



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

**AMANDA DE MONT SERRAT BONFIM DE SOUZA**

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA TORÇÃO EM ARAME DE AÇO PERLÍTICO**

**FORTALEZA**

**2020**

AMANDA DE MONT SERRAT BONFIM DE SOUZA

## **ANÁLISE DOS EFEITOS DA TORÇÃO EM ARAME DE AÇO PERLÍTICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará como requisito obrigatório à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu

FORTALEZA

2020

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)

---

S713a Souza, Amanda de Mont Serrat Bonfim de.  
Análise dos efeitos da torção em arame de aço perlítico / Amanda de Mont Serrat Bonfim de Souza. – 2020.  
37 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2020.  
Orientação: Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu.

1. Trefilação . 2. Aço perlítico . 3. Torção. I. Título.

CDD 669

---



AMANDA DE MONT SERRAT BONFIM DE SOUZA

## **ANÁLISE DOS EFEITOS DA TORÇÃO EM ARAME DE AÇO PERLÍTICO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à 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)

---

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

---

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

À minha mãe, Marcia.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Marcia e Raimundo, por terem sido o grande motivo de eu ter conseguido chegar até o fim deste curso.

À minha família, por todo amor e apoio.

Ao professor Hamilton, por toda a paciência, ajuda e orientação, que foi de extrema importância e tornou tudo possível.

À amiga e irmã da vida, Rayssila, por todo apoio, parceria e por saber que sempre posso contar com sua ajuda.

Ao Antônio Bandeira, por se mostrar sempre disposto a ajudar, e tornar muito mais descomplicado o caminho dentro da universidade.

Aos meus amigos, Lucas Moura, Isaac Mesquitas, e tantos outros que a UFC me proporcionou e os levo para vida.

À minha amiga Gisliane, por toda a torcida para este momento, e apoio nos momentos difíceis.

Ao LACAM, pela oportunidade de trabalhar no início da graduação, o que me proporcionou bastante aprendizado, e por fornecer o material para este estudo.

Ao Centro Acadêmico e Metal Soluções Júnior por todo o desenvolvimento que foi de grande importância para a minha vida profissional.

“Os dias prósperos não vêm por acaso;  
nascem de muita fadiga e persistência.”

Henry Ford

## RESUMO

O aço perlítico apresenta características de resistência e ductilidade favoráveis à sua aplicação em arames, e o entendimento de como esse arame se comportará durante operação é de extrema importância para se garantir uma eficiência e segurança no dia a dia. Neste estudo foi analisado o impacto da torção em um arame constituído de aço perlítico. O material apresentou estrutura lamelar refinada, resultado do processo de trefilação o qual foi anteriormente submetido, e conseqüentemente menor espaçamento interlamelar da estrutura perlítica. As lamelas de cementita também sofrem impacto, sendo quebradas em algumas regiões como resultado do processo de torção.

**Palavras-chave:** Trefilação, Aço Perlítico, Torção

## **ABSTRACT**

The pearlitic steel shows resistance and ductility as characteristics that are favorable to its application in wires. Thus, the understanding of how the wire will behave during an operation is extremely important to ensure efficiency and safety in everyday life. The impact of torsion on a wire made of pearlitic steel was analyzed in this study. The sample presented a refined lamellar structure and a smaller interlayer spacing of the pearlitic structure, which it got from the wire drawing process that it was previously submitted. The cementite lamellae are also impacted when fractured in some areas as a result of the torsion process.

Keywords: Wire Drawing, Pearlitic Steel, Torsion

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática das microestruturas para a liga ferro-carbono na composição eutetóide.....	14
Figura 2 – Representação da formação da perlita por nucleação e crescimento de onde (a) até (d) são etapas sucessivas em sequência temporal.....	15
Figura 3 - Microestrutura da seção longitudinal de um aço eutetóide transformado a 580°C e trefilado. (a) $e = 0.61$ , (b) $e = 1.19$ , (c) $e = 2.06$ , (d) $e = 2.63$ .....	16
Figura 4 - Ilustração esquemática do mecanismo pelo qual vazios nucleiam, crescem e coalescem.....	17
Figura 5 – Tensão cisalhante a 45°.....	18
Figura 6 – Distribuição de forças a 45°.....	19
Figura 7 – Modo de falha em teste de torção sob tensão de cisalhamento $t$ , (a) dúctil e (b) frágil.....	19
Figura 8 – Falha na ductilidade longitudinal resultando em fratura em hélice sob as seguintes forças: $\sigma_1$ : tensão de tração, $\sigma_3$ : tensão de compressão e $\tau$ : tensão de cisalhamento.....	20
Figura 9 – Arame novo sem torção.....	27
Figura 10 – Arame novo com torção.....	28
Figura 11 – Ampliação da deformação do arame novo com torção.....	29
Figura 12 – Amostra fraturada em serviço - detalhe da cementita quebrada.....	30
Figura 13 – Amostra fratura em serviço – detalhe de região inicial de uma trinca.....	30
Figura 14 – Amostra fraturada em serviço - detalhe da borda de uma trinca.....	31
Figura 15 – Ponta da trinca – região muito deformada.....	32

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MEV	Microscópico Eletrônico de Varredura
LACAM	Laboratório de Caracterização de Materiais
SCC	Stress Corrosion Cracking
HE	Hydrogen Embrittlement

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Aços Perlíticos .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Torção em Arames .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.1 Delaminação .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2 Impactos na Resistência .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3 Efeitos da Torção no Arame Trefilado .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.1 Comportamento da Ferrita .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.2 Comportamento da Textura do Arame de Aço Perlítico .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.3 Microdureza .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4 Comportamento da Fratura .....</b>	<b>26</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1 MATERIAIS .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2 MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>29</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>35</b>
<b>6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>36</b>
<b>7 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>37</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Existem muitos usos para arames de aço perlítico trefilados a frio, 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 a mais 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). Especificamente, a armadura de tensão enrolada helicoidalmente feita de aço de carbono médio sustenta completa ou parcialmente as cargas de tração. A corrosão sob tensão (SCC) e os danos à fragilização por hidrogênio (HE) nos fios de blindagem deterioram o desempenho da tubulação flexível por falha prematura.

Devido a sua diversidade de aplicações, é de grande importância o entendimento de como esses arames irão se comportar, pois podem sofrer os mais diferentes esforços durante operação, como compressão, tração e torção. A previsão desses comportamentos permite maior segurança a todos os envolvidos.

Um processo para fabricação de arames é a trefilação a frio, que permite a criação de arames nas mais diversas variedades. Comumente se utiliza aço perlítico para esse processo de trefilação, por conta de sua estrutura lamelar, que quando submetida à trefilação altera a organização da sua microestrutura, e suas lamelas são reorganizadas, alcançando nova orientação e seguindo a mesma orientação da trefilação. Essa alteração na microestrutura também resulta na redução do espaçamento entre as lamelas da perlita, permitindo melhorias nas propriedades desse aço.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O presente estudo tem como objetivo compreender o comportamento de um arame de aço perlítico trefilado a frio após submetido a teste de torção.

### **2.2 Objetivos Específicos**

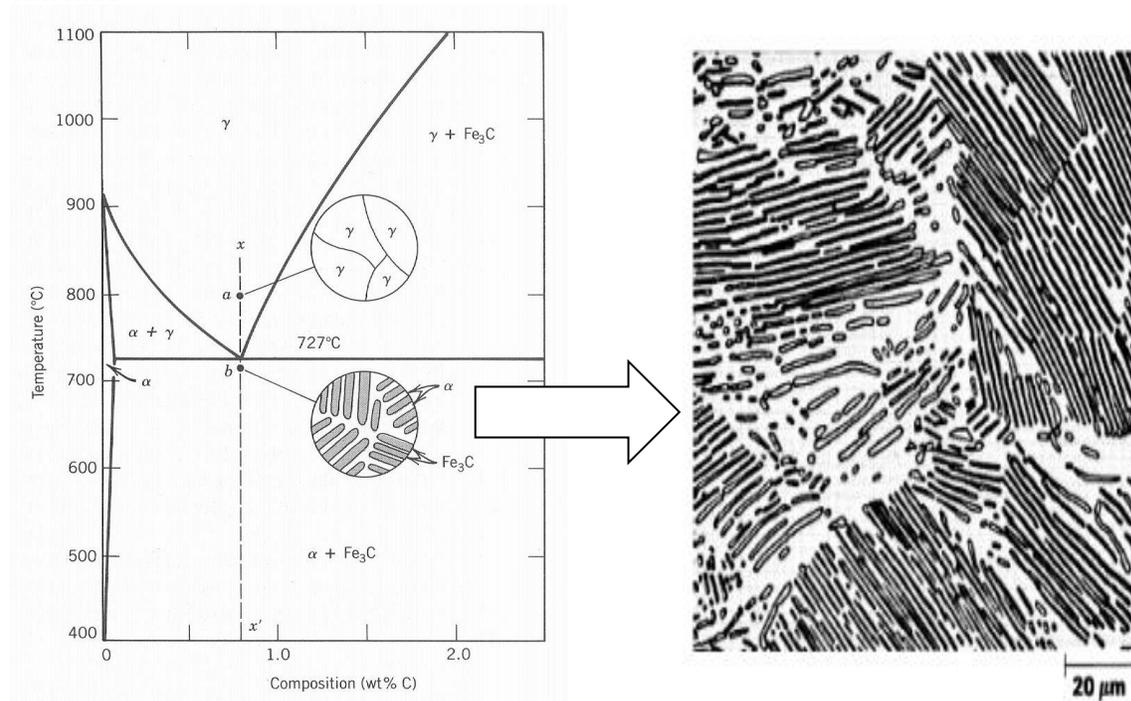
- Investigar microestrutura pós trefilação.
- Investigar impacto na microestrutura após torção.
- Analisar impacto das tensões na área fraturada.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aços Perlíticos

Os aços perlíticos 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 deixa de ser estável e 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



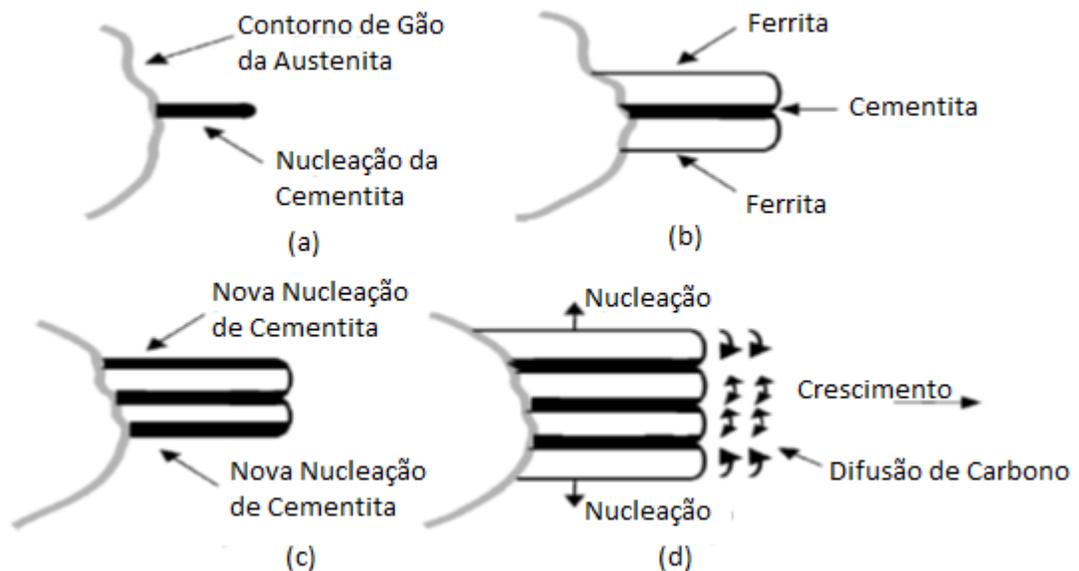
Fonte: Tschipschin, Sinatora e Goldenstein (1986).

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, 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).

O crescimento em questão se dá por meio de difusão e apresenta curto alcance, assim resulta em uma estrutura de pequenas colônias de perlita com distintas orientações lamelares (Figura 2).

Figura 2 – Representação da formação da perlita por nucleação e crescimento de onde (a) até (d) são etapas sucessivas em sequência temporal



Fonte: Elwazri, Yue e Wanjara (2005).

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 perlíticos, pois permitem grandes reduções de área com o processo de trefilação a frio (TORIBIO; GONZÁLEZ; MATOS, 2014).

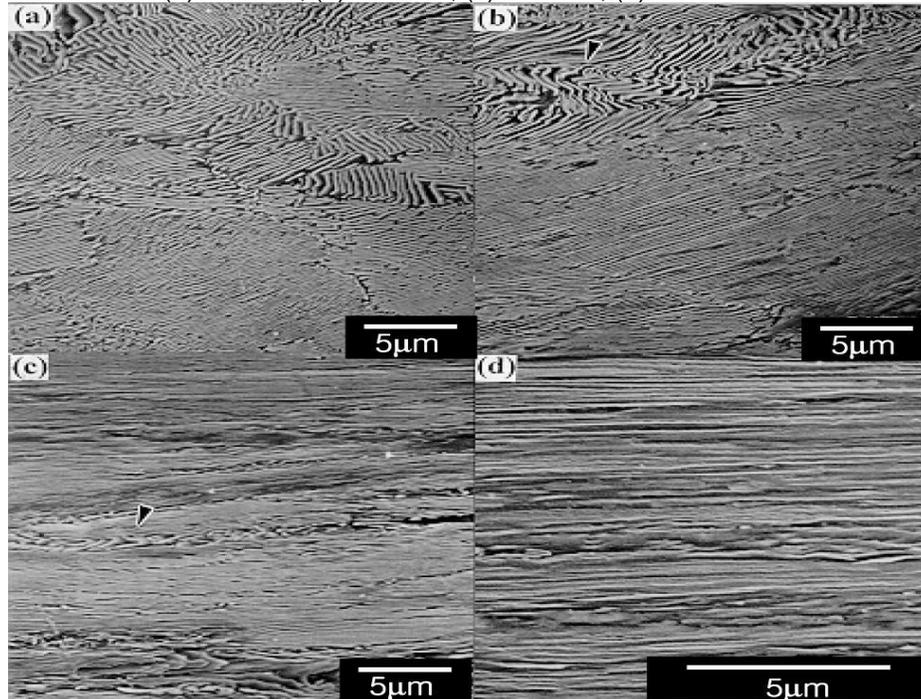
A ductilidade obtida pode resultar da descontinuidade da cementita lamelar, o que favorece a acomodação de grandes quantidades de deformação no plano de escorregamento às lamelas (TORIBIO; GONZÁLEZ; MATOS, 2014).

O processo de trefilação é capaz de proporcionar aumento da resistência

mecânica de aços perlíticos. Com isso também se obtém um aumento de grau de ductilidade, apesar do aumento da resistência, a qual é relacionada ao tamanho de grão da austenita. Já a resistência mecânica da perlita é influenciada pelo comportamento da ferrita, enquanto a cementita lamelar nesse caso age como barreira para os movimentos de discordâncias, além de limitar também o movimento da ferrita, resultando em transferência de carga da ferrita (fase mais mole) para a cementita (fase mais dura), levando assim ao aumento da taxa de endurecimento (ZHOU et al, 2018).

Na deformação plástica, a ferrita acumula tensões residuais, enquanto a cementita acumula tensões de resistência à tração, quando inicialmente as lamelas de ambas as fases da perlita procuram se alinhar ao eixo de deformação, levando à redução do espaçamento interlamelar  $e$ , e, por fim, a fragmentação da cementita lamelar, podendo se observar esse processo na Figura 3:

Figura 3 - Microestrutura da seção longitudinal de um aço eutetóide transformado a 580°C e trefilado. (a)  $e = 0.61$ , (b)  $e = 1.19$ , (c)  $e = 2.06$ , (d)  $e = 2.63$



Fonte: Nam, Song e Bae (2005).

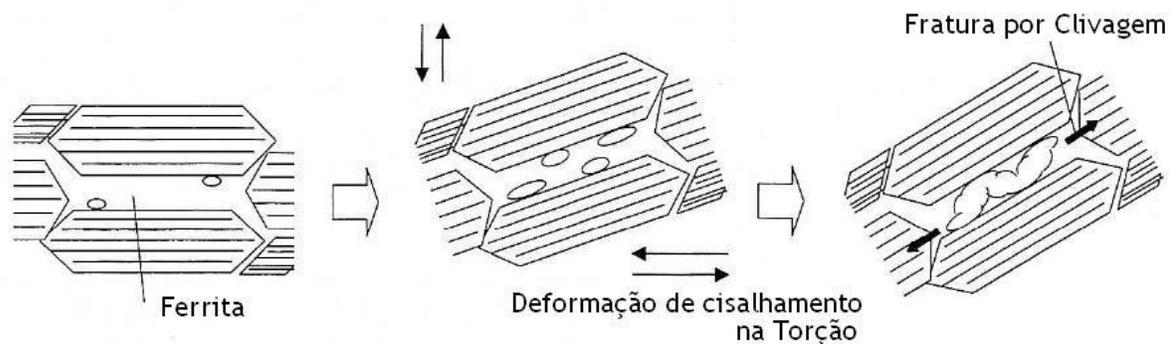
A influência do espaçamento interlamelar varia de acordo com as características do aço. Apesar de tanto a perlita grossa quanto a fina apresentarem coeficientes de

encruamento semelhantes, a perlita fina apresenta uma deformação mais uniforme e convergente a trincas por cisalhamento quando comparada com a perlita grossa, a qual deforma de maneira mais heterogênea. Ainda na perlita fina, durante a trefilação se observa a diminuição das placas de cementita até que se tornem pequenos fragmentos. Já a perlita grosseira apresenta intensas bandas de cisalhamento que tendem a formar trincas por cisalhamento. A orientação da colônia de perlita juntamente com a direção de trefilação irão determinar o comportamento da cementita no processo. (REIS, 2009)

Segundo Krauss (2005), durante o processo de trefilação a cementita lamelar da estrutura perlítica passa por grandes alterações, tornando-se mais fina à medida que se aumenta a deformação podendo levar a flexão ou até mesmo à fragmentação.

A perlita lamelar ao sofrer deformações plásticas torcionais, com presença de uma fina camada de ferrita pró-eutetóide, que é a ferrita que se formou acima da temperatura eutetóide, age como constituinte duro enquanto a ferrita fina atua como fase macia. As torções resultam em mais deformações cisalhantes paralelas ao eixo do arame, facilitando a nucleação, crescimento e coalescimento de vazios dentro da estrutura ferrítica. O resultado desses vazios é a formação de uma trinca que se propaga e finda em uma Delaminação (REIS, 2009). (Figura 4).

Figura 4 - Ilustração esquemática do mecanismo pelo qual vazios nucleiam, crescem e coalescem



Fonte: Shimizu e Kawabe (2002).

A clivagem é um processo de fratura transgranular, ou seja, onde a trinca se propaga no interior do grão. Nesse tipo de fratura se tem a propagação de uma trinca ao longo de um plano cristalino, sendo resultado da limitação de deformação plástica no material tensionado (XU et al, 2013).

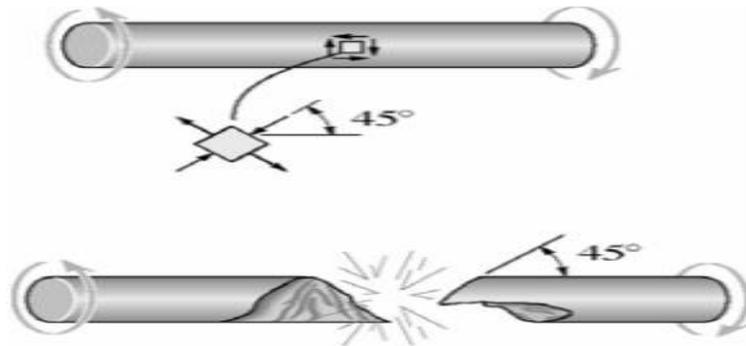
## 2.2 Torção em Arames

Para que se entenda o comportamento do arame durante operação é importante entender seu comportamento quando submetido a esforços cisalhantes. Quando este arame é submetido a um teste de torção, sofrendo deformação cisalhante, a fratura resultante apresentada é bastante relevante trazendo informações importantes para fabricação e desenvolvimento de produtos que sofrem torção e cisalhamento. É essencial que o arame apresente boas características de torção para um funcionamento seguro durante o uso.

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).

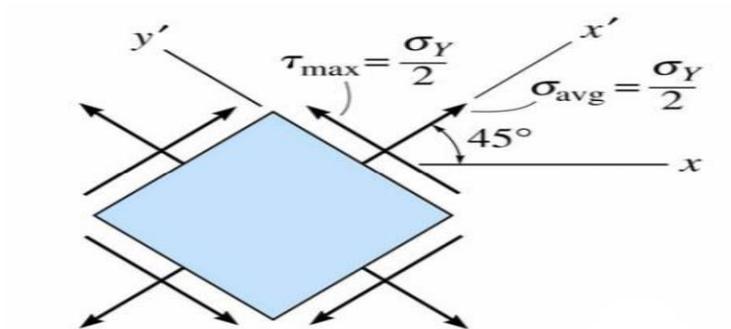
Quando submetido a tensões externas o escoamento do material tem início quando a tensão de cisalhamento máxima absoluta alcança o valor da tensão do material. Segundo Reis (2009), a tensão cisalhante atua a  $45^\circ$  em relação aos planos de tensão principal, como indicado na Figura 5. No teste de torção, o plano de fratura, que se encontra a  $45^\circ$  da direção de cisalhamento, tem a tensão de tração máxima como causadora da fratura (Figura 6)

Figura 5 – Tensão cisalhante a 45°



Fonte: Buffoni (2017)

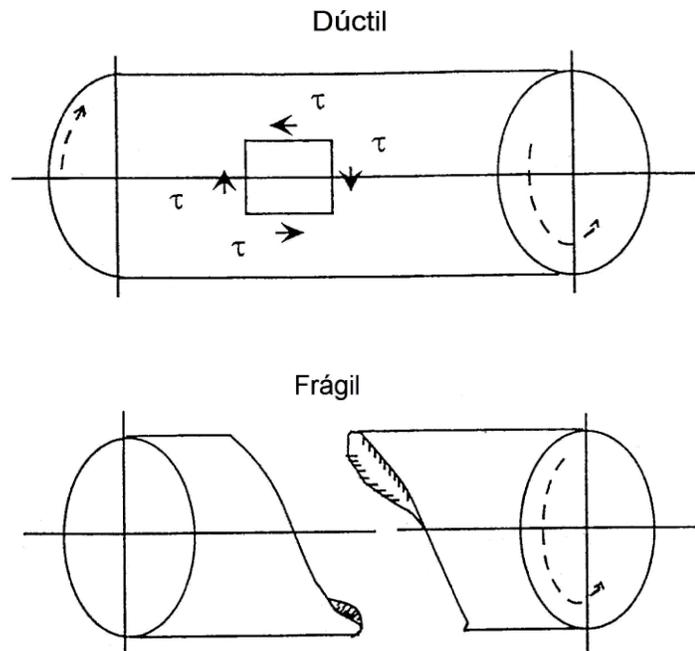
Figura 6 – Distribuição de forças a 45°



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 7 (REIS 2009).

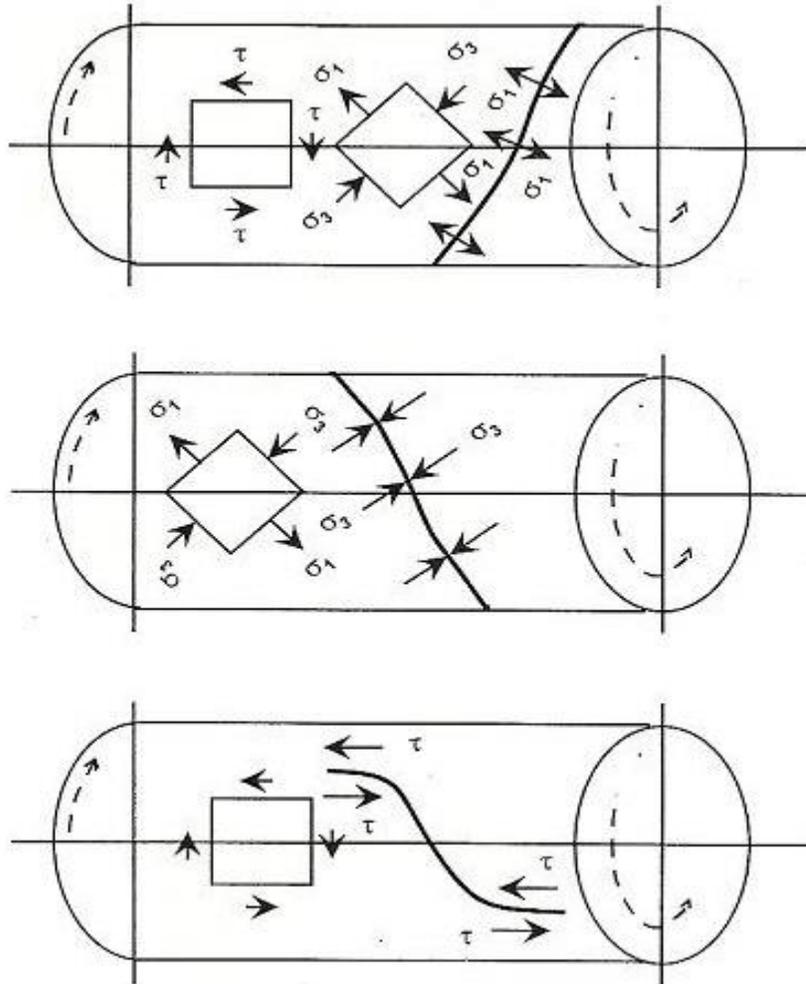
Figura 7 – Modo de falha em teste de torção sob tensão de cisalhamento  $t$ , (a) dúctil e (b) frágil



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 8).

Figura 8 – Falha na ductilidade longitudinal resultando em fratura em hélice sob as seguintes forças:  $\sigma_1$ : tensão de tração,  $\sigma_3$ : tensão de compressão e  $\tau$ : tensão de cisalhamento



Fonte: Reis (2009).

Nos arames, as propriedades de torção estão sujeitas a suas propriedades mecânicas, como por exemplo, a sua ductilidade. Além das características intrínsecas ao material, a fratura também é influenciada pelas condições de trabalho que o material é submetido.

### 2.2.1 Delaminação

A delaminação é um processo ainda pouco compreendido, pois envolve diversos fatores no material. De maneira geral os estudos indicam que está associada à uma queda na ductilidade do arame. Durante o processo de torção, a Delaminação ocorre

após a transição elasto-plástica, sendo caracterizada por uma falha longitudinal do arame.

Durante o processo de trefilação se formam micro vazios na região que sofreu cisalhamento, estes são diretamente proporcionais ao número de torções, e tendem a nuclear preferencialmente na interface Ferrita/Cementita, onde parte da cementita já se apresenta fragmentada pós processo de trefilação. A nucleação e coalescimento dos micros vazios juntamente com a tensão torsional é o que determinam a fratura por delaminação no arame perlítico (XU et al, 2013).

### 2.2.2 Impactos na Resistência

No processo de trefilação à frio, devido às mudanças ocasionadas na estrutura, o resultado ao aço perlítico é um aumento de sua resistência ao escoamento, já que a interface entre as fases beneficia o bloqueio ao movimento das discordâncias.

Para alguns aços perlíticos planos a definição do limite de escoamento é determinado pelo parâmetro de Hall-Petch, que relaciona a redução do espaçamento interlamelar ao aumento da dureza e do limite de escoamento. A relação de Hall-Petch pode ser vista na equação 1 abaixo.

$$\sigma = \sigma_0 + K \cdot \lambda^{-1/2}$$

Onde:

$\sigma$  = tensão aplicada;

$\sigma_0$  = tensão de atrito oposta ao movimento das discordâncias;

$K$  = constante de Hall-Petch (relacionada com o empilhamento das discordâncias);

$\lambda$  = espaçamento interlamelar.

No caso dos arames de aço perlítico trefilados a frio, a redução do espaçamento interlamelar é acompanhada pela alteração da orientação microestrutural. Toribio, González e Matos (2014) propuseram que para esses casos o limite de escoamento está relacionado com a tensão plástica acumulada durante o processo de trefilação, conforme equação 2 (especificada abaixo). tal relação tem sido adotada com sucesso para

trefilados de aços perlíticos com diferentes graus de deformação.

$$\sigma = \sigma_0 + [k \cdot (2\lambda_0)^{-\frac{1}{2}}] \cdot \exp\left(\frac{\varepsilon}{4}\right)$$

Onde:

$\sigma$  = tensão aplicada;

$\sigma_0$  = tensão de atrito oposta ao movimento das discordâncias;

$K$  = constante de Hall-Petch (relacionada com o empilhamento das discordâncias);

$\lambda_0$  = espaçamento interlamelar inicial;

$\varepsilon$  = deformação de trefilação.

## 2.3 Efeitos da Torção no Arame Trefilado

### 2.3.1 Comportamento da Ferrita

O processo de trefilação resulta em deformação plástica, assim como o de torção. Uma consequência dessa deformação plástica está ligada diretamente à textura desse aço, que acaba sendo suavizada. Como já mencionado anteriormente, o aço perlítico é formado por lamelas de ferrita e cementita, porém a cementita dificulta a formação da textura e microestrutura do perlítico. Para analisar o comportamento da textura durante a torção, Liu et al. (2012) realizou um estudo com arame ferrítico, podendo assim desconsiderar o efeito negativo da cementita.

O arame trefilado apresentou diferentes estruturas de acordo com a área analisada. Na região central se encontram grãos que seguem a direção da trefilação, alongados e com baixo ângulo de mesorientação, enquanto para regiões intermediárias existe aumento do ângulo, porém mantêm-se a forma do grão. Já nas regiões superficiais ocorre o aumento do ângulo e os grãos posteriormente alongados se quebram em grãos menores e de forma heterogênia. Esse aumento de ângulo pós torção inicial, demonstra a livre deformação plástica nos grãos alongados.

O estudo de LIU et al. (2012) apontou a coexistência da deformação plástica e

rotação de corpo-rígido, sendo apontado por ele como o principal estilo de deformação no processo de torção inicial, onde os grãos finos próximos aos alongados, a fim de evitar fraturas sofrem deformação plástica. Já se aumentada a deformação aplicada, os grãos anteriormente alongados, se quebram em ângulos menores. A deformação plástica do sistema de deslizamentos leva a deformações sucessivas.

Para se entender mais o comportamento na amostra, o modelo de Taylor, que relaciona o cisalhamento dos sistemas de escorregamento ativados com a deformação real, é uma ferramenta que pode ser utilizada para simulação da textura. Deste modo os grãos axiais mostraram seguir o modelo de Taylor, onde o deslizamento das discordâncias é o principal fator para a deformação, e assim, quanto mais torção, mais adequação ao modelo.

### **2.3.2 Comportamento da Textura do Arame de Aço Perlítico**

A deformação durante a trefilação impacta diretamente no desenvolvimento da fibra do aço perlítico, que após trefilação a frio apresenta uma fibra forte  $\langle 110 \rangle$  da matriz de ferrita. Ao se aplicar uma tensão cisalhante o alinhamento da cementita é alterado e ocorre liberação da concentração de tensões. Estas tensões atuam como resistência para o crescimento da fibra durante a trefilação. Assim, o rearranjo da cementita e das tensões pode levar a rotação de algumas lamelas de ferrita para um estado de baixa tensão e realçar a fibra na textura (GUO, 2015).

Ao se aplicar torção em um arame perlítico, Guo (2015) analisou que a deformação da torção é diretamente relacionada com a textura cisalhante, onde a direção cisalhante é tangencial ao plano cisalhante, e este é normal à torção axial. Ao se aumentar a tensão de torção, a microtextura próxima a superfície diminui linearmente, já a macro textura aumenta inicialmente, porém diminui com a continuidade da torção. Assim, no estágio inicial, com poucas voltas, a fibra é melhorada, porém ao continuar o processo submetendo o arame a um número maior de voltas, essa fibra é prejudicada. Nas voltas iniciais a fibra melhora e os grãos de ferritas são orientados de acordo com a direção de cisalhamento. Em certo momento, nas voltas iniciais, a fibra apresenta o ponto mais forte. A partir daí com a continuidade da torção, à medida que se aumenta o número de voltas,

a tensão cisalhante causa escorregamento da matriz ferrítica ao longo da direção de cisalhamento, provocando a redução gradual da fibra, até o ponto que o arame apresenta textura desordenada, não se podendo mais observar texturas cisalhante típicas.

### **2.3.3 Microdureza**

Assim como a resistência à tração, a microdureza também é um parâmetro que sofre influência direta das características da estrutura do aço perlítico trefilado. O espaçamento lamelar da perlita e a densidade das discordâncias são parâmetros importantes de influência à microdureza, enquanto esta não sofre influência pela redução da fibra de textura. No caso de arames perlíticos submetidos a torção, o fator de maior relevância é a densidade de discordâncias, a qual aumenta com o aumento de voltas ao qual o material é submetido. Este aumento de densidade, o empilhamento é facilitado e como consequência se tem o aumento da microdureza (GUO, 2015).

## **2.4 Comportamento da Fratura**

O fator de Taylor, já mencionado anteriormente, apresenta importante papel no entendimento do comportamento do material. Ao se analisar os grãos de uma amostra é possível observar que grãos com maior fator de Taylor tem menor chance de ativar o escorregamento do cristal, facilitando a fratura transgranular. Já no caso de grãos com baixo fator de Taylor, esses apresentam maior facilidade para o escorregamento. Neste caso a fratura é facilitada nos contornos.

Em uma amostra fraturada, o comportamento do grão, de acordo com o fator de Taylor, se revela de maneira diferente de acordo com a região. Para regiões próximas à fratura os grãos apresentam alto fator de Taylor, os maiores da amostra. Por conta desses altos fatores, a orientação desses grãos não são as ideais para a deformação, levando à ocorrência de fratura nestes grãos(LIU et al, 2016).

A desorientação dos contornos também não se distribui de maneira uniforme ao longo da amostra. Nas regiões distantes da fratura, é observado uma baixa

desorientação, o que dificulta a fratura e seu desenvolvimento. Já para região próxima à fratura se encontra o maior grau de desorientação, o que se leva a acreditar que esta é a região com maior concentração de deformação. Nesta mesma região também está a maior concentração de discordâncias e conseqüentemente maior resistência.

Na região próxima à trinca também se apresentam em sua maioria os contornos de baixo-ângulo, na medida que se distancia da trinca, o que se apresenta em maior quantidade são os contornos de alto-ângulo, que geralmente têm capacidade de impedir a propagação da fratura que se propaga ao longo dos contornos de baixo-ângulo(LIU et al, 2016).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 MATERIAIS**

- Arame trefilado de composição perlítica
- Microscópio Eletrônico de Varredura Quanta 450 FEG-FEI

#### **3.2 MÉTODOS**

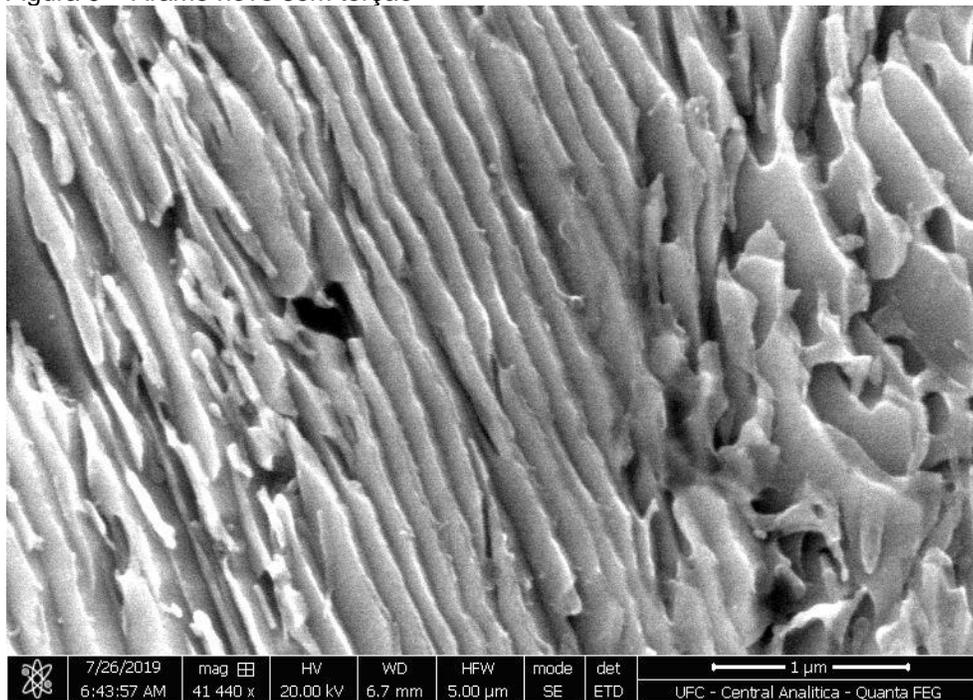
Foram realizadas imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura de uma amostra do material em questão como recebido, pós trefilação. Sem seguida foram realizadas imagens também no MEV, de amostra do material que sofreu torção, neste caso as imagens foram realizadas na região longitudinal da amostra fraturada.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 9, pode-se observar a microestrutura do material estudado, o qual foi previamente informado que se tratava de um aço perlítico. Comparando a figura 9 com a figura 3d, observa-se a semelhança da morfologia da estrutura, reforçando assim que se trata de um material perlítico trefilado. Como esperado pela literatura as lamelas em sua maioria estão preferencialmente em uma mesma orientação, tal característica se dá por conta do processo de trefilação.

De acordo com a literatura no aço perlítico antes da trefilação a perlita apresenta sua organização por meio de colônias, que se organizam de maneira independente e cada uma tem uma orientação particular, o processo de trefilação altera essa microestrutura orientando-a na mesma direção da trefilação, como pode ser visto na imagem.

Figura 9 – Arame novo sem torção



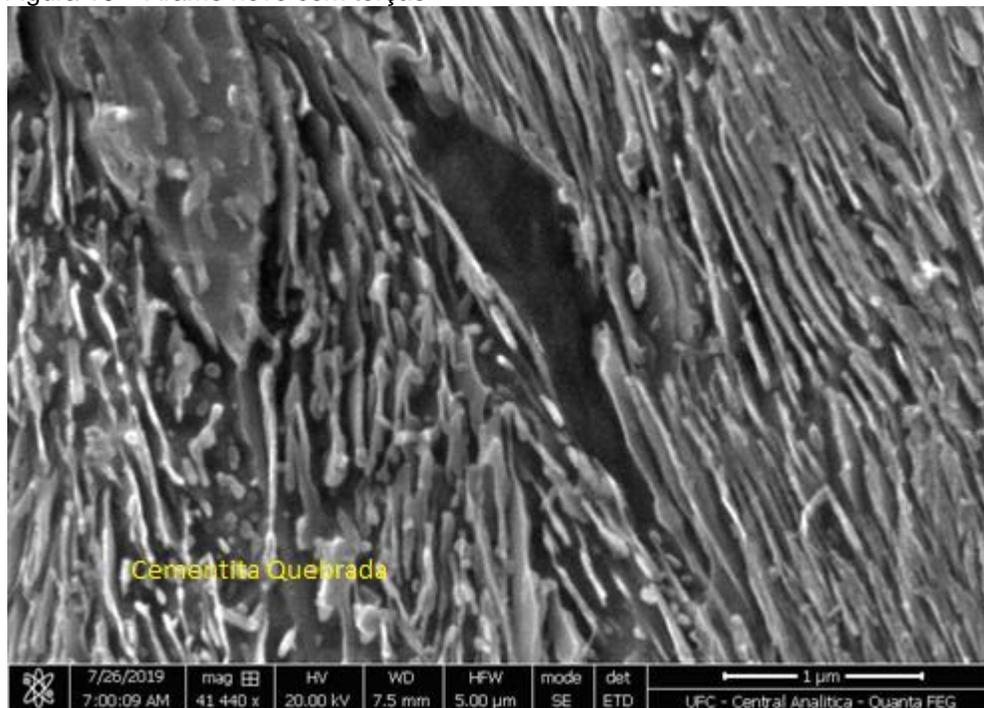
Fonte: LACAM (2020).

Todo o estresse de torção durante o teste resulta na torção das lamelas de perlita para atender a essa tensão aplicada. A Figura 10 mostra a imagem da microestrutura do arame de aço perlítico depois de submetido à torção. É possível notar que de maneira

geral ainda existe uma direção preferencial na distribuição das orientações das lamelas perlíticas, porém em algumas regiões se têm ferrita e cementita quebradas, resultado da fratura interna ocasionada pela aplicação de uma tensão perpendicular às placas de cementita.

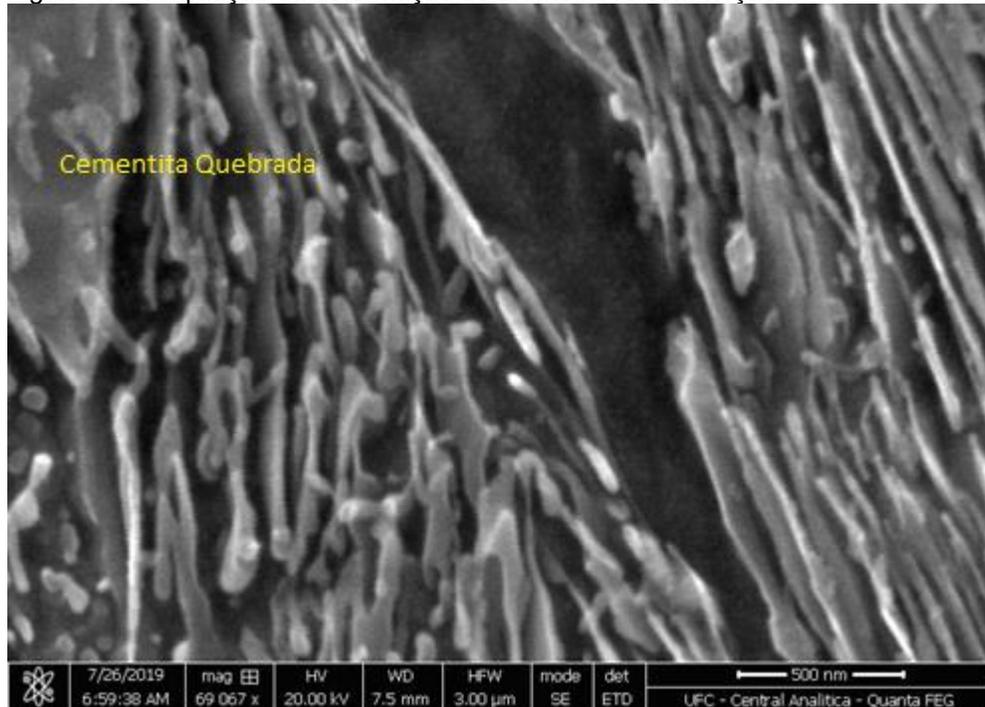
A região em torno dessas fases quebradas deve apresentar alto grau de discordâncias e, conseqüentemente, é previsto o aumento da dureza, devido ao aumento da área interfacial. O fato de a estrutura apresentar regiões com fases quebradas e ao mesmo tempo manutenção da orientação das lamelas em relação à trefilação, indica que tal orientação pode contribuir para o aumento da tensão de fratura. Ao comparar a figura 10 (pós-torção) com 9 (pré-torção) nota-se de maneira geral o refinamento das lamelas de perlita, após o processo de torção, que junto ao aumento de densidade das discordâncias, resulta no aumento da força de torção e conseqüente no aumento da deformação

Figura 10 – Arame novo com torção



Fonte: LACAM (2020).

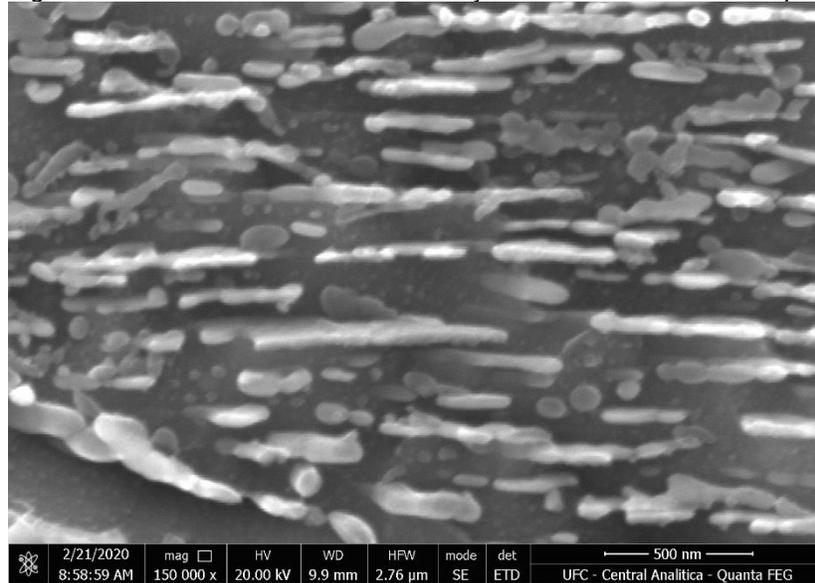
Figura 11 – Ampliação da deformação do arame novo com torção



Fonte: LACAM (2020).

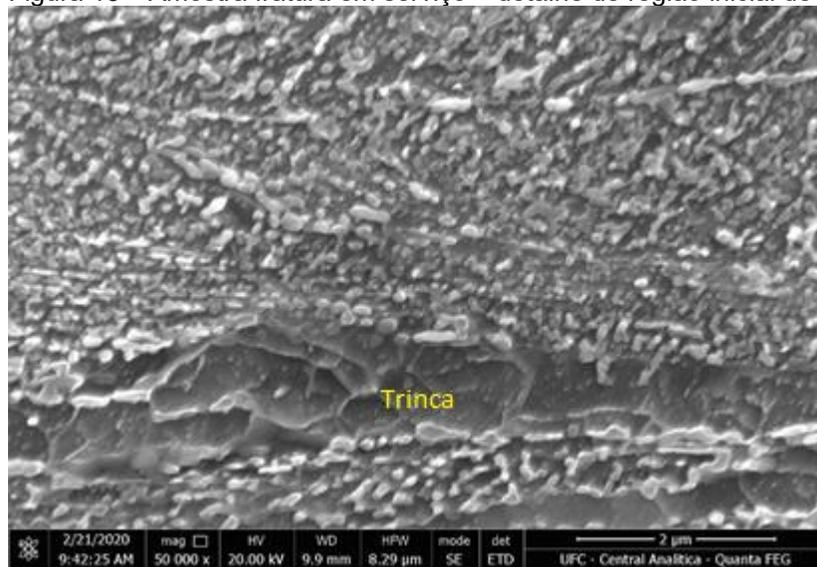
Microtrincas e micro vazios, segundo a literatura, são esperados nas regiões próximas às cementitas fraturadas, conforme as Figuras 12, 13 e 14. Essa característica se dá por conta da degradação da ductilidade do arame de aço perlítico, consequência do rearranjo que resulta em maior densidade de discordâncias, e facilitação do surgimento de trinca transgranular nessa região como consequência da redução de mobilidade das discordâncias. Essa característica é resultado do processo de trefilação, que ao aplicar sua força no material refina parte da estrutura da cementita em pequenas partículas nanométricas.

Figura 12 – Amostra fraturada em serviço - detalhe da cementita quebrada



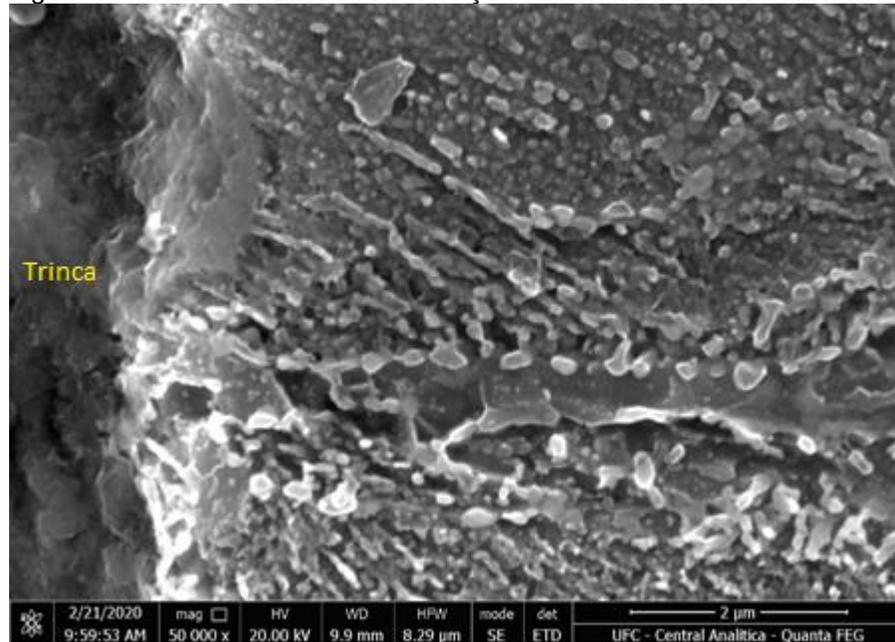
Fonte: LACAM (2020).

Figura 13 – Amostra fratura em serviço – detalhe de região inicial de uma trinca



Fonte: LACAM (2020).

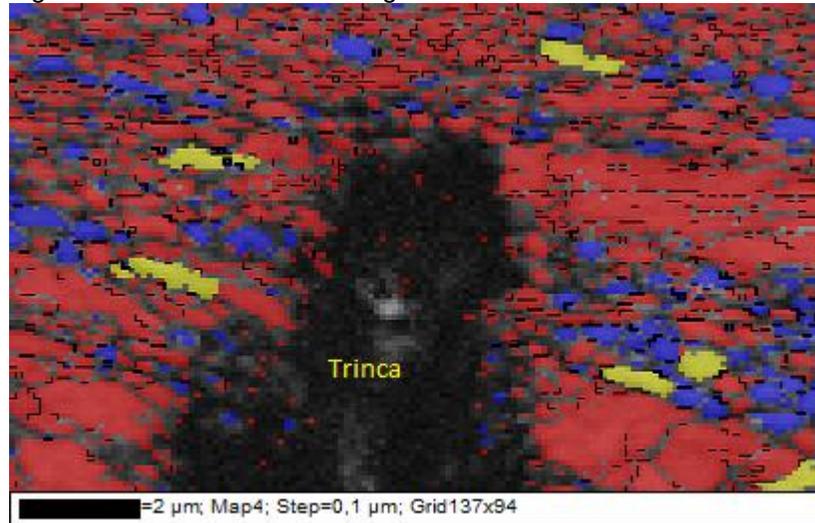
Figura 14 – Amostra fraturada em serviço - detalhe da borda de uma trinca



Fonte: LACAM (2020).

De acordo com a literatura, parte da cementita também é transformada em estado amorfo, ou seja, não é identificada uma organização ao longo da estrutura, e tem capacidade de absorver as discordâncias, resultando em maior tensão de falha na região. Assim, placas de cementita formadas por fases amorfas e nano cristais se mostram favoráveis a deformação no teste de torção. Para tensões mais baixas essas placas de cementita não sofrem nem dobramento, nem deformação. Enquanto para estruturas predominantemente formada com fases nano cristalinas, ocorre bloqueio do movimento das discordâncias causando a quebra das placas de cementita, falha e a deformação severa do local., como pode ser visto na figura 15, onde as regiões vermelhas caracterizam regiões com forte deformação.

Figura 15 – Ponta da trinca – região muito deformada



Fonte: LACAM (2020).

Não foi possível realizar análise de dados referentes à microdureza desse material, porém de acordo com a literatura, como a matéria pós ensaio de torção apresentou um distanciamento interlamelar menor que antes de submetido a esse ensaio, o esperado é que o resultado seja uma microdureza superior para o estado pós-torção, como sustentado por Guo (2015). O endurecimento em microestruturas como essa podem ser benéficos por dificultarem a ocorrência de clivagem, que pode prejudicar o material durante operação.

## 5 CONCLUSÕES

Considerando os resultados e análises apresentadas nesse trabalho, pode-se concluir que:

- O material fornecido corresponde à um aço perlítico trefilado, de acordo com a comparação realizada com imagens da literatura para esse tipo de aço;
- O processo de trefilação resulta em refinamento da estrutura perlítica, provocando redução da sua distância, espaçamento, entre as lamelas de ferrita e cementita que formam a estrutura perlítica do material;
- As lamelas de cementita são quebradas em algumas regiões da microestrutura, conforme pode ser observado nas imagens;

## 6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e conclusões desta análise, tem-se oportunidade de estudos nas seguintes vertentes:

- Não foi possível realizar análises relacionadas a microdureza, o que poderia ajudar a entender melhor o impacto da torção nos arames de aço perlítico trefilados à frio.
- A base bibliográfica a qual esse trabalho se guiou aborda de maneira individual apenas o impacto da fase ferrita, caso se entenda o impacto individual da cementita, permitiria conhecimento ainda mais profundo sobre o assunto.

## 7 REFERÊNCIAS

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.

BUFFONI, Salete. **Crítérios de Falha**. 2017. Aula (Disciplina de Resistência dos Materiais) - Universidade Federal Fluminense, [S. l.], 2017. Disponível em: <http://www.professores.uff.br/salete/wp-content/uploads/sites/111/2017/08/aula141.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2020.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS (Índia). Março de 2012. **METALLIC MATERIALS - WIRE - SIMPLE TORSION TEST**, Nova Deli, 2012. Disponível em: <https://law.resource.org/pub/in/bis/S10/is.1717.2012.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2020.

ELWAZRI, A. M.; YUE, S.; WANJARA, P. Effect of prior-austenite grain size and transformation temperature on nodule size of microalloyed hypereutectoid steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**, [s. l.], v. 36, n. 2297, Setembro 2005.

GUO, Ning; SONG, Bo; WANG, Bing-Shu; LIU, Qing. Influence of torsion Deformation on Textures of Cold Drawing Pearlitic Steel Wires. **Acta Metallurgica Sinica**, [s. l.], Junho 2015.

LIU, M.; YANG, C. D.; CAO, G. H.; RUSSELL, Alan M.; LIU, Y. H.; DONG, X. M.; ZHANG, Z. H. Effect of microstructure and crystallography on sulfide stress cracking in API-5CT-C110 casing steel. **Iowa State University: Materials Science and Engineering Publications**, [s. l.], 8 jan. 2016.

LIU, Y. D; ZHANG, Y. D.; TIDU, A.; ZUO, L. <110> Fiber Texture Evolution of Ferrite Wires during Drawn-torsion and Drawn-annealing-torsion Process. **ScienceDirect**, [s. l.], 2012.

NAM, W.J.; SONG, H.R.; BAE, C.M. Effect on microstructural features on ductility of drawn pearlitic carbon steel. **ISIJ International**, [s. l.], v. 45, p. 1205-1210, 2005.

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.

SHIMIZU, K.; KAWABE, N. Fracture mechanics aspects of delamination occurrence in high carbon steel wire. **WIRE JOURNAL**, [s. l.], p. 88-97, Março 2002.

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

TORÍBIO, Jesús; GON

ZÁLEZ, Beatriz; MATOS, Juan-Carlos. Microstructure and Mechanical Properties in Progressively Drawn Pearlitic Steel. **Materials Transactions**, [s. l.], v. 55, ed. 1, p. 93-98, 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.

TSCHIPTSCHIN, André Paulo; SINATORA, Amilton; GOLDENSTEIN, Hélio. **Metalografia dos Aços**. São Paulo: ABM, 1986.

XU, Xianjun; WANG, Lei; FANG, Feng; MA, Zhongquan; XIE, Zong-han; JIANG, Jianqing. Origin and mechanism of torsion fracture in cold-drawn pearlitic steel wires. **Journal of Materials Science**, [s. l.], 2013.

ZHOU, Lichu; FANG, Feng; WANG, Liping; HU, Xianjun; XIE, Zongham; JIANG, Jianqing. Torsion performance of pearlitic steel wires: Effects of morphology and crystallinity of cementite. **Materials Science & Engineering**, [s. l.], 2018.