



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

FRANCISCO DIEGO COELHO BENEVIDES

**Influência dos tratamentos térmicos do aço API X 70 para aplicações na indústria
petróleo e gás.**

FORTALEZA

2018

FRANCISCO DIEGO COELHO BENEVIDES

**Influência dos tratamentos térmicos do aço API X 70 para aplicações na indústria
petróleo e gás.**

Monografia apresentada ao Curso de engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica. Área de concentração: Metalurgia física.

Orientador: Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes. Coorientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B413i Benevides, Francisco Diego Coelho.
Influência dos tratamentos térmicos do aço API X 70 para aplicações na indústria petróleo e gás. /
Francisco Diego Coelho Benevides. – 2018.
45 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. . Hamilton Ferreira Gomes.
Coorientação: Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso.
1. Aço API. 2. Metalurgia física. 3. Microestrutura. 4. Tratamentos térmicos. I. Título.
- CDD 669
-

FRANCISCO DIEGO COELHO BENEVIDES

**Influência dos tratamentos térmicos do aço API X 70 para aplicações na indústria
petróleo e gás.**

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Metalúrgica. Área de concentração: Metalurgia Física.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Msc. Daniel Brito de Araujo.
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Marcus Alves e Marilena
Coelho.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Livre de Bruxelas (ULB) e à Universidade Federal do Ceará (UFC), pelo apoio financeiro que foi de vital importância durante meu estágio na Companhia Siderúrgica (CSN). Agradeço ao Professor Dr. Lindberg Lima Gonçalves que foi o coordenador dessa parceria (UFC e ULB) que proporcionou a minha ida à CSN.

Ao professor Hamilton Ferreira Gomes Abreu, pela confiança e orientação durante a realização deste trabalho. Esse professor, uma figura ímpar no departamento, que me serviu de inspiração durante o decorrer do meu curso.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará.

Ao amigo e secretário do departamento de engenharia metalúrgica, Francisco José de Souza Júnior, por toda paciência e ajuda nos momentos de necessidade durante a graduação.

Queria agradecer ao meu amigo Emanuel Seixas que esteve comigo durante o período da graduação, onde passamos por momentos difíceis.

Queria lembra-se da minha Tia Maria de Lurdes pelo fato de me deixar focado no trabalho mesmo passando por momentos de turbulência.

Aos meus colegas de graduação Lucas Lopes, Francisco Leonardo, Henrique Alencar, Bruno Mynelly, Eudes Rodrigues, Lincoln Guimaraes, Felipe Moraes, Raphael Olegário, Thomas Junior, Francisco Antônio, Reinaldo Azevedo, Pablo Bruno, Darley Lima, Soraia Castro, Hedipo Pereira, Yuri Maia e Claudio Brasil e Úrsula.

Ao amigo João Vitor queria fazer um agradecimento especial pela qualidade da orientação mesmo estando muito ocupado nos seus trabalhos acadêmicos.

Aos meus grandes amigos Edervan Vidal, Alex Luty, Clerton Maia, João Paulo e Kalid Marques que estão presentes na minha vida e compartilharam muitas alegrias.

Queria agradecer a enorme paciência do meu co-orientador Jorge apesar de estar cansado, foi essencial para o bom desenvolvimento do trabalho.

Queria agradecer a minha querida mãe que me proporcionou todo aparato financeiro e psicológico para dar continuidade aos estudos e concluir meu curso de graduação. Durante esses anos que passei por oscilações emocionais e dificuldades nas disciplinas, não foi fácil, mas a sede de apreender e a esperança foi uma fonte inesgotável de motivação.

“O bom senso é a coisa mais bem distribuída do mundo: todos pensamos tê-lo em tal medida que até os mais difíceis de contentar nas outras coisas não costumam desejar mais bom senso do que aquele que têm (Renê Descartes).

RESUMO

Este trabalho foi inspirado no estudo profundo de metalurgia física com a finalidade de estudar as microestruturas encontradas. A metodologia foi dividida em um estudo detalhado da microestrutura associado a um conjunto de práticas laboratoriais, no que diz respeito à influência dos tratamentos térmicos nas microestruturas e dureza do Aço API 5L X-70, resfriados em banhos de água, óleo e nitrogênio, para obter diferentes taxas de resfriamento. Para compreender este estudo, foram realizados tratamentos térmicos de normalização e têmpera, dureza e análise metalográfica no aço em questão. Discutiram-se assuntos sobre as microestruturas registradas por Microcopia óptica e confirmadas no *TermoCalc*® e fases relevantes para manter a qualidade das propriedades mecânicas. Os resultados encontrados esclarecem uma melhor escolha de temperaturas e composição química para microestrutura desejada, mesmo encontrado uma estrutura multifásica que pode melhorar algumas propriedades mecânicas e restringir outras.

Palavras-chave: Aço API. Metalurgia física. Microestrutura. Tratamentos térmicos

ABSTRACT

This work was inspired by the deep study of physical metallurgy with the purpose of studying the microstructures found. The methodology was divided in a detailed study of the microstructure associated to a set of laboratory practices, with respect to the influence of the thermal treatments in the microstructures and hardness of API 5L X-70 Steel, cooled in water, oil and nitrogen baths, to obtain different cooling rates. To understand this study, thermal treatments of normalization and tempering, hardness and metallographic analysis were carried out on the referred steel. Subjects were discussed on microstructures registered by optical microscopy and confirmed in ThermoCalc® and relevant phases to maintain the quality of the mechanical properties. The results found clarify a better choice of temperatures and chemical composition for the desired microstructure, even finding a multiphase structure that can improve some mechanical properties and restrict others.

Keywords: Steel API. Physical metallurgy. Microstructure. Thermal Treatments

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da estrutura tetragonal de corpo centrado da martensita.....	17
Figura 2 – Curva TTT do aço C-Mn convencional.....	19
Figura 3 – Desenvolvimento dos aços API.....	20
Figura 4 – Diminuição do campo austenítico através de adição de cromo.....	21
Figura 5 – Microestrutura do aço API 5L X 70 após resfriamento. Ferrita poligonal e bainita.. Ampliação 1000X. Ataque Nital 2%.....	24
Figura 6 – Diagrama TRC do aço API X 70.....	24
Figura 7 – Fluxograma do planejamento e prática laboratorial.....	26
Figura 8 – Ciclo térmico de normalização e ciclo térmico de tempera/revenimento	
Figura 9 – Microestrutura do aço API 5L X70 como recebido. Ataque nital 2%.....	29
Figura 10 – Microestrutura do aço API 5L X70 austenítico a 920°C e resfriado em água seguido de revenimento. Ataque nital 2%.....	30
Figura 11 – Microestrutura do aço API 5L X70 austenítico a 920°C e resfriado em óleo. Ataque nital 2%.....	31
Figura 12 – Microestrutura do aço API 5L X70 austenítico a 920°C e resfriado em água. Ataque nital 2%.....	32
Figura 13 – Microestrutura do aço API 5L X70 austenítico a 920°C e resfriado em nitrogênio. Ataque nital 2%.....	32
Figura 14 – Microestrutura do aço API 5L X70 austenítico a 920°C e resfriado em ar calmo. Ataque nital 2%.....	33
Figura 15 – Simulação termodinâmica para o aço API X70.....	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Exemplo de valores representativos de microdurezas de diversos tratamentos térmicos.....	36
----------------------------------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Efeito de alguns elementos de liga em determinadas propriedades dos aços.....	23
Tabela 2	Composição química de um aço API X 70.....	25
Tabela 3	Ensaios e estimativas.....	27
Tabela 4	Tratamentos térmicos e microestrutura.....	28
Tabela 5	Banho de água e revenido.....	31
Tabela 6	Banho em óleo.....	22
Tabela 7	Banho em água.....	33
Tabela 8	Banho de nitrogênio.....	34
Tabela 9	Resfriamento em ar calmo.....	35
Tabela 10	Microdureza.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_{r1}	Temperatura de início da transformação ferrítica ou perlítica
A_{r3}	Temperatura de fim da transformação ferrítica ou perlítica
AF	Ferrita Acicular
TRC	Diagrama de Transformação por Resfriamento Continua.
TMCP	Laminação Controlada
MO	Microscópio Ótico
VC	Carboneto de Vanádio
VN	Nitreto de Vanádio
Nb	Nióbio
B	Boro
Cr	Cromo
V	Vanádio
MoC	Carboneto de Molibdênio
LACAM	Laboratório de Caracterização Microestrutural
TTT	Diagrama tempo temperatura

LISTA DE SÍMBOLOS

+	Favorece levemente
++	Favorece moderadamente
+++	Muito favorável
-	Desfavorável
es	Endurecimento secundário
C4	Região de crescimento excessivo de grão com presença de Martensita
©	Copyright
M	Martensita
P	Perlita

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	Objetivo	15
3.1	Revisão bibliográfica	16
3.1	Aços e suas Aplicações	16
3.2	<i>Desenvolvimentos de aços API X 70</i>	17
3.3	<i>Transformação martensita</i>	17
3.4	Tratamentos térmicos	18
3.4.1	Têmpera e Revenimento dos aços	19
4	Resfriamento acelerado	20
5	Aços API	20
6.1	Composição química	21
6.2	Influência dos elementos de liga	22
7	Microestruturas encontradas para Aços Laminados	24
7.1	Transformação no resfriamento contínuo	25
8	Materiais e métodos	27
8.1	Execução da pesquisa	27
7.2.2	Preparação metalografica	27
7.2.3	Caracterização Microestrutural	27
8	Resultados e discussão	28
8.1	Análise metalografica	28
8.2	Termocalc	32
8.3	Microdureza	32
9	CONCLUSÃO	33
10	Sugestões futuras	33
11	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A extração e transporte de petróleo e gás nos mostra que deve-se produzir um produto para transporte dos mesmos de acordo com a necessidade do cliente, no qual se visa a durabilidade dos dutos e a menor contaminação do produto que por eles passam, e para isso existem normas, como por exemplo, a norma API 5L. Sabe-se essa norma obedece a demanda de compra de países da Europa e, principalmente, a China.(REBECA, 2014)

A proposta inicial trabalhar, de forma similar com as aplicações do dia-a-dia, foi tentar aplicar resfriamentos acelerados, logo foram realizados tratamentos térmicos de têmpera em diferentes meios, em um dos casos seguido de revenimento e uma normalização.

A utilização de diversos banhos no tratamento térmico de metais possibilita a redução de gastos com a adição de elementos de ligas nos mesmos. De acordo com estudos já realizados em aços API, tem-se observado melhorias nas propriedades mecânicas, e principalmente, na tenacidade do material.

A utilização de tratamentos térmicos depois da laminação controlada é importante, pois possibilita uma otimização de propriedades mecânicas visando aplicações a baixa pressão e corrosão.

O aço API reúne propriedades importantes como Tensão limite de escoamento 517 Mpa, Resistência à tração 575 MPa e soldagem em qualquer processo. Além de um alto refino de grão e conseguir suportar baixas pressões. Tendo em vista que se consegue controlar a morfologia do grão e a microestrutura, através de aquecimento seguido de resfriamentos, evitando adições desnecessárias de elementos de liga a matriz do aço utilizado nesse trabalho.

2 OBJETIVO

Realizar tratamentos térmicos para estudar e investigar a microestrutura do material com intuito de mitigar possíveis fases formadas, observando quais fases é mais relevante ao estudo proposto, interligando microestruturas encontradas com microscopia ótica e microdureza das peças.

Os objetivos específicos são:

- Identificar fases presentes na amostra que fazem parte da sua estrutura;
- Verificar o aparecimento de fases metaestáveis nos diferentes tratamentos térmicos;
- Comparar os valores de dureza encontrado nas amostras para cada tratamento térmico;

3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aços e suas Aplicações

Os aços são tão importante para o mundo moderno que é quase impossível viver sem eles. O fato de eles possuírem propriedades físico-químicas e mecânicas mostra sua relevância no cotidiano, com várias aplicações. Suas aplicações vão desde a parte estrutural na construção civil até carros, navios, tubos, pontes etc. As características que os deixam mais resistentes são atribuídas a sua composição e aos avanços tecnológicos no processamento de sua fabricação.

Países como o Canadá e Brasil investem pesado em indústria de base, ou seja, produção de aço. O investimento em pesquisa nos aços API X 70 é importante pelo fato de o controle microestrutural seguir um bom ajuste de parâmetros. Outro fato relevante são as aplicações cada vez mais exigentes do mercado, seguindo normas mais rígidas, tende a aumentar o rigor e a responsabilidades impostas sobre tais aços.

Os aços estão presentes em vários setores: na engenharia de alimentos, as embalagens estanhada, painéis inox, colheres e etc. Nos transportes, estão presentes em aviões, carros, trens, navios e ônibus. Na agricultura, estão presentes em arames galvanizados originados do processo de extrusão.

É possível trabalhar o aço em diversas faixas de resistência mecânica visando adequação ao produto. Isso se faz de algumas maneiras diferentes, como adicionar elementos de liga para conseguir essas propriedades, como nos aços inoxidáveis, se adicionando cromo para propriedades de resistência a corrosão. Ou realizando tratamentos térmicos, para de alguma forma mudar a microestrutura, conseguindo assim um ganho em resistência mecânica pelo refino de grão de um aço, por exemplo.

O aço API X-70 é essencial na indústria de petróleo e gás. Nesse material, é possível a utilização de elementos estabilizadores de ferrita, sendo assim, as fases predominantes nesse material são comumente ferrita e cementita, como é comum na maioria dos aços carbono e microligados. A qualidade desse aço é garantida pela adição de elementos de ligas como Nióbio. Para substituir esses elementos, pode-se adiciona outros elementos como vanádio e cromo, porém não é muito usual, devido ao alto preço do vanádio, por exemplo. O aço descrito tem como principais características boa soldabilidade, resistência à corrosão e alta tenacidade.

3.2 Desenvolvidos de aços API X 70

Com alto grau de exigência para área de petróleo e gás, os aços API de diversos graus foram desenvolvidos com elementos ligantes como cromo e molibdênio. É necessário um estudo sobre efeitos das microestruturas na resistência mecânica desses aços, pois seu controle microestrutural não é simples.

De acordo com a literatura, o Aço API 5L X 70 é constituído de ferrita com morfologia acicular e seu refino de grão proporciona as características adquiridas através do mecanismo de ganho de resistência. Outra fase possível é a bainita granular (BRUNA GOMES, 2013).

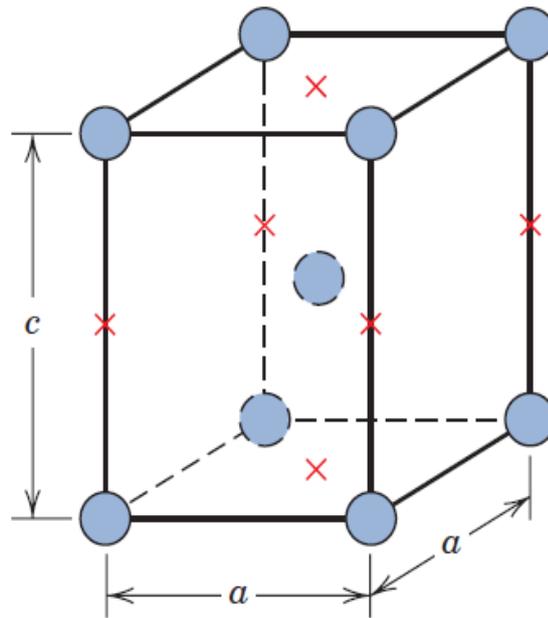
3.3 Transformação martensítica

A transformação martensítica ocorre de maneira que uma estrutura de corpo centrado passa para uma estrutura tetragonal de corpo centrado de acordo como na figura 1. Isso acontece quando um material com certa composição química sofre um resfriamento rápido ou sofre algum esforço de cisalhamento de rede quando está na fase austenítica.

A formação dessa fase é muito importante para os aços, pois garante uma boa resistência mecânica. Uma taxa de resfriamento alta pode formar martensita, diminuindo tenacidade para aplicações em oleodutos e gasodutos. (RYUDI, 2013)

Na formação da martensita, é possível observar o gradiente de temperatura para ocorrer à difusão do carbono. Em seguida, há a transformação da estrutura cúbica de face centrada para forma tetragonal de corpo centrado. No entanto, para a transformação ocorrer com sucesso, a temperatura deve estar contida em um intervalo de 900°C a 200°C (GORNI, 2006).

Figura 01: Representação da estrutura tetragonal de corpo centrado da martensita.



Fonte : Calistert, 2006.

A transformação martensítica ocorre da seguinte maneira, uma transformação de fase no estado sólido sem difusão, resultante de um movimento coordenado e/ou cooperativo entre os átomos da fase matriz, inferior ao parâmetro de célula onde existe uma relação com a matriz, ou seja, a fase resultante depende da fase inicial, formando uma nova estrutura cristalina. Há sempre uma relação cristalográfica específica entre a martensita e a fase original (RIZZO, 2006).

A tetragonalidade da martensita e sua geometria agulhada são característica dessa fase. A temperabilidade do material é uma função importante do mesmo, porém não se pode afirmar que o material é 100% temperavel.

3.4 Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos em materiais metálicos têm como objetivo alterar algumas de suas propriedades mecânicas pela realização de uma ciclagem térmica. Os principais objetivos desses tratamentos são alterar as microestruturas e, por consequente, modificar as propriedades mecânicas. O tratamento térmico é comumente associado às melhorias nas propriedades mecânicas do material, porém, pode ser utilizado para melhorar a usinabilidade e conformabilidade.

Aços com teor de carbono abaixo de 0,25% são difíceis de ser tratados termicamente. Para isso, adiciona-se elementos de ligas como cromo, níquel, molibdênio, manganês, silício e o tungstênio (CALISTER, 2006).

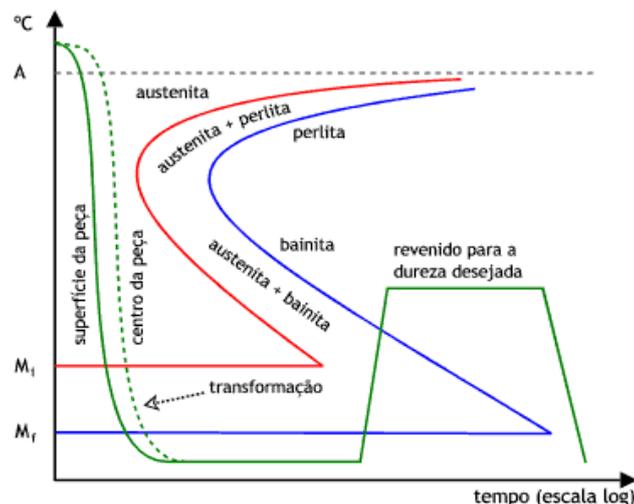
3.4.1 Tempera e Revenimento dos aços.

O tratamento térmico de tempera visa a obtenção do constituinte martensita. O revenimento é o tratamento térmico que normalmente acompanha a têmpera, pois elimina a maioria dos inconvenientes produzidos por esta. Além de aliviar ou remover as tensões internas, o revenimento corrige as excessivas dureza e fragilidade do material, aumentando sua ductilidade e resistência ao choque. A estrutura obtida pelo revenimento é a martensita revenida. Caso haja austenita retida, ela pode se decompor em bainita para temperaturas mais baixas de revenimento (200 a 300 °C). No revenimento, os átomos de carbono presentes na martensita precipitam como partículas de carbonetos com tamanhos que variam à medida que se eleva a temperatura do revenimento (AUGUSTO DE SOUZA, 1989).

No tratamento térmico de revenimento em alta temperatura, elimina-se toda a tensão residual que é responsável por causar trincas existentes no aço temperado. É possível averiguar fases presentes oriundas dos tratamentos térmicos e sua ligação direta com a presença de elementos de ligas que melhoram a temperabilidade como o Mo e Cr. (AUGUSTO DE SOUZA, 1989).

A normalização é o tratamento térmico indicado para obter uma estrutura homogênea e refinada e melhorar a resistência e a tenacidade de aços API.

Figura 2 - Curva TTT do aço C-Mn convencional.



Fonte: Próprio autor

Na curva TTT para aço C-Mn, mostrada na figura 2, pode-se observar que após o resfriamento, ocorre a transformação de austenita para martensita. Já no aço API X 70 seguido de resfriamento em água, ocorre a transformação da fase martensita que possivelmente pode ser formada (OLIVEIRA, 2014).

4. Resfriamento acelerado

O processo de resfriamento acelerado começou a ser aplicado na siderurgia Japonesa no início da década de 1980. Com esta nova tecnologia foi possível desenvolver chapas com maior resistência e tenacidade, melhorando também a sua soldabilidade.

Na laminação controlada foi possível diminuir o carbono equivalente nos aços, elevando o limite de escoamento e a tenacidade, porém não elevou tão intensamente o limite de resistência das placas. Com o desenvolvimento da laminação controlada, juntamente com o resfriamento acelerado, foi possível diminuir a quantidade dos elementos de liga, especialmente o carbono. Esta redução do carbono e outros elementos de liga melhoram consideravelmente a soldabilidade do aço.

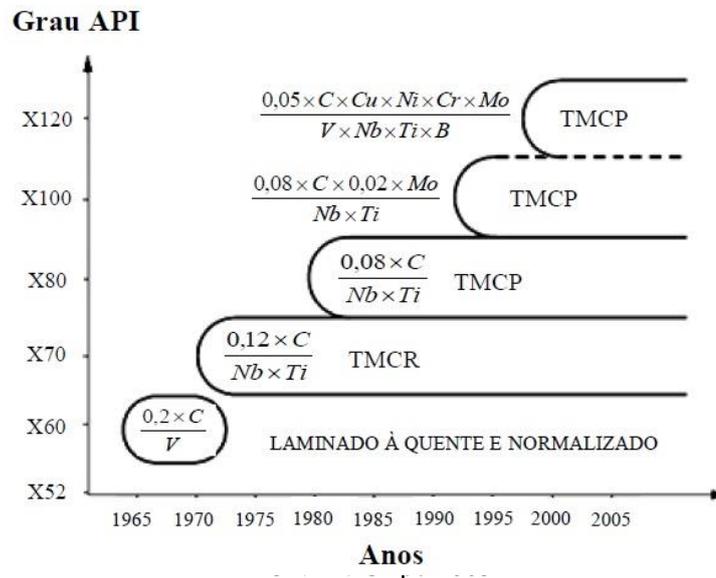
Através de laminação controlada associada ao resfriamento acelerado foi possível obter propriedades mecânicas como: alta resistência, alta tenacidade e boa soldabilidade. Esta técnica de processos é conhecida como processamento termomecânico (*Thermo-Mechanical Control Process- TMCP*).

5. Aços API

Os aços para tubos utilizados no transporte de óleo e gás são confeccionados para atender uma norma específica, conhecida como API 5L (API 5L, 2000). A norma API estabelece uma classificação para tubos de acordo com a resistência mecânica (nomenclatura de acordo com a simbologia apresentada da seguinte maneira: X + Limite de escoamento). Por exemplo, em um aço API 5L X80, os últimos dígitos representam o limite de escoamento em unidades de Ksi. Esses aços vêm sendo bastante estudados e, ao longo do tempo, a indústria conseguiu a diminuição de massa sem danos às propriedades mecânicas. Um exemplo disso foi na indústria canadense que conseguiu reduzir em 14% a espessura do X70

quando comparado com o X60 e uma redução de 12,5% da espessura do X80 quando comparado ao X70 (RODRIGO JOSÉ, 2010). A figura 2 mostra a evolução dos aços API.

Figura 03: Desenvolvimentos dos aços API.



Fonte: Elaborada pelo autor.

No começo da década de 80 foi introduzido um melhoramento na técnica *TMCP* (Laminação Controlada com Resfriamento), que foi chamado de resfriamento acelerado e consiste em resfriar o material rapidamente na etapa final de laminação, de 800 °C a 500 °C. Após atingir esta temperatura, o resfriamento é feito ao ar para que haja a formação de bainita. Esta técnica, que reúne o processo de laminação controlada seguido de resfriamento acelerado, é representada pela sigla *TMCP* (*Thermomechanical Controlled Process*). Utilizando-se desta técnica, é possível obter uma microestrutura com grão refinado, reunindo alta resistência mecânica e tenacidade (TORRES, 2013).

Na laminação controlada acontece a formação de grão ferrítico mais fino proporcionando uma tensão de escoamento elevada, elevada tenacidade, boa soldabilidade e ótima conformabilidade.

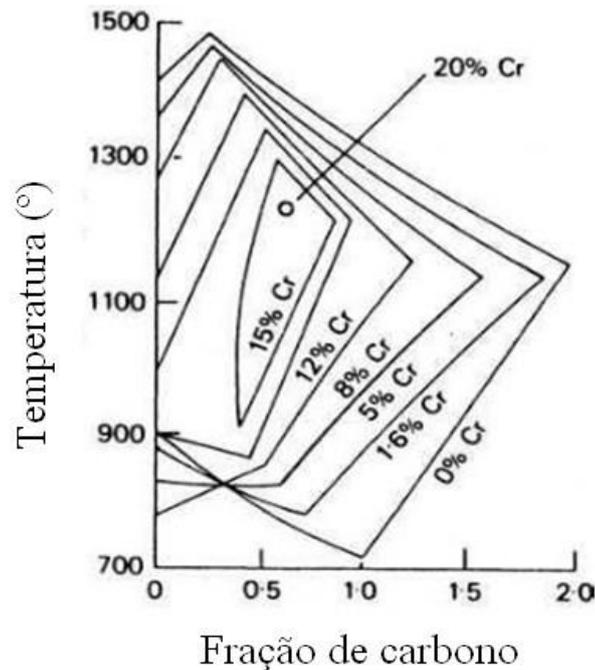
O ganho de resistência do material API deve-se principalmente ao mecanismo de refino de grão pelo fato de ele não causar efeitos deletérios.

6.1 Composição Química

De acordo com a norma API 5L X 70 podemos afirmar que a sua composição química é 0,1% de C, 1,66% de Mn, 0,82% de Mo onde o teor de Nióbio, Vanádio e Titânio são

menores que 0,15% (API, 2000). O Molibdênio, Vanádio, Nióbio, Cromo, Silício são ótimos estabilizadores da ferrita como pode ser observado na diminuição do campo austenítico apresentado na figura 4.

Figura 4: Diminuição do campo austenítico através de adição de cromo.



Fonte: Rizzo (2006).

6.2 Influência dos elementos de liga

Carbono

O carbono tem a função de endurecedor por solução sólida. O aumento do teor de carbono aumenta a dureza, resistência e a temperatura de transição dúctil-frágil, no entanto o aumento de carbono diminui a tenacidade e ductilidade. Por isso deve-se usar uma porcentagem que não limite as características do material.

Molibdênio

O molibdênio intensifica as propriedades mecânicas melhoradas pelos outros elementos (manganês, cromo e níquel), ou seja, se adicionado elementos em pequenas quantidades aumenta temperabilidade, resistência de deformação e ductilidade.

Vanádio

O vanádio é um elemento de liga formador de carbonetos e muito favorável a têmpera de acordo com tabela 01. Além de ter um papel endurecedor sua adição promove refinamento do tamanho de grão austenítico.

Tabela 01; Efeito de alguns elementos de liga em determinadas propriedades dos aços.

Característica	Elemento de liga									
	Cr	Co	Mn	Mo	Ni	Ti	W	V	P	Si
Dureza da ferrita	+	++ +	+	+	+			+	+	+
Revenimento	es			es				es		
Temperabilidade	++	-	+	+	+	+	+	+	+	++

Fonte: Rizzo, 2007

Nióbio

O nióbio tem a função de retardar a recristalização da austenita, promovendo a formação de grãos mais finos, e conferindo maior resistência a tenacidade, geralmente é um elemento que aumenta a dureza através de precipitação de carboneto de nióbio, o que também aumenta a tenacidade por esse mesmo motivo.

Manganês

O manganês é um dos elementos que aumenta o campo austenítico, diminuindo a temperatura de transformação eutetóide retardando a formação de carbonetos.

Cromo

O aumento do teor de cromo diminui o campo austenítico. O cromo atua como elemento que aumenta a resistência à corrosão. O cromo tem papel fundamental na formação de ferrita acicular/bainita.

Titânio

O titânio é um dos elementos de liga que auxilia no ganho de resistência mecânica por precipitação de carbonetos e controla a formação de sulfetos. Pequenas concentrações de titânio (< 0,025%) são úteis para limitar o crescimento de grão da austenita (RYUDI, 2013).

Silício

O Silício é um elemento de liga que tem a função de aumentar moderadamente a temperabilidade do aço. A fase ferrita é endurecida por esse elemento tendo um efeito maior que o manganês e menor do que fósforo, além de aumentar a resistência dos aços temperados e revenidos (TESTMAT).

7. Microestruturas encontradas para aços laminados

A microestrutura resultante depende dos parâmetros usados no processamento do material, tratamento térmico, taxa de resfriamento e adições ou não de elementos ligantes. As possíveis fases formadas são:

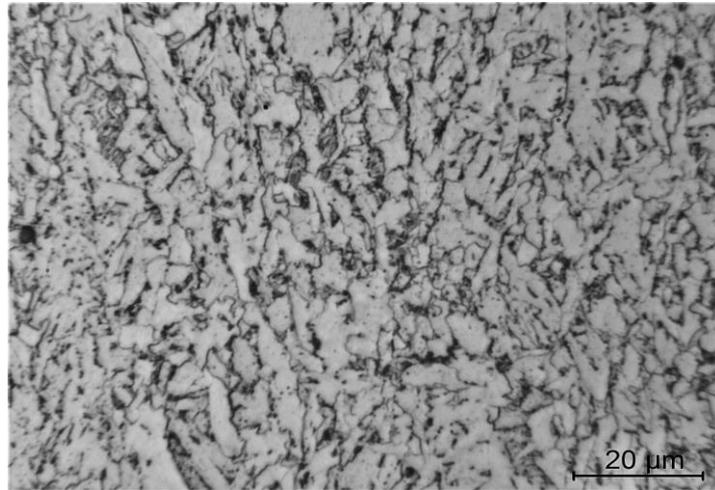
Ferrita poligonal /Perlita: Este tipo de microestrutura é encontrado em aços usuais, não passando por nenhum tipo de resfriamento acelerado. Os grãos de ferrita são equiaxiais e apresentam baixa densidade de discordância. A limitação da quantidade de perlita está no carbono e adição de elementos de liga.

Ferrita acicular: é uma microestrutura especial pelo fato de ser sub-estruturada, formando uma microestrutura de agulhas entrelaçadas.

Bainita é uma microestrutura difícil de ser identificada pelo fato de ser parecida com a ferrita acicular na microestrutura óptica e sua geometria elíptica em forma de ripa.

A figura 5 apresenta a microestrutura de um aço API 5L X 70 após resfriamento. É possível observar a ferrita poligonal (parte clara da micrografia) e bainita (parte escura da micrografia).

Figura 5: Microestrutura do aço API 5L X 70 após resfriamento. Ferrita poligonal e bainita. Ampliação 1000 X. Ataque Nital 2%.

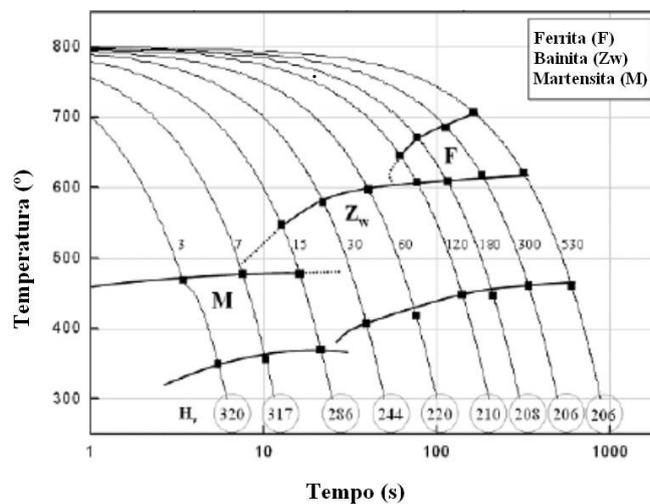


Fonte : Mattioli e Modenesi (2018).

7.1 Transformação por resfriamento contínuo

O diagrama TRC interpreta as transformações ocorridas em materiais que sofrem vários tipos de resfriamentos onde a velocidade é sua principal função. Nesse estudo, pode-se investigar diversas microestruturas mesmo sendo tão complexas. A figura mostra um diagrama das possíveis fases formadas assim como as faixas de temperaturas e tempo para a formação das mesmas.

Figura 6: Diagrama TRC do Aço API X 70.



Fonte: Fourouzan e Heidari.

O diagrama TRC informa quais possíveis transformações podem ocorrer. Quando se aquece até a temperatura de 920 °C acima da linha Ac3, formar-se martensita independente do tempo. Para taxas de 220°C/s, formar-se uma estrutura multifásica composta por Martensita, bainita e ferrita (M. R. FOROUZAN).

O tratamento térmico de têmpera favorece a formação de martensita, aumentando a dureza, resistência à tração, porém reduz a tenacidade (RYUDI , 2013). Para resfriamento brando especificamente em banho em óleo que favorece a formação de martensitica e ilhas de perlita.

8. Materiais e métodos

8.1 Material

O material de estudo foi fornecido pelo Laboratório de caracterização de materiais (LACAM- UFC). O material possui um baixo teor de enxofre e fósforo e redução de segunda fase como óxidos, inclusões e perlita. A composição química do material é mostrada na tabela 02.

Tabela 02: Composição química de um Aço API X70.

<i>C</i>	<i>V</i>	<i>Mo</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Ti</i>	<i>Si</i>	<i>Al</i>
0,1	0,049	0,816	1,66	0,021	0,022	0,019	0,254	0,014

Fonte: Mohamed, 2017

8.2 Métodos

8.2.2 Execução da pesquisa

O projeto foi dividido em duas partes, a primeira consistiu em identificar algumas fases que não são visualizados pelo microscópio óptico e a outra parte consistiu em focar alguns tratamentos térmicos com temperaturas acima de 900°C de acordo com o diagrama ferro-carbono e o gráfico TRC. Os parâmetros são temperatura de encharque e taxa de resfriamento, tempo de permanência em determinada temperatura e atmosfera do meio. Os métodos de resfriamento utilizados nos tratamentos térmicos foram: Imersão em água seguida

de revenimento, imersão em óleo, imersão em água e imersão em nitrogênio líquido e resfriamento ao ar (normalização). O tempo de revenimento foi cerca de 1 h.

Figura 7: Fluxograma do planejamento e prática laboratorial.

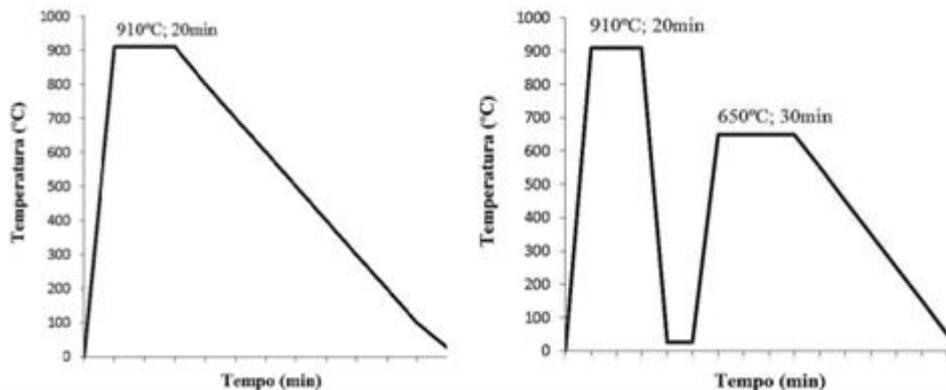


Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Foram realizados alguns tratamentos térmicos em diversos banhos em várias condições como mostrado no fluxograma da figura 7.

O tratamento térmico de têmpera e revenimento foram executados de acordo o ciclo térmico mostrado na figura 8. A temperatura de encharque foi de 920°C, resfriada em água e revenida de acordo com o ciclo abaixo.

Figura 8: Ciclo térmico de normalização e ciclo térmico de tempera/revenimento.



Fonte: Sena e Godefroid, 2016.

No tratamento de têmpera, cada uma das amostras foi aquecida até uma temperatura de 920°C e permaneceram no interior do forno por um tempo de 1h. Esse tempo é necessário para que toda a peça adquira a temperatura desejada. Em seguida, cada amostra obedeceu a seu tratamento térmico descrito anteriormente.

Para os tratamentos térmicos realizados, adotou-se como temperatura de austenitização a temperatura de 920°C. Por segurança, adotou-se uma temperatura de 50 °C acima da curva A_{c3} , ou seja, um valor acima da temperatura de austenitização. A amostra foi temperada em água e tem tendência a formar martensita agulhada (BRUNO RYUDI, 2013).

O tratamento térmico de normalização causa a formação das fases preferenciais ferrita acicular e perlita. O procedimento foi realizado de maneira rigorosa em um forno de resistência elétrica e após este processo, o resfriamento foi feito ao ar calmo em temperatura ambiente (MOHAMED, 2017).

A tabela 03 mostra os respectivos métodos laboratoriais e suas finalidades com intuito de mitigar bastante a microestrutura, principalmente a formação de martensita.

Tabela 03: Ensaio e estimativas

Ensaio e Estudo	Finalidade
Micrografia	Microestrutura e Microsegregação
Microdureza	Verificar o aparecimento de martensita

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

8.3.2 Preparação metalográfica

As amostras foram lixadas em lixas de 80, 100, 240, 340, 400, 600, 1200 mesh, lavadas com água, borrifadas com álcool e secadas com o uso de um secador. Após esse procedimento, as amostras foram polidas com pasta de diamante de granulometria 6 μm , 3 μm e 1 μm .

8.3.3 Caracterização microestrutural

Utilizando um microscópio óptico modelo e técnicas de caracterização de materiais, foi possível identificar as fases ferrita acicular, perlita, martensita revenida, ferritas e martensita, oriundas dos tratamentos térmicos. A liga apresentou uma microestrutura refinada

e multifásica. Nesse trabalho, procurou-se manter os parâmetros de tratamentos térmicos como têmpera e revenimento para, preferencialmente, transformação martensítica.

Tabela 03 Tratamentos térmicos e microestrutura.

Tratamento térmico	Fases	Temperatura do banho
Normalização	Ferrita Acicular e Perlita.	29°C
Tempera em banho de água e Revenimento	Ferrita, perlita e martensita.	24°C
Têmpera em banho de óleo	Perlita, ferrita e martensita agulhada.	25°C
Têmpera em água sem Revenimento	Martensita Agulhada e ferrita.	24°C
Tempera em banho de nitrogênio	Martensita, perlita e ferrita acircular	-196°C

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

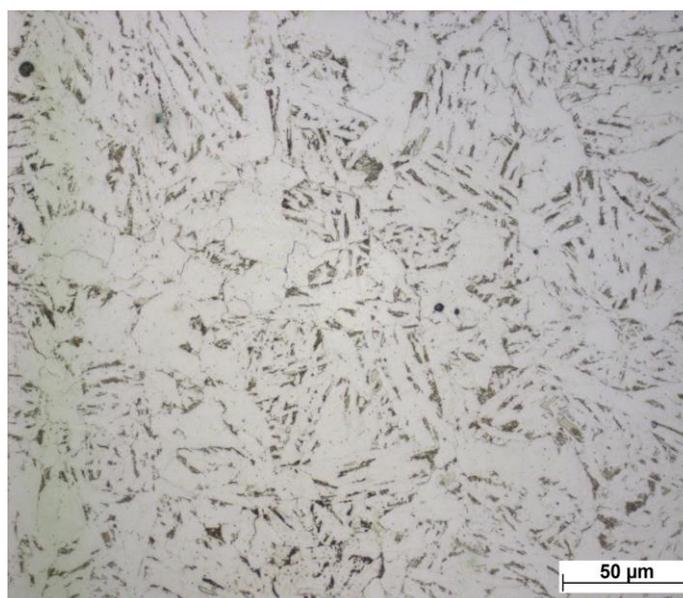
9. Resultado e discussão.

As amostras foram identificadas como; CR (como recebida), TACR (temperada em água com revenimento), TO (temperada em óleo), TA (temperada em água), N(normalizada), TN (temperada em nitrogênio líquido) para facilitar o planejamento do trabalho de acordo com os respectivos banhos.

9.1 Analise metalografica

A figura 09 mostra a microestrutura obtida da amostra CR, do aço API X70, como recebido, visualizou-se ferrita e perlita fina, onde é possível ver o contorno de grão da ferrita (parte clara da micrografia), percebe-se que as perlitas (microconstituente formado de ferrita e cementita intercalados) encontram-se nos contornos de grão, devido ao resfriamento, o carbono que estava contido na austenita foi ficando as margens dos grãos de ferritas que se formavam com o resfriamento, o que justifica essa “marginalização”. Geralmente é a microestrutura obtida com tratamento de normalização, ferrita e perlita fina, o que garante um aumento de resistencia mecanica por haver mais barreiras para conseguir conter a propagação de trincas.

Figura 09: Microestrutura do aço API 51 X70 como recebido. Ataque Nital 2%. Aumento 500x.



Fonte : Elaborado pelo próprio autor.

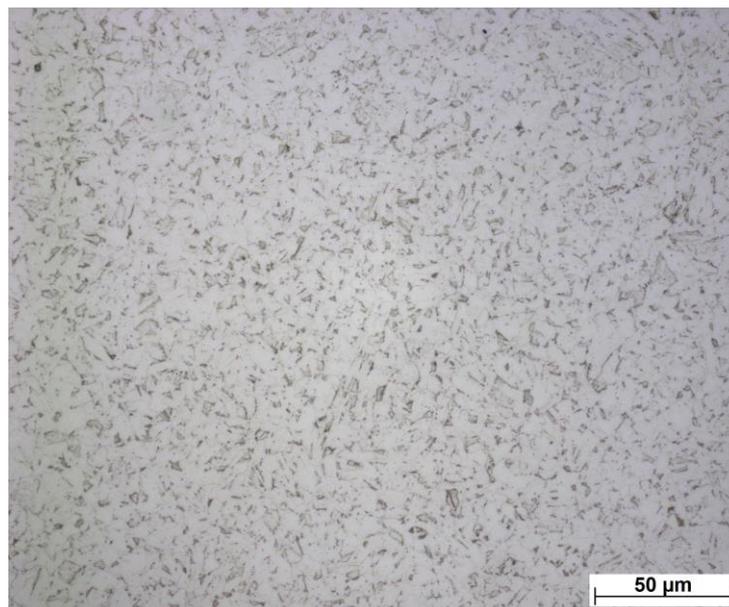
A figura 10 mostra a microestrutura obtida da amostra TACR, aço API X 70, tratado termicamente, com 0,10 %C, na qual é possível ver uma matriz ferrítica (parte clara da micrografia) e martensita revenida e perlita (parte escura da micrografia). Essa microestrutura é esperada de acordo com a literatura, com a austenitização do aço seguida de resfriamento, tem-se o cisalhamento da rede, formando a martensita. Com o revenimento, fornece-se energia suficiente para o carbono difundir da matriz martensítica, aliviando as tensões formadas no tratamento de têmpera, com a difusão do carbono, a martensita tetragonal, perde um pouco dessa tetragonalidade, tendo um aspecto parecido com a estrutura cubica de corpo centrado. A tabela 5 mostra as temperaturas usadas no tratamento térmico.

Tabela 05: Banho de água temperado e revenido.

Tratamento térmico	Tempo	Temperatura	Amostra
Aquecimento	1h	920°C	TACR
Revenimento	1h	400°C	TACR

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 10: Microestrutura do aço API 51 X70 austenitizado a 920°C e resfriado em água seguido de revenimento. Ataque Nital 2%. Aumento 500x.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A figura 11 mostra a microestrutura obtida da amostra TO, a qual foi elevada á sua temperatura de austenitização e, depois, sujeita a um resfriamento em óleo. Mesmo que o resfriamento em óleo sendo um resfriamento mais brando em comparação com o resfriamento em água ou em nitrogênio líquido, ainda apresenta uma alta taxa de resfriamento, fazendo com que ocorra surgimento de microestruturas como a martensita. A microestrutura observada na micrografia trata-se de ferrita (parte clara da micrografia), com algumas ilhas de martensita (parte escura da micrografia), além de perlita, com certo espaçamento entre a perlita e a martensita formada.

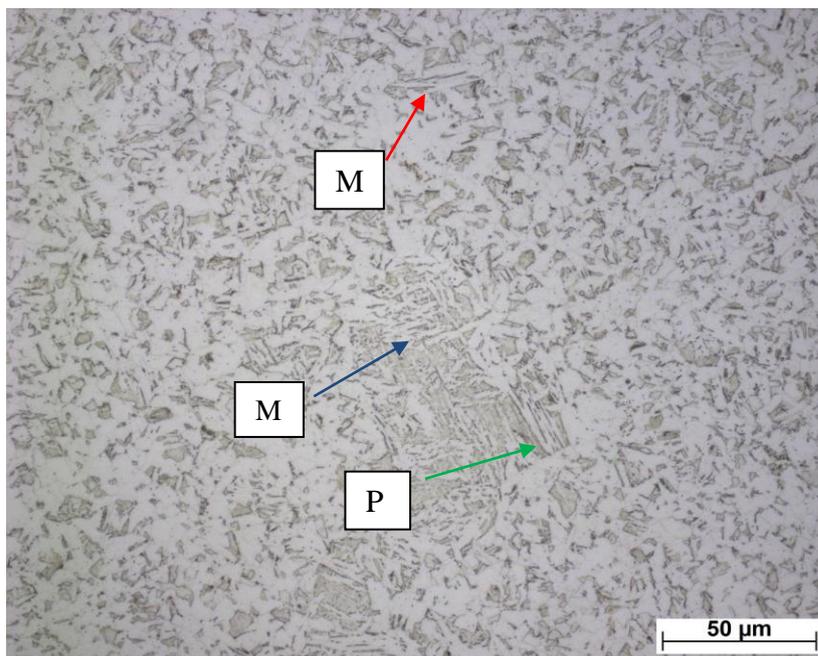
Esse tipo de microestrutura se forma devido a taxa de resfriamento não ter sido tão severa, o que acaba sendo favorecendo as transformações difusionais, por isso há a formação das ferritas e perlitas. Com essa taxa de resfriamento, também se observa a formação de ferritas aciculares, ou seja, ferritas com formas agulhadas, devido a morfologia agulhada da martensita formada, induz um crescimento também agulhado das ferritas. A tabela 6 mostra as temperaturas usadas no tratamento térmico

Tabela 6: Banho em óleo.

Tratamento térmico	Tempo	Temperatura	Amostra
Aquecimento	1h	920°C	TO

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 11: Microestrutura do aço API 5L X70 austenitizado a 920°C e resfriado em óleo com taxa de 23°C/s. ataque Nital 2%. Aumento 500x.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Legendas: M = Martensita, P = Perlita.

Tabela 7: banho em água.

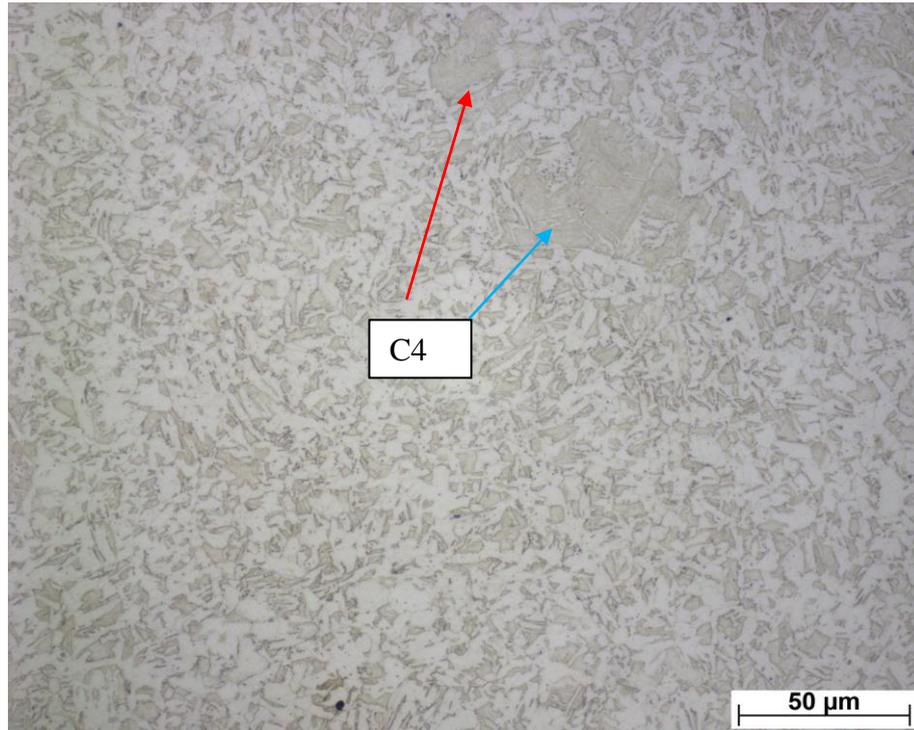
Tratamento térmico	Tempo	Temperatura	Amostra
Aquecimento	1h	920°C	TASR

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A figura 12 mostra a microestrutura obtida da amostra, aço API X 70, temperado em água sem revenimento, com 0,10 %C, na qual é possível ver o surgimento severo de estrutura martensítica (região escura da micrografia) na matriz ferrítica (região clara da micrografia). Essa microestrutura é esperada de acordo com a literatura, com a austenitização do aço seguida de resfriamento em água, devido a alta taxa de resfriamento, alcança-se facilmente a temperatura de transformação martensítica (M_s). A imersão do material no banho de água ocorre de maneira que, parte do carbono que estava na austenita não difunde para fora da matriz, cisalhando a rede, formando martensita. Como não houve o revenimento, como foi feito anteriormente, não há fornecimento de energia para aliviar as tensões na martensita formada, logo, ela continua com sua forma agulhada, com alta dureza e frágil. A tabela 7 mostra as temperaturas usadas no tratamento térmico.

Com a formação dessas ilhas de martensitas, a matriz ferrítica é induzida a crescer também de morfologia agulhada, o que justifica o aparecimento de ferrita acicular na microestrutura. Não foi citado anteriormente, mas tanto na tempera em água, quanto na tempera em óleo, poderia haver bainita, porém, só se provaria a existência dessa fase caso se fizesse uma microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 12 : Microestrutura do aço API 5L X70 austenitizado a 920°C e resfriado em água. Ataque Nital 2%.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Legendas: C4 = Grão crescimento excessivo.

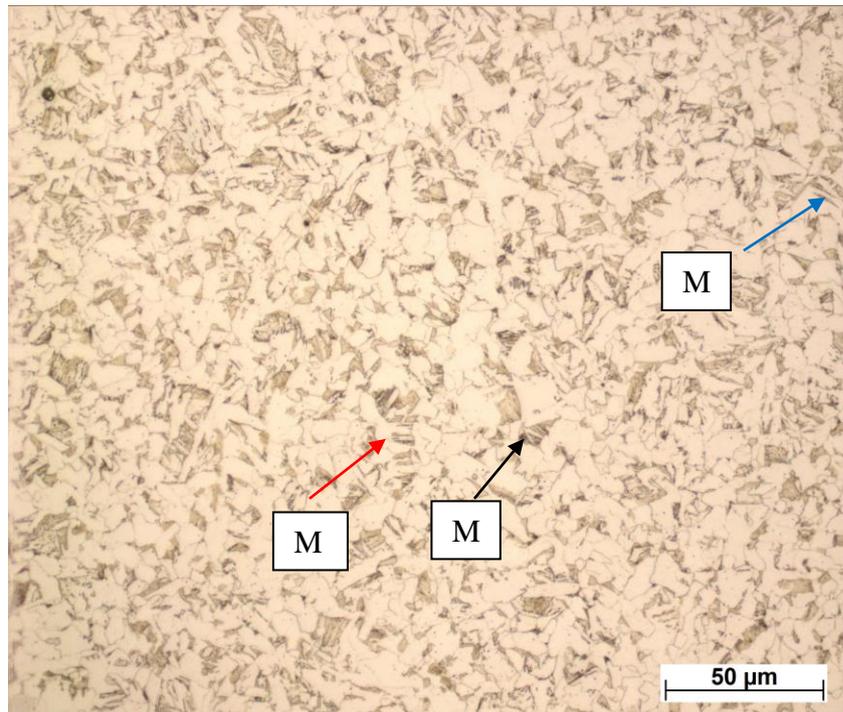
Tabela 07: Têmpera em banho de Nitrogênio

Tratamento térmico	Tempo	Temperatura	Amostra
Aquecimento	1h	920°C	TN

Fonte: Próprio autor.

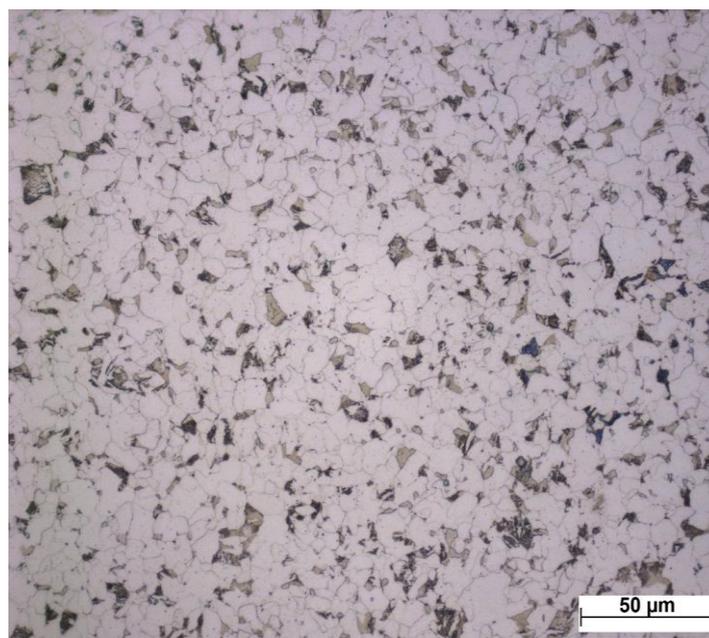
A figura 13 mostra a microestrutura da amostra TN, que foi temperada em banho de nitrogênio a temperatura -196°C . Nessa amostra, esperava-se uma severa taxa de resfriamento, devido a temperatura muito baixa do banho, e logo uma formação de martensita (parte escura da micrografia) muito mais agulhada que nos tratamentos anteriores. Verificando a microestrutura formada e observada na micrografia, percebe-se a formação de martensita, agulhada o que comprova que a taxa de resfriamento foi suficientemente alta para aumentar a tetragonalidade da mesma. Porém, devido a tensão superficial do nitrogênio líquido ser muito grande, não se fez muito contato com a peça, o que justifica que em algumas regiões não houve esse resfriamento tão severo, o que justifica não haver uma microestrutura similar com a tempera em água. Havendo assim, uma microestrutura com aspecto intermediário entre a tempera em água e a tempera em óleo. É possível ainda, observar os contornos de grãos da ferrita formada (parte clara da micrografia), além da formação de ferrita acicular (parte escura da micrografia).

Figura 13: Microestrutura do aço API 5L X70 austenitizado a 920°C e resfriado em nitrogênio líquido com taxa de 400°C/s. Ataque Nital 2%. Aumento 500x.



Fonte : Elaborado pelo próprio autor. Legendas; M = Martensita.

Figura 14: Microestrutura do aço API 5L X70 austenitizado a 920°C e resfriado em ar calmo. Ataque nital 2%.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A figura 14 mostra o aço API submetido a tratamento térmico a 920°C. A microestrutura inicial é composta por ferrita-perlita. A normalização foi eficiente com taxa de resfriamento de 2°C/s ocorreu a homogeneização e refino de grão. A tabela 8 mostra os parâmetros utilizados no tratamento térmico.

Tabela 8: Resfriamento em ar calmo.

Tratamento térmico	Tempo	Temperatura	Amostra
Aquecimento	1h	920°C	N

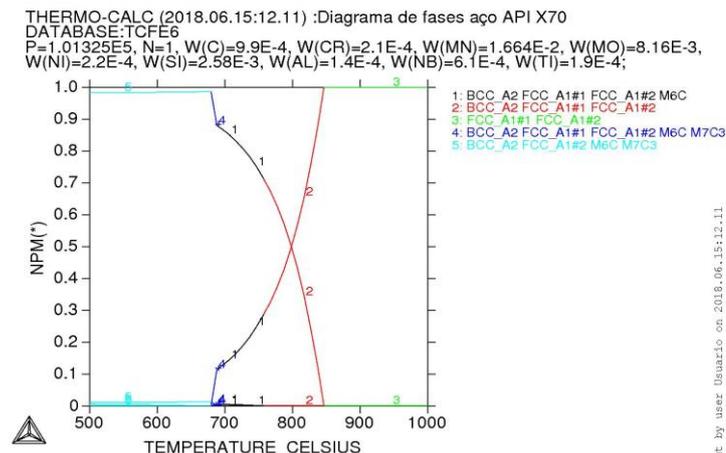
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

9.2 Termocalc

A termodinâmica computacional tem a função de estimar possíveis fases através de dados físico-químicos usando um software chamado *THERMO-CALC*®. O *software* possui o banco de dados TCFEG6 seguindo o protocolo CALPHAD (*Computer coupling of Phase diagrams and Thermoche Mistry*).

Esse *software* é utilizado em inúmeras aplicações da siderurgia na identificação das fases presentes, quantitativamente e qualitativamente. De acordo com gráfico da figura 8, no digrama de equilíbrio na temperatura de 920°C ocorre à solubilização de carbonetos, ou seja, só existe a fase matriz austenita. Na temperatura de 916 °C não há a fase austenita. Entre a temperatura 500 °C á 688 °C existem Mo₆C, W₆C, Nb₆C e Ta₆C com teor muito baixo. Analogamente, o carboneto Cr₇ C₃ a porcentagem é baixíssima.

Figura 15: Simulação termodinâmica para o aço API X 70.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

9.3 Microdureza

Foi realizado o ensaio de dureza nas amostras tratadas termicamente do aço API 5L X70, para posterior análise. Os resultados da medição de dureza são apresentados na tabela 8.

Tabela 08: Banho e dureza avaliada API 5L em diferentes taxas de resfriamento.

Banho	1	2	3	Dureza (HV)
CR	210	205	215	210
Banho de água e Revenido	155	166	164	161,67
Banho de óleo	172	164	168	168
Banho de água	210	196	210	205,33
Banho de nitrogênio	185	185	178	182,67
Normalização	152	156	150	152,67

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Verificou-se que a taxa de resfriamento do banho de nitrogênio foi intermediária entre o banho de água e óleo. Foi comprovado pelo resultado da dureza, apresentando, no gráfico 1.

A dureza alta da amostra temperada em água é explicada pelo o crescimento excessivo de grão e parte do carbono que transformou em martensita formada em certa região definida como C4.

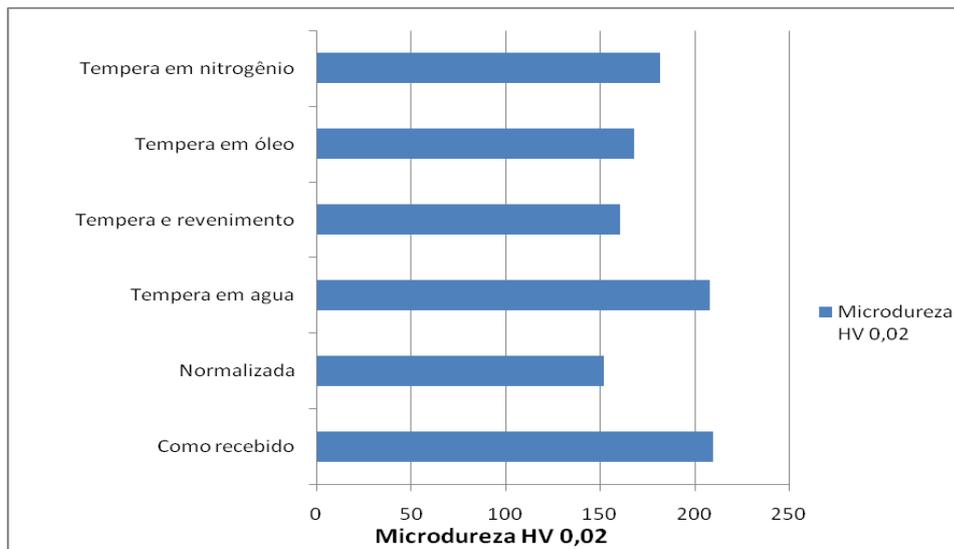
A alta dureza da peça como recebida é justificada pelo fato da mesma está laminada, ela está tensionada, o que encrua seus grãos, aumentando a dureza sobre os mesmos.

Fazendo um comparativo entre a tempera em água e a tempera em água com revenimento, a dureza da primeira é significativamente maior que a da segunda, tendo em vista que o revenimento é justamente para diminuir as tensões induzidas pela martensita e o

severo resfriamento. Logo, revenimento é muito utilizado para evitar falhas estruturais devido a essa alta rigidez obtida com o têmpera em água.

Das peças, a com menor dureza foi a normalizada, provavelmente, devido a o maior numero de contornos de grãos, já que devido a branda taxa de resfriamento, deu-se mais tempo para ocorrer as transformações difusionais. Para o uso no qual se requer alta tenacidade, esse é a melhor opção de uso.

Gráfico 01: Exemplo de valores medidos de microdurezas de diversos tratamentos térmicos.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

11. Sugestões Futuras.

De acordo com a literatura para o controle de taxa de resfriamento, utilizam-se diferentes meios de têmpera, com diferentes gradientes de temperaturas. Podemos usar banho de nitrogênio, Hélio, argônio e água adicionada de polímeros. Os polímeros mais comuns são: Polialquil Glicol (PAG), Polivinil Pirrolidona (PVP), Poliacrilato de Sódio (PA) e polivinil álcool (PVA).

Como sugestão, é preciso averiguar a direção cristalográfica de orientação dos grãos após cada tratamento, além da textura, posteriormente realizar os tratamentos termoquímicos pra averiguar se a indução de alguns elementos, como nitrogênio ou aumentar o teor de carbono, melhora as propriedades mecânicas desse aço, além de melhorar a soldabilidade. Averiguar a soldabilidade do aço após cada tratamento térmico.

12. Conclusão.

Com base nos resultados experimentais, e no que foi proposto para o presente trabalho, foi possível que em seções finas, a taxa de resfriamento seja suficiente para produzir ilha de martensita sem uso de elementos de ligas nos seguintes banhos água, óleo e nitrogênio. No entanto não aconteceu de maneira significativa pelo fato de não acontecer à completa difusão do carbono na transformação de austenita para martensita, pois não ocorreram eficiente as taxas de resfriamentos aplicadas, devido ao material ter baixos teores de ligas, não formando 100% uma estrutura martensítica, devido a taxa de resfriamento não ser o suficiente para chegar na temperatura final de transformação martensítica do gráfico TTT do aço em questão do trabalho.

Pelos resultados, também foi observado que, com a laminação presente na amostra como recebida, encontrou-se uma dureza similar a peça quando foi temperada em água, mantendo a estrutura ferrítica e perlítica, o que mantém basicamente a tenacidade, que é uma propriedade extremamente importante para o uso desse material na indústria petrolífera.

REFERÊNCIAS

- AUGUSTO DE SOUZA. S, **Composição Química dos aços**, 2006. Editora Edgard Blucher.
- ANDRÉ L. COSTA e SILVA, PAULO E. **Aços e ligas especiais**, 2010. Editora blucher.
- BARBOSA. L. H. S. **Efeito da espessura na tenacidade á fratura e no crescimento de trinca por fadiga em um aço do tipo API 5L – X70**. Universidade Federal de Ouro Preto – Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Ouro Preto, MG , 8 outubro. 2012.
- BRUNA GOMES F, LUIS. A. H. **Avaliação microestrutural de um aço API após tratamento térmico de homogeneização**. Congresso fluminense de instituição científica e tecnológica- V CONFIET- Campos dos Goytacazes/RJ, 2013.
- BRUNO RYUDI, **Avaliação da influência da taxa de resfriamento posterior ao tratamento térmico nas propriedades mecânicas do aço API 5L X70**- Universidade estadual paulista “Júlio de Mesquita Filho” Campus de Guaratinguetá, São Paulo, Guaratinguetá, 2013.
- BRUNDLE, C., EVANS, C., & WILSON, **ENCYCOLOPEDIA OF MATERIALS CHARACTERIZATION SURFACES, INTERFACES**, tin Films.
- CALISTERT, JR. **FUNDAMENTOS DA CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**. Uma abordagem integrada. Segunda edição – LTC, 2006.
- CHIAVERINI, V. Tratamento térmico dos aços. Recozimento, normalização, têmpera e revenido; coalescimento. Aços e ferros fundidos. 4 ed. São Paulo: ABM, 2007. p, 41- 50.
- M.R .FOUROUZAN, A. HEIDARI, AND S.J. GOLESTANFH **FE Simulation of submerged arc welding of API 5L X70 straight Seam oil and Gas Pipes**. Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology Said Pipe and Equipment Co, Tehran , Iran.
- GUIMARÃES, V. A . **Influencia da taxa de resfriamento nas propriedades mecânicas e no micromecanismo nas propriedades mecânicas e micromecanismo de fratura de um**

aço microligado com nióbio e titânio. 1997. Tese (Doutorado). Faculdade de engenharia mecânica, Universidade estadual de Campinas, Campinas. P .157.

GORNI A, SILVEIRA J – **Resfriamento acelerado de chapas grossas : o futuro chegou** , 2006.

Masoumi, M. Echeverri E. A. E, Silva. C.C, DE Abreu .H . F. G, **Effect of different Thermomechanical Processes on the Microstructure, Texture, and Mechanical Properties of API 5L X70 Steel.** Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, 720, Fortaleza, Brasil.

Specification for line pipe, API specification 5L, American petroleum institute, outubro 2008.

SENA B.M, GODEFROID. L.B, **Avaliação da influência de diferentes tratamentos térmicos sobre as microestruturas e propriedades mecânicas de tubos sem costura do tipo API 5L.** 22º CBECimat- Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências do Materiais 06 a 10 de novembro de 2016, Natal, RN, Brasil.

GORNIA.A, GONZALEZ .M. F.R **Curva TRC e sua caracterização microestrutural para um aço microligado para tubos API 5L- X80.** 2008. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência de Materiais e Porto de Galinhas. Pernambuco.

JOÃO FRANCISCO B, P. **Os novos aços de ultraresistência obtidos por transformação de fase.** Usiminas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A. – Usiminas.

NUNES, CARLOS ANGELO. LÚCIA OTHÉRO DE BRITO, VERA. **Evolução dos aços para tubos API utilizados no transporte de óleo e gás.** Faculdade de Engenharia Química de Lorena – Departamento de Engenharia de Materiais, Pólo Urbo Industrial Gleba AI-6 – Mondesir – Lorena – SP.

MATTIOLI .C. G, MODENESI. P. J, BRACARENSE. A. Q, OLIVEIRA, M.P. **Fissuração pelo hidrogênio em um aço API 5L X 70 solado com eletrodos celulósicos de diferentes níveis de resistência.** Soldagem e Inspeção, vol 23 N° 1 , São Paulo Jan/Mar. 2018.

OLIVEIRA. R. V. tratamento térmico de um tubo de aço API 5L X 65 **Utilizado em curvamento por indução.** Instituto Militar de Engenharia – Curso de Mestrado em ciência do materiais. Rio de Janeiro -2014.

RIZZO, ERNANDES M. da S. **Processos de Laminação dos Aços: uma introdução,** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais ABM, 2007.

REZENDE, G dos S. **Transformações de Fases: em Materiais Metálicos.** Editora Unicamp. 2006.

RODRIGO J. FERREIRA da SILVA. **Estudos dos efeitos dos tratamentos termomecânicos sobre a microestrutura e propriedades mecânicas do aço API 5L – X 70.** Universidade Federal de Pernambuco Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Recife, 2010.

Rodrigo Vicente B. T , Prof Dr. Leonardo Barbosa Goddfroid. **Estudo dos Aços Microligados API – 5L – X70, usados para confecção de tubos, quando à tenacidade à fratura.** Universidade Federal de Ouro Preto – Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Ouro Preto, MG , Brasil. 2008.

RYUDE B. **Avaliação da influência da taxa de resfriamento posterior ao tratamento térmico nas propriedades mecânicas do aço API 5L X 70.** Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho Campus Guaratinguetá”, Guaratinguetá, 2013.

Specification for line pipe, API specification 5L, American Petroleum Institute, october 2008.

SENA, B, M.GODEFROID L.B **Avaliação da influência de diferentes tratamentos térmicos sobre as microestruturas e propriedades mecânicas de tubos de aço sem costura do tipo API 5L.** Universidade Federal de Ouro Preto – Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Ouro Preto, MG , Brasil. 2016.

SANTOS. I. M, MIRANDA.R **Elaboração de um diagrama TAC para um aço de alta tenacidade API X-70**. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia de materiais. Faculdade de ciências e Tecnologia universidade Nova Lisboa. Dezembro, 2013.

THIAGO de FREITAS C. **Estudo microestrutural e da dureza dos aços ABNT 1020, 1045 e 1080, sob o tratamento térmico de austenitização, com os resfriamento em água, óleo e ar sob ar**, monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Centro tecnológico, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

TESTMAT Tabela elementos de liga, EAD Eng^o de materiais. Material intelligence.

<http://www.testmat.com.br/wp-content/uploads/2018/01/efeito-elementos-liga-tratamento-termico.pdf>

TORRES. C. F. G, BUONO. V. T. L, DE MELO. T.M. F, **Influência do corte a gás nas propriedades mecânicas do aço API 5L X 70 proveniente de resfriamento acelerado**. Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, 2013 .

VICENTE BRAZ T. , WILLIAM RODRIGUES S.,Geraldo L de F. Secretaria Municipal de Educação. **Influência de Diferentes Tratamentos Térmicos sobre a Microestrutura e propriedades de dois aços para aplicação na indústria de óleo e gás**. 70^o Congresso Anual. 2017.

