



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

João Paulo Pinheiro Ferreira

**AVALIAÇÃO DA TEXTURA CRISTALOGRÁFICA DE UM ARAME
PERLÍTICO TORCIDO E NÃO TORCIDO**

Fortaleza

2022

João Paulo Pinheiro Ferreira

**AVALIAÇÃO DA TEXTURA CRISTALOGRÁFICA DE UM ARAME
PERLÍTICO TORCIDO E NÃO TORCIDO**

Fortaleza

2022

João Paulo Pinheiro Ferreira

AVALIAÇÃO DA TEXTURA CRISTALOGRÁFICA DE UM ARAME
PERLÍTICO TORCIDO E NÃO TORCIDO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Metalúrgica e de Materiais da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Hamilton Ferreira
Gomesde Abreu

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso

Fortaleza

2022

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)

- F441a Ferreira, João Paulo Pinheiro.
Avaliação da textura cristalográfica de um arame perlítico torcido e não torcido / João Paulo Pinheiro
Ferreira. – 2022.
49 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu.
Coorientação: Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso.
1. Textura. 2. Cristalografia. 3. UFC. I. Título.

CDD 669

João Paulo Pinheiro Ferreira

AVALIAÇÃO DA TEXTURA CRISTALOGRÁFICA DE UM ARAME PERLÍTICO
TORCIDO E NÃO TORCIDO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Metalúrgica e de Materiais da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

Dr. Jorge Luiz Cardoso (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Dr. Luís Flávio Gaspar Herculano
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, aos meus professores
e colegas.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu, pela excelente orientação e inclusive pela sua brilhante ideia do tema do mesmo que aumentou o meu conhecimento e com certeza vai me ajudar na minha carreira profissional. Ao Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso, pela paciência e dedicação que passamos quase um ano preparando esse TCC sem a sua contribuição nada disso seria possível.

Aos professores participantes da banca examinadora ao Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu, ao Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso e ao Dr. Luís Flavio Gaspar Herculano pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

“Nunca ande por trilhas, pois
assim só irá até onde outros já
foram.”

Alexander Graham Bell

RESUMO

O aço perlítico é utilizado em condições extremas. O estudo da textura no referido aço quando sofre transformações mecânicas como o processo de torção, visa investigar um fenômeno físico conhecido como delaminação que na literatura, não existe muitas informações e é algo desconhecido. O estudo da textura possibilita uma aquisição de conhecimentos que viabiliza a obtenção de muitas informações importante como a anisotropia dentre outras informações. A difração de raios-X pode ser utilizada com inúmeras outras técnicas que permitem obter informações bastante expressivas e importantes sobre esses materiais. O estudo da textura possibilitou uma maior investigação sobre a propagação de trincas e como poderá se comportar o material quando submetidos a esforços mecânicos como torção, usinagem, trefilação, forjamento e extrusão. A utilização do MEV inclusive com a técnica de EBSD e a difração de raio-X permitiu uma nova forma de representar a textura do material como exemplo a micro e macro textura.

Palavras-chave: Aço perlítico. Textura. Difração de raio-X.

ABSTRACT

Pearlitic steel is used in extreme conditions. The study of the texture in that steel when it undergoes mechanical transformations such as the torsion process, aims to investigate a physical phenomenon known as delamination, which in the literature, there is not much information and is something unknown. The study of texture allows an acquisition of knowledge that makes it possible to obtain many important information such as anisotropy among other information. X-ray diffraction can be used with numerous other techniques that allow obtaining very expressive and important information about these materials. The study of the texture made possible a further investigation on the propagation of cracks and how the material may behave when subjected to mechanical stresses such as torsion, machining, drawing, forging and extrusion. The use of SEM including the EBSD technique and X-ray diffraction allowed a new way of representing the texture of the material as an example the micro and macro texture.

Keywords: Pearlitic steel. Texture. X-ray diffraction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática das microestruturas para a liga ferro-carbono na composição Eutetóide.....	19
Figura 2 - Tensão cisalhante a 45°	21
Figura 3 - Distribuição de forças a 45°	21
Figura 4 - Modo de falha em teste de torção de cisalhamento t , (a) dúctil e (b) frágil.....	22
Figura 5 - Falha na ductilidade longitudinal resultando em fratura em hélice sob as seguintes forças: σ_1 : tensão de tração, σ_3 : tensão de compressão e τ : tensão de cisalhamento.	23
Figura 6 - Esquema de orientação de grãos de material (a) sem e (b) com textura.....	24
Figura 7 - Ilustração esquemática de textura de chapa em uma chapa (a) e da textura de fibra em um arame (b).	26
Figura 8 - Pólos e traços de planos sobre uma esfera de referência.	27
Figura 9 - Projeção padrão e Triângulo estereográfico (sistema cúbico).....	28
Figura 10 - Configuração da técnica de difração de raios-X.	30
Figura 11 - Textura de laminação simuladas para metais HCP	32
Figura 12 – Perfil de seção transversal dos dois arames de aço perlítico usados nessa pesquisa.	34
Figura 13 – Amostras dos arames dos aços perlíticos torcido e não torcido (sentido de laminação).	34
Figura 14 - Micrografias em MEV do arame perlítico torcido, seção longitudinal, em diferentes aumentos.	38
Figura 15 - Micrografia em MEV do arame perlítico não torcido, seção longitudinal.	39
Figura 16 – Difratograma dos dois arames estudados nessa pesquisa.	39
Figura 17 - Perfil de microdureza Vickers para o arame perlítico não torcido.	41
Figura 18 - Perfil de microdureza Vickers para o arame perlítico torcido.....	41
Figura 19 – Macrot textura a) na face tracionada, b) face comprimida e c) no meio da amostra do arame torcido.	42
Figura 20 – Ábaco para uma seção de $\varphi_2=45^\circ$ que auxilia na identificação dos pares de orientações para macrot texturas.	43
Figura 21 - Macrot textura a) na face, e b) no meio da amostra do arame não torcido.....	44
Figura 22 – Quantificação de fases para o arame não torcido a) na superfície e b) no meio do arame.	44

Figura 23 – Mapa de orientação dos grãos a) na superfície e b) no meio do arame não torcido.	45
Figura 24 - Quantificação de fases para o arame torcido a) na face tracionada, b) na face comprimida e c) no meio da amostra.....	46
Figura 25 - Mapa de orientação dos grãos a) na face tracionada, b) na face comprimida e c) no meio do arame torcido.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química (em % de massa) para os arames dos aços perlíticos torcido e não torcido.	33
Tabela 2 – Medidas de dureza na escala Rockwell C para os arames analisados.	40

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	16
2.	OBJETIVOS.....	18
2.1.	Objetivos Gerais.....	18
2.2.	Objetivos Específicos.....	18
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1.	Aços Perlítico	19
3.2.	Torções em arames.....	20
3.3.	Textura.....	23
3.4.	Textura de Fibra e Textura de Chapa.....	25
3.5.	Difração de Raios-X.....	26
3.6.	Métodos de Representação da Textura Cristalográfica.....	27
3.7.	Figuras de Pólos Inversas.....	27
3.8.	Textura cristalográfica.....	30
3.9.	Textura de laminação	31
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
4.1.	Materiais	33
4.2.	Métodos	35
4.2.1.	Análise microestrutural das amostras	35
4.2.2.	Dureza Rockwell C.....	35
4.2.3.	Microdureza Vickers	35
4.2.4.	Difração de Raio X (DRX).....	36
4.2.5.	Macrotextura de raio X.....	36
4.2.6.	Análise de EBSD (Electron Back Scatter Diffraction).....	36
5.	Resultados e discussões	38
5.1.	Microestrutura dos arames estudados	38

5.2.	Caracterização por Raio X.....	39
5.3.	Dureza Rockwell C dos arames	40
5.4.	Microdureza Vickers na seção transversal dos arames.....	40
5.5.	Macrotextura de raio X.....	42
5.6.	Microtextura por EBSD	44
6.	CONCLUSÃO.....	48

1. INTRODUÇÃO

Arames de aço perlítico trefilados a frio podem ser utilizados de várias formas, como cabos de catapulta de porta-aviões, cabos de pontes suspensas, cabos de pneus e dutos flexíveis usados na indústria de petróleo. Em muitas dessas aplicações, esses arames são enrolados helicoidalmente e também expostos ao ambiente marinho agressivo quando em operação. A ductilidade torcional é importante quando os fios de aço perlítico trefilados a frio estão sujeitos à deformação plástica durante a fabricação, como cabos torcidos de pneus ou molas helicoidais. Dutos flexíveis são amplamente empregados em equipamentos *offshore* como tubos de produção de petróleo e injeção de gás. Um duto flexível é fabricado com várias camadas poliméricas e metálicas para suportar uma combinação severa de temperatura e pressão em ambientes oceânicos profundos. Em geral, as camadas poliméricas são responsáveis pela vedação, isolamento e resistência ao desgaste, enquanto as camadas metálicas resistem às cargas estruturais (BRANDALEZE, 2015). São materiais cuja composição química é constituída com valor máximo entre 0,7 a 0,9% de carbono na liga. As propriedades mecânicas podem ser passíveis de diversas alterações para o seu melhoramento através de processos por tratamento térmico, e apresenta respostas para usos de diversos níveis em vários setores da engenharia como indústria naval e petroquímica, sendo materiais que apresentam em relação a outros aços, boa usinabilidade.

A constituição da perlita é basicamente formada por ferrita e cementita onde a ferrita apresenta a propriedade mecânica por ser conhecida como mole e a cementita tem a presença de elevada dureza em relação à ferrita por meio do qual são formadas por estas duas fases alotrópicas, onde a dureza final de um aço perlítico dependera apenas da espessura das lamelas de perlita, estando às dimensões delas ligadas às propriedades mecânicas.

O tema dessa pesquisa visa através de técnicas de Metalografia, o estudo de textura para conferir se o aço em estudo é perlítico ou não, por meio de técnicas de difração de raios-X que possibilita avaliar a amostra de aço se teve ou

não mudança de fase após a torção e seu possível encruamento é analisado pelo uso do microscópio ótico(MO), microscópio eletrônico de varredura (MEV), inclusive as fases presentes na sua composição química levando a veracidade do catalogo do fabricante se ele é mesmo perlítico ou não, e pelo uso da técnica de Difração de Elétrons Retro Espalhados (EBSD, do inglês, Electron Backscattered Diffraction) que permite uma veracidade completa sobre a composição química do material e também avalia o estudo da sua textura obtida por meio da torção.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Analisar as características de textura cristalográfica e a micro estrutura de umaço 0erlítico torcido e não torcido.

2.2. Objetivos Específicos

Com o intuito de caracteriza o material, especificamente se objetiva:

- ✓ Analisar a composição química do material;
- ✓ Caracterizar o material por difração de raios-X;
- ✓ Realizar macro textura pelo uso da difração de raios-X;
- ✓ Realizar micro textura pelo uso da técnica de EBSD;
- ✓ Caracterizar a orientação e distribuição dos grãos pela técnica de EBSD;
- ✓ Revelar a micro estrutura do material torcido e não torcido pelo uso dereagentes;
- ✓ Avaliar a dureza do material na superfície e microdureza em sua seçãotransversal.

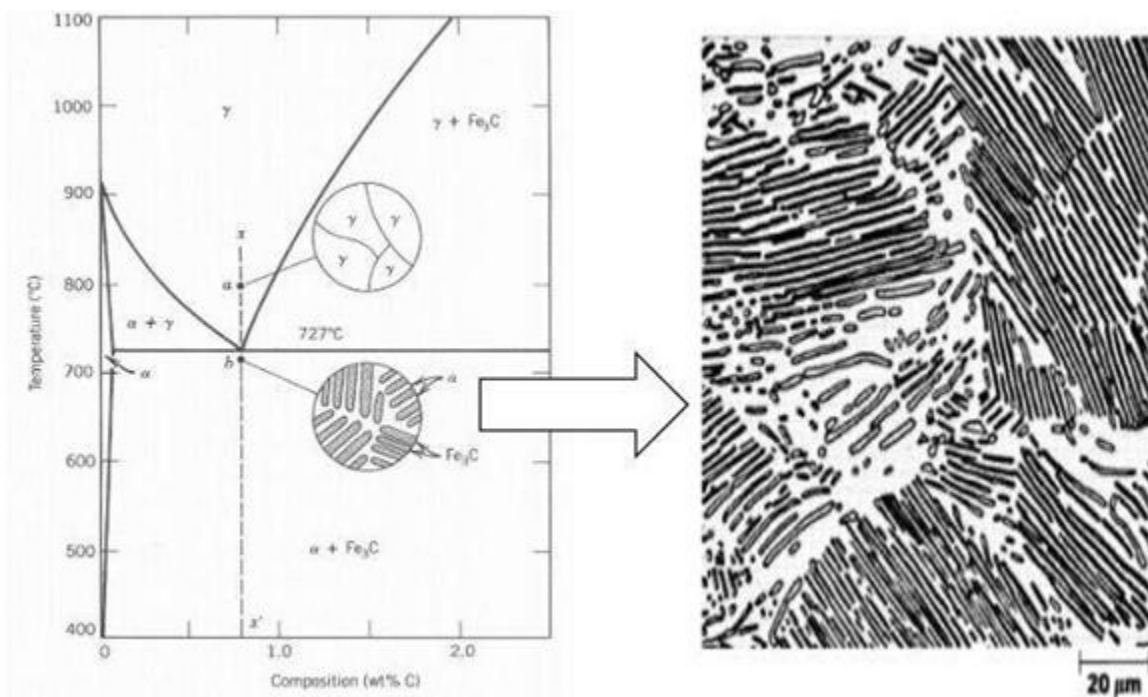
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, serão apresentados os principais tópicos sobre aços perlítico e textura cristalográfica.

3.1. Aços perlítico

Os aços perlítico são caracterizados por apresentarem variação entre 0,70 a 0,90% de teor de carbono, estando no diagrama de fases ferro-carbono próximo a área de transformação eutetóide. Aços com essa composição, quando submetidos a temperaturas superiores a 727°C , a austenita é estável, quando resfriado lentamente a austenita se transforma em perlita, que é um constituinte de estrutura lamelar formado pelas fases ferrita e cementita (SILVA; MEI, 2010). Essa transformação pode ser vista na Figura 1.

Figura 1 - Representação esquemática das microestruturas para a liga ferro-carbono na composição eutetóide



Fonte: Tschipschin, Sinatora e Goldenstein (1986)

O desenvolvimento da perlita se dá principalmente através dos mecanismos de nucleação e crescimento. A cementita inicia um processo de nucleação preferencialmente no contorno de grão austenítico, região esta que anteriormente se encontrava rica em carbono, passa a apresentar baixos teores deste elemento de liga, o que estimula a nucleação da microestrutura ferrítica em torno da cementita. Por consequência do crescimento entre as duas fases, se formam colônias de perlita (SILVA;MEI, 2010).

A perlita possui capacidade de reordenar suas lamelas de cementita de acordo com a direção de trefilação, o que resulta em uma estrutura dúctil, já que o movimento das discordâncias é favorecido pela interface ferrita/cementita. Por essa razão no processo de conformação de arames são utilizados particularmente materiais perlítico, pois permitem grandes reduções de área com o processo de trefilação a frio (TORIBIO; GONZÁLEZ; MATOS, 2014). A ductilidade obtida pode resultar da descontinuidade da cementita lamelar, o que favorece a acomodação de grande quantidade de deformação no plano de escorregamento das lamelas (TORIBIO; GONZÁLEZ; MATOS, 2014).

3.2. Torções em arames

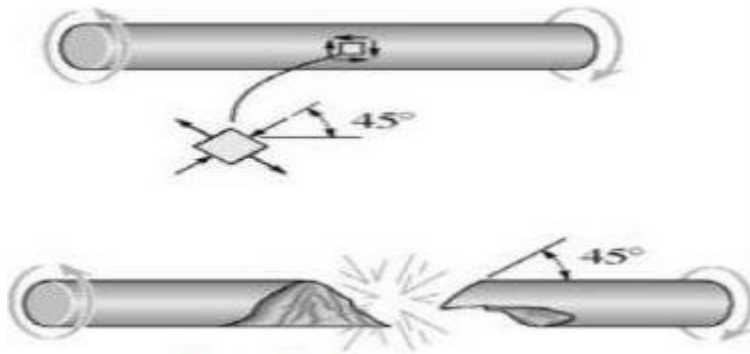
Para entender a torção, devemos investigar o material em estudo quando submetido a esforços cisalhantes. O aço em estudo quando submetido à torção, deve ser levado em consideração à deformação por cisalhamento, pois revela informações importantes.

O aço perlítico quando submetido ao processo de trefilação a frio, passa por mudanças na sua morfologia, rearranjando suas colônias de perlita que são progressivamente dirigidas a orientarem suas lamelas paralelamente à direção axial da trefilação. Essa alteração nas lamelas leva a uma redução do espaçamento interlamelar da estrutura e o resultado é um aumento da resistência ao escoamento, já que o movimento das discordâncias é favorecido na interface ferrita/cementita (TORIBIO; GONZÁLEZ; MATOS, 2014).

Quando submetido às tensões externas, o escoamento do material tem início quando a tensão de cisalhamento máxima absoluta alcança o valor da tensão

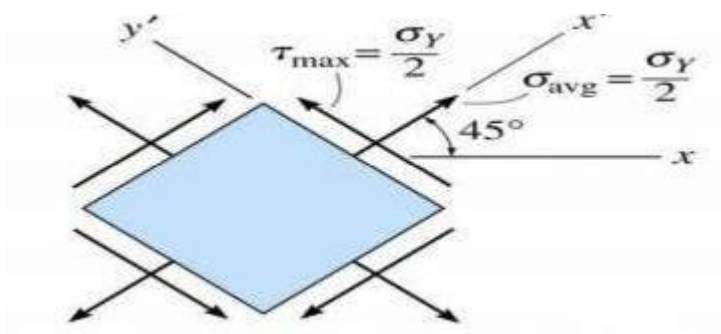
do material. Segundo Reis (2009), a tensão cisalhante atua a 45° em relação aos planos de tensão principal, como indicado na Figura 2. No teste de torção, o plano de fratura, que se encontra a 45° da direção de cisalhamento, tem a tensão de tração máxima como causadora da fratura (Figura 3).

Figura 2 - Tensão cisalhante a 45°



Fonte: Buffoni (2017).

Figura 3 - Distribuição de forças a 45°

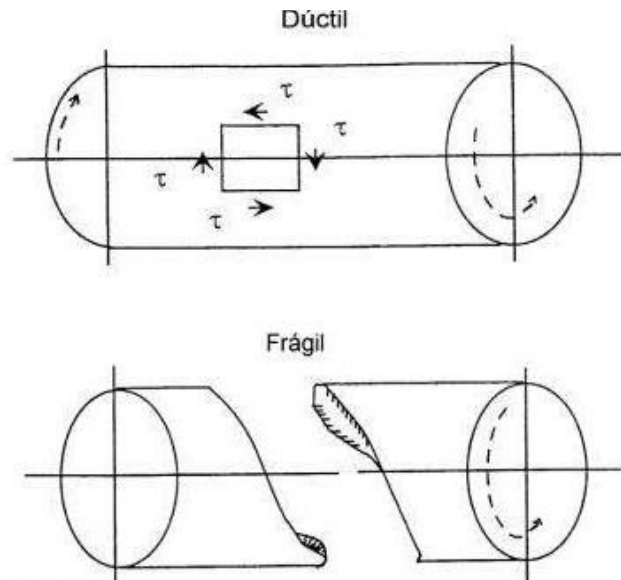


Fonte: Buffoni (2017).

A fratura na torção varia de acordo com suas características. Para fraturas dúcteis, que são as que apresentam intensa deformação plástica, surge uma fratura plana perpendicular ao eixo do arame, já nas frágeis, que são as que não acompanham deformação plástica, a fratura ocorre no plano principal com a tensão

de tração máxima a 45° do eixo como pode ser visto na Figura 4 (REIS 2009).

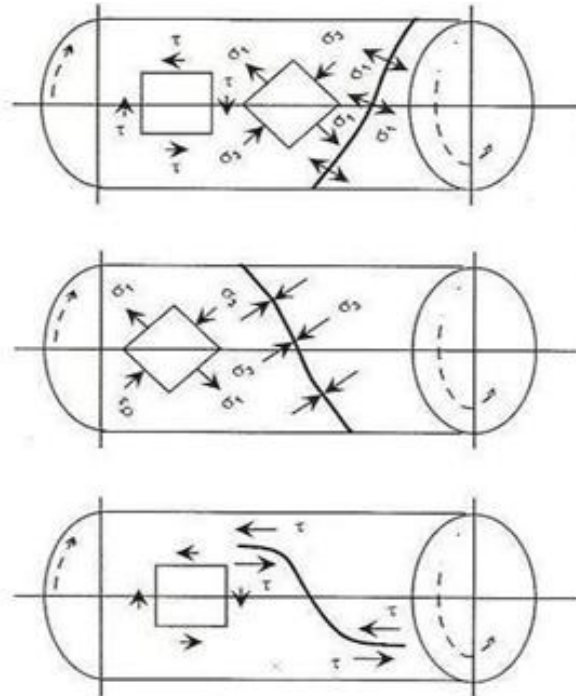
Figura 4 - Modo de falha em teste de torção de cisalhamento t , (a) dúctil e (b) frágil.



Fonte: Reis (2009).

Segundo Reis (2009), algumas fraturas podem ser iniciadas em planos paralelos ao eixo do arame que tem origem na queda de ductilidade por torção, o resultado é a fratura em hélice, esta falha recebe o nome de delaminação (Figura 5).

Figura 5 - Falha na ductilidade longitudinal resultando em fratura em hélice sob as seguintes forças: σ_1 : tensão de tração, σ_3 : tensão de compressão e τ : tensão de cisalhamento.



Fonte: Reis (2009).

3.3. Textura

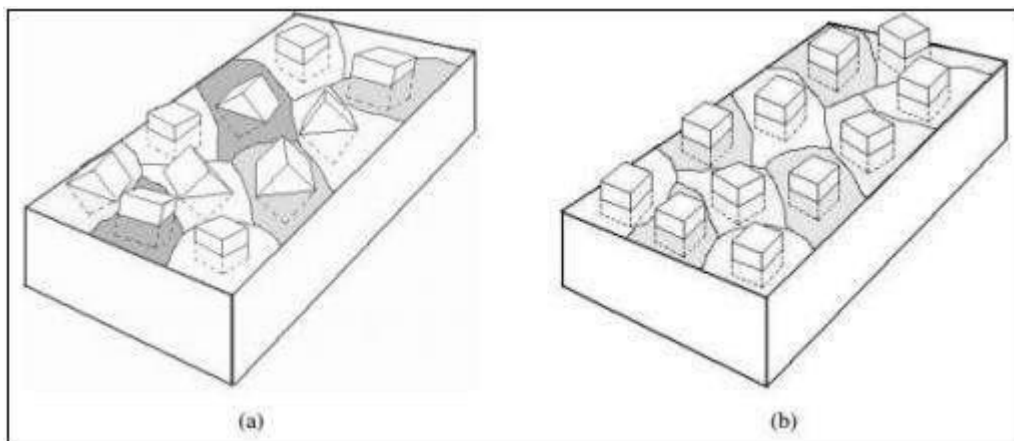
A forma de distribuição das orientações dos cristais constituintes de um material metálico, em particular do aço, é denominada textura. Considera-se um metal com ausência de textura quando a distribuição das orientações dos cristais no agregado policristalino é totalmente aleatória. Algumas diferentes 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. (QUEIROZ NETO, 2011).

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. (QUEIROZ NETO, 2011)

Os materiais policristalinos, os quais possuem mais de um grão em sua estrutura, geralmente, possuem isotropia, ou seja, cada grão formado possui orientação cristalográfica diferente dos outros grãos, resultando em propriedades semelhantes em todas as direções, como observado na Figura 6 (b). Entretanto, quando os grãos do material seguem uma orientação preferencial (Figura 6 (a)), ou seja, vários grãos com mesma orientação cristalográfica, denomina-se que o material possui textura, assim, este não terá mais propriedades iguais independente da direção, logo ele será denominado como anisotrópico (SILVA, 2005).

Figura 6 - Esquema de orientação de grãos de material (a) sem e (b) com textura.



Fonte: SILVA, 2005.

A orientação preferencial pode ser introduzida no material por diversos modos, podendo ser eventual ou produzida intencionalmente (FREITAS, 2011):

- 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. (FREITAS, 2011)

Vale salientar de que a textura não se refere à forma dos grãos, mas sim à forma como a rede cristalina desses grãos são arrançadas. 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). (FREITAS JUNIOR, 2011)

3.4. Textura de Fibra e Textura de Chapa

Existem dois tipos principais de textura: a textura de fibra e a textura de chapa (PADILHA, 2005) conforme ilustrado na Figura 7.

Os grãos em um arame estão orientados de maneira tal que a mesma direção cristalográfica [uvw] 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 (PADILHA, 2005).

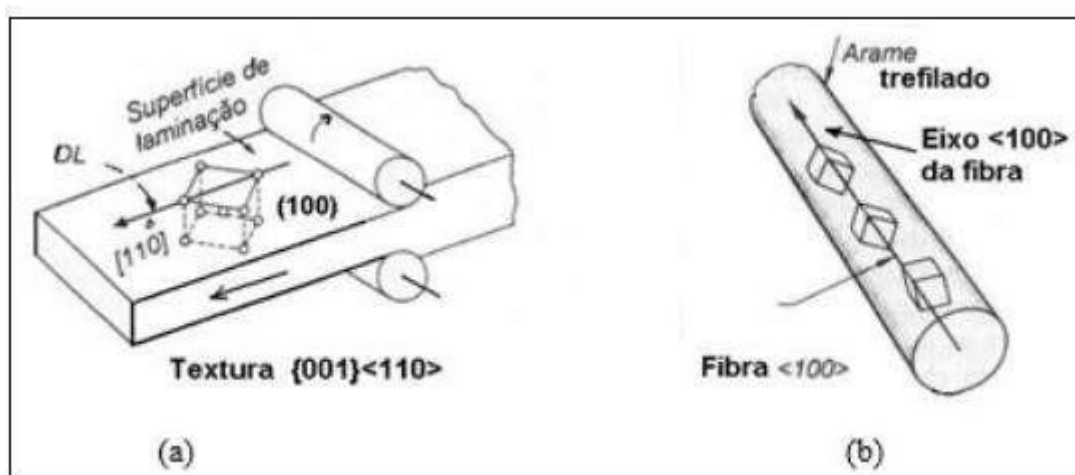
Materiais com textura de fibra apresentam simetria rotacional com relação à um eixo, de forma que todas as orientações cristalográficas com referência a este eixo são igualmente prováveis (PADILHA, 2005).

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 (PADILHA, 2005).

As texturas de fibra variam em grau de perfeição, isto é, no desvio da direção [uvw] em relação ao eixo da fibra. (PADILHA, 2005)

Os metais e ligas com estrutura CCC geralmente apresentam textura de fibra $\langle 111 \rangle$ (PADILHA, 2005).

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



Fonte: Viana, 2005

3.5. Difração de Raios-X

O fenômeno de difração de raios X por cristais resulta de um processo de espalhamento no qual os raios X são dispersos pelos elétrons dos átomos sem alteração no comprimento de onda. Um feixe difratado é produzido por tal dispersão somente quando certas condições geométricas são satisfeitas, o que pode ser expresso em qualquer uma de duas formas, a equação de *Bragg*, ou a de *Laue*. O padrão de difração resultante de um cristal, que compreende tanto as posições como as intensidades dos efeitos de difração, é uma propriedade física fundamental da substância, servindo não apenas para sua rápida identificação, mas também para a elucidação completa de sua estrutura. A análise das posições do efeito de difração leva imediatamente a um conhecimento do tamanho, forma e orientação da célula unitária. Para localizar as posições dos átomos individuais na célula, as intensidades devem ser medidas e analisadas. O mais importante para relacionar as posições dos átomos com as intensidades de difração é a equação do fator de estrutura (CULLITY, 1956).

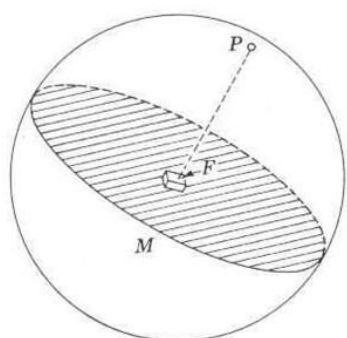
3.6. Métodos de Representação da Textura Cristalográfica

Há vários métodos de representar a textura de um material. Para todos eles, é preciso que as orientações dos cristalinos presentes sejam determinadas de algum modo. Tradicionalmente, tem-se usado a difração de raios x, por meio da qual medem-se as frações volumétricas de material associadas a uma dada orientação cristalina, a partir da intensidade que difratam. Num policristal, milhares de grãos são analisados simultaneamente, por esta técnica. Recentemente, o uso do EBSD (“Electron Back- Scatter Diffraction”) associado à microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu a determinação da orientação individual de cada grão, de modo muito rápido. A quantidade de grãos com cada orientação, existente no policristal, é, assim, levantada diretamente, por um processo automatizado. Abaixo, serão vistas as maneiras mais comuns de representar a distribuição das orientações medidas experimentalmente.

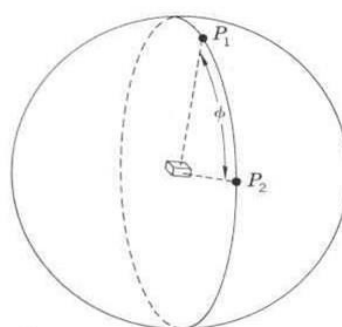
3.7. Figuras de Pólos Inversas

Se colocarmos uma célula cristalina no centro de uma esfera de referência e estendermos seus planos e as normais de seus planos até que cortem a superfície da esfera, produziremos o que está representado nas Figura 8.

Figura 8 - Pólos e traços de planos sobre uma esfera de referência.



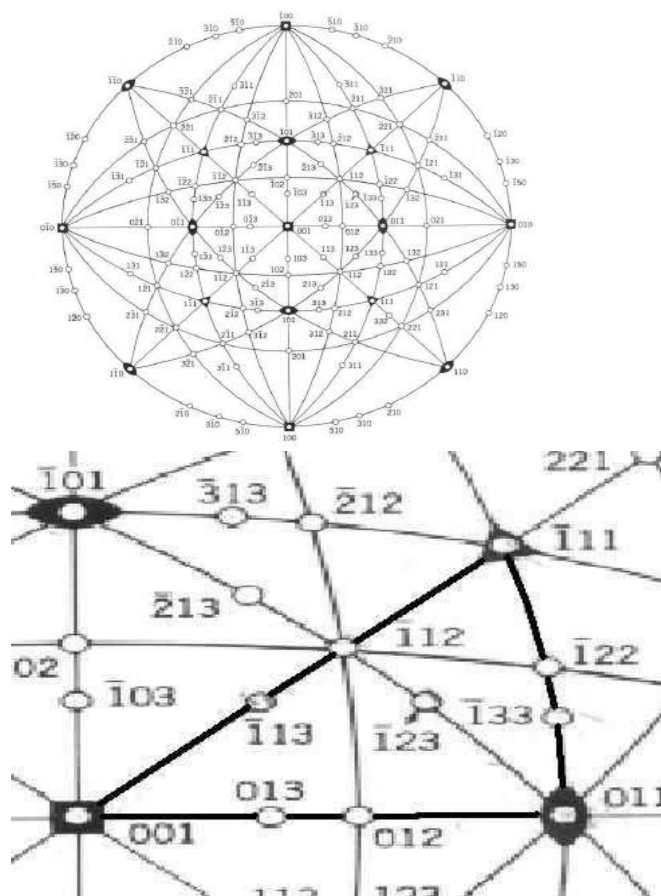
"P" é o pólo de um plano (hkl).
"M" é o traço do plano (hkl).



Ângulo entre dois pólos medido sobre um círculo máximo.

Na figura de pólos inversa, registra-se a densidade dos pólos dos planos $\{hkl\}$ paralelos a uma dada superfície da amostra (por ex.: a seção reta de uma barra), sobre um triângulo estereográfico característico do sistema cristalino do material (Figura 9).

Figura 9 - Projção padrão e Triângulo estereográfico (sistema cúbico).



Fonte: Viana, 2005

Chama-se figura de pólos inversa porque é a normal à superfície que varre o triângulo de orientações à procura daquelas que representam a textura. A densidade de pólos pode ser obtida por difração de raios x ou por EBSD e é normalizada pelas densidades dos planos correspondentes de uma amostra sem textura, em unidades “vezes o padrão aleatório”.

No caso do raio X, obtem-se um difratograma normal do material, com respeito à superfície da qual se deseja as figuras de pólo inversa (Figura 9). As

áreas dos picos $\{hkl\}$ são medidas e, após normalizá-los pelas áreas dos picos correspondentes da amostra sem textura, levam-se os resultados sobre o triângulo estereográfico (Figura 9).

A figura de pólos inversa é representada por linhas de isodensidade de pólos, isto é, linhas que passam pelos mesmos valores da densidade de pólos, e é muito empregada na representação de texturas de fibra.

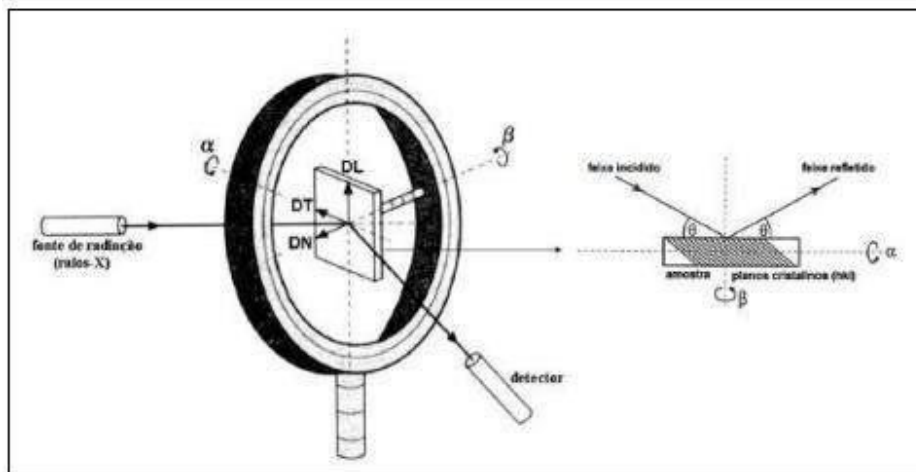
É chamada de polos inversa devido ser a normal da superfície que faz a leitura do triângulo de orientações à procura de representar a textura. A densidade de polos pode ser alcançada por difração de raios x ou por EBSD.

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. (SILVA LIMA, 2014)

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: $\{hkl\}$, 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). (FREITAS JUNIOR, 2012)

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 (Figura 10). 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 figurasde polos que dão origem a FDOC (FREITA, 2012).

Figura 10 - Configuração da técnica de difração de raios-X.



Fonte: SILVA LIMA, 2014

A técnica de difração de raios-X avalia a textura de maneira macro, leva em conta um volume considerável de cristais do material (FREITAS, 2011).

3.8. Textura cristalográfica

Assim como a maioria dos materiais oficializados na engenharia são policristalinos, as ligas de zircônio são policristalinas. Os materiais policristalinos são constituídos de pequenos cristais, denominados grãos, os quais são separados uns dos outros por fronteiras denominadas contornos de grão. A grande maioria dos materiais policristalinos existentes tem grãos com tamanho médio na faixa de $10\mu\text{m}$ a 1 mm.

Cada grão em um agregado policristalino tem orientação cristalográfica diferente das dos seus vizinhos essas diferenças de orientação são habitualmente da ordem de dezenas de graus. As propriedades do policristal dependem do tamanho, da forma e da orientação dos grãos. As distribuições de orientações cristalográficas dependem dos policristais e em muitos casos não é aleatória sendo chamada de textura. Esta orientação cristalográfica preferencial afeta as propriedades físicas e mecânicas do material, devido à anisotropia de propriedades dos cristais, individualmente.

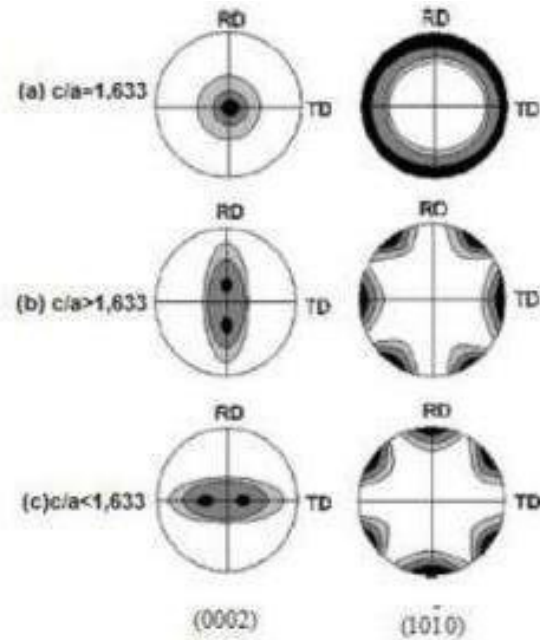
Grande parte das medidas de textura em materiais hexagonais é

representada por figuras de pólo basais, uma vez que a orientação do eixo c tem grande relevância no comportamento anisotrópico. Devido a sua dificuldade e em alguns metais hexagonais eles são menos relevantes na influência de propriedades, pouco se estuda focado na orientação de planos prismáticos ou piramidais. Todavia, para zircônio, planos piramidais podem ser indicadores do grau de recozimento/recristalização no material (KAMMENZIND, 14th International Symposium).

3.9. Textura de laminação

Metais de estrutura hexagonal compacta exibem inerente comportamento mecânico anisotrópico, devido ao limitado número de sistemas de deslizamento, o qual facilita o desenvolvimento de texturas muito fortes durante processamento mecânico. Para entender-se o comportamento destas ligas é necessário conhecer sua textura cristalográfica bem como os mecanismos de deformação que levaram ao seu desenvolvimento. As texturas de deformação em materiais hexagonais compactos variam em função da razão c/a e dos mecanismos de deslizamento e maclagem operantes (FREITAS, 2011). . As texturas de metais e ligas hexagonais laminados a frio podem ser organizadas em três grupos de acordo com a razão c/a (SILVA LIMA, 2014). Materiais com relação c/a maiores, menores ou iguais ao valor. As figuras de pólo dos planos (0002) e (10-10) e obtidas por simulações em computador para chapas laminadas a frio com diferentes valores de c/a são apresentadas abaixo: A Figura 11 mostra a textura de laminação para metais HCP.

Figura 11 - Textura de laminação simuladas para metais HCP



Metais e ligas que apresentam $< 1,633$, assim como o zircônio (1,593) e o titânio (1,587) tendem a formar texturas com os pólos basais inclinados de $\pm 20 - 40^\circ$ da direção normal para a direção transversal. Em geral a razão c/a reflete na ativação de diferentes sistemas deslizamento (FREITAS JUNIOR, 2012).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

Os materiais usados nessa pesquisa foram dois arames de aços perlíticos que compõem a estrutura de *risers* para a extração de petróleo. Um desses arames está torcido e o outro não torcido. Aqui eles serão identificados como Perl T e Perl NT (Perlítico Torcido e Perlítico Não Torcido). A Tabela 1 mostra a composição química (em % de massa) para esses dois arames. Esse resultado foi obtido em um espectrômetro de emissão ótica modelo PDA 7000 (Shimadzu) pertencente ao laboratório de caracterização de materiais da Universidade Federal do Ceará.

Tabela 1 - Composição química (em % de massa) para os arames dos aços perlíticotorcido e não torcido.

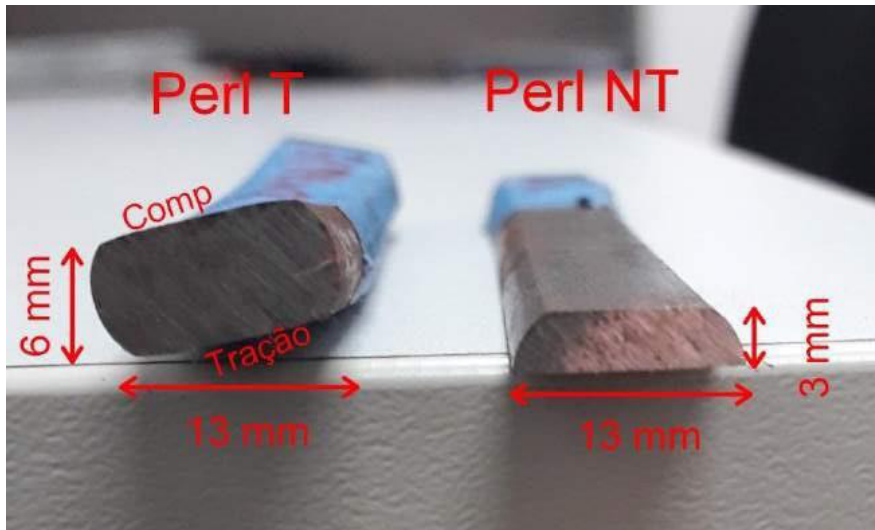
Elemento	Perl T	Perl NT
C	0,78	0,78
Si	0,21	0,25
Mn	0,59	0,75
P	0,007	0,006
S	0,016	0,015
Ni	0,027	0,032
Cr	0,017	0,022
Mo	0,022	0,010
Cu	0,019	0,014
Nb	0,011	0,003
Al	0,004	0,0082
Pb	-	0,03
V	0,005	0,002
Ti	0,002	0,004
Fe	Bal.	Bal.

Fonte: Próprio autor.

A Figura 12 mostra o perfil de seção transversal dos dois arames na condição como recebido, assim como suas dimensões. No caso do arame torcido, há uma face tracionada e a face oposta é a de compressão. O arame do aço

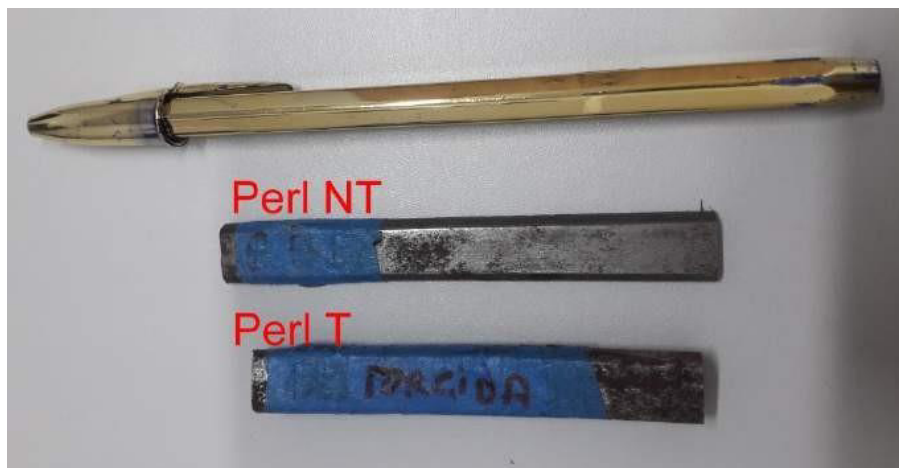
perlítico não torcido está somente laminado e cortado pela metade em sua seção transversal. Na Figura 13, é possível visualizar ambos os arames no sentido de laminação.

Figura 12 – Perfil de seção transversal dos dois arames de aço perlítico usados nessa pesquisa.



Fonte: Próprio autor.

Figura 13 – Amostras dos arames dos aços perlíticos torcido e não torcido (sentido delaminação).



Fonte: Próprio autor.

4.2. Métodos

4.2.1. Análise microestrutural das amostras

Os dois arames foram cortados em amostras menores. Essas amostras passaram por preparação metalográfica, como embutimento em baquelite, lixamento entre 100 a 1200 mesh, polimento em pasta de diamante de 3 e 1 μ e ataque químico em Nital 2% durante 4 s para revelar suas microestruturas. Após essa preparação, imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram feitas em ambos os arames.

4.2.2. Dureza Rockwell C

Os ensaios de dureza na escala Rockwell C foram feitas nas superfícies de ambos os arames. Como o arame torcido tem uma face de tração e outra de compressão, foram feitas seis medidas em ambas as faces. Já no arame não torcido, foram feitas seis medidas somente em uma face. As amostras foram submetidas a uma pré-carga de 10 KgF antes de cada medida. Na escala Rockwell C, a carga aplicada em cada medida foi de 150 KgF por 10 s. Das seis medidas, dois valores foram descartados, geralmente o maior e o menor valor, para diminuir o erro da medida (desvio padrão). Das quatro medidas restantes, foi tirada a média aritmética que representa o resultado da medida. Os ensaios de dureza Rockwell C foram feitos segundo a norma ASTM E18-11 (2011).

4.2.3. Microdureza Vickers

Mapas de microdureza foram feitas nas seções transversais de ambos os arames. As amostras foram indentadas pelo método de microdureza Vickers, cujo indentador é de diamante com formato piramidal, onde as faces estão espaçadas a uma angulação de 136°. Este indentador é comprimido nas amostras, aplicando uma carga F (1 kgf, equivalente a 9,877 N) por 10 s em várias regiões, espaçadas

horizontalmente de 1,5 mm e verticalmente de 1,2 mm para o arame torcido e verticalmente de 0,6 mm para o arame não torcido. O Microdurêntro utilizado é da marca SHIMADZU, modelo SHIMADZU HMV-2 *Micro-Hardness Tester*.

4.2.4. Difração de Raio X (DRX)

Para a caracterização por DRX, as amostras dos arames foram lixadas até 1200 mesh e polidas com alumina de 1 μ . As medições foram realizadas utilizando um difratômetro Philips® X'Pert Pro com uma radiação de $\text{CoK}\alpha$ (0,1799 nm). O ângulo 2θ variou de 45° a 105°.

4.2.5. Macrotextura de raio X

Foram medidas três figuras de polos (110), (200), e (211) com anodo de cobalto, e ψ de 0 a 75 graus. As funções de distribuição de orientação cristalográfica foram calculadas a partir das três figuras de polo usando os softwares LaboTex e Mtex. As medidas de textura de raio X foram feitas em ambas as superfícies das amostras, assim como no meio da amostras no sentido de laminação. Para o arame não torcido, a medida foi feita somente em uma das faces e no meio da amostra.

4.2.6. Análise de EBSD (Electron Back Scatter Diffraction)

Para análise utilizando a técnica de EBSD, a preparação metalográfica foi mais rígida. As amostras foram lixadas de 100 a 2000 mesh, polidas em pasta de diamante de 3 a 1 μ , borrifadas em álcool e secadas a quente. Depois as amostras passaram por polimento em sílica coloidal de 0,5 μm com o uso de uma MiniMet até que sua microestrutura fosse revelada somente com esse polimento. A análise de EBSD foi feita na seção transversal de cada amostra. Para a amostra torcida, foram feitos mapas de EBSD nas proximidades de ambas as faces, assim como no centro

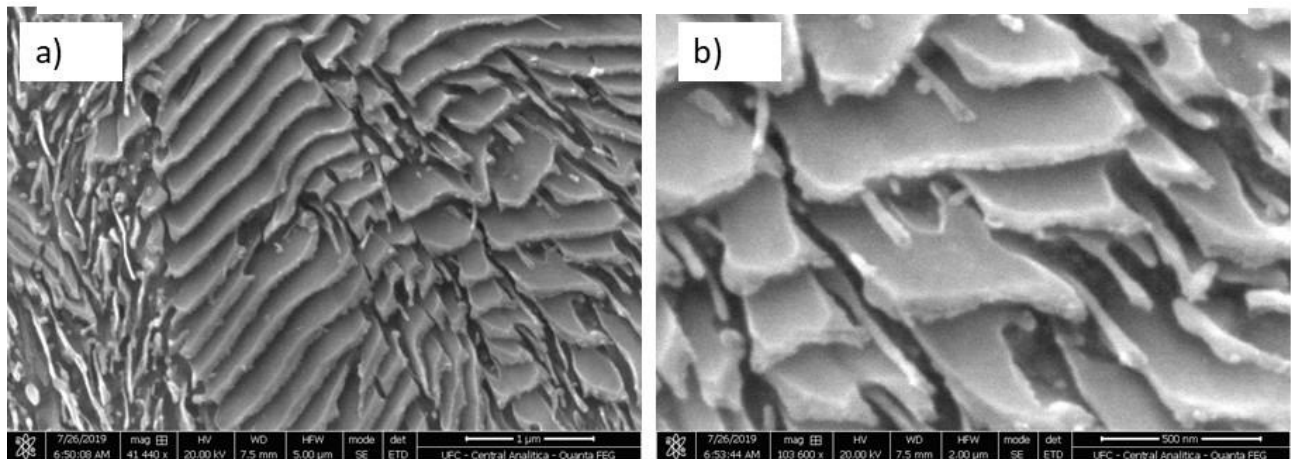
da seção transversal. Já para a mostra não torcida, foram feitos mapas de EBSD somente nas proximidades de uma das faces, assim como no centro de sua seção transversal. A distribuição de grãos, assim como a quantificação de fases foi feita pelo uso dessa técnica.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Microestrutura dos arames estudados

A Figura 14 mostra a microestrutura do arame feito do aço perlítico torcido. Esse arame foi retirado de um *riser* dissecado que sofreu torção. É possível observar as colônias de perlita se estendendo paralelamente na direção de laminação. Para a fabricação dos risers, esse arame sofreu torção e também cisalhamento. Os efeitos causados por esses esforços mecânicos podem ser vistos melhor na Figura 14b. Após a torção, há a retenção das lamelas que se retorceram pelo processo de torção, onde a cementita fragmentada pode ser bem observada tanto na Figura 14a como na Figura 14b. Essas falhas podem facilitar a propagação de trincas.

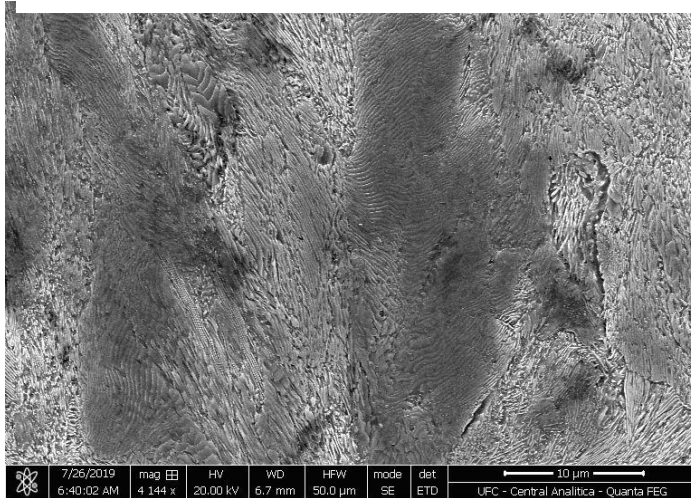
Figura 14 - Micrografias em MEV do arame perlítico torcido, seção longitudinal, em diferentes aumentos.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 15 mostra a microestrutura longitudinal do arame não torcido. É possível ver as colônias de perlita agrupadas em várias direções. Em algumas regiões, é possível ver diferenças no formato dessas perlitas, havendo perlitas mais grossas em umas regiões e finas em outras. É também possível observar algumas perlitas quebradiças.

Figura 15 - Micrografia em MEV do arame perlítico não torcido, seção longitudinal.

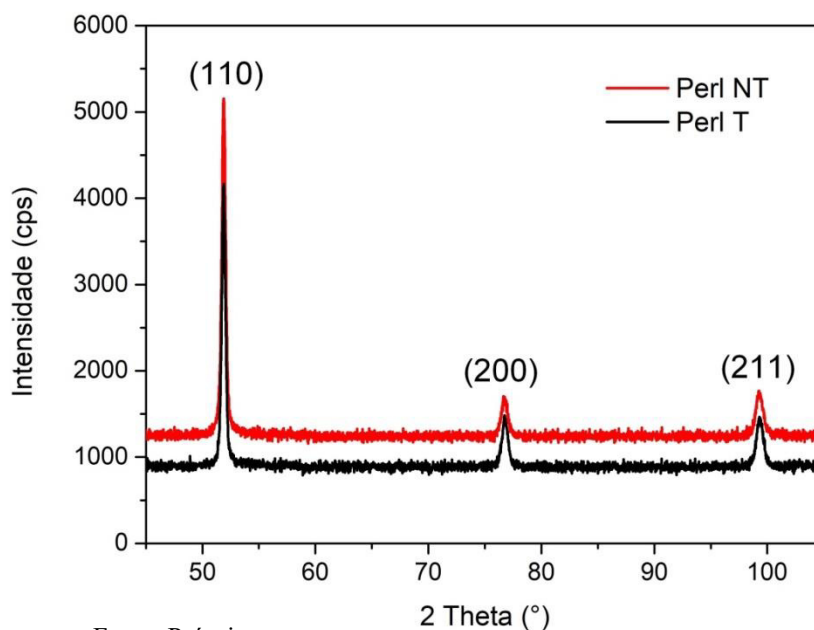


Fonte: Próprio autor

5.2. Caracterização por Raio X

A Figura 16 mostra o difratograma para os dois arames, torcido e não torcido, feitos de aço perlítico. É possível observar os três picos referentes à fase cúbica de corpo centrado (CCC), indicando que esse material possui uma matriz ferrítica. Esses três picos auxiliaram no cálculo da textura cristalográfica.

Figura 16 – Difratograma dos dois arames estudados nessa pesquisa.



Fonte: Próprio autor

5.3. Dureza Rockwell C dos arames

A Tabela 2 mostra os resultados de dureza na escala Rockwell C para os dois arames estudados. Há uma diferença de dureza entre as faces do arame torcido. A face tração apresentou uma maior dureza do que a face comprimida. O arame não torcido apresentou o maior valor de dureza nessa escala. Em média, a dureza desses aços perlíticos é maior do que a dureza para aços carbonos comerciais, como o aço 1020.

Tabela 2 – Medidas de dureza na escala Rockwell C para os arames analisados.

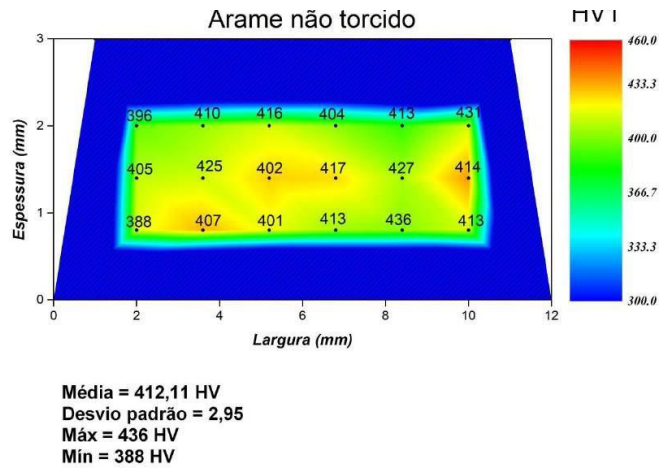
Rockwell C						
	1	2	3	4	Média	Erro
Perl T face tração	42	42	42	41,3	41,8	0,30
Perl T face comp	38,5	38	39	39	38,6	0,41
Perl NT face	43,2	43	42,9	42	42,8	0,46

Fonte: Próprio autor

5.4. Microdureza Vickers na seção transversal dos arames

O perfil de microdureza Vickers na seção transversal para a amostra não torcido é mostrado na Figura 17. Foi observada uma média de 412,11 HV, com a menor medida observada de 388 HV e a maior medida de 436 HV. O erro da medida foi baixo (de 2,95), isso indica uma certa homogeneidade na distribuição dos valores de dureza na região analisada.

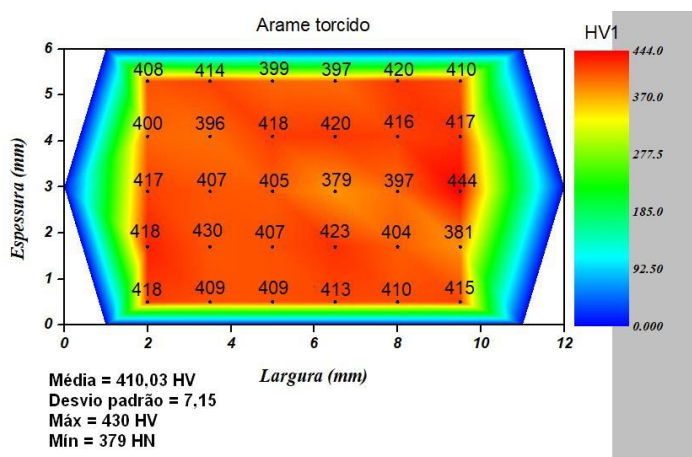
Figura 17 - Perfil de microdureza Vickers para o arame perlítico não torcido.



Fonte: Próprio autor

Para o arame torcido, o perfil de microdureza Vickers na seção transversal é apresentado na Figura 18. Foi observada uma média de 410,03 HV, com a menor medida observada de 379 HV e a maior medida de 430 HV. A distribuição dos valores de dureza na seção transversal desse arame não é tão homogênea como no caso do arame não torcido (erro de 7,15). Comparando a média de dureza para os dois arames, os valores são próximos, indicando praticamente a mesma dureza na seção transversal.

Figura 18 - Perfil de microdureza Vickers para o arame perlítico torcido.

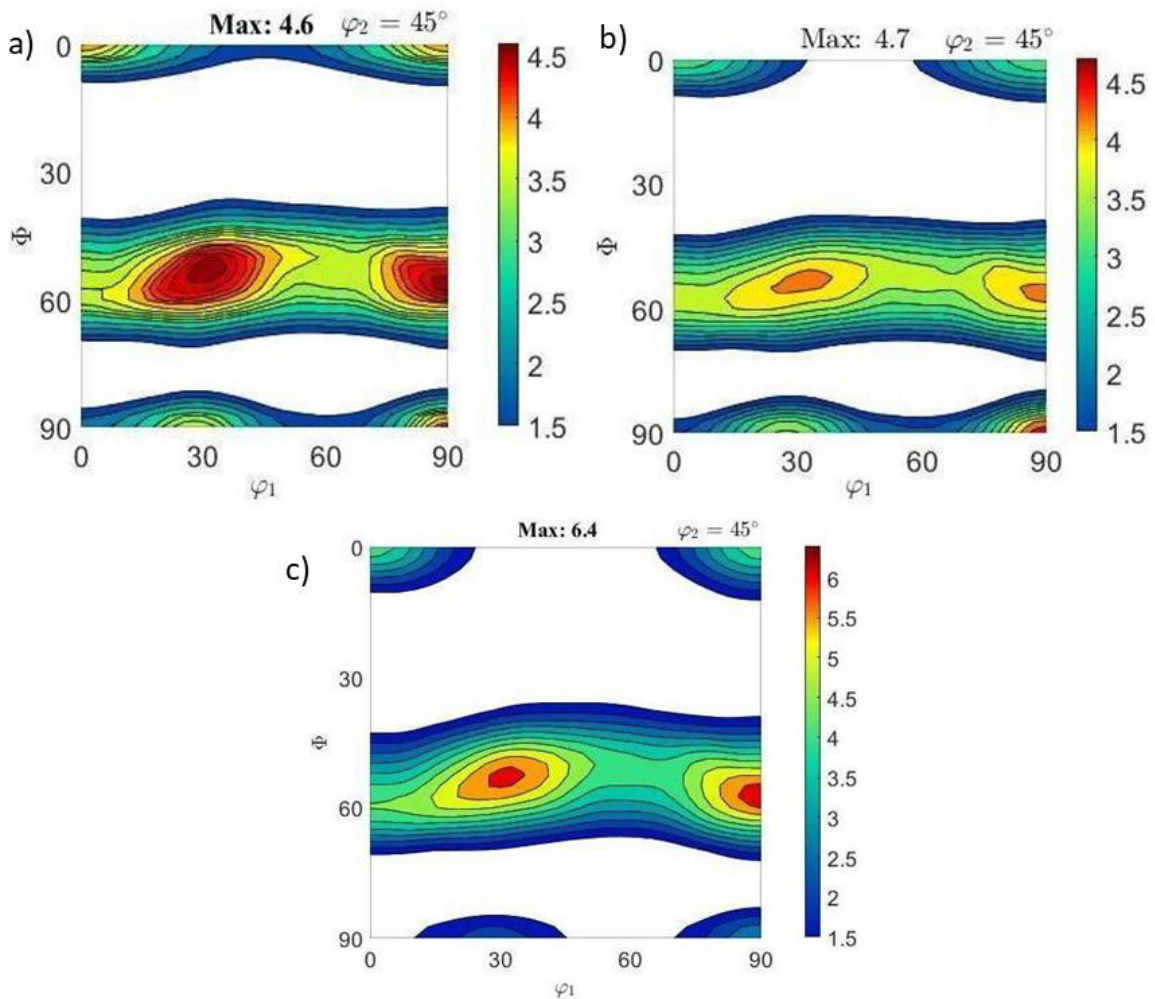


Fonte: Próprio autor

5.5. Macrotextura de raio X

As seções de $\varphi_2=45^\circ$ para o arame torcido são mostradas na Figura 19. A textura na face tracionada é mostrada na Figura 19a, na face comprimida na Figura 19b e no meio do arame no sentido de laminação é mostrada na Figura 19c.

Figura 19 – Macrotextura a) na face tracionada, b) face comprimida e c) no meio da amostra do arame torcido.

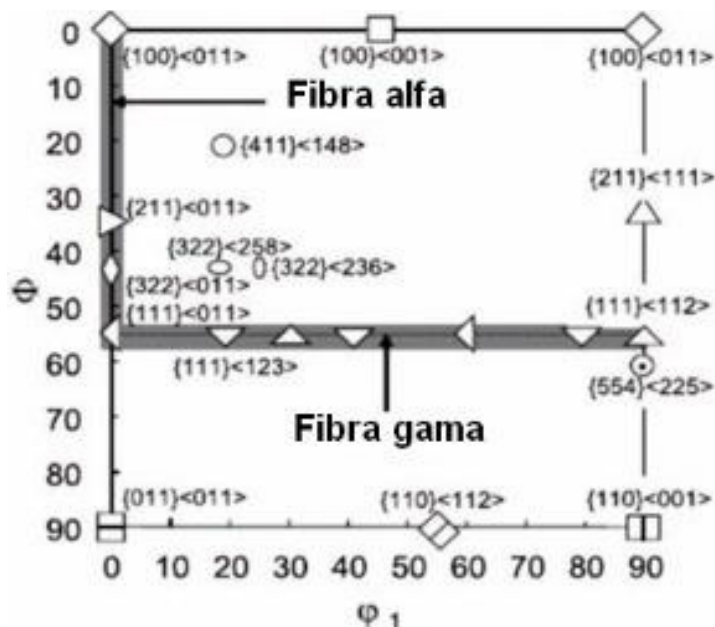


Fonte: Próprio autor

Há a presença da componente cubo girado para as três macrotexturas feitas em diferentes posições do arame torcido. A componente cubo girado $(001)[1\bar{1}0]$ e $(001)[\bar{1}\bar{1}0]$ e mais intensa na face tracionada do que na face comprimida. Essa textura é típica de materiais laminados a frio. Para aços perlíticos, grãos com a orientação de textura de cubo girado são caminhos preferenciais para a propagação de trincas induzidas por hidrogênio. Também há a presença da componente Goss $(110)[001]$ tanto na face tracionada como na face comprimida. Já no meio do arame, a textura de Goss é bem fraca. A componente Goss é característica do

processo de trefilação causado pelo atrito do arame com os rolos durante o processo de laminação. A eliminação dessa componente é feita através de tratamentos térmicos adequados. Há uma anisotropia na textura quando feita em regiões dependentes da espessura do arame (meio mais texturado do que as faces). Para todas as texturas do arame torcido, as componentes mais intensas estão na textura de fibra gama. A componente de textura gama apresenta o plano cristalográfico (111), que é o plano mais compacto para a estrutura CCC e, portanto, grãos com essa orientação oferecem mais resistência à propagação de trincas. A Figura 20 mostra um ábaco para a seção de $\varphi_2=45^\circ$ que contem os principais pares de orientações encontradas nas ODFs para os arames períticos.

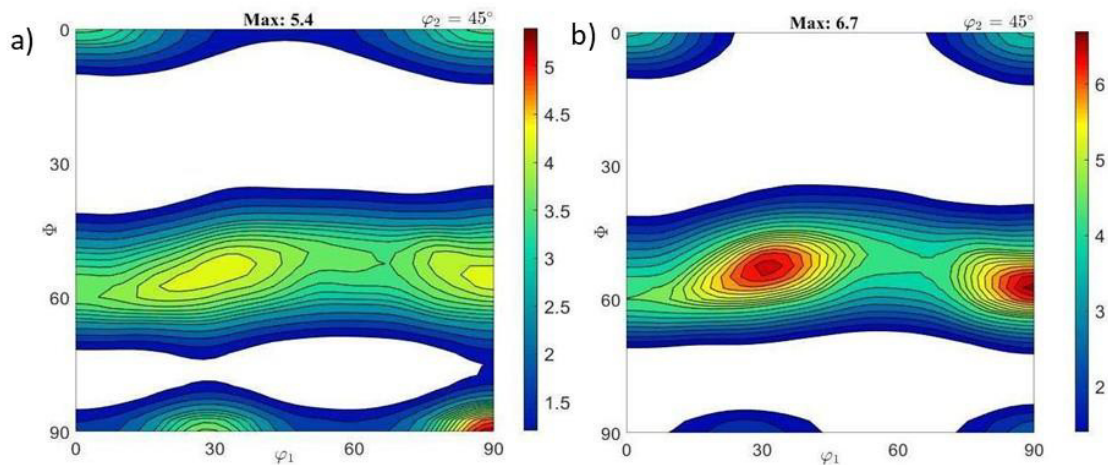
Figura 20 – Ábaco para uma seção de $\varphi_2=45^\circ$ que auxilia na identificação dos pares de orientações para macrotexturas.



Fonte: Annan, K. A, 2013

A Figura 21 mostra as texturas para uma seção de $\varphi_2=45^\circ$ para o arame perlítico não torcido. No caso do arame não torcido, a textura foi feita em uma das faces e no meio do arame na seção de laminação. A textura feita na face mostrou como componente mais intensa a componente Goss (110)[001]. Já a componente Goss para a textura no meio do arame tem uma intensidade muito fraca. Tanto na face como no meio do arame, há a presença das componentes de cubo girado. A textura feita no meio do arame apresentou as componentes de textura de fibra como as mais intensas. Assim como para o arame torcido, o arame não torcido apresentou textura mais intensa no meio do arame do que na face.

Figura 21 - Macrotextura a) na face, e b) no meio da amostra do arame não torcido.

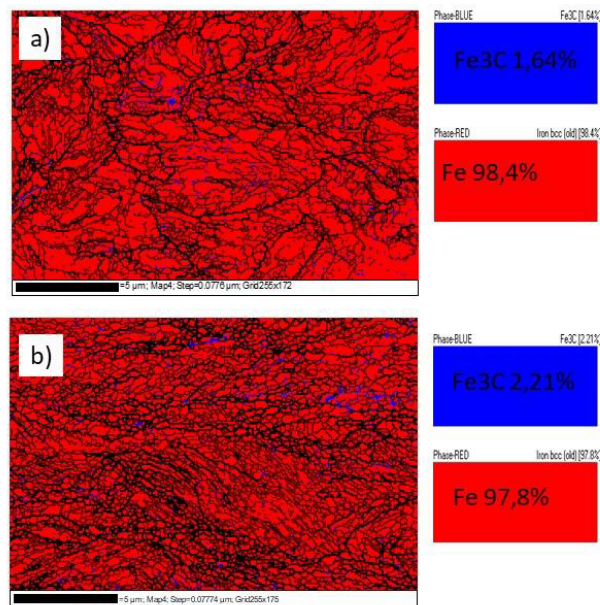


Fonte: Próprio autor

5.6. Microtextura por EBSD

A Figura 22 mostra a quantificação de fases (ferro alfa + cementita) medidas em duas posições diferentes para o arame não torcido. A Figura 22a mostra que próximo a superfície, o percentual de cementita é 1,64% (em massa). Já a quantidade desse constituinte no meio da amostra é 2,21% (Figura 22b).

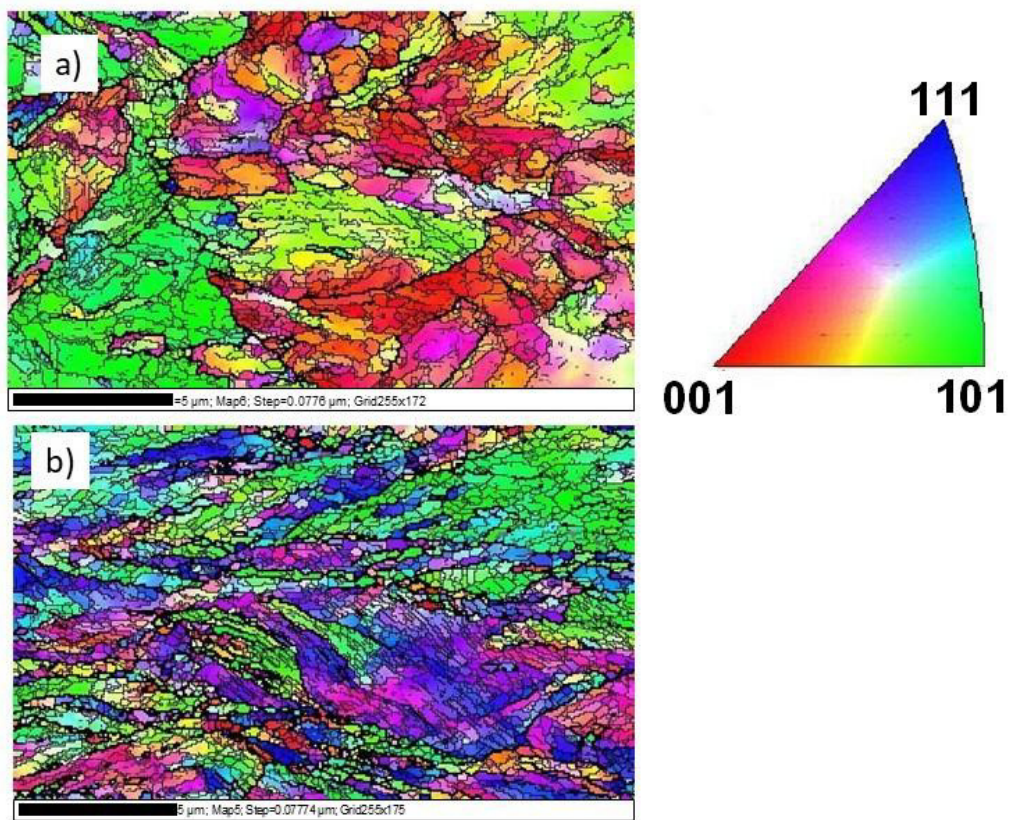
Figura 22 – Quantificação de fases para o arame não torcido a) na superfície e b) no meio do arame.



Fonte: Próprio autor

A Figura 23 mostra a distribuição dos grãos e suas orientações para o arame não torcido. Na Figura 23a, a microtextura foi medida em um ponto próximo à superfície. Há a presença de grãos com orientações (001), que favorecem a propagação de trincas. A presença de grãos com orientação (101) também pode ser observada. Já no meio da amostra (Figura 23b), os grãos são menores e a presença de grãos com orientação (001) é quase inexistente, prevalecendo os grãos com orientação (101) e (111).

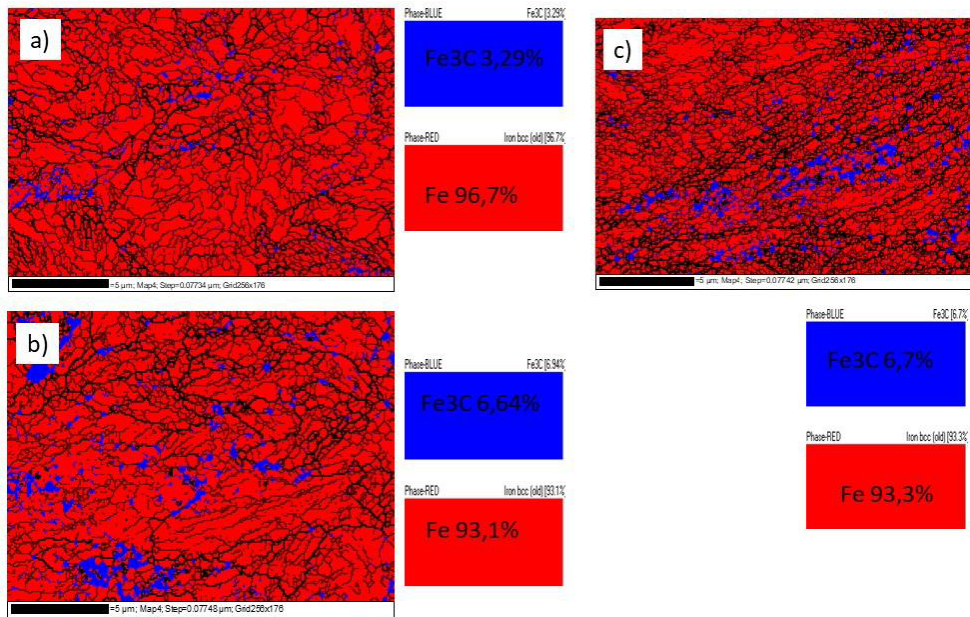
Figura 23 – Mapa de orientação dos grãos a) na superfície e b) no meio do arame não torcido.



Fonte: Próprio autor

A Figura 24 mostra a quantificação de fases em posições diferentes para o arame torcido. Os teores de cementita variam entre as faces e a posição central da amostra. A face comprimida apresenta maior teor de cementita do que a face tracionada (Figura 24b). Já o teor de cementita encontrado no meio da amostra é próximo do valor encontrado na superfície comprimida (Figura 24c).

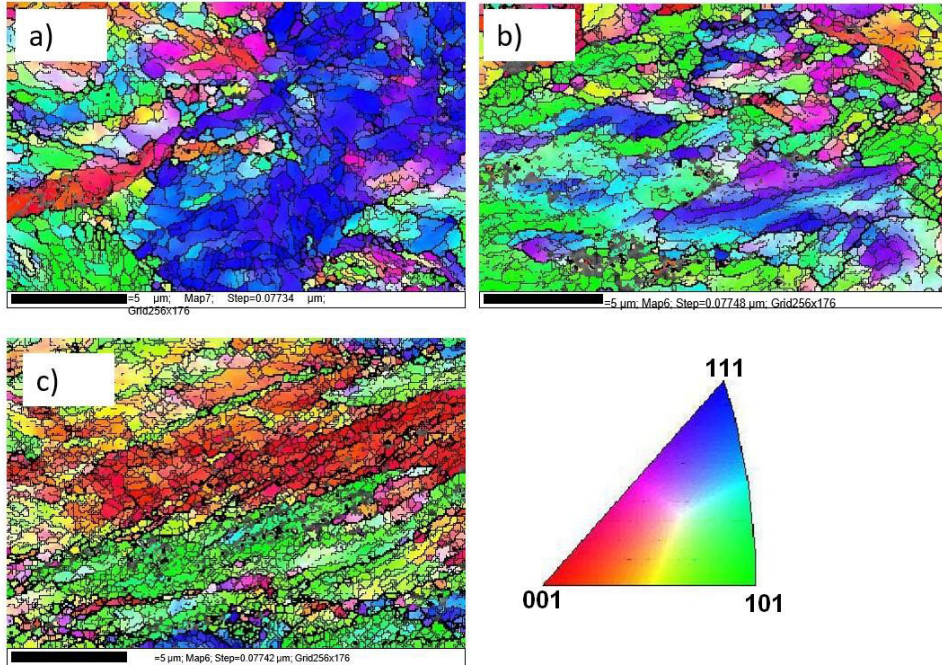
Figura 24 - Quantificação de fases para o arame torcido a) na face tracionada, b) na face comprimida e c) no meio da amostra.



Fonte: Próprio autor

Nos materiais policristalinos como os metais, as propriedades mecânicas estão ligadas as orientações dos cristais. A Figura 25 apresenta os resultados de microtextura de EBSD para o arame perlítico torcido. É possível observar que na face tracionada (Figura 25a) há a presença majoritária de grãos do tipo (111). Já na face comprimida (Figura 25b), a orientação predominante para os grãos é (111) e (101). Essas orientações dificultam a propagação de trincas. A família de planos {110} é conhecida como a principal família de planos de deslizamentos na estrutura CCC, o que pode levar à ativação de vários sistemas de deslizamentos que podem resultar em uma taxa acelerada para o crescimento de trincas (MASSOUMI, 2018). Para a microtextura no meio da amostra (Figura 25c), as orientações (001) e (101) são as mais frequentes, sendo que a orientação (001) desfavorece o arame perlítico, pois é o caminho preferencial de trincas por ter maiores espaços interatômicos. Outra diferença é que no meio da amostra, os grãos são menores, indicando o efeito da torção nos mesmos (Figura 25c).

Figura 25 - Mapa de orientação dos grãos a) na face tracionada, b) na face comprimida e c) no meio do arame torcido.



6. CONCLUSÃO

Avaliando os resultados presentes nesse trabalho, pode-se concluir que:

- Os dois arames analisados possuem microestrutura perlítica, com lamelas de cementita quebradiças no arame torcido,
- Não houve diferenças expressivas da microdureza na seção transversal das amostras para os arames torcidos e não torcidos. Ambos têm microdurezas parecidas;
- Dureza Rockwell C semelhante para os dois arames;
- A textura na face do arame sem torção é menos intensa do que nas faces do arame torcido. Na face do arame não torcido, a componente de Goss é a mais intensa, já no arame torcido, em ambas as faces a textura de fibra gama é a mais intensa, apesar de haver também a componente Goss.
- Tanto para o arame torcido como para o não torcido, a textura no meio do arame é mais intensa do que nas faces, prevalecendo a textura da fibra gama.
- Os grãos no meio do arame tanto torcido como não torcido são mais refinados do que próximo as faces.
- Presença da orientação de grão (100) com mais frequência na face do arame torcido e no meio do arame não torcido.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões futuras para esses arames, temos:

- Realizar diversos tipos de tratamentos termicos para modificar a microestrutura;
- Medir novamente a textura de raio X para ver sua variação em função das modificações na microestrutura dos arames;
- Fazer medidas de EBSD aprofundando mais o estudo da microtextura nesses arames, levando em consideração outros parâmetros como fator de Taylor e desorientação média de Kernel;
- Realizar ensaios de tração nesses arames relacionando os resultados dos ensaios com a textura do material.

REFERENCIAS

ANNAN, K. A.; SIYASIYA, C. W.; STUMPF, W. E. Effect of hot rolling conditions on ridging in 16wt% Cr ferritic stainless steel sheet. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 113, n. 2, p. 91-96, 2013.

BRANDALEZE, E. Structural Evolution of Pearlite in Steels with Different Carbon Content under Drastic Deformation during Cold Drawing, *Procedia Mater. Sci. - Int. Congr. Sci. Technol. Metall. Mater. SAM - CONAMET 2013*. 8 (2015) 1023–1030. Doi:10.1016/j.mspro.2015.04.164.

CULLITY, Bernard Dennis. *Elements of X-ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing, 1956.

DIETER, G. E. – *Metalurgia Mecânica*, 2a edição, Guanabara Koogan, Rio de Janeiro - 1981.

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.

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

https://pt.wikipedia.org/wiki/Difra%C3%A7%C3%A3o_de_raios_X Acesso em: 30 de outubro de 2021

MASOUMI, Mohammad et al. Role of crystallographic orientation and grain boundaries in fatigue crack propagation in used pearlitic rail steel. *Materials Science and Engineering: A*, v. 722, p. 147-155, 2018.

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.

PADILHA, A. F., F. SICILIANO JR - Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura. 3 ed., ABM, São Paulo, 2005

“Review of deformation mechanisms, texture, and mechanical anisotropy in zirconium and zirconium base alloys,” em *Zirconium in the Nuclear Industry: 14th International Symposium*, RUDLING, P. ; KAMMENZIND, B.

REIS, Luciano de Castro. ESTUDO DO BORO E DAS CONDIÇÕES DE TREFILAÇÃO NA DELAMINAÇÃO DE AÇOS PERLÍTICOS. Orientador: Prof. Vicente Tadeu Lopes Buono. 2009. Dissertação (Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SILVA, André Luiz da Costa e; MEI, Paulo Roberto. Aços e ligas especiais. 3. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2010.

SILVA, J. J. M. Análise de Textura e propriedades magnéticas em aços maraging 300 e 350 em várias condições de tratamento. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2005.

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

TORIBIO, Jesús; GONZÁLEZ, Beatriz; MATOS, Juan-Carlos; AYASO, Francisco-Javier. Influence of Microstructure on Strength and Ductility in Fully Pearlitic Steels. *Metals*, [s.l.], 2016.