

VITOR DONATO VAZ DE BELLIS

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E FRACTOGRÁFICA
DE TUBOS DE AÇO TEMPERADO E REVENIDO (NORMA API X80)**

São Paulo

2009

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

VITOR DONATO VAZ DE BELLIS

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E FRACTOGRÁFICA
DE TUBOS DE AÇO TEMPERADO E REVENIDO (NORMA API X80)**

São Paulo

2009

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

VITOR DONATO VAZ DE BELLIS

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E FRACTOGRÁFICA
DE TUBOS DE AÇO TEMPERADO E REVENIDO (NORMA API X80)**

**Trabalho de Formatura apresentado ao
Departamento de Engenharia Metalúrgica e
de Materiais da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.**

**Área de Concentração:
Engenharia Metalúrgica**

**Orientador:
Prof. Dr.Cesar R. de Farias. Azevedo**

São Paulo

2009

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz energética mundial.....	3
Figura 2 - Matriz Energética Brasileira (2007).....	4
Figura 3 - Consumo mundial de energia por fonte.....	5
Figura 4 - Reservas mundiais de petróleo.....	6
Figura 5 - Amostra para Análise Química de Verificação.....	6
Figura 6 - Localização das reservas de petróleo e gás natural em território brasileiro.....	7
Figura 7 - Ilustração indicando a localização do pré-sal.....	8
Figura 8 - Esquema ilustrativo de uma coluna usada para exploração de petróleo no mar.....	11
Figura 9 - Desenvolvimento dos aços para tubos API.....	12
Figura 10 - Tamanho de grão obtido pelos diferentes processos de laminação.....	13
Figura 11 - Diferentes processos de nucleação.....	13
Figura 12 - Etapa de desbobinamento.....	18
Figura 13 - Etapa de corte de aparas das bobinas.....	19
Figura 14 - Etapa de "Fin-Pass".....	20
Figura 15 - Etapa de soldagem dos tubos.....	21
Figura 16 - Etapa de esmerilhamento.....	23
Figura 17 - Resumo das etapas de fabricação dos tubos antes do tratamento térmico.....	24
Figura 18 - Esquema do processo de tratamento térmico de têmpera e revestimento.....	26
Figura 19 - Amostra após ensaio de tração.....	26
Figura 20 - Análise de Inclusões na Direção Longitudinal do tubo. Aumento de 100X.....	29
Figura 21 - Análise Microestrutural na Direção Transversal ao tubo. Amostras A,B e C. Aumento de 200x. Ataque Nital 2%.....	30
Figura 22 - Análise Microestrutural na Direção Transversal ao tubo. Amostras A,B e C. Aumento de 1000x. Ataque Nital 2%.....	31
Figura 23 - Análise Microestrutural na Direção Longitudinal ao tubo. Amostras A,B e C. Aumento de 200x. Ataque Nital 2%.....	32

Figura 24 - Análise Microestrutural na Direção Longitudinal ao tubo. Amostras A,B e C.	
Aumento de 1000x. Ataque Nital 2%.....	33
Figura 25 - Exame em MEV, a) Aumento 2000X; b) Aumento 5000X; Análise microestrutural na direção Longitudinal ao tubo da Amostra A. Ataque Nital 2%.....	34
Figura 26 - Exame em MEV, a) Aumento 2000X; b) Aumento 5000X; Análise microestrutural na direção Longitudinal ao tubo da Amostra B. Ataque Nital 2%.....	35
Figura 27 - Exame em MEV, a) Aumento 2000X; b) Aumento 5000X; Análise microestrutural na direção Longitudinal ao tubo da Amostra C. Ataque Nital 2%.....	36
Figura 28 - Exame em MEV, a) Aumento 2000X; b) Aumento 5000X; Análise microestrutural na direção Transversal ao tubo da Amostra A. Ataque Nital 2%.....	37
Figura 29 - Exame em MEV, a) Aumento 2000X; b) Aumento 5000X; Análise microestrutural na direção Transversal ao tubo da Amostra B. Ataque Nital 2%.....	38
Figura 30 - Exame em MEV, a) Aumento 2000X; b) Aumento 5000X; Análise microestrutural na direção Transversal ao tubo da Amostra C. Ataque Nital 2%.....	39
Figura 31 - Análise Química por EDS da Superfície da Amostra A longitudinal ao tubo.....	40
Figura 32 - Análise Química por EDS da Superfície da Amostra B longitudinal ao tubo.....	41
Figura 33 - Análise Química por EDS da Superfície da Amostra C longitudinal ao tubo.....	42
Figura 34 – Inspeção da superfície de fratura da amostra A com lupa. Aumento 10X.....	43
Figura 35 – Exame Microfractográfico em MEV da amostra A. Aumento 5000X.....	43
Figura 36 – Inspeção da superfície de fratura da amostra B com lupa. Aumento 10X.....	44
Figura 37 – Exame Microfractográfico em MEV da amostra B. Aumento 5000X.....	44
Figura 38 – Inspeção da superfície de fratura da amostra C com lupa. Aumento 10X.....	45
Figura 39 – Exame Microfractográfico em MEV da amostra C. Aumento 5000X.....	45
Figura 40- Relação entre tamanho de grão austenítico e martensítico.....	47
Figura 41 – Exemplo de diagrama TTT.....	48
Figura 42 - Relação da temperatura do revenido e das propriedades mecânicas.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Processos de Manufatura e Tratamento Térmico, segundo especificação 5CT / ISO 11960.....	10
Tabela 2 – Composição química, fração mássica em porcentagem, segundo Especificação 5CT / ISO 11960.....	17
Tabela 3 - Dados da Norma API 5CT L80.....	27
Tabela 4 – Dados das propriedades mecânicas das amostras A, B e C.....	27
Tabela 5 - Temperaturas de Têmpera das amostras A, B e C.....	27
Tabela 6 – Temperaturas de Revenimento e Tempo de Encharque das amostras A, B e C.....	28
Tabela 7 - Dados referentes à norma API 5CT.....	46

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus pelo dom da vida e pela realização desta etapa tão importante em minha caminhada.

À minha família, apoio e fonte de muita força e fé em cada etapa da minha formação. Desta maneira, este trabalho é dedicado especialmente ao meu pai, Donato De Bellis Júnior, minha mãe, Rosângela Vaz Pereira De Bellis e à minha irmã Beatriz Vaz De Bellis. Agradeço ainda à Beatriz Flores Pereira e Elza Zenha De Bellis, minhas avós que tanto acreditavam no meu sucesso, mas tiveram que nos deixar.

Aos meus amigos de toda vida, Ademir Serafim Júnior, Cínthia Magalhães, Daniel Rodrigues, Fernando Goiano, Marilia Murakami, Marilia Garcia, Rafael Escrich e Rodrigo José, pelos momentos de alegria e amizade, mas principalmente pelo suporte nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos que compartilharam das mesmas dificuldades e alegrias ao longo dos anos de faculdade: Alberto Massao, Lucas Almeida, Lucas Sanches, Ricardo Sakai e Rodrigo Inglez. Ainda agradeço ao amigo de infância que contribuiu diretamente para o sucesso da minha graduação, Roberto Piaissi Passos Bodo.

Ao meu orientador, Professor Cesar Roberto de Farias Azevedo, pela atenção e compreensão durante a realização deste trabalho. Também agradeço ao professor Fernando José Gomes Landgraf pelo apoio e acolhida na fase final desta etapa.

Ao engenheiro Fernando Matuda pela presteza e atenção com este trabalho, de maneira que sempre esteve empenhado com a realização e o sucesso deste.

ABSTRACT

Global demand for energy increases dramatically every year. And at the same pace, the use of fossil fuels or any other non-renewable energy source that causes environmental impact have been opposed.

Countries such as Brazil, which is blessed by its geography and soil, presents significantly part of renewable energy in its annual energy balances, such as hydroelectric power and ethanol. However, oil remains the most important fuel and consumed in the world. In fact, this source of energy follows the human development, and the human race becomes so dependent on all sectors of the transport industry.

This fact makes the exploitation of oil continue increasing, and faster. Therefore, all stages, from extraction, production to transportation has been increasingly in demand and depends on a high-performance materials for pipes and equipment involved in these processes.

The progress of the mechanical properties is critical for such working conditions are achieved. However, these specifications must be within an expected standard for the material in question in the respective certification. The standards are developed by organizations like the American Petroleum Institute (API) that avoid accidents and environmental impacts

The material to be studied in this document are the steel pipes API 5CT L80 and is used in oil exploration, and it is classified as OCTG (Oil Country Tubular Goods). These tubes that pass through the ERW (Electric Resistance Welding), and then by heat treatment will be analyzed trough samples of the traction test to understand the relationship between the microstructure of steel, the mechanical properties of material and manufacturing process of the tubes.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	2
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Panorama Energético	3
2.1.1. Panorama Energético Mundial	3
2.1.2. Panorama Energético Brasileiro.....	4
2.1.3. Petróleo no mundo	5
2.1.4. Petróleo no Brasil	7
2.2. Desenvolvimento dos aços API.....	9
2.2.1. Aços API 5CT	9
2.2.2. Composição química.....	12
2.2.3. Processo de fabricação	14
2.3. Processo ERW.....	18
2.4. Tratamento Térmico	25
3. Materiais e Métodos	26
3.1. Materiais.....	26
3.2. Métodos.....	27
4. Resultados.....	29
4.1. Microscopia.....	29
4.1.1. Análise do nível de Inclusões.....	29
4.1.2. Microscopia Optica	29
4.1.3. Microscopia Eletrônica	34
4.1.4. Análise da Composição Química.....	40
4.2 .Caracterização Macro e Microfractográfica.....	42
5. Discussão.....	46
6. Conclusão.....	50
7. Referências Bibliográficas	52

1. Introdução

A demanda mundial por energia aumenta vertiginosamente ano a ano. E neste mesmo ritmo o uso de combustíveis fósseis ou qualquer outra fonte de energia não renovável que cause impacto ambiental têm sido combatidos. Países, como o Brasil, que é abençoado pela sua geografia e solo, apresentam números representativos no consumo de energia renovável nos seus balanços energéticos anuais, como por exemplo, a energia hidrelétrica, e o etanol.

Porém, o petróleo continua sendo o combustível mais importante e utilizado no mundo. Na realidade, esta fonte de energia é a que acompanha o desenvolvimento humano e torna a raça humana tão dependente, em todos os setores, dos transportes à indústria.

Este fato faz com que a exploração do petróleo avance cada vez mais, e mais rápido. Portanto, todas as etapas, desde a extração, produção até o transporte tem sido cada vez mais exigidas e dependem de um alto desempenho dos materiais de tubos e equipamentos envolvidos nestes processos.

O avanço das propriedades mecânicas é fundamental para que tais condições de trabalho sejam alcançadas. Porém, estas especificações devem estar dentro de um padrão previsto para o material em questão na norma respectiva. As normas são elaboradas por entidades como a *American Petroleum Institute* (API), que através destas evitam acidentes e impactos ambientais.

O material a ser estudado neste trabalho são os tubos em aço que atendem a norma API 5CT grau L80 e são utilizados na exploração do petróleo, e por isso são classificados em tubos OCTG (*Oil Country Tubular Goods*). Estes tubos que passam pelo processo ERW (*Electric Resistance Welding*) seguido de tratamento térmico terão amostras do ensaio de tração caracterizadas e ao longo deste trabalho serão estudadas a relação entre as microestruturas do aço, as propriedades mecânicas do material e o processo de fabricação dos tubos.

Palavras-chave: Tubos API 5CT L80; Tubos OCTG; Tratamento térmico;

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Panorama Energético

2.1.1 Panorama Energético Mundial

A crescente demanda do homem por energia tem迫使 o avanço tecnológico de todas as áreas envolvidas com este setor, da obtenção ou extração até a transformação. Não poderia ser diferente com os tubos para transporte de petróleo e gás natural, tema deste trabalho, que têm cada vez maior exigência quanto às propriedades de trabalho.

Para entender este processo e ter maior compreensão do trabalho a seguir, é necessário fazer uma análise preliminar do setor energético mundial, assim como do brasileiro, em questões atuais e também nas expectativas do setor no plano econômico, político e ambiental.

As fontes de maior utilização ao redor do mundo são o carvão, petróleo e o gás natural que ao todo somam 80% da energia consumida mundialmente [2]. Todas estas, principalmente as duas ultimas, são extremamente debatidas por vários aspectos, e em destaque, pelo fato da extensão das reservas naturais, do impacto ambiental por serem potenciais poluidores, pelos preços instáveis e crescentes e também pela questão geopolítica sendo origem de entraves ao redor do mundo.

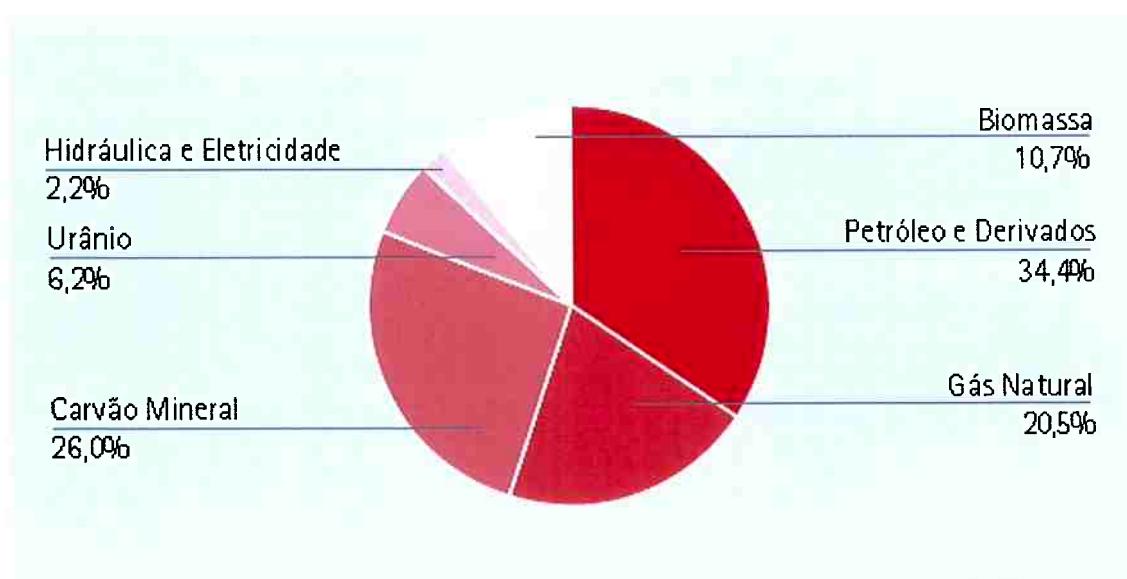


Figura 1 – Matriz energética mundial. [2]

2.1.2 Panorama Energético Brasileiro

De acordo com o cenário mundial de produção e consumo energético, o Brasil ganha grande destaque, devido ao incentivo e a produção de fontes alternativas de energia para utilização industrial, veicular e residencial. Além do apelo das questões ambientais pelo desenvolvimento sustentável, o preço dos combustíveis de fonte de energia tradicional faz com que sejam necessárias novas alternativas. Estas, conhecidas como “energia limpa”, têm grande potencial no cenário nacional através do etanol, biodiesel e bioeletricidade.

Além da grande participação das fontes renováveis em sua matriz energética, deve-se destaque ao Brasil devido às grandes reservas de gás e petróleo e auto-suficiência energética.

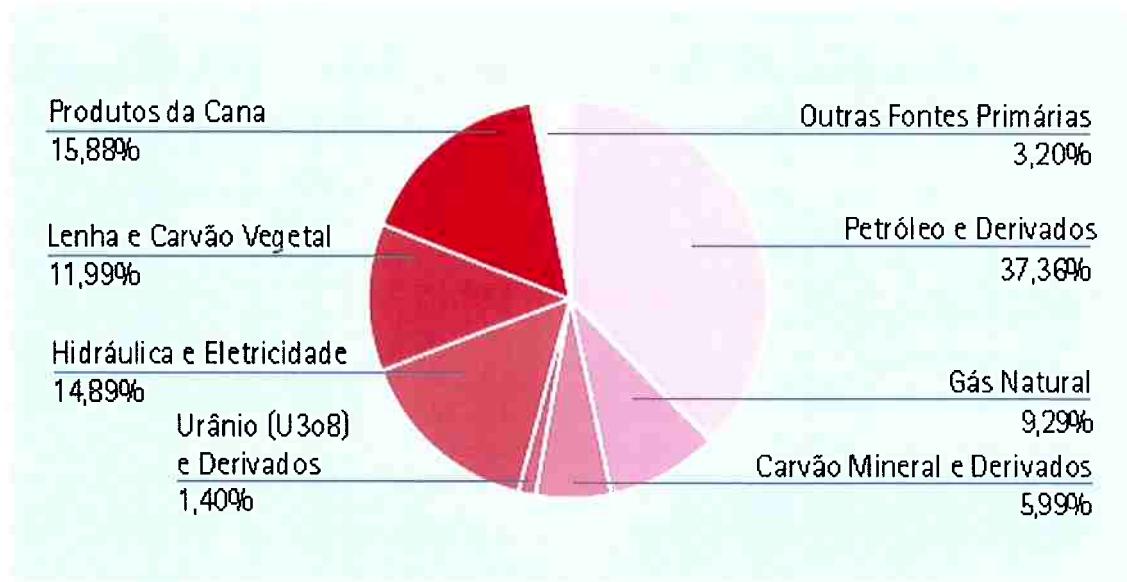


Figura 2 - Matriz Energética Brasileira (2007).[2]

Novas descobertas de grandes reservas de petróleo e gás natural em altas profundidades na chamada camada do pré-sal, deve garantir um futuro mais promissor a estes dois insumos no Brasil nas próximas décadas. De outro lado, a produção nacional de petróleo viveu, também, grande desenvolvimento, graças a vultosos investimentos em prospecção e exploração, que permitiram à Petrobrás a aplicação de tecnologia pioneira no mundo de extração de petróleo em águas profundas

2.1.3 O Petróleo no mundo

O petróleo é a combinação complexa de hidrocarbonetos, composta na sua maioria de hidrocarbonetos alifáticos, alicíclicos e aromáticos, podendo conter também quantidades pequenas de nitrogênio, oxigênio, compostos de enxofre e íons metálicos, principalmente de níquel e vanádio. Substância esta, maior fonte de energia ao redor do mundo e também motivo de muita instabilidade política e social.

A extração pode ser realizada na parte continental, conhecida como onshore, com custos inferiores e engenharia menos complexa em relação à extração submarina, conhecida como offshore, de investimentos superiores e tendo a exploração em águas profundas como grande desafio, caso do pré-sal.

A utilização do petróleo é crescente, porém podemos observar no gráfico da evolução de consumo que cada vez mais o uso deste combustível aumenta.

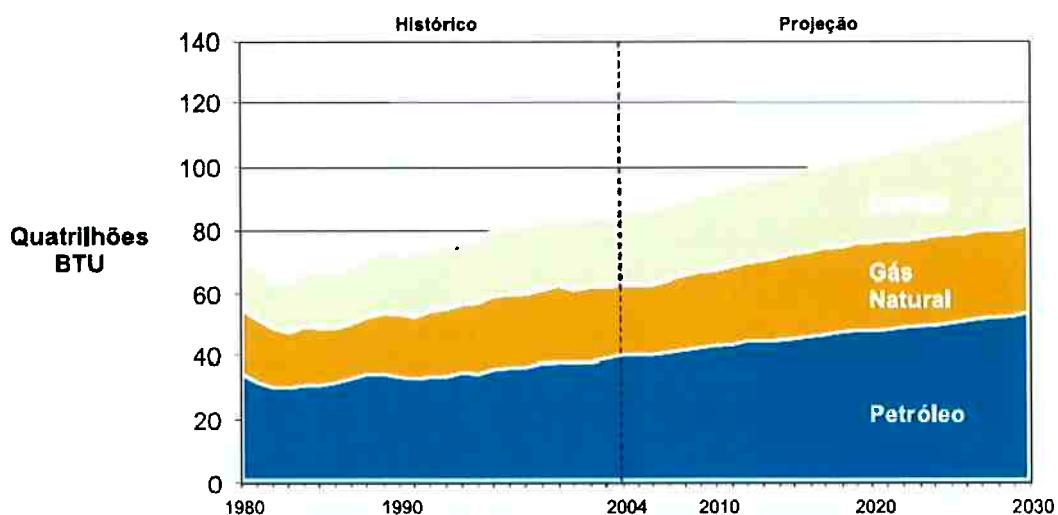


Figura 3 – Consumo mundial de energia por fonte. [1]

As reservas de petróleo são altamente concentradas e segundo estatísticas que podem ser observadas na figura abaixo, cerca de 85% das reservas estão distribuídas por apenas 10 países. Estes dados servem como justificativa para constantes conflitos, ameaças e instabilidades políticas devido à grande importância econômica e estratégica deste insumo.

Um dos reflexos do alto valor do petróleo e a ganância dos estados. Por este recurso está no fato das maiores reservas pertencerem aos estados e não a empresas de grande porte, como por exemplo, a Exxon que no ano de 2006

registrou a incrível marca de 406 bilhões de dólares, se sagrando a empresa com maior valor de mercado no mundo. Ou seja, os países se utilizam do petróleo para ser adicionado à renda dos recursos energéticos nacionais e também instrumento de negociação entre países.

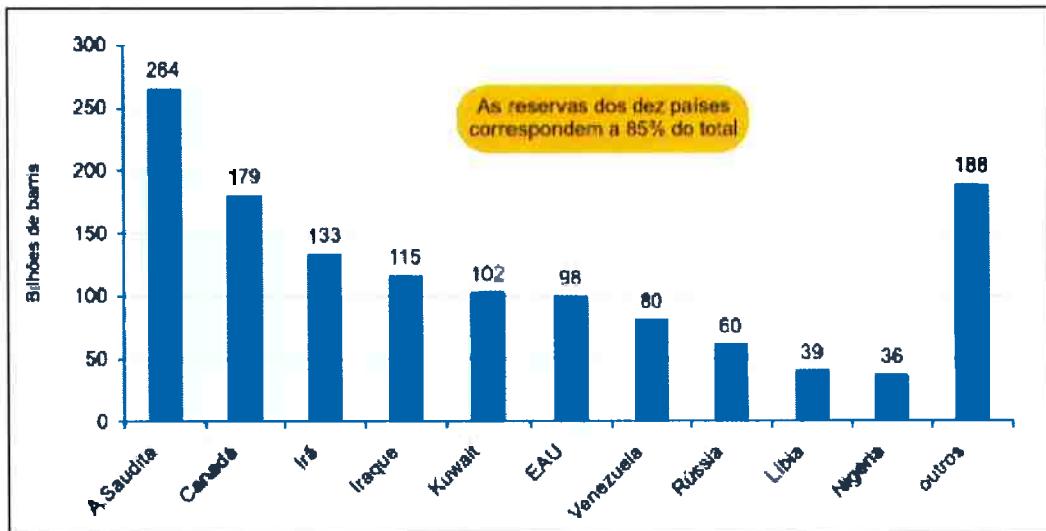


Figura 4 – Reservas mundiais de petróleo. [1]

A exploração e uso do petróleo são crescentes a cada ano, e por se tratar de um recurso não renovável, diversas instituições debatem sobre o pico de extração e produção deste combustível e datas para a extinção deste insumo são projetadas, como ilustra a figura 5. Ou seja, a combinação da demanda crescente, da produção decadente e de seguidas crises geopolíticas afetam diretamente nos preços do petróleo, o que pode por em jogo a utilização deste.

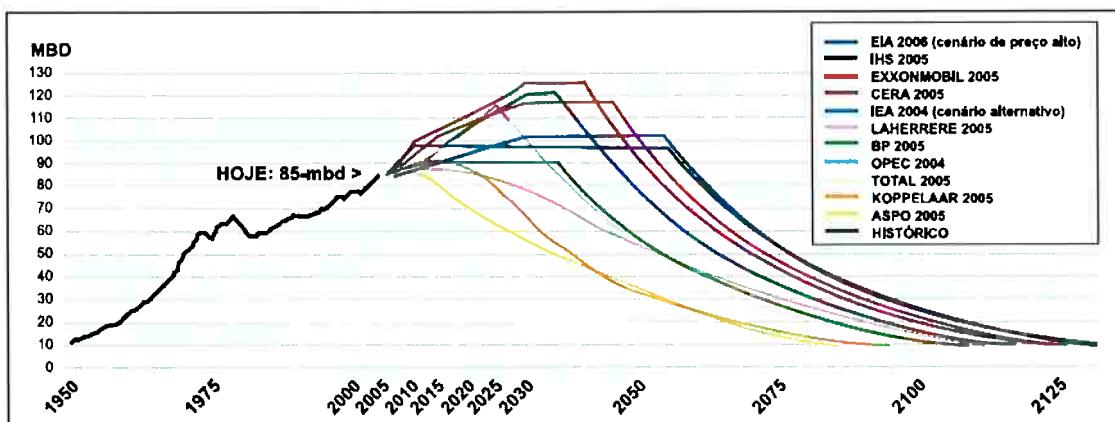


Figura 5 – Projeção de produção de petróleo. [1]

2.1.4 Petróleo no Brasil

A primeira produção de petróleo no Brasil foi feita ainda na década de 40. Sob o controle do Conselho Nacional do Petróleo (CNP), o feito ocorreu no recôncavo Baiano, no subúrbio de Lobato.

Foi então em 1953 que o presidente Getúlio Vargas criou a Petrobras, fruto da campanha o petróleo é nosso, que teve suas atividades iniciadas a partir do acervo da CNP, que teve sua função fiscalizadora mantida.

Após uma década da criação da estatal e controle da maior parte da cadeia que envolvia o petróleo, suas atividades foram ampliadas, portanto, a partir desta data a Petrobras era responsável pela pesquisa, extração *onshore* e *offshore*, além do refino e transporte do insumo e seus derivados.

Em 1974 foi descoberta a principal bacia petrolífera, a bacia de Campos, uma bacia sedimentar, próxima ao norte do Rio de Janeiro. Esta bacia é responsável por 80% da produção nacional do petróleo nacional.

A primeira extração desta bacia foi no campo de Garoupa em 1976, e em 1977 teve início à exploração comercial no campo de Enchova.

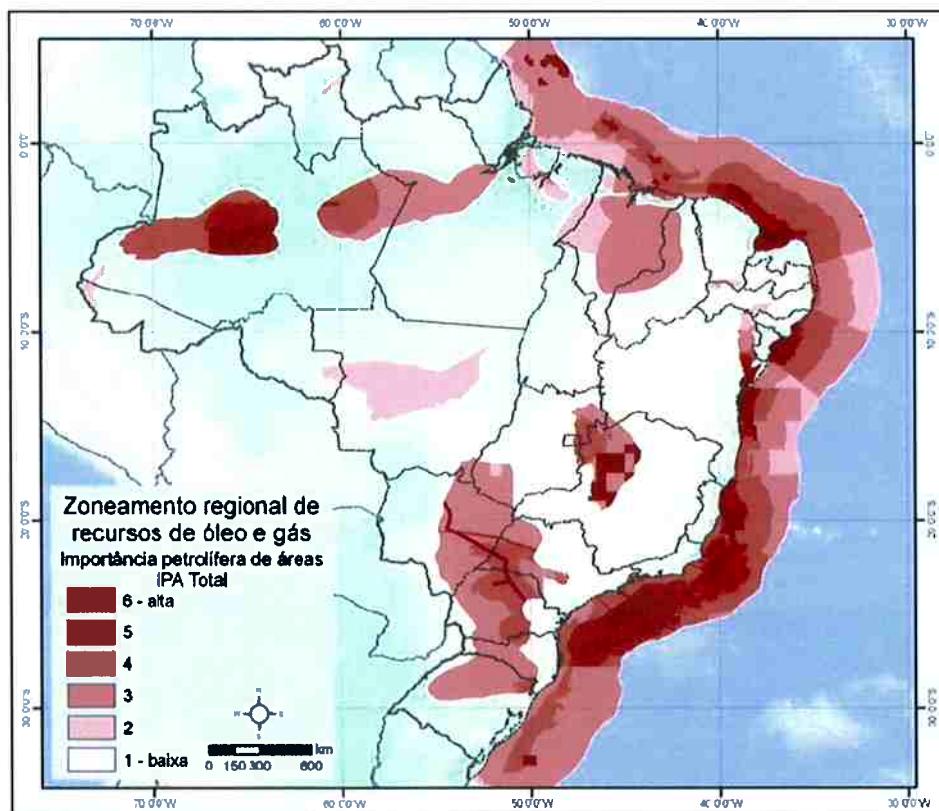


Figura 6 – Localização das reservas de petróleo e gás natural em território brasileiro. [3]

Desta forma, a empresa foi se desenvolvendo sua própria tecnologia e explorando novos poços. Com o tempo, a Petrobrás se tornou referência internacional na exploração de águas profundas e líder mundial neste setor, até sendo consagrada com prêmios, como no projeto Roncador em 2001.

Marco importante para a companhia e na história do petróleo nacional ocorreu em 2006 com o anúncio do alcance da auto-suficiência sustentável por parte do Brasil em petróleo. Esta marca ocorreu juntamente com o início das operações da plataforma P-50, unidade que é capacitada para produzir, processar, armazenar e escoar óleo e gás, que possibilitou com tais características o alcance da auto-suficiência.

O fato impulsionador para que a Petrobras se tornasse exemplo para o mundo e líder na prospecção offshore é que a maior parte das reservas nacionais está no ambiente marinho, o que diferencia toda a exploração. As principais diferenças e dificuldades estão ligadas a pressão, temperatura e o meio, que em muitas vezes, como no caso do Pré-sal são desconhecidos e com propriedades totalmente diferenciadas, como por exemplo, acidez, composição e granularidade.

Esta camada Pré-sal está localizada no campo petrolífero de Tupi, e está sob mais de 2000m de camada de sal marinho depositado no leito oceânico. Estas reservas foram as maiores anunciadas nos últimos tempos, e podem ser ilustradas como na figura 7 que segue abaixo.

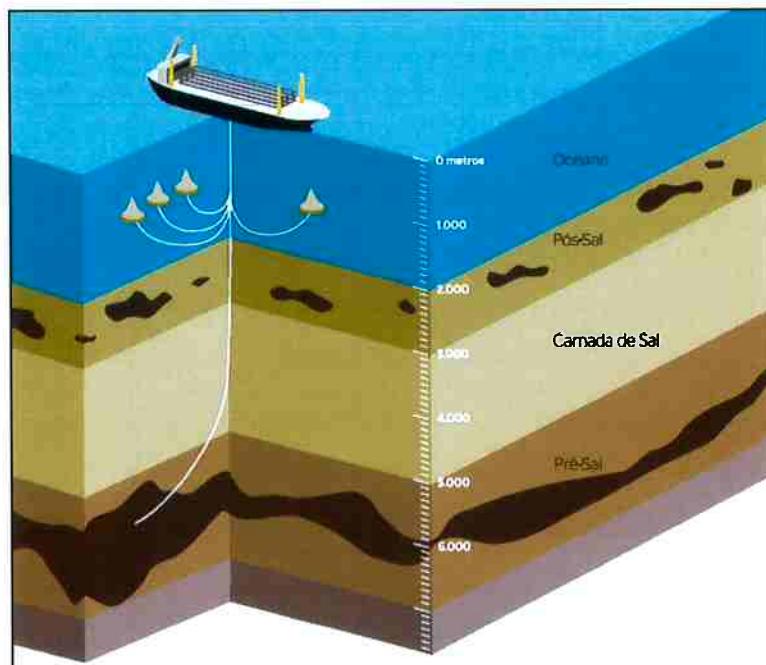


Figura 7 – Ilustração indicando a localização do pré-sal: reservas de petróleo sob a camada de sal. [22]

Visto o panorama atual da empresa e os desafios que estão por vir, os equipamentos e tubos utilizados na prospecção e produção do petróleo serão cada vez mais exigidos. Desta maneira, espera-se cada vez mais da evolução das propriedades mecânicas e de trabalho envolvidos para que cada vez mais a companhia e o petróleo nacional tenham uma história de sucesso.

2.2. Desenvolvimento dos aços API

2.2.1. Aços API 5CT

Os aços utilizados nos tubos e equipamentos de exploração e produção do petróleo têm as propriedades e características rigorosamente controladas através de normas, API por exemplo. Desta maneira são asseguradas exigências que não só zelam pela funcionalidade do material, mas também pela segurança, que envolve trabalhadores e também o meio ambiente.

A melhoria e desenvolvimento dos aços API 5CT visa aumento das propriedades mecânicas, como o limite de escoamento e resistência, aliado a redução cada vez maior da espessura da parede dos tubos. Ou seja, além do aumento da capacidade de trabalho do material, podendo suportar pressões superiores e condições mais agressivas, serão contabilizadas reduções de gastos, como o transporte, graças a redução do peso do material.

Este trabalho tem como foco os tubos de aço API 5CT, ou seja, tubos OCTG (Oil Country Tubular Goods) que são usados na extração e exploração do petróleo. Neste estudo deve-se caracterizar tubos de aço API 5CT de grau L80 e buscar relações das microestruturas encontradas em diferentes amostras, propriedades mecânicas e o processo de fabricação. Abaixo, na tabela1, podemos conferir algumas características do tubo em questão.

Tabela 1 – Processos de Manufatura e Tratamento Térmico – Especificação 5CT / ISO 11960

Grupo	Grau	Tipo	Processo de Manufatura ^a	Tratamento Térmico	Temperatura de Revenimento °C min.
1	H40	-	S ou EW	Nenhum	-
	J55	-	S ou EW	Nenhum ^b	-
	K55	-	S ou EW	Nenhum ^b	-
	N80	1	S ou EW	c	-
	N80	Q	S ou EW	T & R	-
2	M65	-	S ou EW	d	-
	L80	1	S ou EW	T & R	566
	L80	9Cr	S	T & R ^e	593
	L80	13Cr	S	T & R ^e	593
	C90	1	S	T & R	621
	C90	2	S	T & R	621
	C95	-	S ou EW	T & R	538
	T95	1	S	T & R	649
	T95	2	S	T & R	649
3	P110	-	S ou EW ^{f, g}	T & R	-
4	Q125	1	S ou EW	T & R	-
	Q125	2	S ou EW	T & R	-
	Q125	3	S ou EW	T & R	-
	Q125	4	S ou EW	T & R	-

a - S = seamless process; EW = electric-welded process.

b - Todo comprimento normalizado (N), normalizado e temperado (N e T), ou temperado e revenido (T & R), de acordo com o fabricante ou como especificado no momento da compra.

c - Todo comprimento normalizado ou normalizado e temperado de acordo com o fabricante.

d - Todo o tubo deve ter corpo completo tratado termicamente. Todo comprimento normalizado (N), normalizado e temperado (N e T), ou temperado e revenido (T & R), de acordo com o fabricante ou como especificado no momento da compra.

e - Tipo 9Cr e 13Cr podem ser temperados em ar.

f - Requerimentos químicos especiais para EW P110 casing são especificados em outra tabela da norma.

g - Requerimentos especiais únicos para EW P110 e Q125 são especificados em outra tabela da norma.

Os tubos OCTG podem ser classificados de acordo com a sua utilização, como é mostrado na figura 8, e são exemplificados abaixo:

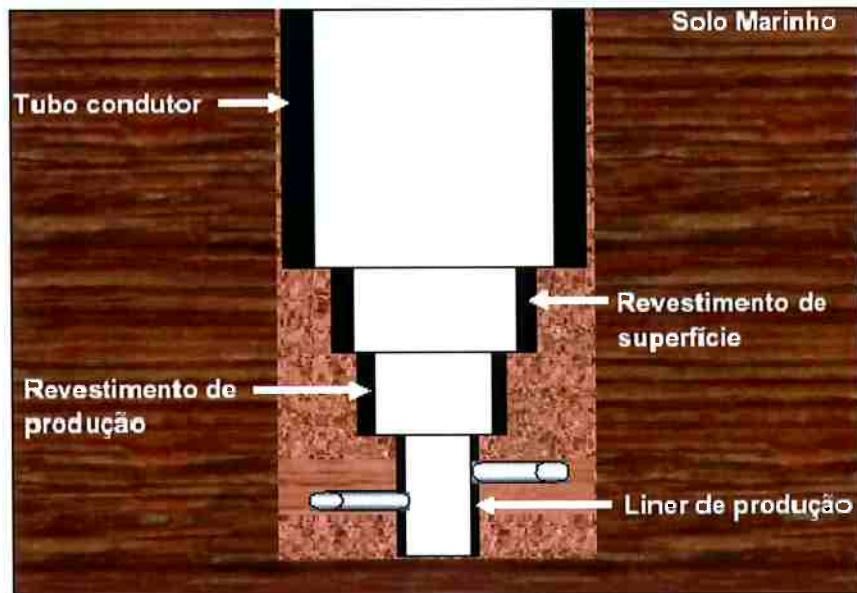


Figura 8 – Esquema ilustrativo de uma coluna usada para exploração de petróleo no mar. [23]

- Tubos de perfuração (drilling): são utilizados para a perfuração de poços;
- Tubos de revestimento (casing): são inseridos nas perfurações e assentados com cimento;
- Tubos de produção (tubing): são tubos posicionados dentro dos tubos de revestimento e utilizados para a extração de óleo e gás. Também são utilizados no transporte de fluidos hidráulicos para o acionamento de equipamentos. [8]

Devido à extrema exposição e a crescente demanda por melhoria e desenvolvimento, é necessário que estes tubos estejam prontos para situações de extrema exigência. Portanto, estes devem possuir alta resistência mecânica, boa soldabilidade (para o caso dos tubos com costura), boa tenacidade e temperabilidade. Estas condições são controladas pela microestrutura final que, por sua vez, é resultante da composição química do aço e do processo de fabricação.

2.2.2. Processo de fabricação

Os processos de fabricação são totalmente relacionados com a qualidade final do produto. A extrema necessidade de melhoria dos produtos, com propriedades cada vez mais rigorosas, torna necessário o avanço contínuo dos métodos e processos de fabricação. Portanto, a fabricação de chapas de aço passou por mudanças e aprimoramentos nos procedimentos de laminação controlada e resfriamento acelerado, conforme será detalhado abaixo.

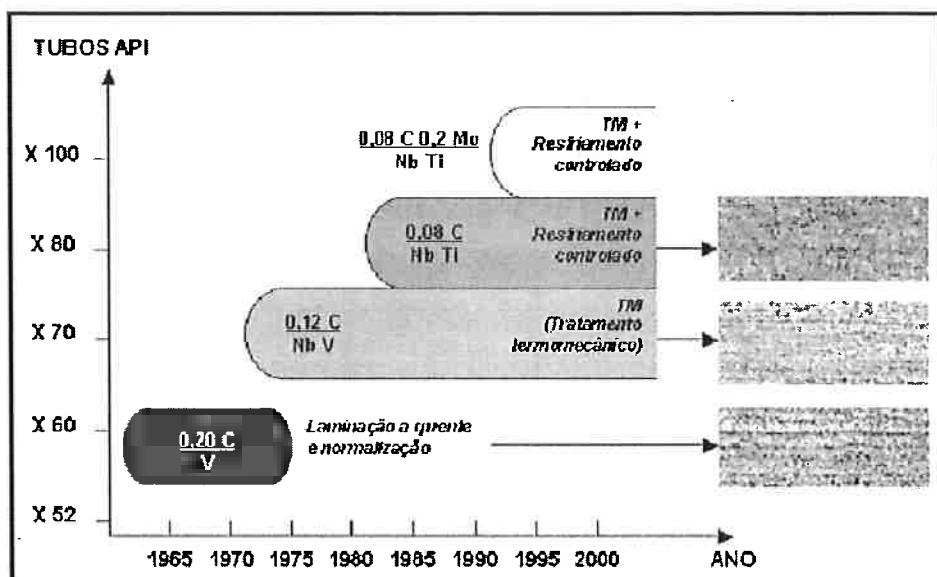


Figura 9 - Desenvolvimento dos aços para tubos API [12].

A microestrutura ferrítico-perlítica não possibilitava o alcance dos níveis exigidos de soldabilidade e tenacidade, portanto desta necessidade, nos anos 70, partiu a substituição da laminação com o tratamento de normalização pelo processo termomecânico da laminação controlada.

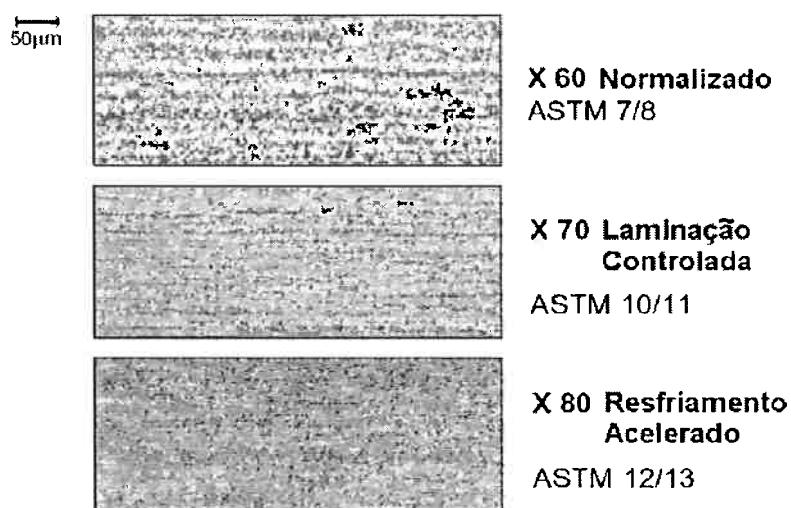


Figura 10 - Tamanho de grão obtido pelos diferentes processos de laminação [10]

Após esta evolução do processo era possível obter um aço com granulação ferrítica fina, que se deve a alta taxa de nucleação da ferrita, ocasionada pelo grande número de sítios de deformação preferencial como contornos de grão austenítico e as bandas de deformação. Ilustra-se o processo de nucleação na figura 11.

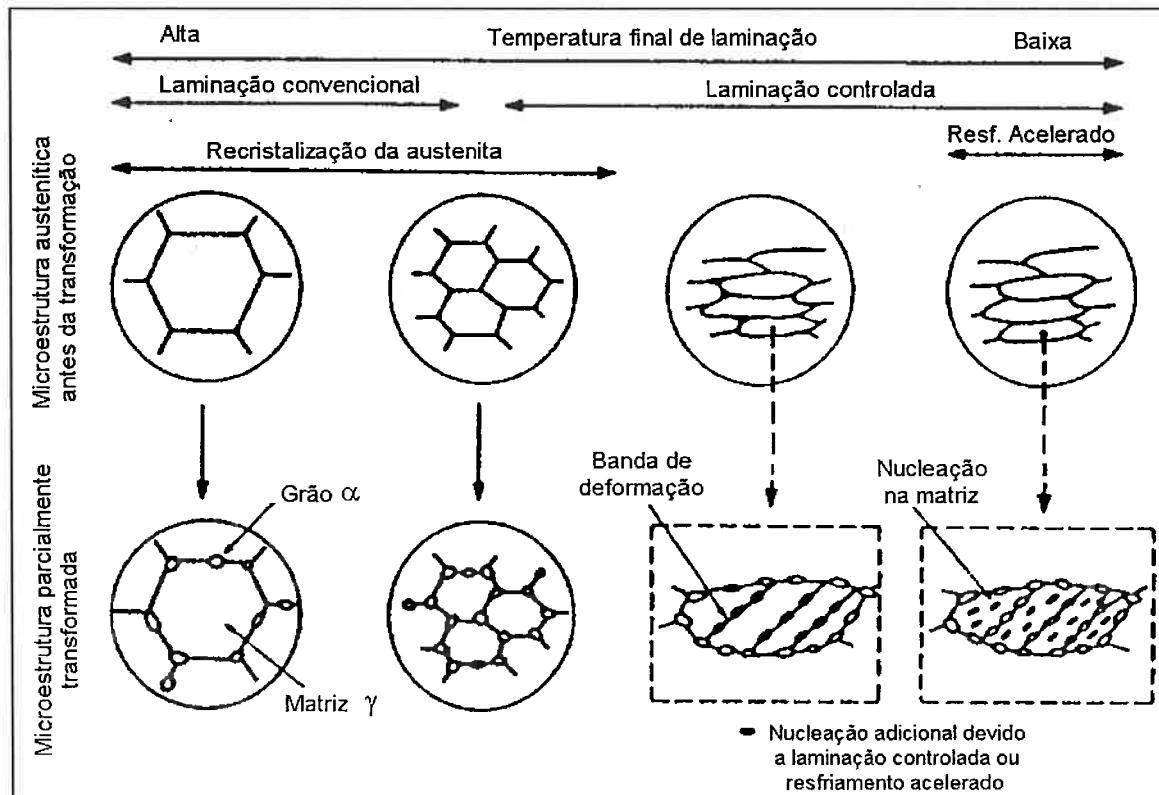


Figura 11 – Diferentes processos de nucleação. [10]

O resfriamento acelerado surgiu na década seguinte e passou a ser utilizado para atingir limites de escoamento de ordem maior ou igual a 80ksi.

Este método se dá através com a utilização de água e taxas de resfriamento de 15 a 20°C/s, comumente em faixas entre 800 e 550°C, após a qual o material é resfriado ao ar [10]. E tem como resultado uma estrutura ferrítica-bainitica de granulação ainda mais fina, que para o mesmo teor de carbono possui um limite de resistência superior aos ferríticos e perlíticos.

Deve-se ressaltar que o aumento das propriedades mecânicas é obtido por meio de conjunto de mecanismos de endurecimento. Entre eles, tem-se o refino de grão, precipitação de segunda fase, transformação de fase, formação de textura, solução sólida e encruamento [12].

2.2.3. Composição química

Os aços utilizados em tubos OCTG (*Oil Country Tubular Goods*) são de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL). Estes, por definição, são aços microligados que combinam como o próprio nome já diz alta resistência, com dutibilidade e tenacidade.

A composição química é determinante para qualidade final do aço. Desta maneira é possível fazer com que certas propriedades e especificações exigidas por normas API sejam respeitadas e possibilite a aplicação do aço para a produção de tubos para a exploração de petróleo.

Portanto, através de seus efeitos em solução sólida e, principalmente, de seus efeitos como precipitados, os elementos de liga desempenham papel fundamental na determinação da microestrutura e por consequência nas propriedades dos aços em geral.

Desta maneira descrevem-se os principais elementos utilizados em aços para tubos OCTG:

Carbono: historicamente o carbono é considerado o elemento que oferece a menor relação custo/benefício para aumentar a resistência mecânica nos aços estruturais. Entretanto, no caso de aços para tubos, o carbono deve ser utilizado na menor quantidade possível, visando melhor soldabilidade (alcançada por um menor carbono equivalente), menor suscetibilidade à trinca a frio na zona afetada pelo calor

(ZAC) e também melhor tenacidade e ductilidade. Comparado com os outros mecanismos de endurecimento (refino de grão, endurecimento por precipitação e encruamento) é considerado o menos desejável (pois aumenta mais significativamente a temperatura de transição dúctil-frágil, diminuindo a tenacidade do material) [10].

Manganês: o elemento mais comumente utilizado nos aços para dutos, que provoca endurecimento por solução sólida, é o Mn. A melhora na soldabilidade destes aços teve início com a substituição de C por Mn. Uma alta relação Mn/C acarreta em melhor tenacidade para um mesmo nível de resistência. Por outro lado, se a resistência à trinca induzida por hidrogênio for desejada, é prudente limitar o teor de Mn, que só pode ser aumentado se o teor de C for reduzido. O Mn também possui um efeito marcante na temperabilidade do aço. Quando aumenta de 1,40 para 1,60 e deste para 1,80% a microestrutura transforma-se de ferrita-perlita para ferrita-perlita-bainita e para ferrita-bainita, respectivamente [10].

Boro: é utilizado para aumentar a temperabilidade do aço. O boro concentra-se nos contornos de grão dificultando a nucleação da ferrita poligonal. Para aumentar a sua efetividade deve-se evitar a formação de nitreto de boro através de adições de Ti que tem maior afinidade pelo N. A adição de boro deve ser limitada em torno de 0,002%. Teores acima destes podem levar à precipitação de Fe₂B ou Fe₂₃(CB)₆, favorecendo a nucleação da ferrita poligonal. Isto pode ser prevenido através da adição de Ti ou Nb que têm maior afinidade pelo C [10].

Nióbio: o nióbio é o elemento mais eficaz para retardar a recuperação e a recristalização da austenita durante a laminação controlada (este processo será detalhado em tópico posterior). Isto permite que o aço seja laminado em uma temperatura onde a recristalização da austenita não ocorre, gerando uma austenita fina e severamente encruada. A consequência disto é o aumento do número de sítios para nucleação preferencial dos novos grãos de ferrita, como os contornos de grão austenítico e as bandas de deformação. Quanto maior a taxa de nucleação, menor será o tamanho de grão ferrítico final. Além disso, o nióbio forma precipitados que contribuem para o mecanismo de endurecimento por precipitação. Este retardo da recristalização da austenita induz temperaturas de laminação relativamente altas. Isto significa menores tempos de laminação e uma menor carga aplicada, resultando em um processo mais econômico [10]. Durante o resfriamento acelerado (este

processo também será tratado em tópico posterior), o Nb contribui para a formação de uma estrutura acicular através do impedimento da formação de ferrita [24].

Nitrogênio: é conhecido que o N livre no aço, não combinado na forma de nitreto, é extremamente nocivo para a tenacidade. Portanto, um baixo teor de N deve ser especificado para a chapa. O teor de N no aço é mais importante para a ZAC e para o metal de solda, onde o ciclo térmico pode provocar um aumento na quantidade de N livre. Por isso, é usual utilizar combinações com elementos que formam nitretos estáveis a altas temperaturas para reduzir o nitrogênio em solução sólida intersticial no aço [10]:

Titânio: o titânio possui grande afinidade pelo nitrogênio e forma nitretos extremamente estáveis a altas temperaturas. Além de seu efeito positivo no sentido de reduzir o teor de N livre, o precipitado TiN resultante não se dissolve nas altas temperaturas atingidas durante a soldagem, controlando o tamanho do grão austenítico. As partículas de TiN mais efetivas para melhorar a tenacidade são as mais finas e mais uniformemente distribuídas, que são obtidas com uma baixa temperatura de formação dos precipitados. Quanto mais baixo os teores de Ti e N, mais baixa será a temperatura de formação do TiN e, consequentemente, mais finas e uniformemente distribuídas serão as partículas. Por este motivo, um baixo teor de N deve estar combinado com um valor de Ti próximo da razão estequiométrica. Com adições de Ti acima do estequiométrico, a tenacidade, tanto do metal de base quanto da ZAC é prejudicada. O titânio também é empregado para evitar o crescimento do grão austenítico durante a fase inicial da laminação. Isto é possível porque o Ti forma precipitados estáveis a altas temperaturas que se prendem nos contornos de grão da austenita, evitando o seu crescimento através da ancoragem dos contornos de grão [10].

Vanádio: este elemento é utilizado para atingir os níveis requeridos de resistência através de endurecimento por precipitação. O mecanismo predominante de endurecimento envolve a precipitação de nitreto de vanádio na matriz ferrítica [23]. A precipitação do V na ferrita acicular formada no resfriamento acelerado aumenta a capacidade de encruamento do aço, elevando a resistência mecânica [24].

Cobre, Cromo e Molibdênio: o efeito dos precipitados nas propriedades é função do seu tamanho e da temperatura em que estes se formam em relação à temperatura de transformação. A presença de Cu, Cr e Mo em solução sólida tende

a conter a precipitação, forçando que esta ocorra em uma temperatura mais baixa resultando em um refino dos precipitados. O Mo aumenta a temperabilidade, diminuindo a formação de perlita e facilitando a formação de ilhas de martensita a partir da austenita retida em uma matriz ferrítica [10].

Enxofre: o processo de fabricação padrão produz aços com baixos teores de enxofre, aproximadamente 0,005 a 0,010%, e é usual utilizar estes valores para garantir o alongamento requerido e uma alta energia Charpy, que é necessária para resistir à propagação de fratura dúctil em gasodutos. Além disso, em condições de serviço em ambiente ácido, requisitos adicionais são necessários para melhorar a resistência do aço ao processo de trinca induzida pelo hidrogênio. Estas trincas são causadas pela recombinação do hidrogênio atômico em locais onde há inclusões, resultando em um aumento da pressão no local. Portanto, para essas condições, torna-se necessário o controle do teor de enxofre para níveis bem menores. Adicionalmente, o controle do formato das inclusões de enxofre através da adição de Ca (globulização das inclusões) ajuda a prevenir a formação de MnS de morfologia alongada [10].

A composição química destes aços deve respeitar os limites definidos pela especificação API 5CT. O intervalo de composição química permitido está apresentado de forma simplificada na tabela 2:

Tabela 2 – Composição química, fração mássica (%) – Especificação 5CT / ISO 11960.

Grupo	Grau	Tipo	C		Mn		Mo		Cr		Ni max	Cu max	P max	S max	Si max	
			min	max	min	max	min	max	min	max						
1	1	H40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0300	0,0300	-	
		J55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0300	0,0300	-	
		K55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0300	0,0300	-	
		N80	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0300	0,0300	-	
		N80	Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0300	0,0300	-	
2	2	M65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0300	0,0300	-	
		L80	1	-	0,43 ^a	-	1,90	-	-	-	0,25	0,35	0,0300	0,0300	0,45	
		L80	9Cr	-	0,15	0,30	0,60	0,90	1,10	8,00	10,00	0,50	0,25	0,0200	0,0100	1,00
		L80	13Cr	0,15	0,22	0,25	1,00	-	-	12,00	14,00	0,50	0,25	0,0200	0,0100	1,00
		C90	1	-	0,35	-	1,20	0,25 ^b	0,85	-	1,50	0,99	-	0,0200	0,0100	-
		C90	2	-	0,50	-	1,90	-	SL	-	SL	0,99	-	0,0300	0,0100	-
		C95	-	-	0,45 ^c	-	1,90	-	-	-	-	-	0,0300	0,0300	0,45	
		T95	1	-	0,35	-	1,20	0,25 ^d	0,85	0,40	1,50	0,99	-	0,0200	0,0100	-
		T95	2	-	0,50	-	1,90	-	-	-	0,99	-	0,0300	0,0100	-	
		P110	e	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0300 ^e	0,0300 ^e	-	
4	4	Q125	1	-	0,35	-	1,35	-	0,85	-	1,50	0,99	-	0,0200	0,0100	-
		Q125	2	-	0,35	-	1,00	-	SL	-	SL	0,99	-	0,0200	0,0200	-
		Q125	3	-	0,50	-	1,90	-	SL	-	SL	0,99	-	0,0300	0,0100	-
		Q125	4	-	0,50	-	1,90	-	SL	-	SL	0,99	-	0,0300	0,0200	-

a - A quantidade de carbono para L80 pode ser aumentada até 0,50% max se o produto é temperado em óleo.

b - A quantidade de molibdénio para o grau C90 tipo 1 não tem tolerância mínima se a espessura da parede é menor que 17,78 mm.

c - A quantidade de carbono para C95 pode ser aumentada até 0,55% max se o produto é temperado em óleo.

d - A quantidade de molibdénio para T95 pode ser decrescida para 0,15% min. se a espessura da parede é menor que 17,78 mm.

e - Para EW grau P110, a quantidade de fósforo deverá ser 0,020% max. e a quantidade de enxofre, 0,010% max.

SL = Sem limite.

2.3. O processo ERW

O processo utilizado para a fabricação dos tubos a partir de bobinas de aço é chamado de ERW (Electric Resistance Welding), que utiliza soldagem elétrica. A principal característica deste processo é a grande produtividade da linha de fabricação de tubos, o que torna peça principal para uma grande competitividade na produção. Desta forma, a seguir o processo será apresentado de maneira detalhada:

Desbobinamento: consiste de uma desbobinadeira que tem como objetivo desenrolar a bobina para iniciar o processamento. Defeitos característicos desta etapa: arranhões na superfície da bobina comprometendo a espessura ou gerando retrabalho.



Figura 12 – Etapa de desbobinamento [16]

Aplainamento: consiste no aplaíramento da bobina por meio de rolos. Defeitos característicos desta etapa: arranhões na superfície da bobina comprometendo a espessura ou gerando retrabalho.

Corte da ponta da bobina: quando necessário, é cortada a parte irregular da bobina, para propiciar um início de soldagem uniforme. Defeitos característicos desta etapa: corte irregular da ponta da bobina.

Centralização da bobina: a bobina é guiada por cilindros centralizadores móveis, para manter a sua centralização na mesa. Defeitos característicos desta etapa: amassamento nas bordas ou no sentido da largura da bobina que pode reprovar o tubo por não atender os requisitos especificados.

Corte de aparas: a bobina passa por um conjunto de tesouras circulares que tem como objetivo cortá-la lateralmente, nos dois lados, deixando na largura ideal para a formação do tubo. Defeitos característicos desta etapa: rebarbas,

amassamentos, falha de material, incrustações ou corte deficiente que compromete o processo de soldagem, gerando falta de fusão, defasagem de bordas e raspagem deficiente.



Figura 13 – Etapa de corte de aparas das bobinas [16]

Pré-formação: a pré-formação é efetuada em duas etapas, utilizando-se dois conjuntos de rolos côncavos e convexos, os quais deixam a tira com a forma do rolo, iniciando a formação do tubo. Defeitos característicos desta etapa: incrustação no material ou buracos proveniente de materiais estranhos no rolo ou algum material estranho que pode cair sobre a tira de bobina e ficar incrustado na chapa e/ou no rolo, deixando marcas em todos os tubos na seqüência, arranhões e marcas de rolos.

Formação de bordas: o formador de bordas é um conjunto de rolos côncavos e convexos que tem por finalidade formar nas bordas da “tira” uma curvatura bem próxima à do tubo a ser produzido, facilitando assim, a conformação. Defeitos característicos desta etapa: deformação das bordas, incrustações de material estranho, arranhões e marcas de rolo.

Gaiolas: as gaiolas são constituídas de conjuntos de rolos reguláveis que são ajustados de modo a proporcionar um curvamento gradual, equalizando assim o raio de curvatura da saída do pré-formador com o de entrada do “Fin – Pass”. Defeitos característicos desta etapa: deformação de bordas, formação irregular do tubo, amassamento no tubo.

“Fin pass”: o fin pass é constituído de três conjuntos de rolos côncavos. Os rolos superiores possuem anéis centrais cuja principal finalidade é promover nas bordas da tira um ângulo de fechamento, chamado ângulo de convergência, para que se possa efetuar a soldagem. Uma outra finalidade destes rolos é proporcionar uma continuidade ao processo de conformação da “tira”, para o diâmetro do tubo a

ser produzido. Defeitos característicos desta etapa: deformação das bordas da chapa, ângulo de fechamento do tubo para soldagem irregular, falta de fusão, defasagem de bordas, arranhões e marcas de rolos.



Figura 14 – Etapa de “Fin-Pass” [16]

Soldagem: quando a “tira” chega na placa de solda, o tubo já está praticamente formado, faltando apenas unir as bordas através do processo de soldagem por resistência elétrica – alta freqüência, e a soldagem tem que ser efetuada por soldador devidamente qualificado, e com um processo também qualificado. A soldagem das bordas se dá em duas etapas, a saber:

Através de uma sapata de cobre ou prata (eletrodo não consumível), localizada em cada borda da tira, é conduzida uma corrente elétrica de alta freqüência. Esta corrente proporciona um aquecimento das bordas devido ao efeito Joule, chegando à temperatura de fusão no momento do contato.

Como o material adjacente às bordas está em “estado pastoso”, é introduzida então uma força de compressão das bordas através da “placa de solda” que garante assim uma completa fusão.

A placa de solda é constituída de rolos côncavos ajustáveis a fim de que se tenha o recalque necessário para uma boa soldagem. Normalmente esse recalque é de 3,0 a 10,0 mm. O material expulso da área de fusão, pelo recalque, aloja-se na superfície interna e externa da solda, e posteriormente são retirados através de raspagem, utilizando-se pastilha de metal duro presa a um suporte de ferramenta de cabeçote ajustável. A eliminação do excesso da solda é efetuada na superfície interna e externa simultaneamente. Defeitos característicos desta etapa: trinca, falta

de fusão, *hook crack*, solda fria, penetradores, defasagem de borda, raspagem deficiente, amassamento lateral do tubo, arranhões e marcas de rolo.



Figura 15 – Etapa de soldagem dos tubos [16]

Tratamento térmico da solda: o tratamento térmico da região da solda é feito por duas estações de tratamento, localizadas após a máquina de soldagem. O resfriamento é feito ao ar até o tubo atingir uma temperatura inferior a 300° C. Em seguida, o resfriamento é feito por aspersão de água. O tratamento térmico efetuado assemelha-se a uma normalização e tem por finalidade garantir uma boa ductilidade à região da solda. Defeitos característicos desta etapa: trinca, falta de tratamento térmico, excesso de tratamento térmico, altura da solda acima do especificado, amassamento na lateral do tubo, arranhões e marcas de rolo.

Pré-calibragem: a pré-calibragem é efetuada pelos rolos chamados “Pull - Out”, que têm a finalidade de puxar o tubo e, ao mesmo tempo, fazer uma pré-calibração. O esforço realizado pelo “Pull – Out” provoca a redução do perímetro do tubo e, consequentemente, acréscimo da espessura na região da solda em virtude da alta temperatura local. Defeitos característicos desta etapa: trinca, espessura abaixo do mínimo especificado por falta de aperto para aumento da espessura e altura da solda acima do especificado por excesso de aperto, amassamento lateral do tubo, arranhões e marcas de rolo.

Calibragem dos tubos: os calibradores são formados por 4 conjuntos independentes, sendo que, cada conjunto é montado com rolos côncavos ajustáveis para os seguintes diâmetros de tubo:

- Tubos de diâmetro de 4 ½" a 9 5/8" - cada conjunto formado com 2 rolos, superior e inferior.

- Tubos de diâmetro de 10 ¾" a 20" - cada conjunto é formado com 4 rolos, superior, inferior e 2 laterais.

Os rolos têm a função de calibrar o tubo, ajustando assim o seu perímetro, diâmetro e empeno, para as dimensões especificadas, sendo a calibração efetuada a frio. O penúltimo calibrador tem também a função de ajustar a retidão (empeno) do tubo e para tanto é dotado de um sistema de ajuste transversal em relação à linha de formação do tubo. Defeitos característicos desta etapa: perímetro fora do especificado, diâmetro fora do especificado, tubo empenado, amassamento na lateral do tubo, arranhões e marcas de rolos.

Ultra-som automático: Nesta etapa a região da solda é inspecionada por um sistema automático de ultra-som, visando detectar qualquer descontinuidade característica do processo de soldagem ERW, auxiliando como controle de processo. Esta inspeção é feita por pares de transdutores angulares posicionados a distâncias pré-estabelecidas em relação à solda.

Corte em tramos dos tubos: os tramos são cortados através de um cortador móvel que é constituído de três facas em forma de disco que giram externamente ao tubo, e o corte é feito a frio e nas dimensões especificados para cada obra. Defeitos característicos desta etapa: corte do comprimento fora do especificado e marcas e arranhões provocados pelas facas quando giram e tocam no tubo.

Identificação dos tramos: cada tramo de uma determinada bobina é identificado através de um código que mantém a rastreabilidade do tubo ou perfil em relação à documentação da usina e todos os registros efetuados durante a fabricação, inspeção e testes. Defeitos característicos desta etapa: divergência de marcação entre o marcado no tubo e o número da documentação.

Corte das pontas e anéis dos tubos: as pontas e anéis dos tubos são seccionados por um cortador estacionário que é constituído de três facas em forma de disco que giram externamente ao tubo, e o corte é feito a frio. São cortados anéis para os testes de amassamento e ensaios de laboratório. Defeitos característicos desta etapa: corte do comprimento dos anéis fora do especificado, corte do comprimento dos tubos fora do especificado e marcas e arranhões provocados pelas facas quando em movimento e tocam no tubo.

Esmerilhamento das extremidades da solda interna: é efetuado o esmerilhamento da solda interna, nas duas extremidades dos tubos, numa extensão aproximadamente de 50 mm, removendo assim qualquer ressalto deixado pelo

raspador interno. Esta operação é efetuada para proporcionar um perfeito biselamento através dos tornos copiadores. Defeitos característicos desta etapa: esmerilhamento irregular não deixando o acabamento no contorno do tubo.



Figura 16 – Etapa de esmerilhamento [16]

Biselamento das extremidades dos tubos: as extremidades dos tubos são usinadas para execução dos biséis, através de torno copiador. Defeitos característicos desta etapa: bisel fora das dimensões especificadas, ângulo do bisel fora do especificado, ortogonal fora da dimensão especificada, rebarba no bisel, bisel virado e deformado pela usinagem.

Teste hidrostático: o equipamento para o teste hidrostático é constituído por duas placas equipadas com gaxetas de borracha que vedam as extremidades do tubo. Após o preenchimento do tubo com água é feita a pressurização, por meio de um sistema de injeção de pressão. A pressão especificada é mantida por um período de tempo controlado por um temporizador automático. O teste hidrostático tem uma limitação de pressão em função do esforço nas placas. Diâmetros grandes, espessura grossa e alto grau podem ocasionar um esforço excessivo nas placas do teste hidrostático. Defeitos característicos desta etapa: vazamento do tubo, vazamento das gaxetas, vazamento do equipamento durante o teste do tubo, empeno do tubo e escoamento do tubo.

Reparos por lixamento: todos os defeitos marcados para lixamento devem ser removidos, somente por lixamento. Defeitos característicos desta etapa: lixamento não acompanhando o contorno do tubo; lixamento profundo, ficando com a espessura abaixo do mínimo especificado.

Ultra-som automático: Nesta etapa a região da solda é novamente inspecionada por um sistema automático de ultra-som, visando garantir a sanidade

da solda. Esta inspeção é feita por um conjunto de transdutores angulares posicionados a distâncias pré-estabelecidas em relação à solda.

Inspeção Visual e Dimensional: todos os defeitos visuais são identificados pelo inspetor para que seja feito o reparo por lixamento ou por soldagem. Também nesta etapa é feito o controle dimensional do tubo (Ex.: ovalização, perímetro, empeno, ortogonalidade, verificação do ângulo do bisel, alinhamento da junta, embicamento, espessura, etc.).

Inspeção do Peso, Comprimento e Marcação: os tubos são posicionados sobre uma balança para verificação se o peso e comprimento atendem aos limites especificados. Posteriormente, é feita a marcação por intermédio de pistola de ar comprimido utilizando tinta e moldes em chapelona e uma etiqueta adesiva com as informações necessárias para manter a rastreabilidade do tubo. Na etiqueta adesiva existe um código de barra que auxilia na identificação do produto.

Proteção superficial externa: quando especificado, os tubos recebem uma camada de proteção externa (verniz), para proteger contra oxidação superficial externa. Defeitos característicos desta etapa: falha de aplicação de verniz e excesso de verniz.

O processo da fabricação dos tubos por formação contínua com soldagem por resistência elétrica (ERW) está representado por inteiro a seguir, na Figura 17. Todo o item 2.3 foi retirado do relatório da Confab Industrial S.A. “Processos Produtivos” [16], de circulação interna da empresa

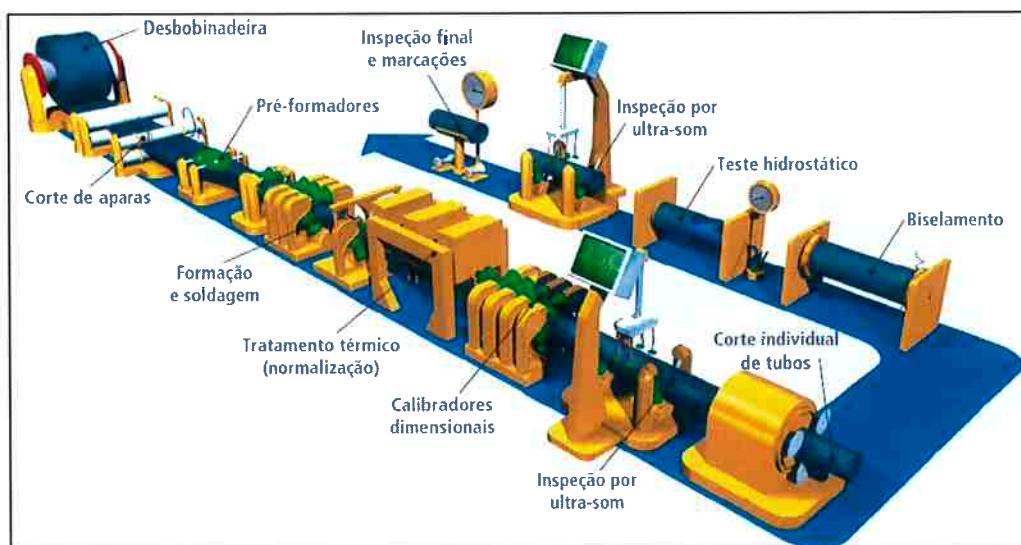


Figura 17 – Resumo das etapas de fabricação dos tubos antes do tratamento térmico.

2.4. Tratamento térmico

O tratamento térmico é realizado a fim de que as propriedades mecânicas do tubo sejam aprimoradas, a exemplo da dutilidade e tenacidade. Nesta etapa do processo de fabricação do tubo as microestruturas são alteradas de modo que sejam alcançadas as características exigidas por norma para a utilização do tubo, no caso a API 5CT.

Existem diversos tipos de tratamento térmico, porém para este caso em estudo, o processo é feito por uma etapa de têmpera seguida por outra de revenimento.

Esta primeira etapa, a têmpera, tem como objetivo alterar a microestrutura de forma que resulte na melhora das propriedades mecânicas do tubo.

A austenitização do tubo acontece em um forno a gás natural, onde a relação ar/gás é uma das principais variáveis de controle da atmosfera local. Outras variáveis são a qualidade do gás e a pressão deste.

Na seqüência da etapa de têmpera, o tubo deve passar por um descamador e um cabeçote de têmpera, saindo a temperaturas baixas, de acordo com a curva de resfriamento contínuo (CRC) do material.

Desta maneira, ao fim do processo de têmpera é esperado que a microestrutura seja martensítica. Porém, no estado “como temperado”, a microestrutura final, a martensita, além de ser muito dura, é tão frágil que não pode ser usada para a maioria das aplicações. Além disso, quaisquer tensões internas que possam ter sido introduzidas durante a têmpera possuem um efeito de enfraquecimento. Porém esta situação pode ser alterada e melhorada através de um segundo tratamento.

A etapa seguinte é o revenimento e tem como objetivo aliviar as tensões e ajustar as propriedades finais do material. O processo ocorre através do aquecimento do tubo entre 250°C e 650°C, variando dependendo do grau do material, como por exemplo, neste estudo tubos API 5CT de grau L80. E ao fim desta etapa encontra-se a martensita revenida, que pode ser tão dura quanto a martensita, porém com uma dutilidade e uma tenacidade substancialmente aprimoradas. A seguir apresenta-se na figura 18 o processo de um tratamento térmico.

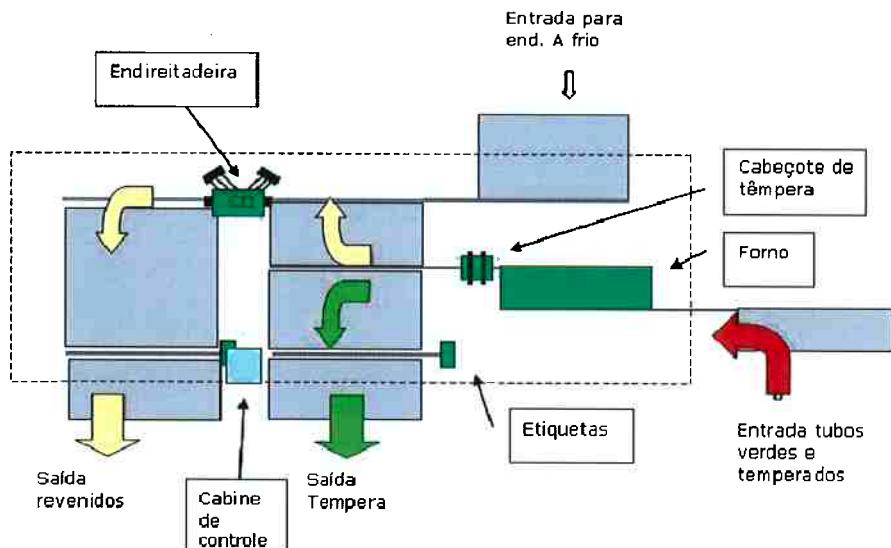


Figura 18 – Esquema do processo de tratamento térmico de têmpora e revenimento. [23]

Por fim, devido às possíveis distorções remanescentes provocadas no tratamento térmico vindos do aquecimento/resfriamento, o tubo é encaminhado a uma endireitadeira que possui pares de rolos e variações de ângulos e aperto, etapa final e fundamental para que haja um acerto dimensional preciso.

3. Materiais e métodos

3.1. Materiais

Este trabalho foi realizado a partir de 9 amostras já fraturadas pelo ensaio de tração. O material foi obtido junto à empresa responsável pela produção dos tubos e análise da qualidade destes. Os tubos são de aço API 5CT de grau L80 e são utilizados na exploração de petróleo.



Figura 19 - Amostra após ensaio de tração.

Os corpos de prova do ensaio de tração foram retirados em sentido longitudinal aos tubos. E após a realização do ensaio, onde ocorreu a fratura destes, as amostras foram separadas para utilização neste estudo.

3.2. Métodos

Devido a proximidade de alguns resultados das propriedades do material (limite de escoamento, limite de resistência, e alongamento) e a grande quantidade de amostras, apenas 3 destas tiveram resultados apresentados neste trabalho.

A partir da norma API 5CT Ed. 2007, comparou-se os limites de escoamento e resistência das amostras com o previsto neste documento. Logo, as amostras foram categorizadas em abaixo do permitido pela norma, de acordo com a norma e acima do previsto. Abaixo seguem os dados da norma e das amostras que permitiram tal categorização.

Tabela 3 - Dados da Norma API 5CT L80.

	Limite de Escoamento		Limite de Resistência	Alongamento Mínimo
	Mínimo	Máximo		
Norma API 5CT L80	552 MPa	655 MPa	655 MPa	19%

Tabela 4 – Dados das propriedades mecânicas das amostras A, B e C.

	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
Amostra A	498	625	38
Amostra B	614	724	35
Amostra C	674	763	32

Tabela 5 - Temperaturas de Têmpera das amostras A, B e C.

Têmpera			
	Media (°C)	Ponta 1 (°C)	Ponta 2(°C)
Amostra A	901	908	899
Amostra B	900	893	905
Amostra C	911	908	915

Tabela 6 – Temperaturas de Revenimento e Tempo de Encharque das amostras A, B e C.

Revenimento				
	Ponta (°C)	Média (°C)	Desvio (°C)	Tempo de Permanência (min.)
Amostra A	614	624	2,8	43,90
Amostra B	610	610	10,1	43,95
Amostra C	623	623	3,9	44,00

É importante ressaltar que a medição da temperatura de austenitização, como a de revenido, são medidas com um pirômetro automático localizado logo a frente da porta de saída do forno, de forma que é medida a temperatura atingida no material do tubo e medido ao longo de todo comprimento deste. Já as temperaturas de ponta 1 e 2 são relativas às extremidades do tubo e a temperatura média é a calculada sobre o medido ao longo de todo o material.

Desta forma, foram feitas análises de microscopia óptica e eletrônica no intuito de observar e caracterizar a morfologia do material e se possível relacioná-lo aos resultados das propriedades mecânicas.

Foram feitas análises da composição química das amostras via EDS nas regiões de maior bandeamento, comparando a composição das linhas de segregação e da matriz do material.

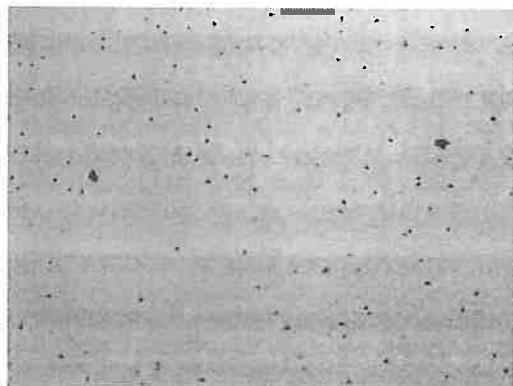
Por fim, ainda foram realizadas macro e microfractografia via lupa (aumento de 10X) e microscopia eletrônica de varredura, respectivamente. Através destas análises era esperado extrair evidências que pudessem auxiliar no estudo da relação das propriedades mecânicas e do material.

4. Resultados

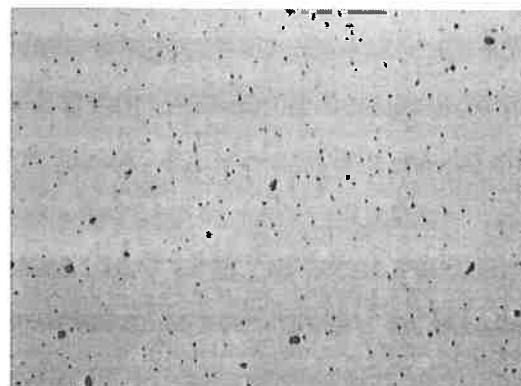
4.1. Microscopia

4.1.1 Análise do nível de inclusões

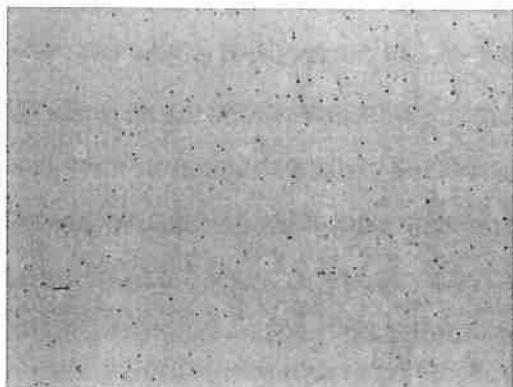
A análise das inclusões foi feito em microscópio óptico com aumento de 100X nas amostras A, B e C em sentido transversal ao tubo e paralelo a fratura dos ensaios de tração. Desta forma observamos inclusões classificadas como óxidos globulares, ou seja, do tipo D. A quantidade destes varia entre 2 série fina a 3 série grossa, como é ilustrado abaixo.



AMOSTRA A



AMOSTRA B



AMOSTRA C

Figura 20 - Exame microestrutural das amostras longitudinais ao tubo. MO. Ataque: Nital 2%. Ampliação 100X. Região central da espessura do tubo. Observa-se que as inclusões são muito mais intensas nas amostras de menor Limite de Escoamento (LE). Amostra A: D3 grossa; Amostra B: D2 grossa; Amostra C: D2 fina

4.1.2. Microscopia Óptica

As amostras A, B e C foram analisadas no microscópio óptico em secções transversais e longitudinais ao tubo, e para cada uma destas apresentam-se regiões próximas à superfície e do centro da espessura. Foram utilizados aumentos de 200X

e 1000X a fim de observar a morfologia da microestrutura em cada caso e relacionar possíveis padrões às propriedades mecânicas.

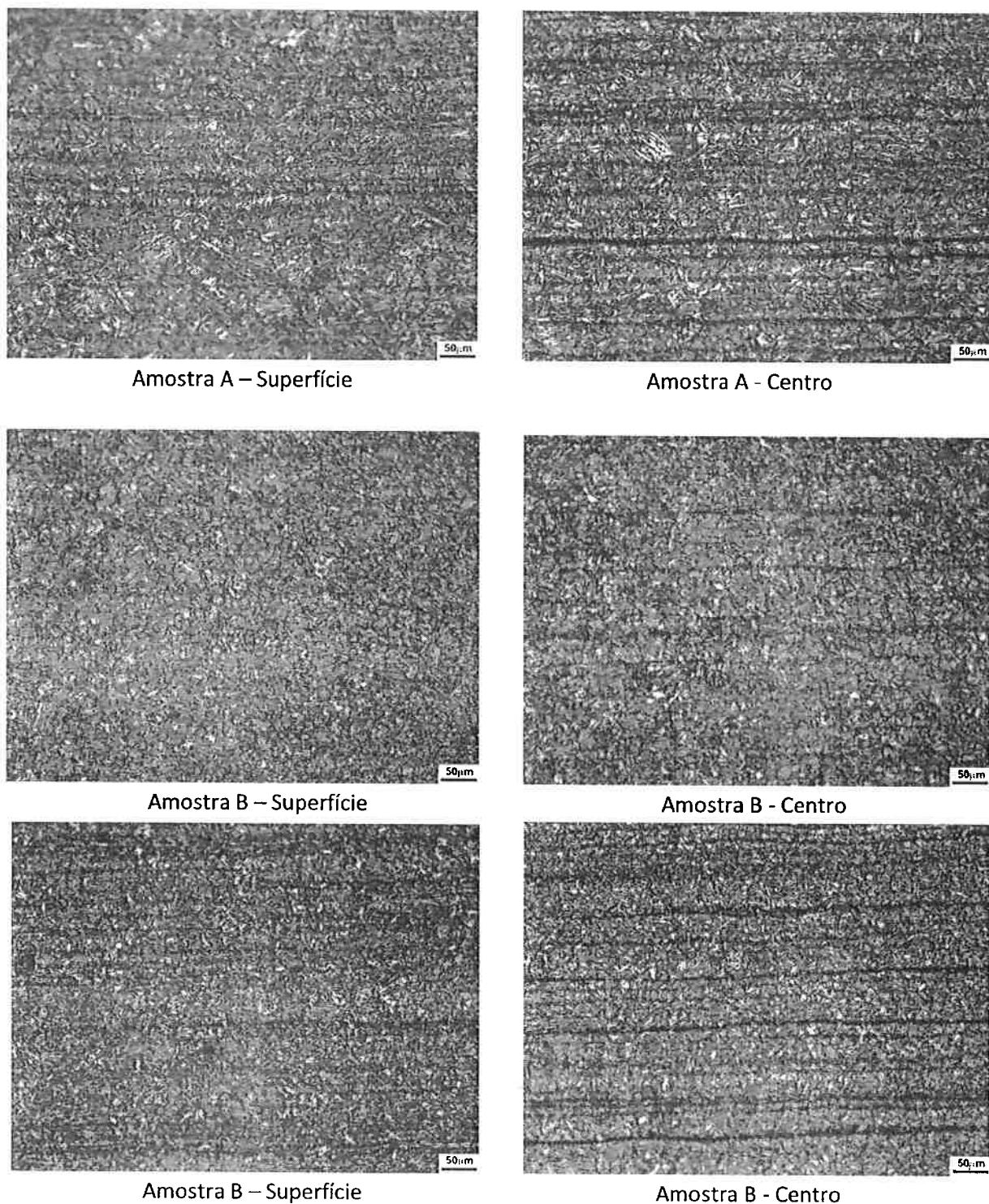


Figura 21 – Amostra A (LE= 498 MPa; LR= 625 MPa; α = 38%; T_a =901,3°C Trev=622,8° C); Amostra B(LE= 614 MPa; LR= 724 MPa; α = 35%; T_a =900,4°C; Trev=610,44); Amostra C (LE= 674 MPa; LR= 763 MPa; α = 32%; T_a =910,5°C; Trev=623,62). Exame microestrutural, seção transversal ao tubo (paralela à superfície de fratura). MO. Ataque: Nital 2%. Ampliação 200X. Observa-se microestrutura de martensita revenida, aparentemente mais grosseira na Amostra A do que nas demais. Nota-se ainda um intenso bandeamento nas regiões centrais das amostras A e C.

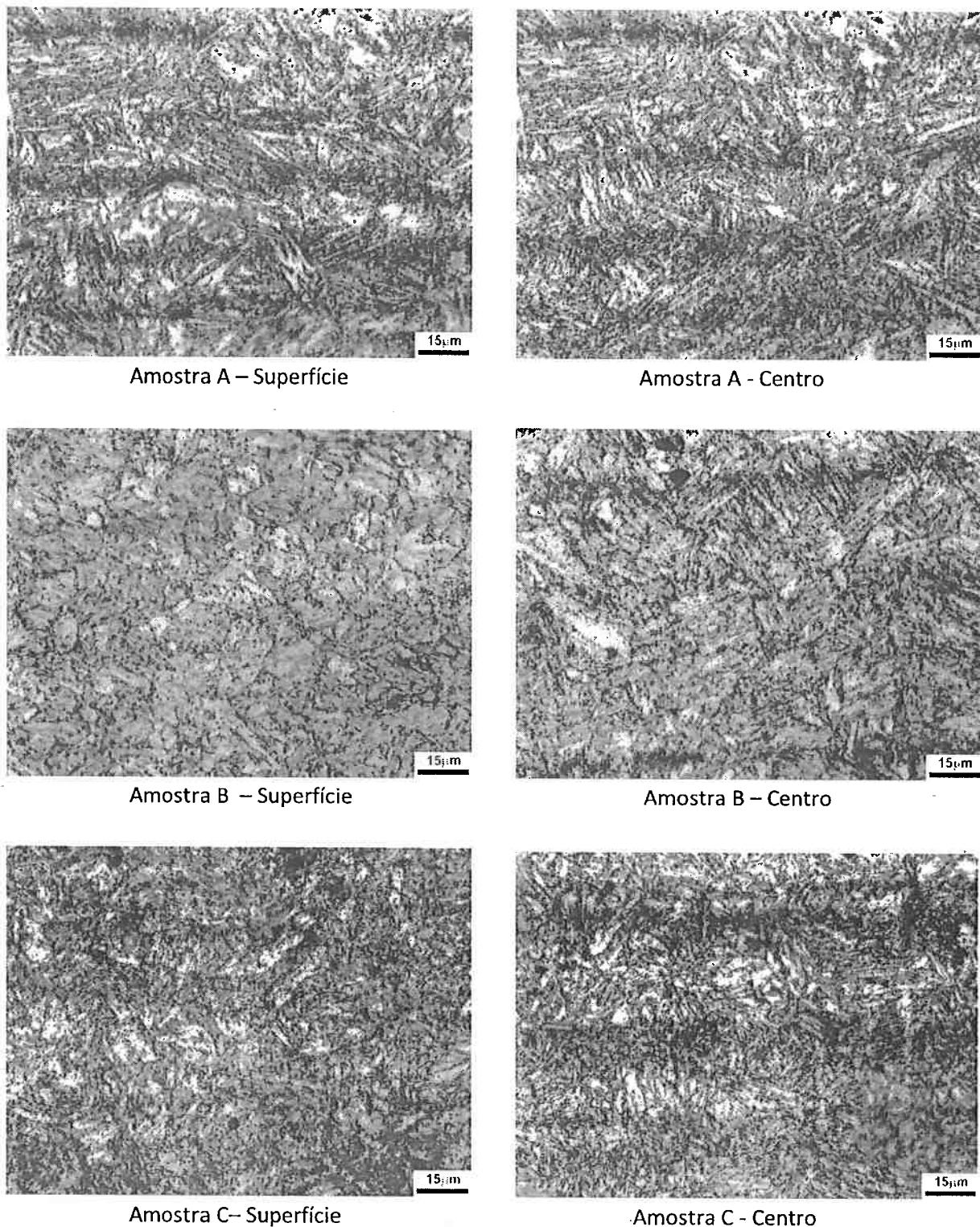


Figura 22 – Amostra A (LE= 498 MPa; LR= 625 MPa; $a= 38\%$; $T_a=901,3^{\circ}\text{C}$; $\text{Trev}=622,8^{\circ}\text{C}$); Amostra B (LE= 614 MPa; LR= 724 MPa; $a= 35\%$; $T_a=900,4^{\circ}\text{C}$; $\text{Trev}=610,44$); Amostra C (LE= 674 MPa; LR= 763 MPa; $a= 32\%$; $T_a=910,5^{\circ}\text{C}$; $\text{Trev}=623,62$). Exame microestrutural, seção transversal ao tubo (paralela à superfície de fratura). MO. Ataque: Nital 2%. Ampliação 1000X. Observa-se morfologia acicular nas amostras acima, porém pode-se diferenciar que as agulhas são maiores na amostra A com relação às demais. Nota-se ainda um intenso bandeamento nas regiões centrais das amostras A e C.

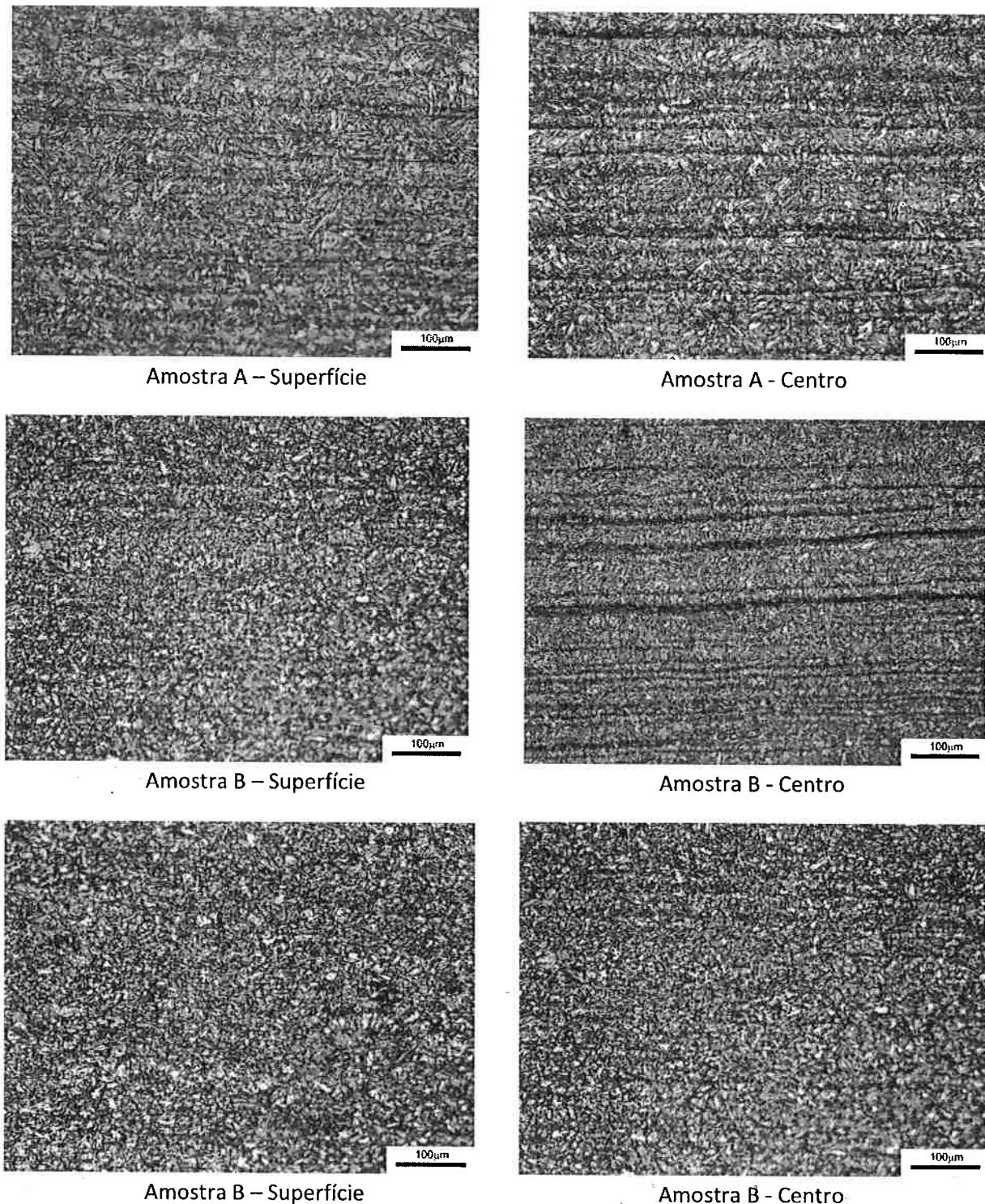


Figura 23 – Amostra A (LE= 498 MPa; LR= 625 MPa; α = 38%; T_a =901,3°C; T_{rev} =622,8°C); Amostra B (LE= 614 MPa; LR= 724 MPa; α = 35%; T_a =900,4°C; T_{rev} =610,44); Amostra C (LE= 674 MPa; LR= 763 MPa; α = 32%; T_a =910,5°C; T_{rev} =623,62). Exame microestrutural, seção longitudinal ao tubo (perpendicular à superfície de fratura). MO. Ataque: Nital 2%. Ampliação 200X. De acordo com as amostras de seção transversal, observa-se novamente microestrutura de martensita revenida mais grossoiro na amostra A. Notam-se também linhas de segregação na amostra B.

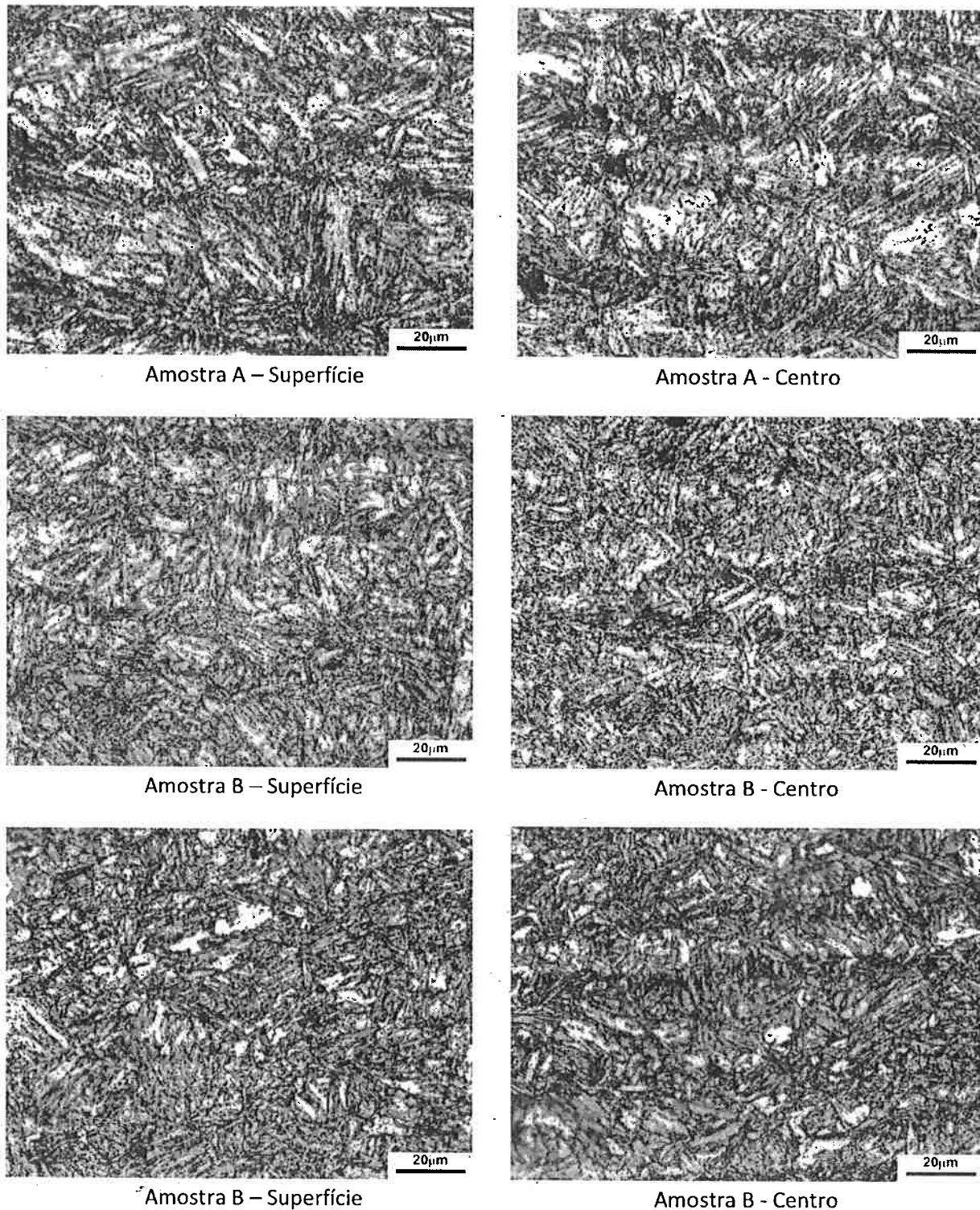


Figura 24 – Amostra A (LE= 498 MPa; LR= 625 MPa; a= 38%; Ta=901,3°C; Trev=622,8° C); Amostra B(LE= 614 MPa; LR= 724 MPa; a= 35%; Ta=900,4 °C; Trev=610,44); Amostra C (LE= 674 MPa; LR= 763 MPa; a= 32%; Ta=910,5°C; Trev=623,62). Exame microestrutural, seção longitudinal ao tubo (perpendicular à superfície de fratura). MO. Ataque: Nital 2%. Ampliação 1000X. Observa-se morfologia acicular na microestrutura de martensita revenida. Destaca-se o maior tamanho das agulhas na amostra A.

4.1.3. Microscopia Eletrônica

A microscopia eletrônica foi realizada no intuito de identificar as fases e compreender aspectos que não estavam ao alcance na microscopia óptica. O mesmo padrão comparativo utilizado acima será repetido: imagens das amostras A, B e C em secção transversal e longitudinal ao tubo, porém desta vez somente na região central da espessura do corpo de prova, pois as linhas de segregação ocorrem com maior intensidade, assim como as estruturas aciculares aparecem em maior tamanho e com maior freqüência. Foram utilizados aumentos de 2000X e 5000X de elétrons secundários, pois a visualização não era nítida através dos elétrons retroespalhados.

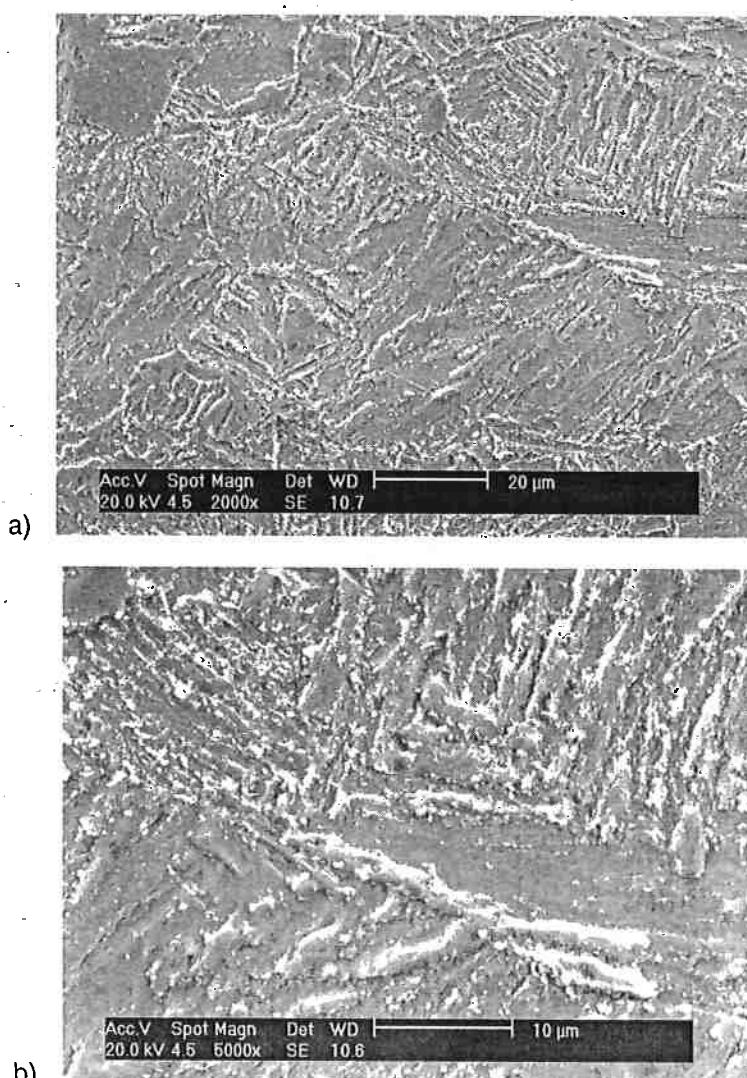


Figura 25 — Amostra A (LE= 498 MPa; LR= 625 MPa; a= 38%; $T_a=901,3^{\circ}\text{C}$ Trev=622,8° C) Exame microestrutural, seção longitudinal ao tubo (perpendicular à superfície de fratura). MEV. Ataque: Nital 2%. Ampliação a) 2000X; b) 5000X. Centro da amostra. Nota-se dispersão da cementita ao longo da

microestrutura de martensita revenida, no entanto é possível observar o carboneto se apresenta em maior tamanho com relação às demais amostras.

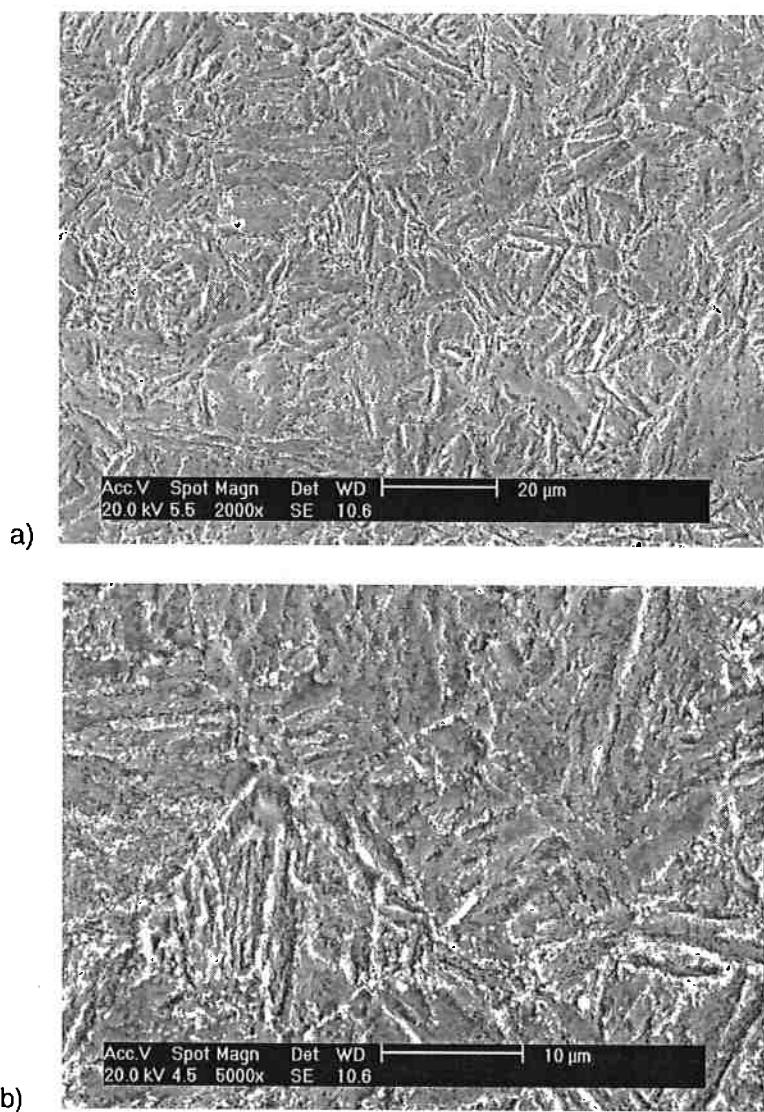


Figura 26 – Amostra B (LE= 614 MPa; LR= 724 MPa; α = 35%; Ta=900,4°C Trev=610,44°C). Exame microestrutural, seção longitudinal ao tubo (perpendicular à superfície de fratura). MEV. Ataque: Nital 2%. Ampliação a) 2000X; b) 5000X. Centro da amostra. Nota-se dispersão da cementita ao longo da microestrutura de martensita revenida, porém com o carboneto em menor dimensão.

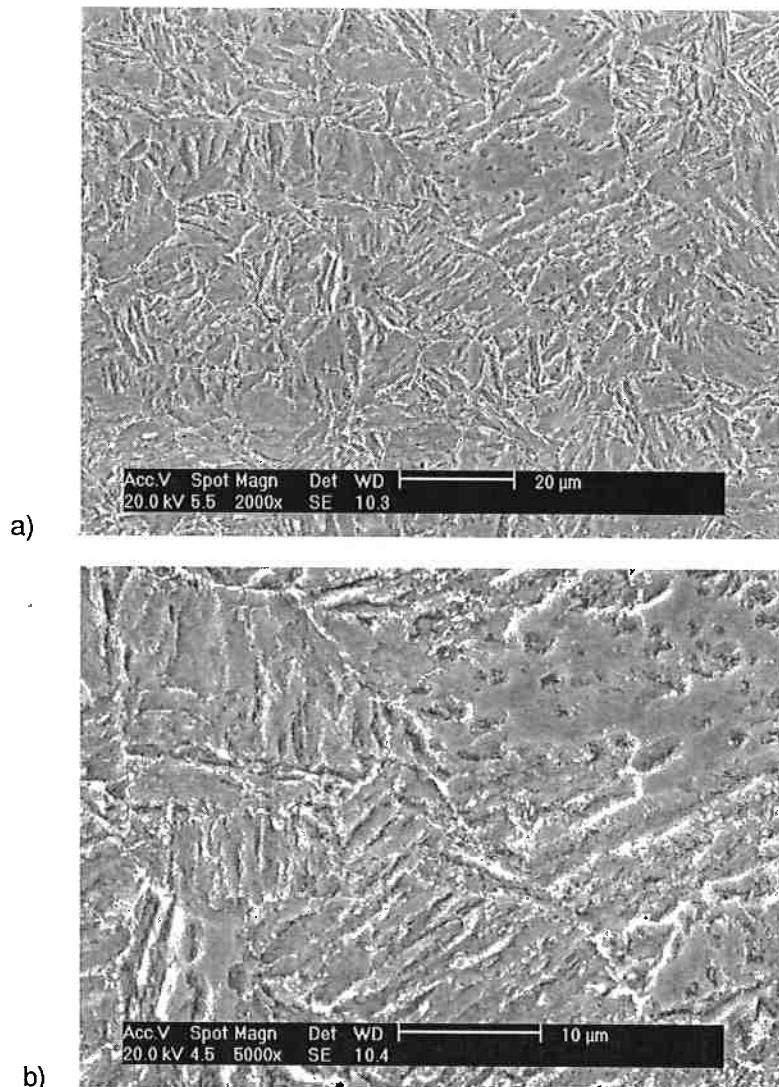


Figura 27 – Amostra C (LE= 674 MPa; LR= 763 MPa; α = 32%; T_a =910,5°C T_{rev} =623,62°C). Exame microestrutural, seção longitudinal ao tubo (perpendicular à superfície de fratura). MEV. Ataque: Nital 2%. Ampliação a) 2000X; b) 5000X. Centro da amostra. Nota-se a cementita em tamanho muito menor na amostra C com relação às anteriores.

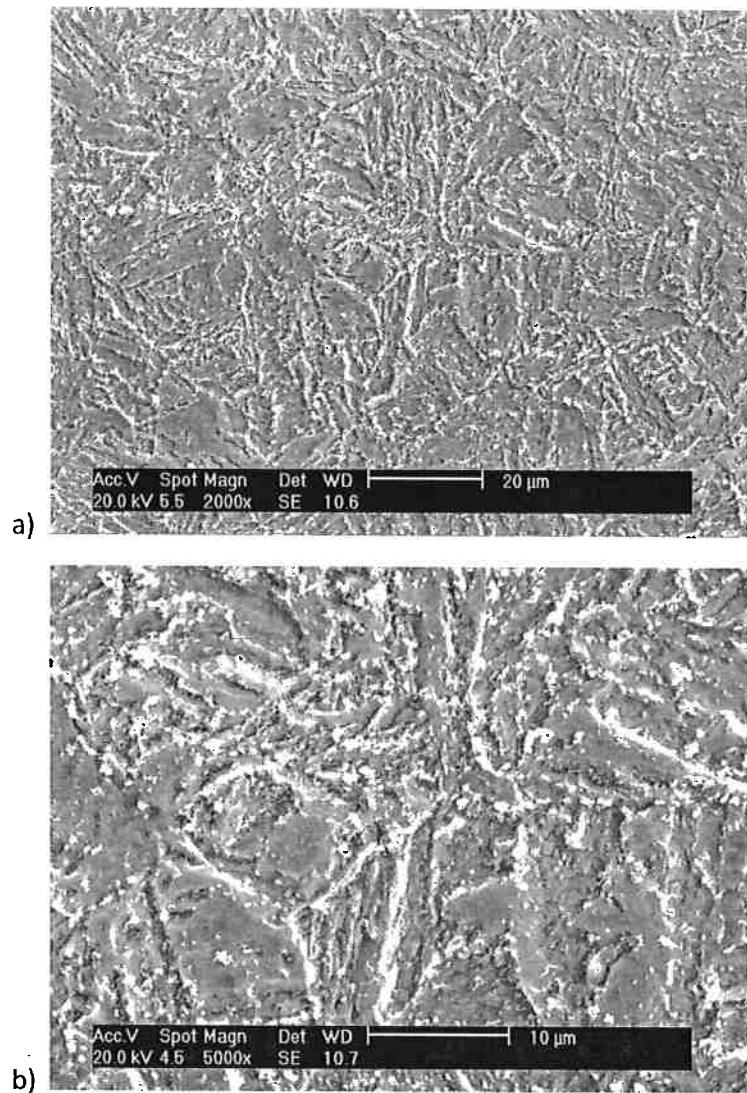


Figura 28 – Amostra A (LE= 498 MPa; LR= 625 MPa; α = 38%; T_α =901,3°C; T_{rev} =622,8°C)Exame microestrutural, seção transversal ao tubo (paralelo à superfície de fratura). MEV. Ataque: Nital 2%. Ampliação a) 2000X; b) 5000X. Centro da amostra. Nota-se dispersão da cementita ao longo da microestrutura de martensita revenida, no entanto é possível observar o carboneto se apresenta em maior tamanho com relação às demais amostras.

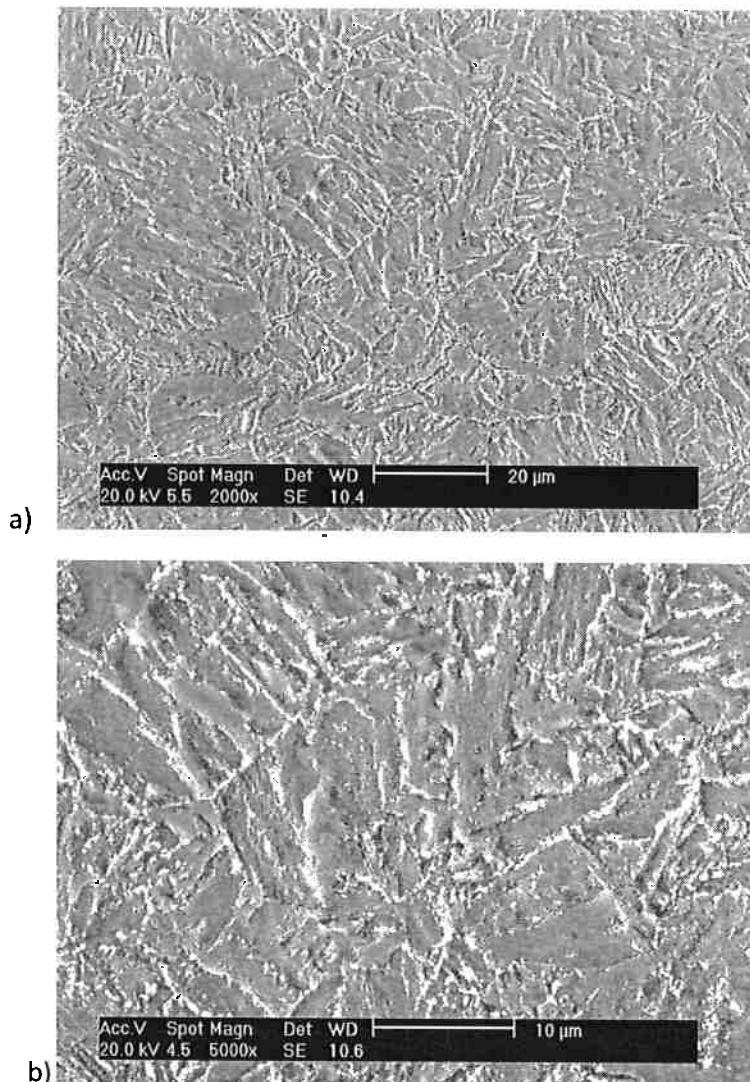


Figura 29 – Amostra B (LE= 614 MPa; LR= 724 MPa; α = 35%; T_a =900,4°C T_{rev} =610,44°C). Exame microestrutural, seção transversal ao tubo (paralelo à superfície de fratura). MEV. Ataque: Nital 2%. Ampliação a) 2000X; b) 5000X. Centro da amostra. Nota-se dispersão da cementita ao longo da microestrutura de martensita revenida, porém com o carboneto em menor dimensão.

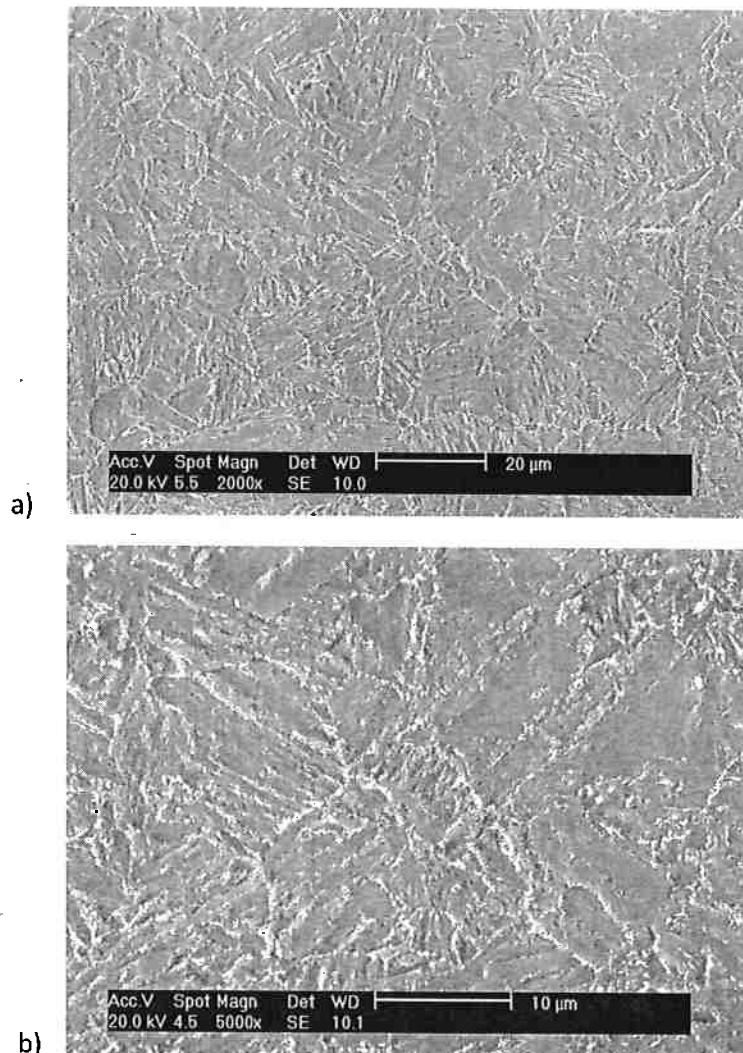


Figura 30 – Amostra C (LE= 674 MPa; LR= 763 MPa; a= 32%; Ta=910,5°C; Trev=623,62°C). Exame microestrutural, seção transversal ao tubo (paralelo à superfície de fratura). MEV. Ataque: Nital 2%. Ampliação a) 2000X; b) 5000X. Centro da amostra. Nota-se a cementita em tamanho muito menor na amostra C com relação às anteriores.

4.1.4. Análise da composição química.

A composição química foi realizada nas amostras A,B e C, em regiões centrais da espessura dos corpos de prova relativos à secção longitudinal, onde é mais aparente as linhas de segregação, isto é, o bandeamento. Foram observadas as regiões escuras, as linhas de segregação, e a regiões claras, a matriz da microestrutura. A análise foi feita por área para não buscar pontos em especial, que podem trazer distorção no resultado final.

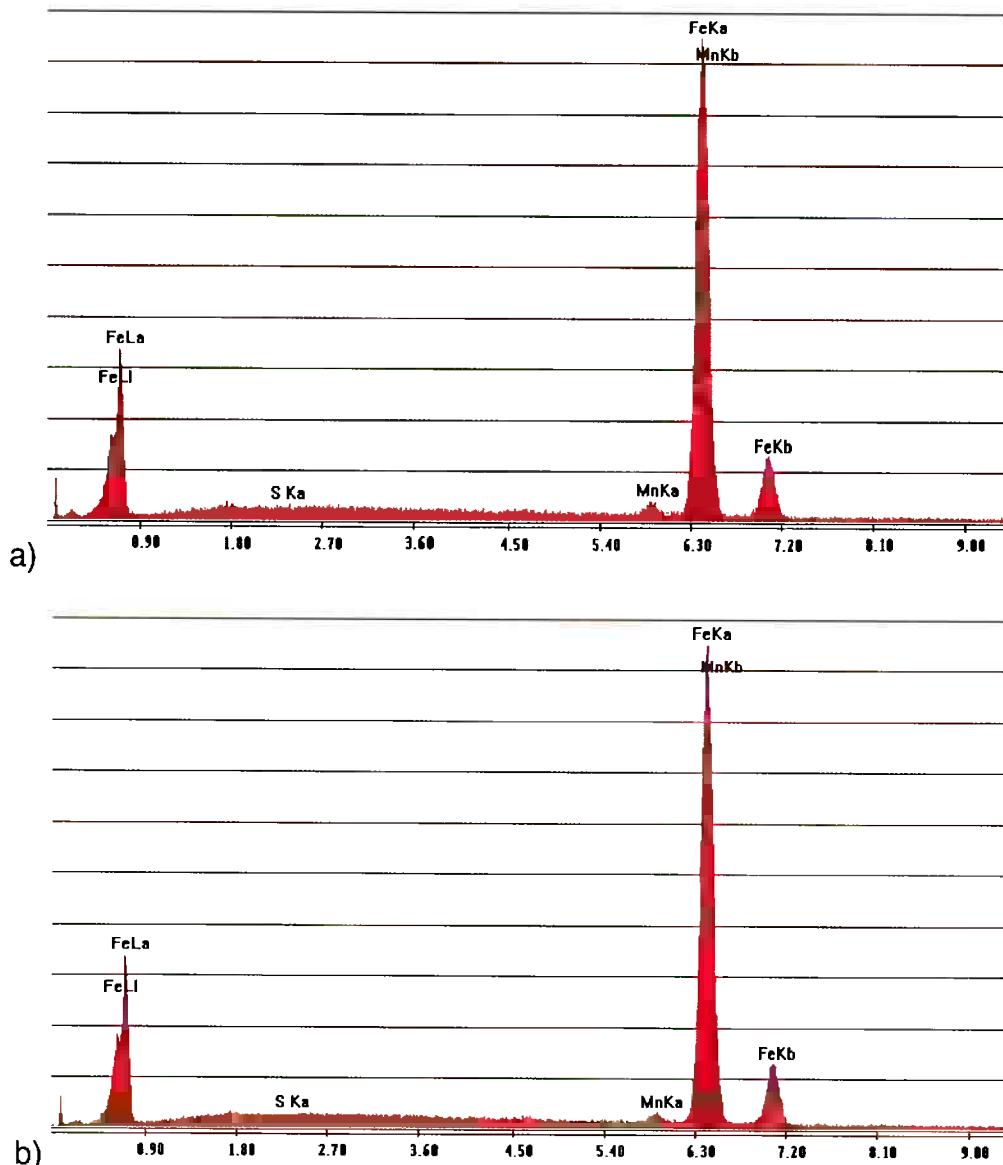


Figura 31 – Resultado de análise por EDS na amostra A sobre as regiões onde apresentam maior concentração de linhas de segregação. A) Região escura (bandeamento); b) Região clara (Matriz). Não é possível observar nos resultados diferença significativa na composição química entre as áreas.

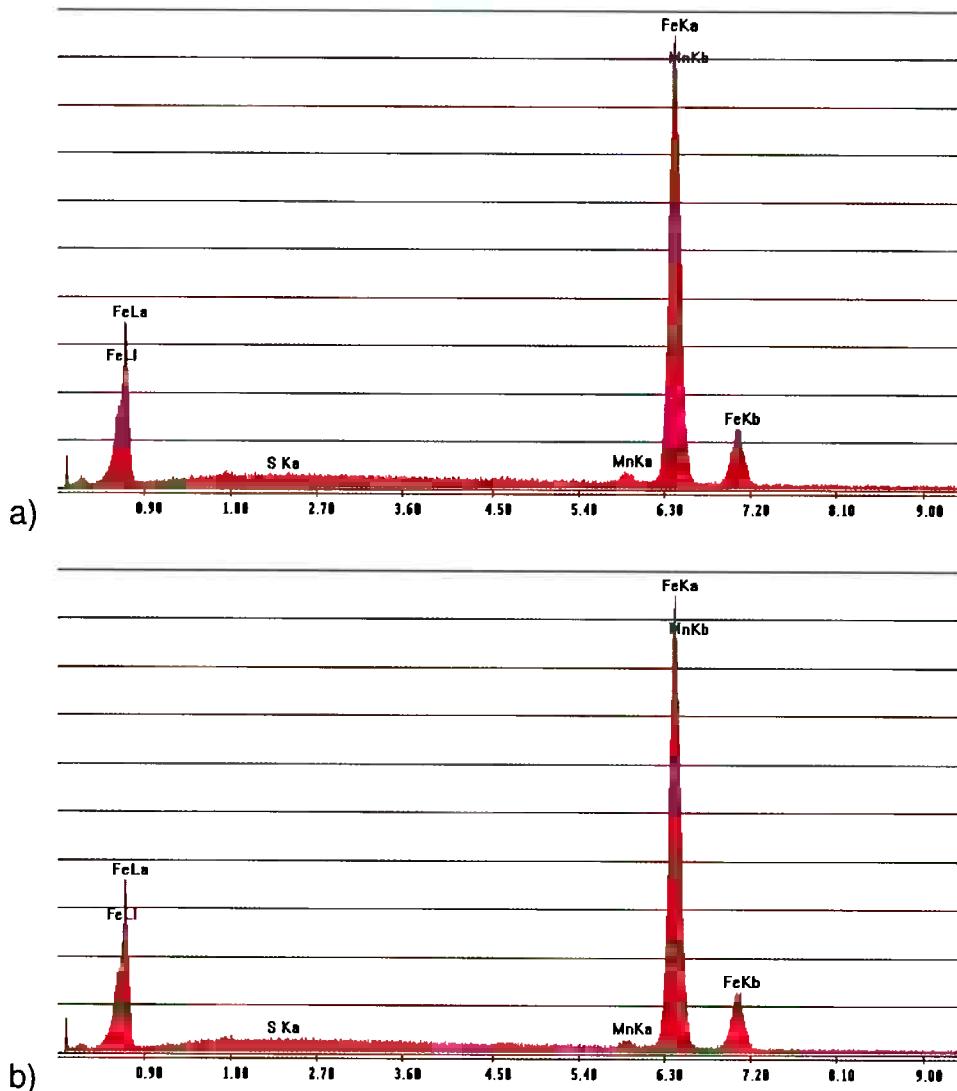


Figura 32 – Resultado de análise por EDS na amostra B sobre as regiões onde apresentam maior concentração de linhas de segregação. A) Região escura (bandeamento); b) Região clara (Matriz). Não é possível observar nos resultados diferença significativa na composição química entre as áreas.

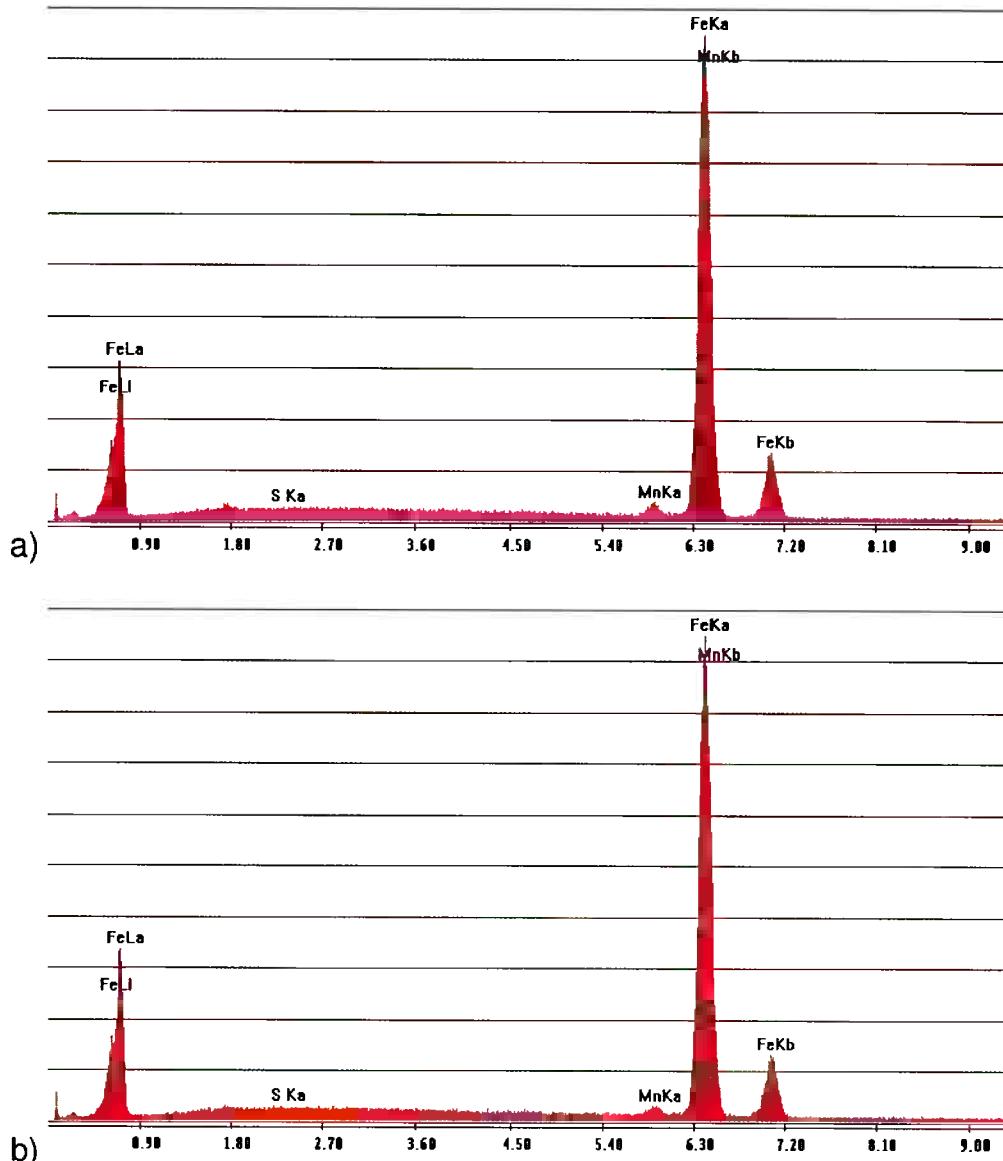


Figura 33 — Resultado de análise por EDS na amostra C sobre as regiões onde apresentam maior concentração de linhas de segregação. A) Região escura (bandeamento); b) Região clara (Matriz). Não é possível observar nos resultados diferença significativa na composição química entre as áreas.

4.2. Caracterização Macro e Microfractográfica

A caracterização macro e microfractográfica foram feitas a partir dos corpos de prova do ensaio de tração. Através destas análises busca-se entender o mecanismo de fratura das amostras e assim possivelmente poder correlacioná-los às propriedades mecânicas e as temperaturas utilizadas no tratamento térmico.

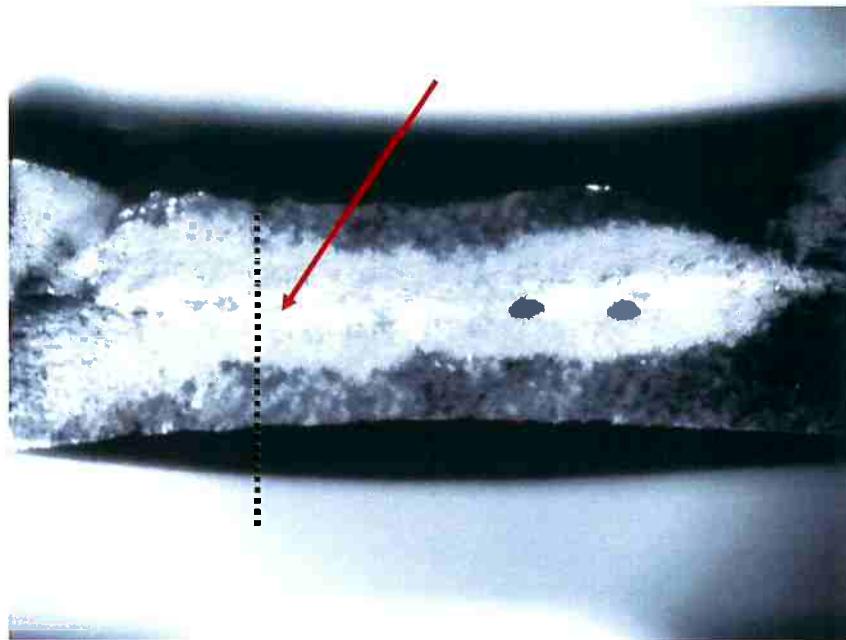


Figura 34 – Inspeção da superfície de fratura da amostra A (amostra retirada na direção longitudinal do tubo, fraturando a sua superfície transversal). Amostra apresenta superfície de fratura com corte longitudinal (vide linha tracejada) em V, indicando possível fratura por cisalhamento. Adicionalmente, observam-se pequenas trincas na região central da amostra. A seta indica a região para exame microfractográfica. Lupa, aumento 10X.

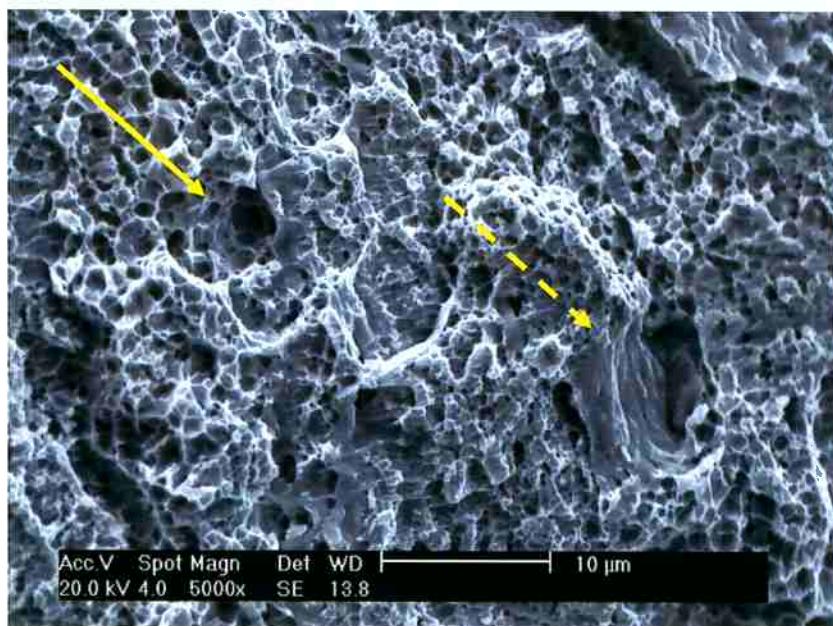


Figura 35 – Amostra A (LE= 498 MPa; LR= 625 MPa; α = 38%; Trev=622,8°C). Exame microestrutural de amostras dos tubos, mostrando fratura dúctil (com alguma presença de alvéolos alongados, típicos de cisalhamento, vide ceta com linha cheia). MEV. Ataque: Nital 2%. Ampliação 5000X. MEV. Algumas regiões da fratura mostraram aspecto atípico (vide seta tracejada), indicando possível clivagem de partícula de segunda fase (inclusão).

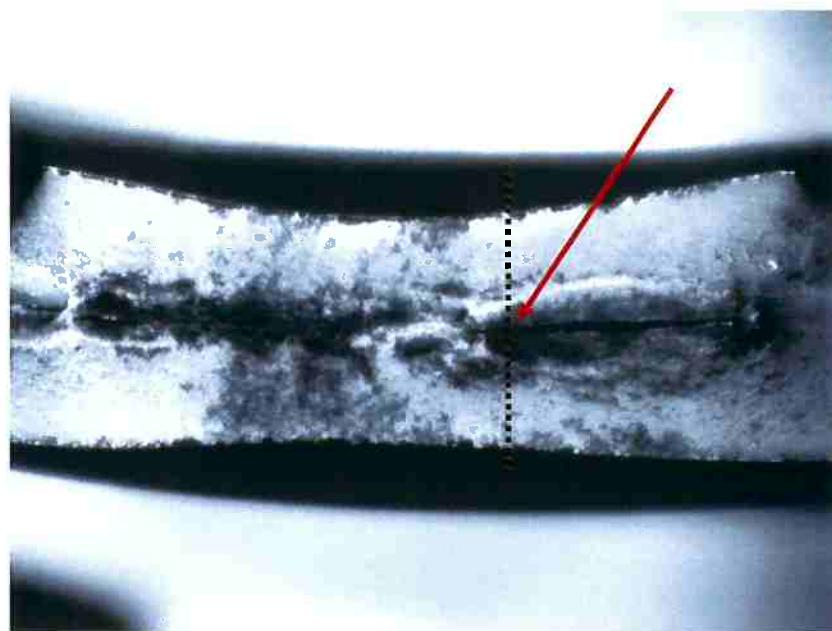


Figura 36 - Inspeção da superfície de fratura da amostra 34 (amostra retirada na direção longitudinal do tubo, fraturando a sua superfície transversal). Amostra apresenta superfície de fratura com corte longitudinal (vide linha tracejada) em V, indicando possível fratura por cisalhamento. Adicionalmente, observam-se intensa presença de trincas típicas de delaminação na região central da amostra. A seta indica a região para exame microfractográfico. Lupa, aumento 10X.

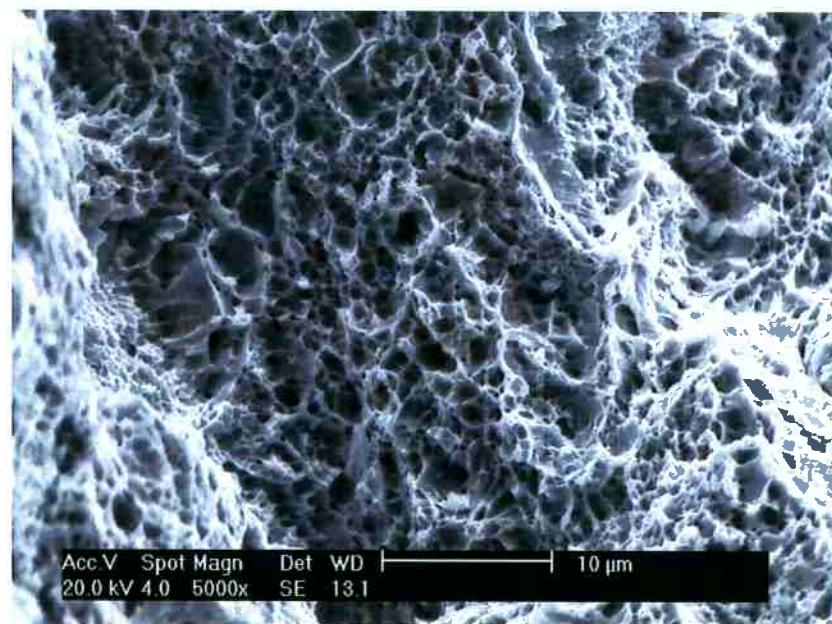


Figura 37 - Amostra B(LE= 614 MPa; LR= 724 MPa; a= 35%; Trev=610,44); Exame microfractográfico de amostras dos tubos, mostrando fratura dúctil (presença de alvéolos ligeiramente alongados, vide seta, típicos de cisalhamento). MEV. Ataque: Nital 2%. Ampliação 5000X MEV.

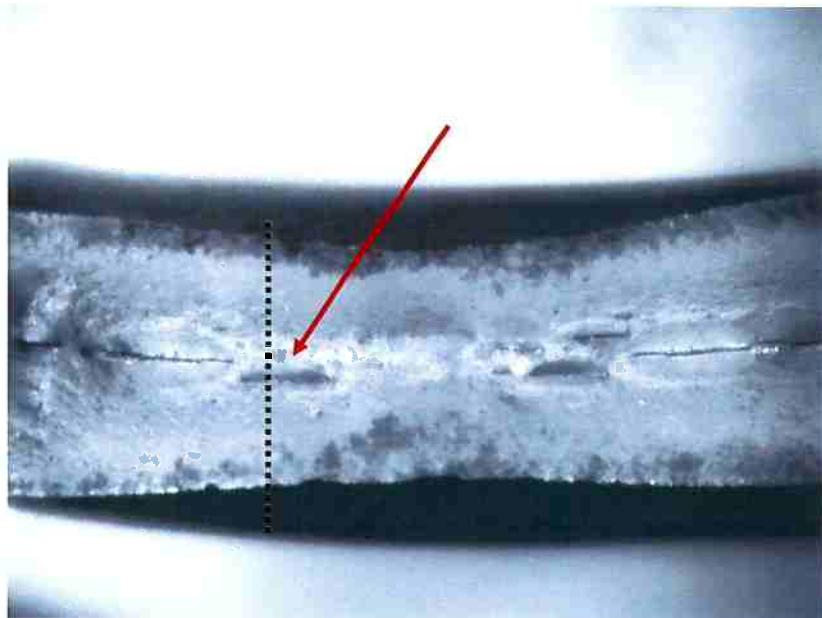


Figura 38 - Inspeção da superfície de fratura da amostra C (amostra retirada na direção longitudinal do tubo, fraturando a sua superfície transversal). Amostra apresenta superfície de fratura com corte longitudinal (vide linha tracejada) em V, indicando possível fratura por cisalhamento. Adicionalmente, observam-se pequenas trincas na região central da amostra. A seta indica a região de para exame microfractográfica. Lupa, aumento10X.

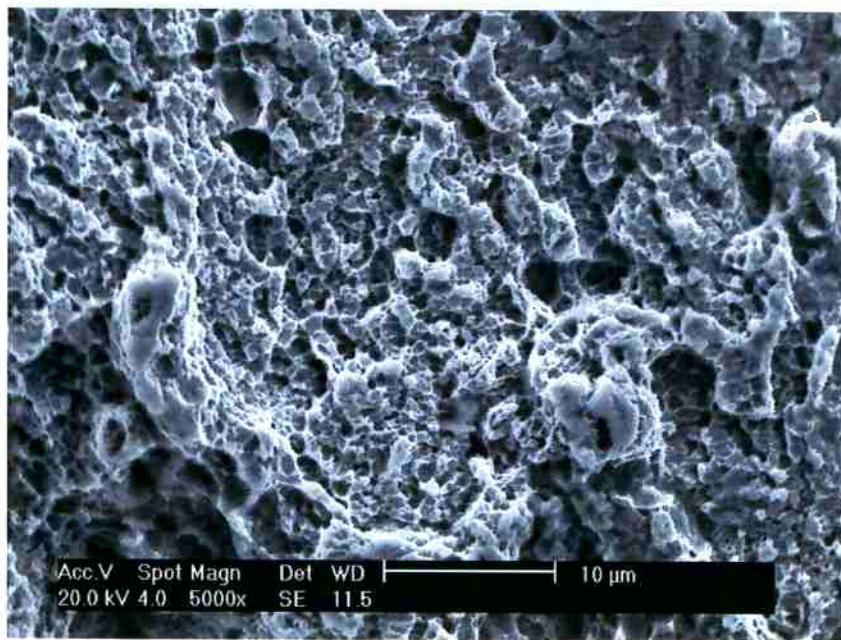


Figura 39 - Amostra C (LE= 674 MPa; LR= 763 MPa; a= 32%; Trev=623,62). Exame microfractográfico de amostras dos tubos, mostrando fratura dúctil (presença de alvéolos ligeiramente alongados, vide seta, típicos de cisalhamento). MEV. Ataque: Nital 2%. Ampliação 5000X. MEV.

5. Discussão

Através dos ensaios realizados, o intuito deste trabalho é fazer a caracterização dos tubos de aço de norma API 5CT, edição 2007, e correlacioná-los às propriedades mecânicas obtidas nas diferentes amostras A, B e C.

A norma prevê para tubos de aço com o grau L 80 as seguintes propriedades:

Tabela 7 - Dados referentes à norma API 5CT.

Norma API 5CT - Grau L80	Mínimo	Máximo
Limite de Escoamento	552 MPa	655 MPa
Limite de Resistência	655 MPa	-
Alongamento	19%	-

Desta maneira, podemos categorizar os resultados das amostras A, B e C para estes parâmetros, cujos valores foram citados anteriormente. Dado que a amostra A está abaixo do limite de escoamento previsto pela norma API 5CT de tubos de aço usados para Casing e Tubing, a amostra B está dentro do previsto, e a amostra C está acima do que a norma prevê.

Porém, as análises de microscopia e caracterização das amostras A, B e C não apresentam gradientes ou tendências como os limites de escoamento, de resistência ou ainda o alongamento. Portanto, a análise e discussão serão feitas a partir da amostra A, com limite de escoamento abaixo do previsto e resultados diferenciados das demais, que seguiam um padrão próximo. Desta maneira, segue abaixo a discussão dos resultados apresentados anteriormente. No entanto, é importante ressaltar que as amostras fazem parte de uma mesma corrida durante o tratamento térmico, porém se referem a lotes diferenciados, organizados de acordo com propriedades do tubo a ser produzido.

Nas imagens de microscopia óptica, figuras 21 a 24, são evidentes as linhas de segregação. As amostras A e C, de secção transversal ao tubo, figuras 21 e 22, apresentam um intenso bandeamento, principalmente nas imagens próximas à região central da espessura do corpo de prova. Também é possível se observar estas linhas, mas mais discretas na amostra transversal ao tubo B.

Já as amostras de secção longitudinal ao tubo, figuras 23 e 24, também apresentam as linhas de segregação, evidente em todas as amostras. Ainda há destaque, que como esperado as amostras do centro da espessura dos corpos de prova apresentam bandeamento mais intenso.

Portanto, foi realizada a análise da composição química via EDS para analisar as amostras de secção longitudinal onde estão localizadas o bandeamento mais intenso. Assim, foram estudadas as regiões escuras (linhas de segregação) e as regiões claras (a matriz). Nas três amostras, A, B e C, conforme é possível observar nas figuras 31, 32 e 33 que não há mudança de composição química representativa.

Por se tratar da caracterização de um material que passou pelo processo de têmpera e revenimento encontramos nas amostras microestruturas de martensita revenida, como é possível observar nas figuras 21 a 24. Porém, é possível identificar nas figuras 23 e 24, mas de maneira mais evidente na figura 24, que a amostra A apresenta morfologia acicular diferenciada das demais. A estrutura apresenta agulhas de maior tamanho na amostra de menor limite de escoamento em relação às demais. Isto sugere que antes da reação martensítica, durante a têmpera tem-se um maior tamanho de grão austenítico para esta amostra. Pois é dado que a relação entre o tamanho de grão austenítico e martensítico é diretamente proporcional na mesma razão, como ilustra o gráfico abaixo:

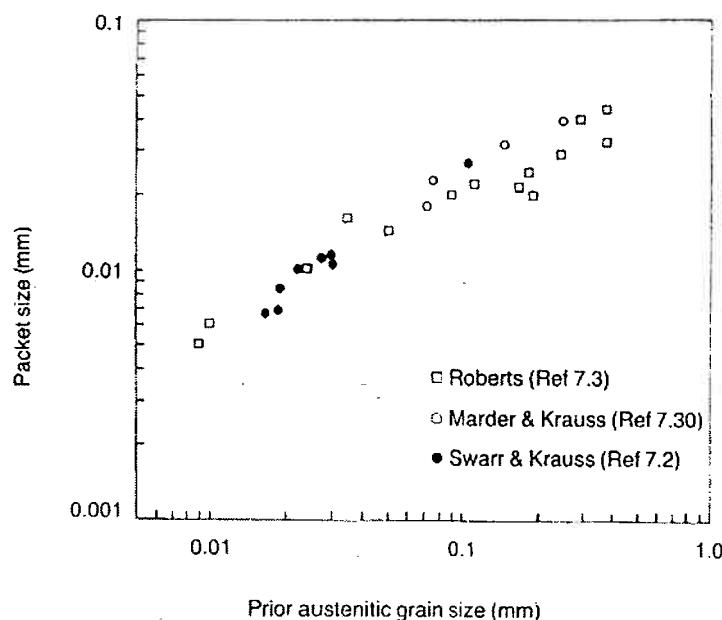


Figura 40- Relação entre tamanho de grão austenítico e martensítico.[20]

A maior temperatura de austenitização faz com que sejam obtidos grãos austeníticos de maior tamanho. Estes, por sua vez, fazem que em um diagrama TTT (Temperatura – Tempo – Transformação) a curva se desloque cada vez mais para a direita. O maior tamanho de grão dificulta a formação da perlita, já que a mesma se

inicia no contorno de grão. Portanto, o maior tamanho de grão austenítico favorece a formação da martensita.

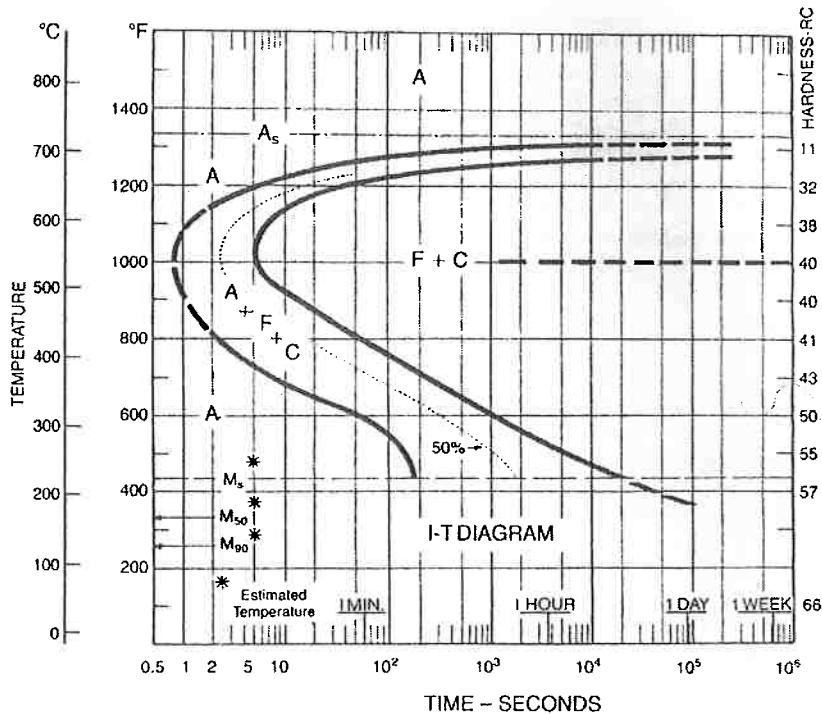


Figura 41 – Exemplo de diagrama TTT [20]

A martensita se forma em um conjunto de pequenas unidades paralelas que subdividem o grão austenítico. Estas unidades, em sua maioria, possuem a mesma orientação, portanto podemos afirmar efetivamente que o conjunto destas se trata de um grão. Portanto, o tamanho deste conjunto é diretamente relacionado ao tamanho de grão austenítico. Logo, o tamanho de grão martensítico revela propriedades mecânicas. Uma vez que com o aumento do tamanho de grão austenítico, o limite de escoamento do material é menor, assim como demonstrado pela amostra A.

Além da temperatura de austenitização, outra maneira de se obter um maior tamanho de grão austenítico é a partir do tamanho de grão encontrado na bobina. Na usina, as características do aço são exatamente as mesmas até a acaria, isto é, quanto à composição química. Porém, durante a laminação é possível obter diferentes tamanho de grão através da mudança de parâmetros nos laminadores. Portanto, estas variações também podem acarretar diferenças no tamanho de grão austenítico.

No tratamento térmico, a formação de martensita revenida acontece a partir da martensita TCC monofásica, saturada com carbono, e se transforma na martensita revenida, composta pelas fases estáveis ferrita e cementita.

Nas imagens de microscopia eletrônica, figuras 25 a 30, é possível identificar que na figura 28, referente à amostra A, transversal e longitudinal ao tubo, respectivamente, existem partículas claras dispersas que em comparação às demais amostras apresentam maior tamanho médio.

Estas regiões claras são as partículas de cementita que compõe a martensita revenida. De acordo com a bibliografia, o tamanho das partículas de cementita influencia o comportamento mecânico da martensita revenida. O aumento no tamanho das partículas diminui a área de contornos entre as fases ferrita e cementita e, consequentemente, resulta em um material mais macio e mais fraco. Além do mais, o tratamento térmico de revenimento determina o tamanho das partículas de cementita. As variáveis do processo térmico são a temperatura e o tempo, e a maioria dos tratamentos consiste em processos que são realizados a uma temperatura constante. Uma vez que são realizados a uma temperatura constante. Uma vez que a difusão do carbono está envolvida na transformação da martensita em martensita revenida, o aumento da temperatura irá acelerar o processo de difusão, a taxa de crescimento das partículas de cementita, e subsequente, a taxa de amolecimento.

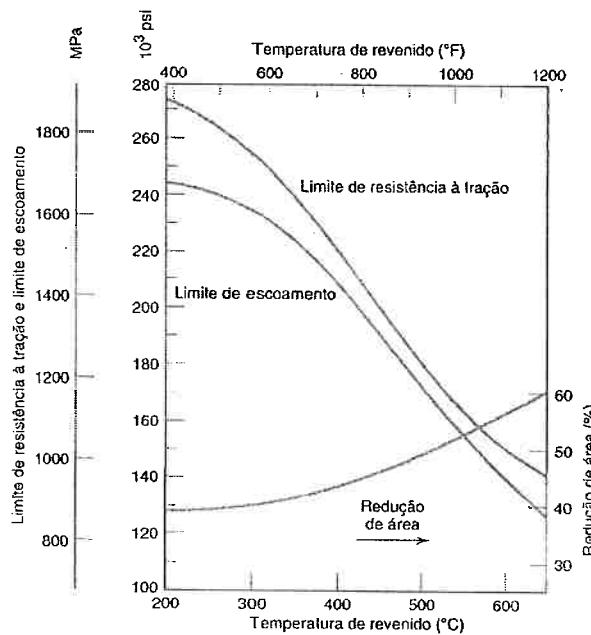


Figura 42 - Relação da temperatura do revenido e das propriedades mecânicas. [21]

Analisaram-se também as fraturas das amostras de tração dos corpos de prova. A fractografia apresenta nas figuras 35, 37 e 39 alvéolos alongados e de tamanhos variados, não apresentando nenhum padrão que possa correlacionar a quantidade ou tamanho destes com as propriedades mecânicas das amostras. Observa-se na figura 16, aspecto atípico, indicando possível clivagem por segunda fase (inclusão)

Vale destacar que nas figuras 34,36 e 38 obtidas através da lupa com aumento de 10X, é possível observar que as fraturas apresentam caráter misto entre taça e cone.

6. Conclusão

- As linhas de segregação, o bandeamento, apesar de apresentar diferença de intensidade entre as amostras, não mostram relação direta com as propriedades mecânicas apresentadas.
- A fractografia não apresentou resultados que pudessem explicar, ou mostrar evidências quanto algum processo ou mecanismo que alterasse o limite de escoamento do aço conforme variação da temperatura
- O tamanho de grão austenítico está diretamente relacionado ao tamanho de grão martensítico. O aumento do tamanho de grão austenítico causa diminuição do limite de escoamento e deve ser controlado, neste caso através da temperatura de austenização, ou ainda o seu maior tamanho pode ser originado do próprio aço, que durante o processo de laminação na usina pode ter originado tamanhos de grão diferenciado na bobina. O que justificaria as propriedades mecânicas do material da amostra A.
- A difusão do carbono está envolvida na transformação da martensita em martensita revenida, portanto a cementita em altas temperaturas pode ocasionar a diminuição do limite de escoamento.
- Sugere-se uma análise da variação de temperatura da atmosfera dentro do forno de tratamento térmico seja feita e comparada com a temperatura real do tubo a fim de verificar se há distorções nos resultados de forma que possa

impactar mudanças na microestrutura do material e por conseqüência nas propriedades mecânicas.

- Sugere-se um estudo de quantificação do tamanho de grão do aço fornecido pela usina, de modo que se possam evitar variações que sejam prejudiciais a partir da etapa de austenitização e confirmam propriedades não desejadas ao tubo.
- Sugere-se um estudo de quantificação do tamanho de grão martensítico ou austenítico de acordo com a temperatura durante o tratamento térmico, a fim de correlacionar o tamanho de grão, temperatura e as propriedades mecânicas.

7. Referências Bibliográficas

- [1] BRASIL. Confederação Nacional da Indústria: **Matriz energética: cenários, oportunidades e desafios**. Brasília: 2007. 82 p.
- [2] BRASIL. Ministério de Minas e Energia / Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2008: Ano base 2007 - Resultados Preliminares**. Rio de Janeiro: 2008. 44 p.
- [3] BRASIL, Ministério de Minas e Energia / Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Energia 2008 – 2017**. Brasília: 46 p.
- [4] SANTOS, A. I.; WEBER, L. M.; MOREIRA, T. Z. T. **A matriz energética brasileira e o aproveitamento das fontes renováveis**. Análise Conjuntura, v.28, n.1-2, p.18, jan./fev. 2006.
- [5] MARIANO, J. B. **Impactos Ambientais do Refino de Petróleo**. 2001. 261 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- [6] INATOMI, T. A. H.; UDAETA, M. E. M. **Análise dos Impactos Ambientais na Produção de Energia dentro do Planejamento Integrado de Recursos**. Campinas: Cori/Unicamp, 2005.
- [7] BRASIL. Ministério de Minas e Energia / Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2007: Ano base 2006 – Relatório Final**. Rio de Janeiro: 2007. 192 p.
- [8] FREIAS, J. J. **Validação de uma metodologia de Ensaio de Resistência ao Cisalhamento para Avaliação da Aderência de Interfaces Revestimentos Metálico-Bainha de Cimento Aplicada a Poços de Petróleo**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007. 41 p.
- [9] TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. **Matriz energética brasileira: uma prospectiva**. Novos Estudos – CEBRAP, n.79. São Paulo: 2007.
- [10] BATISTA, G. Z. **Curvamento por indução de tubo da classe API 5L X80**. 2005. 122 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2005.

- [11] GORNI, A. A.; DA SILVEIRA, J. H. D. **Interação entre as Demandas das Aplicações e as Características e Especificações de Chapas Grossas.** Belo Horizonte: 60º Congresso Anual da ABM, Julho/2005.
- [12] PINTO, P. M. A. S. **Soldagem circunferencial de tubo API 5L X80 empregando processos manual/semi-automático.** 2006. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2006.
- [13] RITTMAN, R.; FREIER, K. **Niobum Containing Steels for Spiral and Electric Resistance Welded Line Pipe Production.** Development; Salzgitter Flachstahl GmbH 38239 Salzgitter, Germany.
- [14] NUÑEZ, M. M. G. **Avaliação do comportamento em corrosão dos aços API 5LX70 e API 5LX80 em meio contendo CO₂ por técnicas de análises superficiais e eletroquímicas.** 2006. 102 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2006.
- [15] GORNI, A. A.; DA SILVEIRA, J. H. D. **Resfriamento Acelerado em Chapas Grossas: O Futuro Chegou.** Caderno Técnico da Revista Metalurgia e Materiais, Março 2006, pág. 103-105.
- [16] CONFAB INDUSTRIAL S.A. **Processos Produtivos - 001.** Pindamonhangaba: 2007. Arquivo .doc de circulação interna da empresa.
- [17] RATNAPULI, R.C.; RODRIGUES, E.C. **Avaliação das Mudanças de Propriedades Mecânicas durante a Conformação de Tubos pelo Processo UOE.** Relatório Final RV7915, Centro de Pesquisas, Usiminas. Ipatinga: 1981.
- [18] RATNAPULI, R.C.; FERREIRA, E.S. **Método Estimativo para Determinar o Limite de Escoamento de Tubos de Grande Diâmetro Conformado pelo Processo UOE com Aços API.** Belo Horizonte: 49º Congresso Anual da ABM, Julho/1984.
- [19] SAGE, A. M. **Microalloyed Steels for Estructural Applications.** Metals & Materials, 1989.

[20] Krauss, G. **Steels: Heat Treatment and Processing Principles.** 1989

[21] Callister Jr., W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução.** 5^a Edição, 1999.

[22] BOLETIM SBGF, **Publicação da Sociedade Brasileira de Geofísica.** Rio de Janeiro: 2008. Número 4, 10 p.

[23] SALANI, S. **Desenvolvimento de tratamento térmico de tubo sem costura API 5CT grau N80 na Tenaris Confab.** Rio de Janeiro: 60º Congresso Anual da ABM, 2006. 3571 p

[24] WILLIAMS, J. G. **Advances in Steels for high strength ERW Linepipe Application in Australia.** Materials Forum Volume 31, 2007

