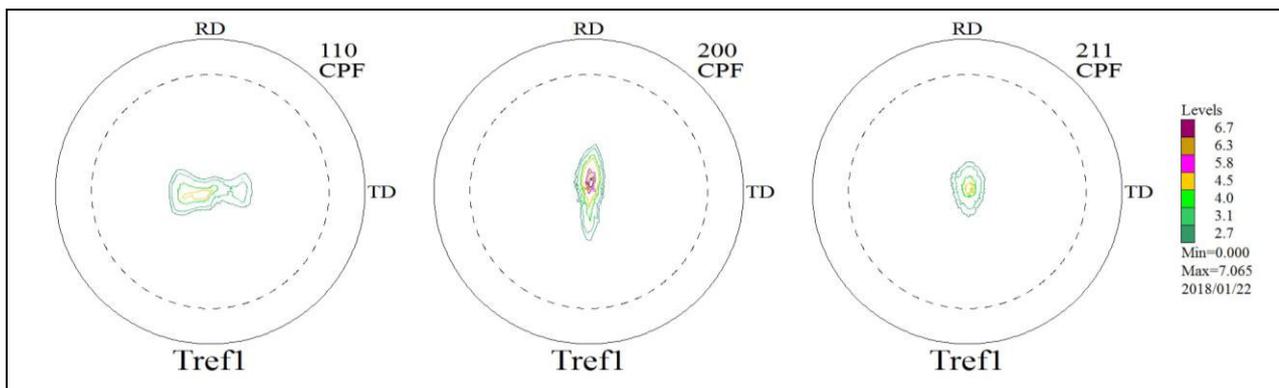
Para a figura 17, 18 e 19, encontram-se os resultados de análise de textura das amostras a), c) e e) que foram realizados através da técnica de Difração de raios-X, com objetivo de verificar as principais regiões de concentração de orientações cristalográficas, de acordo com os diferentes passos de trefilação.

Figura 17 – Figuras de polo direta da amostra a) (sem trefilação)



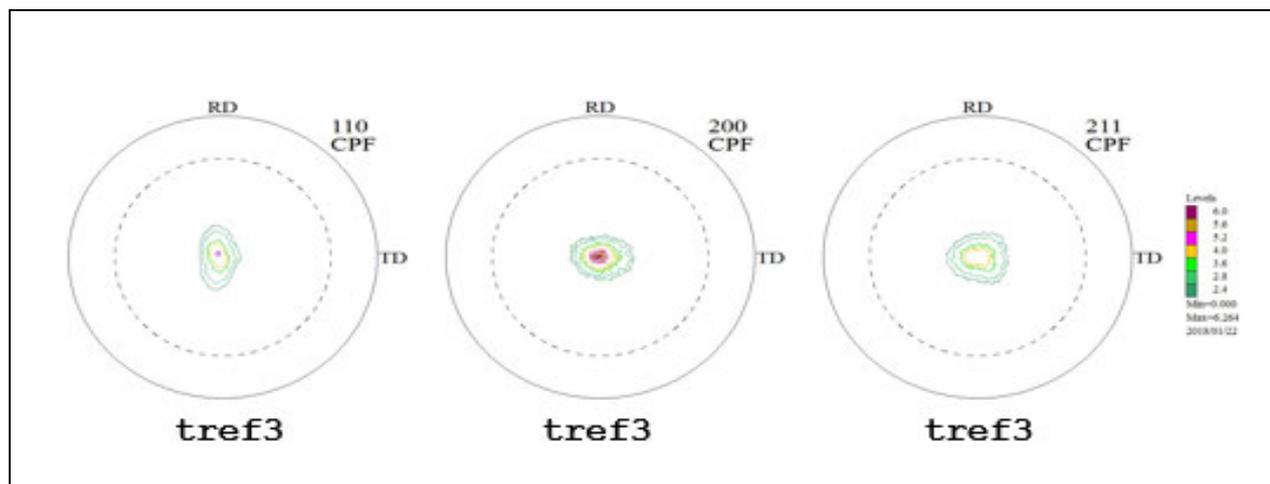
Fonte: Própria do autor

Figura 18 – Figuras de polo direta da amostra c) (segundo passe)



Fonte: Própria do autor

Figura 19 – Figuras de polo direta da amostra e) (terceiro passe)



Fonte: Própria do autor

Figura 20 – ODF das amostras a) respectivamente, de trefilação representando a comparação entre os materiais.

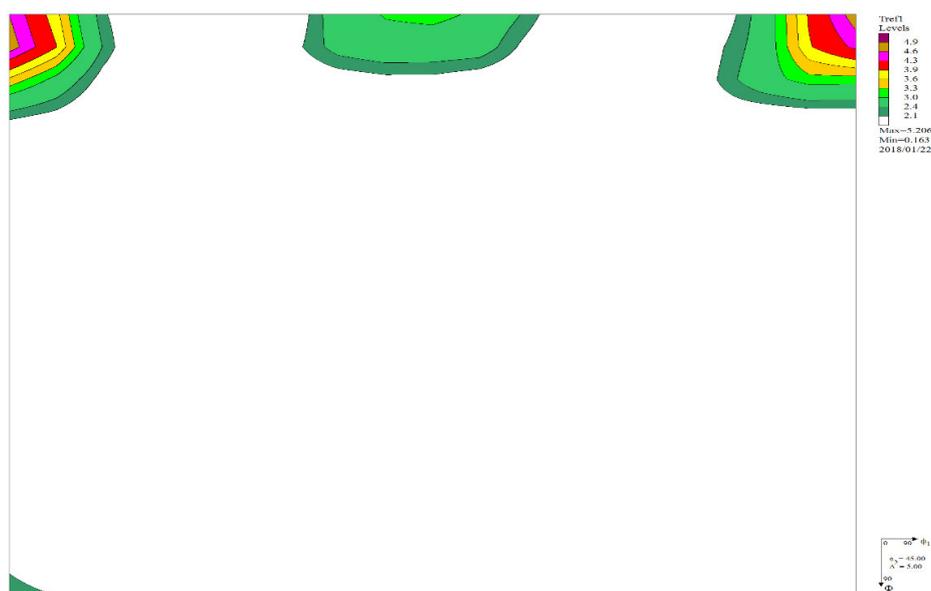


Figura 21 – ODF das amostras **c)** respectivamente, de trefilação representando a comparação entre os materiais.

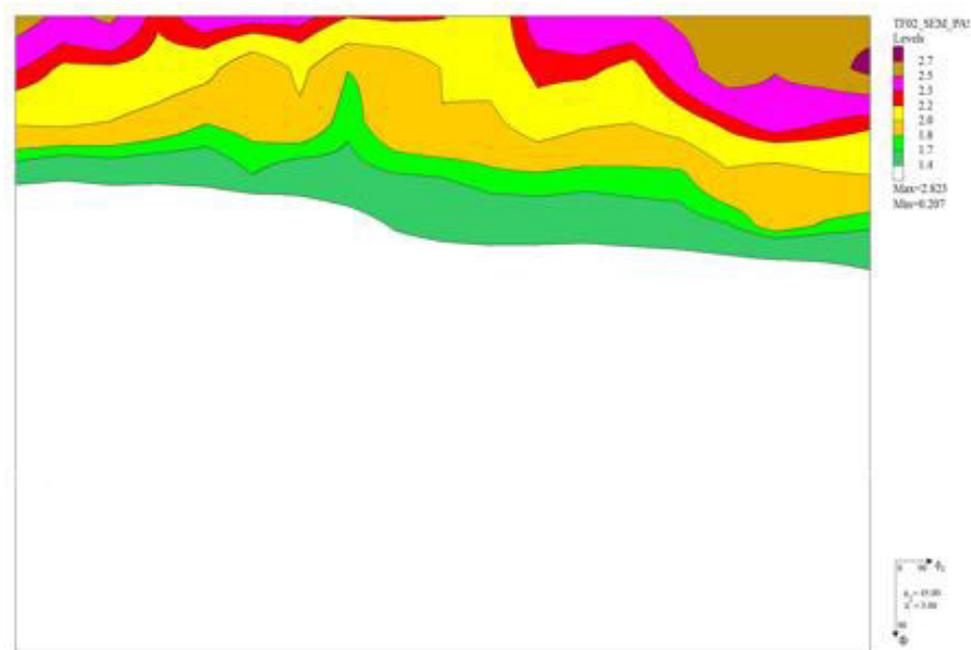
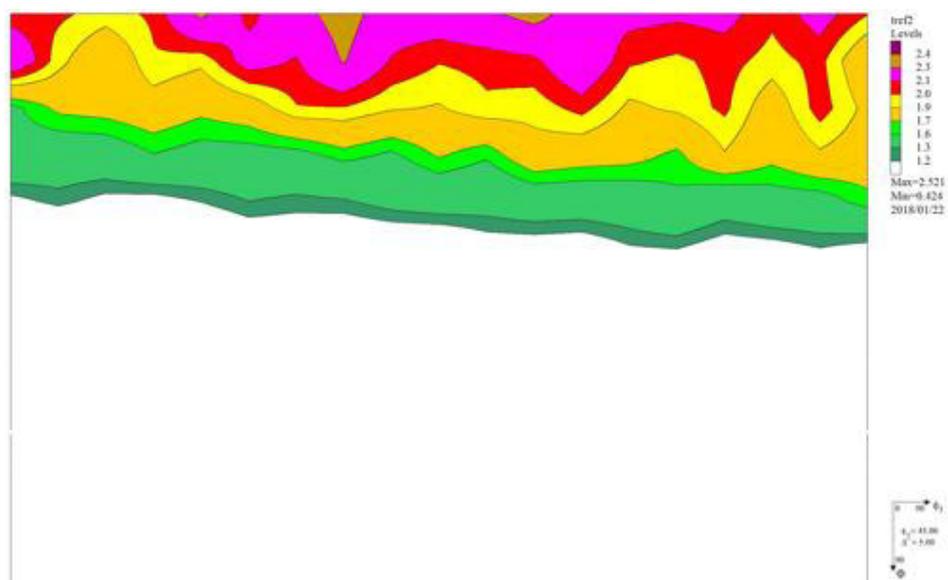


Figura 22 – ODF das amostras **e)** respectivamente, de trefilação representando a comparação entre os materiais.



De acordo com os resultados obtidos através da análise das Figuras de polo e das ODF'S obtidas, o material apresenta densidade de textura alta nas regiões do plano (100), comum em materiais trefilados que apresentam textura de fibra preferencial.

O comportamento dos tipos de textura observado é comum para materiais que passaram por trefilação à frio, devido a presença de encruamento e quantidade relevante de anisotropia.

6. CONCLUSÃO

Considerando as análises e resultados apresentados nesse trabalho, foi possível concluir que:

- O material que não possui conformação, que é oriundo da matéria-prima siderúrgica, apresenta resultados de microdureza inferiores aos materiais que foram trefilados e passados por passes maiores de trefilação;
- É evidenciado de que os materiais fornecidos pelo fabricante, atendem aos requisitos de propriedades mecânicas e composição química do aço SAE 1008.
- A cada passe de trefilação há uma maior redução de área dos produtos, aumentando assim a densidade observada de deformação plástica (encruamento) e anisotropia do material;
- Para todas as amostras, observa-se uma variação pequena nas características de microestruturas e de fases dos materiais.
- Todas as amostras possuem região perlítica em uma matriz Ferrítica, característica observada em aços de baixo carbono, diferindo, apenas, na orientação preferencial das amostras que foram trefiladas.
- Quando comparando as amostras com os níveis de passes de trefilação, observa-se orientações preferenciais nos planos (100).

- Amostra 3 e 5, que representam os processos realizados no segundo e terceiro passe de trefilação, apresentam textura característica da textura de fibra.
- Observa-se que quanto maior a redução do material trefilado a frio, maior será a facilidade de obtenção dos resultados de propriedades mecânicas do produto CA-60.

Pode se concluir de que o material trabalhado e os processos observados estão estáveis, gerando produtos que atendem as regulamentações de produção dos vergalhões CA-60 produzidos a frio.

7. TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Realizar mapeamento da textura através do EBSD para análise de microtextura.
- ✓ Analisar a influência da velocidade de conformação nas propriedades de textura cristalográfica do material trefilado.
- ✓ Comparar os resultados obtidos pelos passes de trefilação quando o processo for realizado à quente.

REFERÊNCIAS

1. DIETER, G. E. – Metalurgia Mecânica, 2a edição, Guanabara Koogan, Rio de Janeiro - 1981.
2. SILVA, Thiago Ferreira. **EFEITO DOS PARÂMETROS DE TREFILAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DO AÇO SAE 1015 TREFILADO.** 2011. 28 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
3. GERDAU. **Trefilação.** Porto Alegre, RS: Gerdau Aços Longos S/A, 2007
4. FILHO, Ettore Bresciani. **Conformação plástica dos metais,** São Paulo, SP: USP, 2011.
5. NAKAGIRI, A., YAMANO, T., KONADA, M., ASAKAWA, M., SASAKI, W. **Behavior of Residual Stress and Drawing Stress in Conical – Type Die and Circle – Type Die Drawing by FEM simulation and Experiment,** USA Wire Journal International, 2001.
6. QUEIROZ NETO, Mozart. **Caracterização microestrutural de diferentes bitolas do aço CA-50 com composição química definida.** 2011. 38 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
7. FREITAS, Francisco Nélio Costa. **Influência da recristalização no Comportamento da textura cristalográfica e nas perdas magnéticas por histerese de um aço elétrico de grão não orientado.** 2011. (Tese) Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

8. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7480/2007. **Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado** – Especificação. 03/09/2007
9. SILVA LIMA, Rafael. **Estudo da cinética de recristalização em ligas zircaloy - 4 e sua influência na microtextura**. 2014. 38 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014
10. FREITAS JÚNIOR, Francisco Edval Sampaio. **Influência da deformação na textura cristalográfica de um aço inoxidável duplex**. 2012. 17 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012
11. SANTOS, Rezende Gomes dos. **Transformação de Fases em Materiais Metálicos**. Campinas, SP, Unicamp, 2006.
12. Callister, Jr., William D., 1940 – **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**, tradução Sérgio Murilo Stamile Soares, Rio de Janeiro, LTC, 2011.
13. PADILHA, A. F., F. SICILIANO JR - **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. 3 ed., ABM, São Paulo, 2005
14. Viana, S.C.C. – **Texturas Cristalográficas**. IME, 2002.
15. COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4ª ed. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 2008.