

RAONI COSTA CABRAL

**VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS NA FABRICAÇÃO
DE TUBOS DE AÇO API X70 PARA GASODUTOS**

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

**SÃO PAULO
2008**

RAONI COSTA CABRAL

**VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS NA FABRICAÇÃO
DE TUBOS DE AÇO API X70 PARA GASODUTOS**

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 Roberto de
Farias Azevedo

**SÃO PAULO
2008**

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Cesar R. F. Azevedo, pela grande orientação e amizade, e também constante estímulo, e por proporcionar um trabalho que em sua execução me agregou um bom conhecimento.

À empresa TenarisConfab, representada pelo Eng^o Sérgio Seijio Kojima, Gerente de Matérias-Primas e Metalurgia, pelo fornecimento das amostras utilizadas nos ensaios, pelas boas idéias, orientações, e pelo apoio e estrutura dados ao desenvolvimento desse trabalho.

A Deus, e ao meu pai Cláudio Francisco Cabral e à minha mãe Gláucia Maria Chaves Costa, que me deram a vida, e proporcionaram todas as condições possíveis não só para ingressar na faculdade, mas também proveram todo o suporte necessário durante o curso.

Aos amigos Genis e Patrícia, Gilson e Sandra, Mário e Regina, José Clóvis e Magnólia, Arlete e Mário, Thayana, Pedro e Iuri, pela sincera amizade, carinho, atenção, e pela inspiração e o apoio para o meu desenvolvimento, me auxiliando a fazer e a ser cada vez melhor, nos mais diversos aspectos.

Aos colegas Rafael “Goiano” de Paula Guayer Wanderley, Fernando “Pada” de Almeida Cerqueira, Pedro “Jacaré” Garcia Lins, Lucas Alberto Calandrino, Thiago “Carica” Luis Alves Jatobá, Thiago “Mala” Formigoni Dias, Álvaro Luis Costacurta Baldo, André “Capa” Garcia, Guilherme Sevaybricker Benito, Luis “Boi” Terêncio Parisotto Ricciardi, Flávio Pereira de Moraes, Néelson “Paisana” Luiz dos Santos, Luiz Fernando Schneider, André “Babi” Camargo, Rafael Ikemori, Renato Nazário Ide, André “Xumbrega” Mendes Carneiro Lyrio, Gabriel Rubin de Lima, Rafael Bechelli Paviato, Ruy Sevalho Gonçalves, Marcelo “Martché” Mendes de Castro e Bianca Foggiatto, e outros não menos importantes, que tomaram minha trajetória acadêmica uma experiência única, além de terem me dado suporte por diversas vezes, e em situações que me possibilitaram chegar à etapa final da graduação, ou seja, a realização deste trabalho.

RESUMO

A produção de gás e petróleo e o consumo de seus derivados vêm crescendo cada vez mais ao redor do mundo, inclusive no Brasil. Para atender a essa demanda, é necessária a fabricação de gasodutos e oleodutos para realizar o transporte desses recursos. A fim de tornar esse transporte mais barato e mais confiável o mercado de tubulações exige que as propriedades mecânicas dos tubos sejam aprimoradas constantemente, e para isso é necessário ter maior conhecimento dos processos de fabricação e da microestrutura dos aços microligados que atendem às normas da API (American Petroleum Institute). Isso se torna fundamental no sentido de compreender a relação desses parâmetros com a variação das propriedades no processo de fabricação dos tubos, já que há uma tendência de perda das propriedades durante a conformação das chapas e bobinas em tubos, devido ao efeito Bauschinger. Esse trabalho tem como objetivo principal apresentar as variações das propriedades mecânicas mais importantes na fabricação de tubos de aço de grau API-5L X70, e como elas são afetadas. Também fazem parte das propostas do trabalho analisar os estudos realizados mundialmente visando o desenvolvimento dos aços ARBL (alta resistência e baixa liga), estudar o efeito Bauschinger e traçar um panorama do setor energético (e mais especificamente do gás natural) brasileiro e mundial. Microestruturas mais refinadas e com distribuição mais homogênea entre as fases, e bobinas com menor resistência mecânica estão relacionadas com um maior aumento da resistência mecânica dos tubos.

Palavras-chave: Gasodutos. Aços ARBL. Soldagem ERW. Efeito Bauschinger. Microestrutura. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Gas and oil production and their derivatives consumption are growing increasingly around the world, including Brazil. To meet this demand, it is necessary the manufacture of gas and oil linepipes to carry out the transport of these resources. In order to make such transport cheaper and more reliable, the linepipes market requires that the mechanical properties of the tubes are enhanced constantly, and for that greater knowledge of the manufacture and the microstructure of API (American Petroleum Institute) class steels is needed. This becomes essential in order to understand the relationship of these parameters with the variation of properties in the process of manufacturing pipes, since there is a tendency for loss of mechanical properties during the conformation of plates and coils in tubes, due to the Bauschinger effect. The target of this project is to link the main processes of fabrication of steel, its microstructure and chemical composition with the variation of the mechanical properties in the manufacture of API-5L X70 steel tubes. Also part of the proposals of this project is to analyze the studies to develop the HSLA (high-strength low-alloy) steels, to study the Bauschinger effect and draw a picture of the actual energy sector (and more specifically the natural gas one).

Keywords: Linepipes. HSLA steels. ERW, Bauschinger effect. Microstructure. Mechanical properties.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Panorama Energético Brasileiro	3
2.1.1. Panorama Energético Mundial	3
2.1.2. Inserção do Brasil	3
2.1.3. Matriz Energética Brasileira	4
2.1.4. Fontes Renováveis	6
2.1.5. Questão Ambiental	7
2.1.6. O Gás Natural	11
2.2. Desenvolvimento dos Aços API	13
2.2.1. Aços API 5L (Linepipes)	13
2.2.2. Processos de Fabricação	15
2.2.3. Composição Química	20
2.3. O Processo ERW	24
2.3.1. Etapas do Processamento	24
2.4. O Efeito Bauschinger	32
2.4.1. Mecanismos do Efeito Bauschinger	32
2.4.2. Importância do Efeito Bauschinger na Fabricação de Tubos	34
2.5. Objetivos	35
3. Materiais e Métodos	36
3.1. Materiais	36
3.2. Métodos	37
3.2.1. Ensaio Mecânicos	38
3.2.2. Análise Metalográfica	41
3.2.3. Análise Química	45
4. Resultados	46
4.1. Análise Química	46
4.2. Ensaio Mecânicos	47

4.3. Ensaaios Metalográficos	56
4.3.1. Dureza	56
4.3.2. Microscopia	56
5. Discussões	64
5.1. Limite de escoamento	64
5.2. Limite de Resistência	66
5.3. Razão Elástica e Alongamento	66
5.4. Charpy	66
5.5. Microestrutura	67
6. Conclusões e Sugestões	72
7. Referências Bibliográficas	75

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira (2007).....	5
Figura 2 - Desenvolvimento dos aços para tubos API.....	15
Figura 3 - Tamanho de grão obtido pelos diferentes processos de laminação.....	16
Figura 4 - Diferentes processos de nucleação.....	17
Figura 5 - Ilustração esquemática de mudanças microestruturais na laminação controlada.....	19
Figura 6 - Influência dos elementos de liga no retardo da recristalização da Austenita.....	22
Figura 7 - Etapa de desbobinamento.....	24
Figura 8 – Etapa de corte de aparas das bobinas.....	25
Figura 9 – Etapa de pré-formação dos tubos.....	26
Figura 10 – Etapa de “Fin-Pass”.....	27
Figura 11 – Etapa de soldagem dos tubos.....	28
Figura 12 – Etapa de identificação dos tramos.....	29
Figura 13 – Etapa de esmerilhamento.....	30
Figura 14 - Fabricação dos tubos por formação contínua e soldagem ERW.....	32
Figura 15 - Curva Tensão-Deformação considerando o Efeito Bauschinger.....	33
Figura 16 - Curva Tensão-Deformação de um corpo de prova submetido a tração seguida de compressão. σ_b é menor que σ_a devido ao Efeito Bauschinger.....	34
Figura 17 – Amostras utilizadas no trabalho para as análises química e Metalográfica.....	38
Figura 18 – Máquina de tração utilizada no ensaio de tração.....	39
Figura 19 – Máquina de ensaio Charpy.....	40
Figura 20 – Esquema da retirada de amostras dos ensaios mecânicos – tração e ensaio Charpy.....	40
Figura 21 – Esquema da retirada das amostras e da região observada na análise metalográfica (ensaio de dureza Vickers e microscopia).....	41
Figura 22 – Microscópio Óptico e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	43
Figura 23 – Durômetro Vickers.....	44
Figura 24 – Disposição dos pontos de impressão no ensaio de dureza Vickers.....	45

Figura 25 – Espectômetro de emissão óptica para análise química.....	45
Figura 26 - Exame microestrutural de amostras dos tubos.....	58
Figura 27 - Exame microestrutural de amostras dos tubos.....	59
Figura 28 - Exame microestrutural de amostras dos tubos.....	60
Figura 29 - Exame microestrutural de amostras dos tubos.....	61
Figura 30 - Exame microestrutural de amostras dos tubos.....	62
Figura 31 - Exame microestrutural de amostras dos tubos.....	63
Figura 32 – Exame microestrutural do agregado ferrita-cementita.....	68
Figura 33 – Exame microestrutural do agregado ferrita-cementita.....	68
Figura 34 – Exame microestrutural de uma das amostras dos tubos.....	69
Figura 35 – Exame microestrutural de amostras dos tubos.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos aços para dutos pela Norma API 5L.....	14
Tabela 2 – Composição Química de produto das 12 bobinas utilizadas no trabalho (conforme Certificado da usina).....	36
Tabela 3 – Medidas de dureza Vickers (HV10) das bobinas (conforme Certificado da usina).....	37
Tabela 4 – Análise Química das amostras de tubos.....	46
Tabela 5 – Dados obtidos no ensaio de tração para tubos e bobinas.....	47
Tabela 6 – Variação de bobina para tubo das propriedades obtidas no ensaio de tração.....	47
Tabela 7 – Resultados do ensaio de impacto Charpy para bobinas e tubos, e as respectivas variações, para cada corrida.....	54
Tabela 8 – Medidas do ensaio de Dureza Vickers (HV10) das amostras de tubos...	56

1. Introdução

A crescente demanda por tubulações para o transporte de petróleo e gás ao redor do mundo gera a necessidade de se desenvolver aços com resistência mecânica cada vez maior, boa tenacidade a baixas temperaturas, maior resistência à corrosão e boa soldabilidade. A fabricação de tubos de aço com melhores propriedades se faz necessária não apenas pela economia no transporte e na soldagem dos mesmos, mas também pelas condições a que os tubos são submetidos nos dias de hoje. Para que os dutos transportem produtos mais agressivos quimicamente e em ambientes mais exigentes, são necessários tubos de graus API (American Petroleum Institute) cada vez mais altos. Para que isso seja possível, é fundamental o conhecimento do processo de fabricação das chapas e bobinas de aço, além de sua composição química e microestrutura.

O desenvolvimento dos processos de fabricação do material foi e continua sendo fundamental para que as exigências do mercado sejam atendidas. A introdução do processo de laminação controlada na fabricação do aço nos anos 70 e o advento do resfriamento acelerado nos anos 80 possibilitaram a obtenção de ótimas propriedades mecânicas e químicas, com baixos teores de elementos de liga (e conseqüente baixo carbono equivalente, o que melhora a soldabilidade do aço). Contudo, os estudos visando o desenvolvimento de novos processos de fabricação, microestruturas, composições químicas e mecanismos de endurecimento continuam sendo necessários.

No Brasil, a fabricação dos aços Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) para tubos que atendem a norma API com graus X70 e X80 (os mais altos fabricados no país atualmente) utiliza o tradicional processo de laminação controlada, enquanto em países mais desenvolvidos é utilizada a técnica de resfriamento acelerado. A composição química típica desses materiais contém um baixo teor de carbono (até 0,10% de C), alto teor de manganês (Mn), e adições de cromo (Cr), Molibdênio (Mo), Vanádio (V), Titânio (Ti) e Nióbio (Nb), gerando uma microestrutura final ferrítica com grãos refinados (é comum a presença de grãos de ferrita com morfologia acicular), podendo também conter perlita, bainita e precipitados do microconstituente AM (austenita-martensita). Para tubos fabricados pelo processo de formação contínua

com soldagem por resistência elétrica (ERW - Electric Resistance Welding) o grau mais alto utilizado no país atualmente é o API X70.

A relação entre as propriedades das chapas e bobinas vindas da usina e dos tubos fabricados a partir delas é muito importante, o que torna fundamental o conhecimento do efeito Bauschinger, responsável pela perda de resistência mecânica do aço no processo de conformação dos tubos. Agindo no sentido contrário a esse efeito, o encruamento do material que ocorre durante a conformação das chapas e bobinas pode resultar em um aumento dessa resistência. Portanto, se esses efeitos e seus mecanismos forem entendidos, pode-se ajustar o processo de fabricação, a composição química e a microestrutura do aço no intuito de se obter um balanço positivo na variação das propriedades, e, com isso, fabricar tubos mais resistentes mecânica e quimicamente, e com boa tenacidade e soldabilidade, atendendo as necessidades do exigente mercado de dutos atual. Além disso, a relação entre esses parâmetros e a variação das propriedades entre chapas/bobinas e tubos, da mesma forma, facilita a obtenção de melhores propriedades do aço, e também atender as exigências das normas API. Essa relação é o principal objetivo desse trabalho, mais especificamente no que diz respeito à microestrutura do aço em estudo.

Neste trabalho, foi utilizado como objeto de estudo um aço que atende as especificações da norma API 5L (que rege a fabricação de tubos para condução de gás e petróleo) de grau X70 (limite de escoamento mínimo de 70 ksi, correspondente a 482 MPa). Esse aço foi fabricado pelo processo termomecânico de laminação controlada (Thermo-Mechanical Control Process – TMCP), e os tubos foram fabricados a partir das bobinas vindas da usina, por formação contínua, e soldados pelo processo ERW. Os tubos têm 20" de diâmetro e 0,469" de espessura, e serão aplicados na construção de um gasoduto em território brasileiro. Para se obter os dados necessários ao desenvolvimento do trabalho, foram realizados ensaios de tração, dureza, resistência ao impacto Charpy e análise química, além de microscopias óptica e eletrônica de varredura (MEV) (as microscopias foram realizadas apenas para as amostras referentes aos tubos). O objetivo do trabalho foi comparar as propriedades das bobinas e dos tubos, e relacionar a variação destas com os parâmetros de fabricação mais importantes, principalmente a microestrutura final do material.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Panorama Energético Brasileiro

2.1.1. Panorama Energético Mundial

Nos dias de hoje, é de suma importância conhecermos e entendermos o panorama energético brasileiro e mundial. Como esse estudo aborda a fabricação de tubos para gasodutos, é fundamental que se entenda como e onde as fontes de energia em geral, e o gás natural mais especificamente (e também o petróleo, já que gasodutos e oleodutos utilizam tubos de aço com as mesmas especificações) se inserem na matriz energética do país e do mundo. Deve-se analisar o panorama energético mundial para também entendermos as possibilidades de desenvolvimento da matriz energética brasileira, contextualizando o setor de gás natural e as perspectivas do mesmo para o futuro.

Os principais insumos energéticos utilizados atualmente pela indústria mundial são o petróleo, o carvão e o gás natural. A demanda por esses insumos tem aumentado significativamente nos últimos anos, e considerando a instabilidade política nas regiões produtoras de gás e petróleo e a necessidade de redução dos gases causadores do “efeito estufa”, cria-se uma preocupação a respeito do futuro do setor energético mundial, em se tratando tanto da distribuição e da oferta das diversas fontes de energia quanto dos preços que estas podem alcançar devido a esse panorama. Nesse contexto é que se inserem as fontes alternativas de energia, para utilização industrial, e também veicular e residencial, por dois motivos principais: o aspecto ambiental das fontes de energia, já que é fundamental para o mundo em que vivemos hoje visarmos um desenvolvimento sustentável, e o aspecto de alternativa em relação aos altos preços que as fontes tradicionais tendem a alcançar [1].

2.1.2. Inserção do Brasil

É nesse aspecto que o Brasil se insere mundialmente com grande potencial, devido à alta participação de fontes renováveis em sua matriz energética, às boas

reservas de gás e petróleo, e à auto-suficiência energética. Os setores industriais do país que utilizam energia elétrica têm sua competitividade aumentada em relação a outros países, cujas indústrias têm insumos baseados no petróleo e no gás, que, como já discutido, tendem a ter seus preços aumentados no mercado internacional, enquanto no Brasil a geração de energia é predominantemente hidrelétrica. Existe também um grande interesse de investidores internacionais na “energia limpa”, em que o Brasil apresenta grande potencial, principalmente nas áreas de etanol, biodiesel e bioeletricidade. Apesar de situações delicadas no setor de hidroeletricidade (atrasos nas construções de usinas e dificuldades em licitações paralisando os investimentos no setor), e um pequeno desequilíbrio entre demanda e oferta de gás natural, a auto-suficiência do país em petróleo dá condições para um bom crescimento da indústria e da economia brasileiras [1].

2.1.3. Matriz Energética Brasileira

Em 2007, a oferta interna de energia no Brasil cresceu 5,9%, taxa ligeiramente superior ao crescimento da economia (de 5,4%, conforme dados do IBGE). Apesar de expressivo, esse resultado traz implícita a sugestão de que importantes mudanças estruturais podem estar em curso na economia nacional, com aumento da eficiência no uso da energia. Isto é muito claro no caso da energia elétrica, mas também se verifica, quando tomado em perspectiva, com relação à energia como um todo. Com efeito, a intensidade energética (quantidade de energia por unidade do PIB), apesar de ligeiramente maior do que a de 2006, é a mesma que se registrou em 1990: 0,182 tep/103 US\$ (tep=toneladas equivalentes de petróleo). A oferta interna de energia atingiu 239,4 milhões de tep, com destaque para o crescimento dos produtos da cana-de-açúcar, cuja oferta cresceu 17,1%. A cana-de-açúcar passa, assim, a ser a segunda fonte de energia mais importante na Matriz Energética Brasileira (MEB), atrás somente do petróleo. Em 2007, mais de 16% de toda a energia consumida no país foram provenientes dessa fonte renovável. Outros destaques em 2007 foram:

- Manutenção da auto-suficiência de petróleo alcançada em 2006: pelo segundo ano consecutivo, a produção nacional atendeu o consumo doméstico e gerou exportações que superaram o volume importado;

- Aumento da autoprodução de energia elétrica, principalmente em razão da cogeração no setor industrial, indicativo de aumento da eficiência global no uso da energia;
- Crescimento de 6,7% no consumo final de energia, percentual maior do que o da oferta, indicando que houve redução de perdas na transformação;
- Aumento da proporção de energia renovável na MEB: em 2007, 46,4% de toda a energia consumida no país foram produzidos a partir de fontes renováveis; em 2006 essa proporção foi de 44,9%; esse resultado preserva a condição de “matriz limpa” da MEB, quando comparada com referências mundiais.

Entre as fontes de energia, o destaque foi o etanol, com crescimento de 34,7%, refletindo os preços favoráveis relativamente à gasolina. O consumo final de energia cresceu em todos os setores de atividade, em especial na indústria, nos transportes, no setor agropecuário e no setor comercial. Em todos esses casos, as taxas de crescimento (sobre 2006) superaram 6% [2]. Abaixo, na Figura 1, temos a distribuição das fontes de energia da Matriz Energética Brasileira (lembrando que a biomassa se refere à lenha, carvão vegetal e outras fontes renováveis):

Matriz Energética Brasileira (2007)

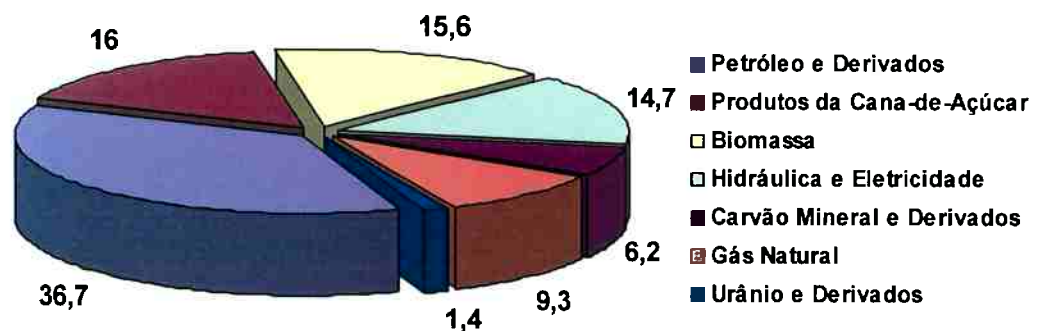


Figura 1 - Matriz Energética Brasileira (2007) [adaptado de 2].

2.1.4. Fontes Renováveis

Em relação às fontes renováveis, já foi citado o grande potencial do Brasil nesse setor, cuja participação na MEB de 2007 foi de 46,4%. Isso decorre, dentre outros fatores, da pequena utilização da energia nuclear e da significativa participação da biomassa e da hidroeletricidade na oferta total de energia do País. Também fazem parte dessas fontes o biodiesel e a energia eólica (gerada pelo vento), entre outras.

Inicialmente, pode-se definir a energia renovável como aquela que é obtida a partir de fontes naturais, sendo disponibilizada de forma cíclica. Além de reduzir a dependência em relação às fontes tradicionais, uma maior utilização da energia renovável proporciona grandes benefícios ambientais, abrindo espaço, também, para o desenvolvimento tecnológico e a produção de novos conhecimentos na área energética.

A hidroeletricidade continua sendo a grande fonte de energia elétrica do país, responsável por 77% da oferta interna em 2007, não inclusas as importações desse setor (que somam 15,6% a esse valor) [2]. O grande potencial hídrico ainda não explorado deve ser aproveitado, e, visando um baixo impacto ambiental, o governo federal desenvolveu nos últimos anos o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), quem tem por meta, entre outras, a construção de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), que se mostram como uma boa alternativa no sentido de se gerar energia "limpa" sem grandes impactos ambientais. A construção de novas usinas de uma forma geral tem encontrado entraves no licenciamento, por questões ambientais, que devem ser sanadas no sentido de incentivar o aumento da hidrogeração no país.

A energia eólica possui um bom potencial a ser explorado em algumas regiões do País. Hoje, a potência instalada é de 26,8 MW, com possibilidade de crescer 4,1%, caso seja atingida a meta fixada pelo Proinfa [3]. De qualquer forma, é uma fonte ainda pouco expressiva no Brasil, considerando que foi responsável por apenas 0,1% da geração de energia elétrica no país em 2007, mas que já obteve um crescimento de 135,8% nessa participação em relação ao ano anterior [2].

Em relação à biomassa, a principal opção é a geração de energia pelas indústrias sucroalcooleiras. As usinas brasileiras são, em sua maioria, auto-suficientes em energia, pois utilizam sistemas de geração internos baseados na

queima do bagaço da cana. Como já citado anteriormente, 16% da energia consumida no país em 2007 foi proveniente da cana-de-açúcar (álcool combustível e queima do bagaço da cana), passando a ser a segunda fonte de energia mais importante na MEB. É de conhecimento geral que há um grande potencial de crescimento para o álcool, tanto no mercado interno quanto no externo. No Brasil, os carros bicompostíveis já representam mais de 70% dos automóveis comercializados, havendo nítida tendência de aumento com a introdução da tecnologia em um número cada vez maior de modelos. Em relação às exportações, há grandes oportunidades em alguns mercados, como o do Japão e o da União Européia, por conta de metas para a redução da emissão de gases poluentes.

Além do álcool, o Brasil apresenta condições favoráveis à ampliação do uso do biodiesel. A partir de 2008, será obrigatória a adição de 2% de biodiesel ao petrodiesel, o que demandará 800 milhões de litros do combustível vegetal. No ano de 2013, esse percentual passará para 5%. Nesse sentido, cabe salientar que há uma grande variedade de oleaginosas para a produção do combustível, como a mamona, o dendê, a canola e a soja. No entanto, um empecilho à produção de biocombustíveis é o balanço energético de cada cultura, representado pelo quociente entre a energia proporcionada pelo combustível e o total de insumos e combustíveis fósseis utilizados na sua produção. Considerando o balanço energético, as únicas culturas que apresentam resultados significativos são as de cana-de-açúcar e dendê. Para as demais lavouras, ainda são necessários grandes avanços da pesquisa agrônômica, na direção do aumento da produtividade e da diminuição da utilização de insumos petroquímicos [3].

2.1.5. Questão Ambiental

Uma consideração muito importante a ser feita quando se trata do setor energético é a questão ambiental, que está intimamente ligada às fontes renováveis de energia, citadas no item anterior, e se faz fundamental nos dias de hoje, em um panorama atual em que se visa um desenvolvimento sustentável. Vamos analisar os impactos ambientais das diversas fontes, como se dão, como podem ser minimizados e os desafios do setor energético a fim de contornar essa questão,

considerando as possíveis substituições e soluções visando suprir as demandas energéticas sem comprometer o meio ambiente e a saúde humana.

- **Petróleo e derivados:** a utilização do petróleo e seus derivados, como a gasolina, na geração de energia e nos transportes está diretamente relacionada à emissão dos chamados “gases do efeito estufa”, e ao aquecimento global que o planeta está sofrendo no decorrer das últimas décadas. A gasolina e o óleo diesel são responsáveis por quase toda a energia consumida no setor de transportes, que contribui com 25% das emissões dos países industrializados.
- **Gás natural:** muito utilizado na geração de energia e também nos transportes, sua queima é mais aceitável, em termos ambientais, que o óleo e o carvão, porém isto não significa que seja uma fonte benigna, pois também contribui substancialmente com a poluição do ar. Como consequência, há previsão de uma pressão política crescente nos dias de hoje para substituir a geração termoelétrica a gás natural por fontes que não emitem CO₂, como a biomassa, a nuclear e a energia eólica.
- **Carvão:** o carvão é responsável por 25% do consumo mundial de energia. Desta parcela, 2/3 são usados para geração de eletricidade, e quase todo o restante para uso industrial (siderurgia e calor). As reservas mundiais de carvão são gigantescas, quase 3,5 vezes em relação ao petróleo e ao gás natural. O carvão é a fonte energética que emite mais gás carbônico por unidade de energia produzida, e um dos grandes responsáveis pelo aquecimento global. Entretanto, tem grande importância para a segurança energética dos Estados Unidos, China e outros países que relutarão em apoiar medidas ambientais que restrinjam seu uso [1].

De um modo geral, é difícil estabelecer em que níveis a emissão de um determinado poluente afeta o meio ambiente em geral e a saúde humana em particular, dado o grande número de fatores que confundem a correta avaliação da extensão dos efeitos. Para o caso do meio ambiente, essas variáveis de confusão incluem o clima, as variedades das espécies encontradas na região, a adaptabilidade dessas espécies a condições de stress, entre outras. Para a saúde humana, tais fatores incluem o gênero, raça, status sócio-econômico, se o indivíduo é fumante, qual o seu estilo de vida e ocupação. Essa avaliação também pode ser prejudicada pela interação entre dois ou mais poluentes, assim como entre os

poluentes e variáveis meteorológicas como temperatura e umidade relativa do ar, e entre poluentes e doenças infecciosas, bem como pelo efeito de sinergia que existe entre alguns desses poluentes. Esses efeitos de interação ajudam a explicar algumas das grandes diferenças observadas em estudos toxicológicos e epidemiológicos [4].

Para minimizar a utilização dos combustíveis fósseis e, conseqüentemente, o impacto ambiental da geração de energia e dos transportes, é importante substituir as fontes tradicionais por fontes alternativas e renováveis, já citadas no item anterior. A hidroeletricidade, a biomassa (com destaque para o etanol e o biodiesel) e a energia eólica, já tratadas anteriormente, são as grandes soluções para a geração de energia e para os transportes, em se tratando da minimização da emissão de gases poluentes na atmosfera. A hidroeletricidade e a energia eólica sequer envolvem a queima de substâncias, portanto não possuem nenhum tipo de emissão de gases. Já a biomassa, em sua queima, possui um balanço neutro em relação aos gases poluentes, mais especificamente o CO₂, não contribuindo, portanto, para o aumento da concentração desse gás na atmosfera. Trataremos os potenciais ambientais de cada uma, analisando as melhores alternativas para cada utilização.

- Etanol: os principais biocombustíveis são o etanol e o biodiesel. O etanol anidro pode ser diretamente adicionado à gasolina em até 20%, sem exigir alterações nos veículos. Além do Brasil, onde a mistura de etanol à gasolina vem sendo feita há mais de vinte anos, outros países, como o Japão, estão analisando este tipo de medida. Por sua vez, o etanol hidratado também pode ser misturado em qualquer proporção com a gasolina em motores *flex fuel*. No Brasil, por exemplo, mais de 75% dos novos carros produzidos já são *flex fuel*. Os maiores produtores de etanol do mundo são o Brasil – que produz o etanol a partir da cana-de-açúcar – e os Estados Unidos, que utilizam o milho. A produção mundial de etanol ainda é relativamente pequena, equivalendo a 5% do consumo de gasolina dos Estados Unidos. Entretanto, ela deve crescer rapidamente. O Brasil, por exemplo, deve aumentar em 50% sua produção de cana-de-açúcar nos próximos cinco anos – de 400 para 600 milhões de toneladas. Os Estados Unidos também estão fazendo investimentos substanciais no aumento de sua produção de etanol. Lembrando que quando se calcula o potencial de substituição da gasolina por um combustível renovável como o etanol, deve-se levar em conta a energia fóssil utilizada na

sua produção. Isso faz com que a cana-de-açúcar é seis vezes mais eficaz do que o milho quando se trata de reduzir o consumo de combustíveis fósseis.

- O biodiesel, por sua vez, complementa ou substitui diretamente o diesel convencional. Ele pode ser produzido utilizando qualquer fonte de gordura ou de óleo vegetal, ou animal. Entre as fontes promissoras, incluem-se a soja, a mamona e o pinhão. O biodiesel pode ser misturado diretamente ao diesel convencional, sem mudança no desempenho dos motores. O Brasil, por exemplo, tem como meta incorporar até 5% de biodiesel ao combustível até 2010. O etanol brasileiro é o único biocombustível competitivo nos dias de hoje. Seu custo de produção equivale a 40 US\$/barril de petróleo. O etanol produzido nos Estados Unidos tem um custo de produção na faixa do preço atual de petróleo (cerca de 70 US\$/barril equivalente). Para a Europa, este custo equivalente seria de 90 US\$/barril. Portanto, a produção de etanol fora do Brasil dependerá de mecanismos de incentivo, tais como compra obrigatória ou subsídios diretos. Além disso, nenhuma produção de biodiesel pode competir com o preço do diesel, sendo necessário subsídio. Esta competitividade deve surgir à medida que a estrutura de produção do biodiesel aumentar. O Brasil está entre os países com o maior potencial de produção de biodiesel competitivo [1].
- Hidroeletricidade: a hidroeletricidade vem sendo usada desde as origens da indústria elétrica – por exemplo, o primeiro grande projeto de geração nos Estados Unidos, na última década do século 19, foi uma usina hidroelétrica na região das cataratas do Niágara. Os países industrializados já desenvolveram a maior parte de seu potencial hidroelétrico, e é pouco provável que o restante seja utilizado; nos países emergentes, por outro lado, ainda há um grande potencial a ser desenvolvido. Apesar da hidroeletricidade ser um recurso renovável, abundante e competitivo para muitos países, entre os quais se destaca o Brasil, ela enfrenta uma forte oposição por parte de grupos internacionais. Isto resultou, por exemplo, na paralisação de financiamentos do Banco Mundial para hidroelétricas por mais de uma década; e na quase impossibilidade de se obter créditos de carbono no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Kioto para projetos hidroelétricos de maior porte [1]. Além disso, as hidrelétricas, vistas por muitos como uma fonte de “energia limpa”, por não envolver emissão de

gases poluentes, do ponto de vista ambiental não podem ser consideradas uma ótima solução ecológica. Elas interferem drasticamente no meio ambiente devido à construção das represas, que provocam inundações em imensas áreas de matas. Também interferem no fluxo de rios, destroem espécies vegetais, prejudicam a fauna, e interferem na ocupação humana. As inundações das florestas fazem com que a vegetação encoberta entre em decomposição, alterando a biodiversidade e provocando a liberação de metano, um dos gases responsáveis pelo efeito estufa e pela rarefação da camada de ozônio [5].

- **Energia eólica:** A energia eólica é atualmente a fonte renovável com maior taxa elevada de crescimento anual. Ela tem como atrativos o potencial abundante e custos de instalação decrescentes ao longo do tempo. Entretanto, ela ainda não é competitiva; os Estados Unidos subsidiam suas eólicas em cerca de 18 US\$/MWh. Outras dificuldades para a maior disseminação desta energia incluem a necessidade de geração complementar (muitas vezes termoelétrica), devido à variabilidade dos ventos, e oposição estética às *wind farms* [1]. Também não podemos esquecer das grandes áreas que esse tipo de energia alternativa e renovável requer para sua instalação, “desapropriando” áreas que poderiam ser utilizadas para outros fins, além de gerar poluição visual.

2.1.6. O Gás Natural

O gás natural (GN) era considerado uma das fontes mais promissoras para o atendimento da demanda energética mundial, com ritmo muito acelerado de crescimento e de consumo. Um de seus principais usos é como fonte de calor industrial, pois as regulamentações ambientais restringem cada vez mais o uso de óleo combustível. A segunda maior utilização do GN é a geração de energia elétrica, que teve um crescimento exponencial depois do desenvolvimento da tecnologia de geração a ciclo combinado (CCGN), na década de 1980. Além de eficiente, a CCGN era competitiva em módulos bem menores que os de outras tecnologias, como o carvão. Esta atenuação da economia de escala no setor de geração contribuiu para a criação dos mercados de energia elétrica, que transformaram profundamente o

setor elétrico mundial. Além das vantagens econômicas, a visão otimista sobre o papel do GN era reforçada pelo montante de reservas mundiais, que hoje se igualam, em termos energéticos, às reservas de petróleo.

Entretanto, a fragilidade de suprimento do GN tornou-se evidente após a suspensão do envio da Rússia para a Ucrânia, no inverno europeu de 2005/2006. Na região do Mercosul, a Argentina vem, desde 2004, interrompendo o suprimento de gás contratado com o Chile, sem perspectivas de melhora nos próximos anos. Também no Brasil, o suprimento de gás proveniente da Bolívia, que chegou a ser brevemente interrompido em 2005 (antes da posse do atual governo), vem, desde então, sendo motivo de atritos. Esta percepção de vulnerabilidade do suprimento a questões geopolíticas é intensificada quando se observa que 58% das reservas mundiais de gás estão concentradas em apenas três países: Rússia, Catar e Irã [1].

A entrada em cena do gás natural liquefeito (GNL) reduziu, por algum tempo, a sensação de insegurança, já que o mesmo transformou o gás natural em *commodity*; e, com isto, passou a ser possível comprar de um grande número de produtores espalhados por todo o mundo e, portanto, diminuir o risco geopolítico. O Chile, recentemente, contratou a construção de um terminal de regaseificação de GNL no país para reduzir a insegurança com relação ao suprimento argentino. Processo semelhante aconteceu no Brasil, que anunciou a construção de terminais no Rio de Janeiro (16 milhões de m³/dia) e no Ceará (4 milhões de m³/dia). Entretanto, a “comoditização” que permite diversificar as fontes de suprimento de GN faz que os preços de petróleo e do gás tendam a se igualar, pois passam a ser produtos (ao menos parcialmente) intercambiáveis. Dado que o petróleo ainda é a fonte economicamente dominante, isto significa que a volatilidade dos preços do petróleo tenderá a “contaminar” os preços do GN [1].

O projeto de colaboração energética entre Brasil e Bolívia existe desde a década de 1930. Ele começou a tornar-se realidade em 1992, quando a Petrobras assumiu a responsabilidade pelo gasoduto entre os dois países. O GasBol (Gasoduto Brasil-Bolívia), iniciado em 1997, tem 3.100 km de extensão total, dos quais 2.600 km estão em território brasileiro. Ele tem dois trechos principais: o Norte, que vai da Bolívia até São Paulo, com cerca de 1.800 km (inaugurado em 1999); e o Sul, que vai daí até Porto Alegre, com 800 km (inaugurado em 2001). O investimento total foi cerca de US\$ 2 bilhões.

A rede de transporte de gás no Brasil ainda é pouco desenvolvida, com aproximadamente 8.500 km de extensão – como referência, a rede de transporte de gás dos Estados Unidos possui cerca de 450 mil km. Duas empresas principais são responsáveis pelo transporte de gás no Brasil: a TBG (transportadora do gasoduto Brasil-Bolívia) e a Transpetro (transportadora de gás da Petrobras, responsável pela malha nacional de transporte de gás excluindo o transporte da TBG). Adicionalmente, a Gasocidente é a empresa que faz a operação do gasoduto lateral da Bolívia (dedicado ao suprimento de Cuiabá) [1].

O gás natural é a fonte de energia que vem apresentando o mais significativo desenvolvimento nos últimos anos. A descoberta de novas reservas nacionais, elevando o seu volume para 588,6 bilhões de m³ em 2006 e a perspectiva de ampliação da importação de gás natural da Bolívia e do Peru permite ampliar ainda mais sua utilização, o que vai representar melhorias em termos de eficiência energética e de qualidade do meio ambiente, uma vez que o gás natural é o mais limpo dos combustíveis fósseis [6].

O setor industrial deverá permanecer como o principal consumidor do gás natural, em processo continuado de substituição do óleo combustível. Na geração de energia elétrica, a demanda de gás, atualmente de 76 milhões de m³/dia, poderá ser acrescida de 35 a 40 milhões de m³/dia em 20 anos, na hipótese de despacho continuado das termelétricas em carga máxima. Poder-se-ia adotar a estratégia de tratar a disponibilidade de GNL como um "pulmão" desse mercado (eventuais excedentes poderiam ser exportados) e, de modo complementar, proceder a uma importação adicional (em relação a 2005) de pelo menos 50 milhões de m³/dia, por gasodutos [7].

2.2. Desenvolvimentos dos Aços API

2.2.1. Aços API 5L (Linepipes)

Existem várias normas que classificam os aços para oleodutos e gasodutos, sendo a mais utilizada a API 5L, que classifica o aço de acordo com o limite de escoamento mínimo especificado para o tubo. Nesse trabalho, utilizaremos como objeto de estudo um aço que atende a Norma API 5L grau X70. A Tabela 1 mostra esta classificação:

Tabela 1 - Classificação dos aços para dutos pela Norma API 5L¹.

Pipe grade	Pipe body of seamless and welded pipes						Weld seam of HFW, SAW and COW pipes
	Yield strength ^a		Tensile strength ^a		Ratio ^{a, b, c}	Elongation ^d	Tensile strength ^d
	$R_{10.5}^b$ MPa (psi)		R_m MPa (psi)		$R_{10.5}/R_m$	A_f %	R_m MPa (psi)
	minimum	maximum	minimum	maximum	maximum	minimum	minimum
L245R or BR L245N or BN L245Q or BQ L245M or BM	245 (35 500)	450 ^e (65 300) ^e	415 (60 200)	760 (110 200)	0,93	f	415 (60 200)
L290R or X42R L290N or X42N L290Q or X42Q L290M or X42M	290 (42 100)	495 (71 800)	415 (60 200)	760 (110 200)	0,93	f	415 (60 200)
L320N or X46N L320Q or X46Q L320M or X46M	320 (46 400)	525 (76 100)	435 (63 100)	760 (110 200)	0,93	f	435 (63 100)
L360N or X52N L360Q or X52Q L360M or X52M	360 (52 200)	530 (76 900)	460 (66 700)	760 (110 200)	0,93	f	460 (66 700)
L390N or X56N L390Q or X56Q L390M or X56M	390 (56 600)	545 (79 000)	490 (71 100)	760 (110 200)	0,93	f	490 (71 100)
L415N or X60N L415Q or X60Q L415M or X60M	415 (60 200)	565 (81 900)	520 (75 400)	760 (110 200)	0,93	f	520 (75 400)
L450Q or X65Q L450M or X65M	450 (65 300)	600 (87 000)	535 (77 600)	760 (110 200)	0,93	f	535 (77 600)
L485Q or X70Q L485M or X70M	485 (70 300)	635 (92 100)	570 (82 700)	760 (110 200)	0,93	f	570 (82 700)
L555Q or X80Q L555M or X80M	555 (80 500)	705 (102 300)	625 (90 600)	825 (119 700)	0,93	f	625 (90 600)
L625M or X90M	625 (90 600)	775 (112 400)	695 (100 800)	915 (132 700)	0,95	f	695 (100 800)
L690M or X100M	690 (100 100)	840 (121 800)	760 (110 200)	990 (143 600)	0,97 ^g	f	760 (110 200)
L830M or X120M	830 (120 400)	1 050 (152 300)	915 (132 700)	1 145 (166 100)	0,99 ^g	f	915 (132 700)

Atualmente existe uma forte tendência para a utilização de aços de alta resistência mecânica na fabricação de tubos API, para transporte de óleo e gás. O emprego desses tubos pode representar uma economia significativa na instalação e operação de oleodutos e gasodutos em longas distâncias [9]. A principal vantagem da utilização de tubos com grau elevado de resistência mecânica é a redução do custo total da obra. Esta redução se baseia na premissa de que, ao aumentar o

¹ Tabela 7 da Norma API 5L/ISO 3183, vigente a partir de 10/2008

limite de escoamento do material, a espessura de parede requerida para resistir às pressões internas ou externas (no caso de águas profundas) é reduzida [10,11]. Assim, tem-se também uma redução no peso e no transporte dos tubos, bem como no volume de solda e na hora/soldador a serem computados. Alguns países da Europa, Japão, Estados Unidos e Canadá produzem, em escala comercial, dutos de elevada resistência mecânica como X80, X100 e até superiores. No Brasil ainda não se fabricam tubos da classe X100 devido às limitações tecnológicas e de equipamento que possibilitem a produção de aços com resfriamento acelerado para a fabricação do aço API X100. No entanto, esta limitação pode ser compensada por uma composição química diferenciada atingindo a resistência mecânica requerida pela norma [10]. A seguir discutiremos as possibilidades tecnológicas e parâmetros importantes de fabricação relacionados com o desenvolvimento desses materiais, no intuito de se obter propriedades mecânicas cada vez melhores.

2.2.2. Processos de Fabricação

Os aços estruturais, e conseqüentemente as propriedades dos tubos, são controlados pela microestrutura, que por sua vez é função da composição química do aço e do processo de fabricação. Para atender a crescente necessidade de aços com mais alta resistência, boa soldabilidade e tenacidade, uma série de metodologias (apresentadas na Figura 2) tem sido desenvolvidas na fabricação das chapas.

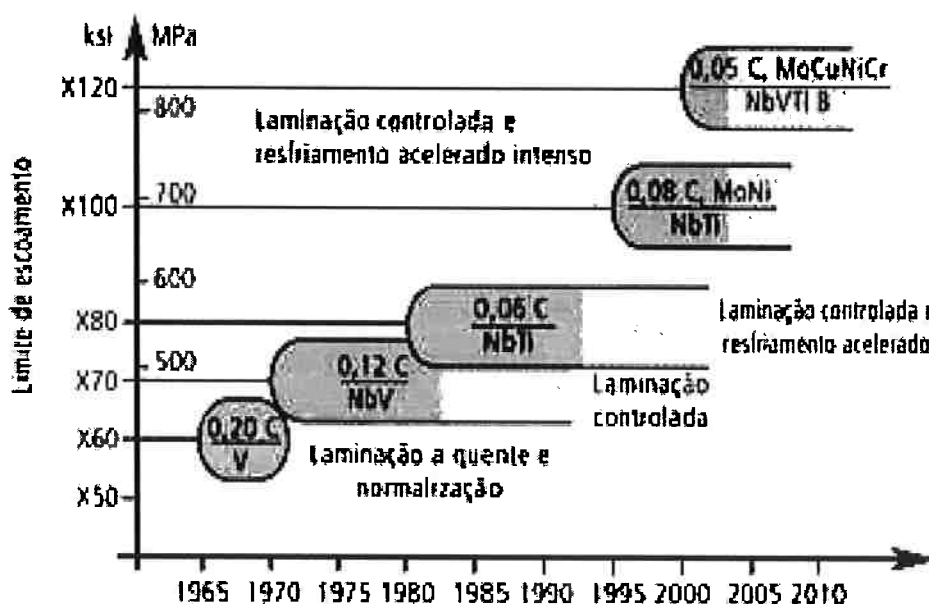


Figura 2 - Desenvolvimento dos aços para tubos API [10].

Um importante avanço no desenvolvimento destes aços ocorreu nos anos 70, com a introdução da laminação controlada (processamento termomecânico) em substituição à laminação convencional com tratamento térmico de normalização. Esta substituição se fez necessária porque, com a microestrutura ferrítica-perlítica obtida através da normalização, não é possível atingir os elevados níveis de resistência exigidos com boa tenacidade e soldabilidade. Adicionalmente foi desenvolvido o processo de laminação controlada com resfriamento acelerado. Este processo gera uma microestrutura final bainítica com granulação ainda mais fina [8]. Na Figura 3 pode-se observar a diferença em tamanho de grão obtido nos diferentes procedimentos:

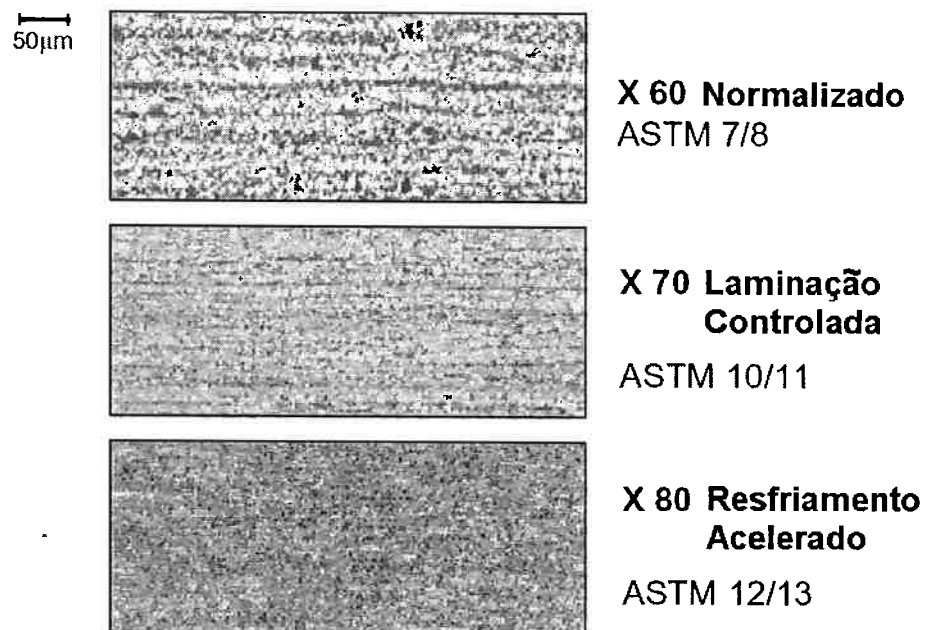


Figura 3 - Tamanho de grão obtido pelos diferentes processos de laminação [8].

Isto ocorre porque a formação de sítios para nucleação nos processos de laminação convencional, laminação controlada e resfriamento acelerado mostrado de forma esquemática na Figura 4, ocorre no contorno de grão, nas bandas de deformação e na matriz a diferentes temperaturas. Também é possível perceber que quanto menor for a temperatura final de laminação (definida como alta a cerca de 950°C e baixa a cerca de 650°C) menor será o tamanho de grão resultante.

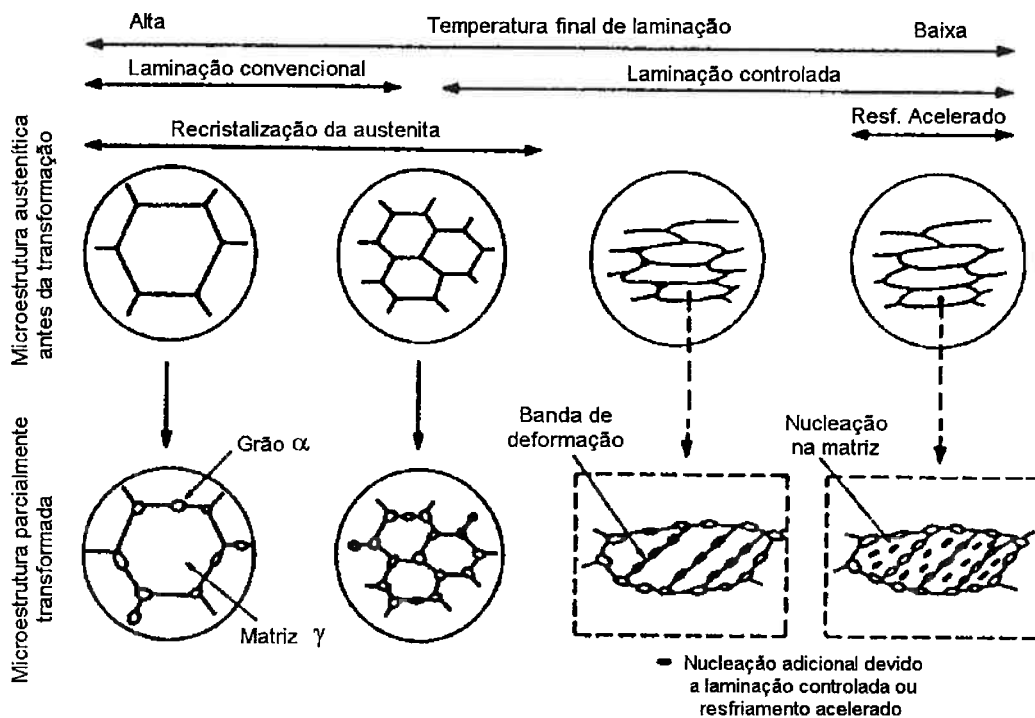


Figura 4 - Diferentes processos de nucleação [8].

O principal objetivo destes processos de laminação é obter uma microestrutura final com o menor tamanho de grão possível, já que este é o único mecanismo capaz de melhorar o limite de escoamento do aço juntamente com a tenacidade sem prejudicar a soldabilidade. Outra maneira de facilitar a formação de texturas aciculares, que possuem melhor tenacidade e resistência que as texturas poligonais, é através da adição de elementos de liga tais como Mn, Cr, Mo ou Ni, que retardam a transformação da austenita, aumentando a temperabilidade e a fração volumétrica de bainita. Os aços com microestrutura bainítica possuem um limite de resistência bem superior aos aços ferríticos e perlíticos para um mesmo teor de carbono (um aço com 30% de fração de bainita pode ter essa propriedade aumentada em mais de 50%). Uma diminuição no teor de carbono é necessária para melhorar a tenacidade e soldabilidade, porém causa uma perda marcante na resistência mecânica para aços ferríticos-perlíticos. Torna-se, portanto, necessário determinar o percentual de carbono ótimo que atendesse aos requisitos desejados de alta tenacidade e alta resistência mecânica [8]. Atualmente, na fabricação de tubos de aço API de graus mais altos (acima de X70) tem-se utilizado teores de C cada vez menores, na faixa de 0,05 a 0,10 % [12].

Laminação Controlada: a laminação controlada confere aos aços microligados propriedades mecânicas superiores em comparação aos aços com mesmo nível de elementos de liga, além de proporcionar boa tenacidade e soldabilidade. O aumento das propriedades mecânicas pode ser obtido através de um conjunto de mecanismos de endurecimento, são eles: refino de grão, precipitação de segunda fase, transformação de fase, formação de textura, solução sólida e encruamento [13]. Um exemplo é a adição de elementos de liga como Nb, V e Ti com o objetivo de evitar o crescimento de grão nas altas temperaturas e retardar a recristalização da austenita nos estágios finais da laminação. Isto possibilita que a transformação austenita→ferrita ocorra a partir de uma austenita severamente encruada. O produto final deste processo é um aço com uma granulação ferrítica fina e, conseqüentemente, elevada resistência mecânica e tenacidade. A granulação ferrítica extremamente fina obtida desta forma pode ser explicada pela acentuada elevação da taxa de nucleação da ferrita em decorrência do grande aumento do número de sítios para nucleação preferencial como os contornos de grão austenítico e as bandas de deformação (Figura 4) [8]. O processo é dividido em 3 etapas, conforme a Figura 5: deformação na região de recristalização da austenita; deformação na região de não-recristalização da austenita e deformação na região bifásica $\alpha+\gamma$.

No reaquecimento da placa (usualmente entre 1100 e 1250°C) ocorre a dissolução do Nb, V e outros, e grãos maiores de austenita são formados. Na região de recristalização é produzida a deformação do grão austenítico pela aplicação de ciclos de deformação-recristalização. Quando a laminação é levada para a região de não-recristalização as áreas dos contornos de grão austenítico aumentam junto com a taxa de nucleação da ferrita nessa área. Além disso, varias bandas de deformação e recozimentos são formados dentro dos grãos austeníticos os quais também atuam como sítios de nucleação da ferrita junto com os contornos de grão. A laminação na região da segunda fase ($\gamma+\alpha$) abaixo da temperatura A_{r3} faz com que os grãos austeníticos não transformados sejam achatados e a deformação da ferrita ocorre para tornar-se subgrão. Esta ferrita possui alta densidade de discordâncias promovendo aumento na resistência e tenacidade, obtendo uma chapa com microestrutura ferrítica-perlítica [13].

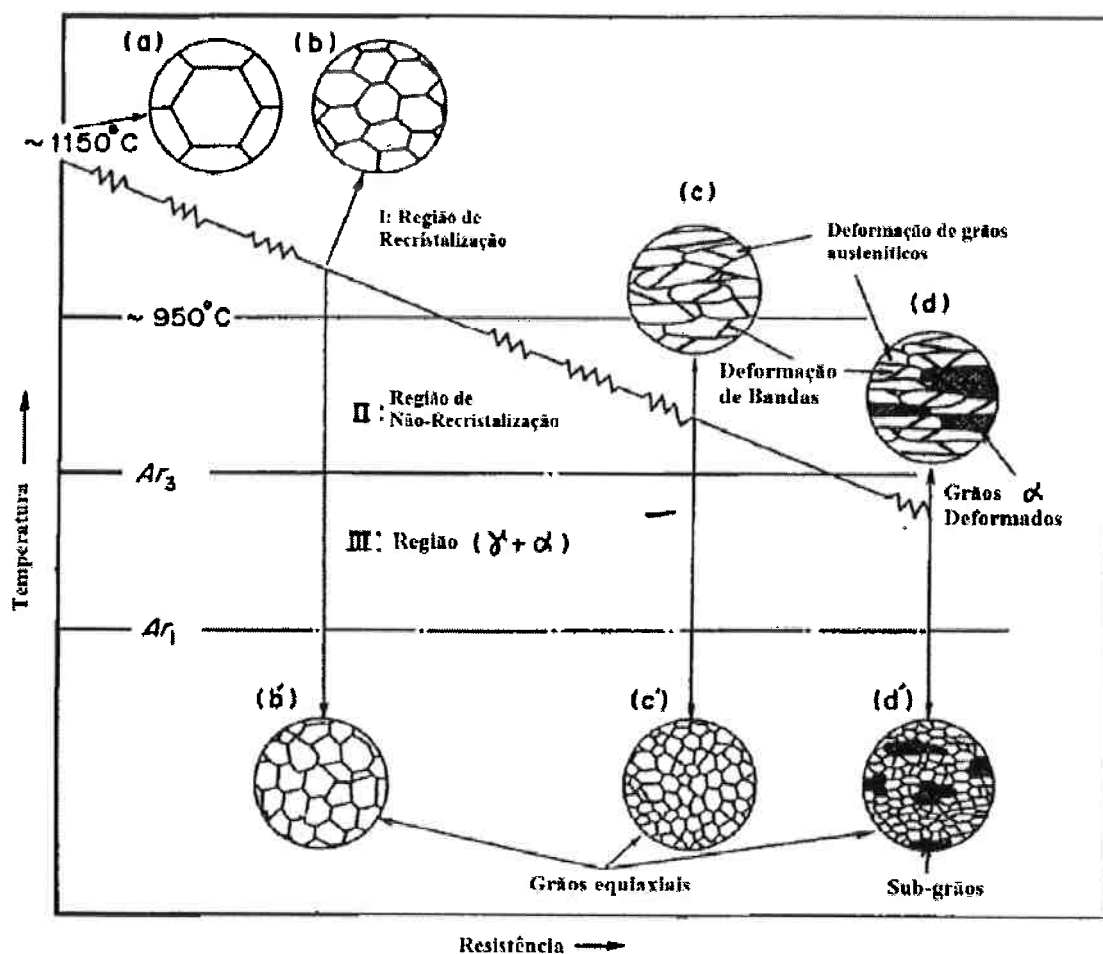


Figura 5 - Ilustração esquemática de mudanças microestruturais na laminação controlada [13].

Resfriamento Acelerado: a técnica do resfriamento acelerado é utilizada quando se necessita atingir limites de escoamento da ordem de 80 ksi ou maiores. Ela ocorre após a laminação controlada, e o resfriamento de se dá 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 [13]. O aumento da resistência mecânica do material permite reduzir a espessura do tubo – por exemplo, ao se passar do aço API X70 para X120, consegue-se uma redução de 39%. Tubos mais leves possuem transporte mais fácil e barato, diminuindo também as dimensões das obras para assentamento dos dutos. A área a ser soldada fica menor, reduzindo os custos desse oneroso processo, os quais já diminuem em função do menor teor de C desse aço. Além disso, o uso do resfriamento acelerado reduz o tempo disponível para a difusão do C durante a transformação da austenita. Isso evita a segregação desse elemento para a parte central da chapa grossa, minimizando a formação de microconstituintes duros que são um ponto fraco para a ocorrência de fragilização por hidrogênio em tubulações que conduzem óleo com alto teor de H₂S [14].

2.2.3. Composição Química

Os elementos de liga desempenham uma importante função na determinação da microestrutura e nas propriedades dos aços em geral. Sua influência é obtida através de seus efeitos em solução sólida e, principalmente, de seus efeitos como precipitados.

- **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, 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 melhores 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) [8].
- **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 [8].
- **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, conseqüentemente, 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, isto é:

$\%Ti = 3,42 \times \%N$ [8,12]. 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 [8].

- Nióbio: o nióbio é o elemento mais eficaz para retardar a recuperação e a recristalização da austenita durante a laminação controlada (Figura 6). 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 for 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. Para condições práticas de laminação a Figura 6 revela que a temperatura de interrupção da recristalização, em um aço contendo 0,10% de Nb em solução, aumentará de aproximadamente 920°C para aproximadamente 1050°C. 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 [8]. Durante o resfriamento acelerado, o Nb contribui para a formação de uma estrutura acicular através do impedimento da formação de ferrita [15].

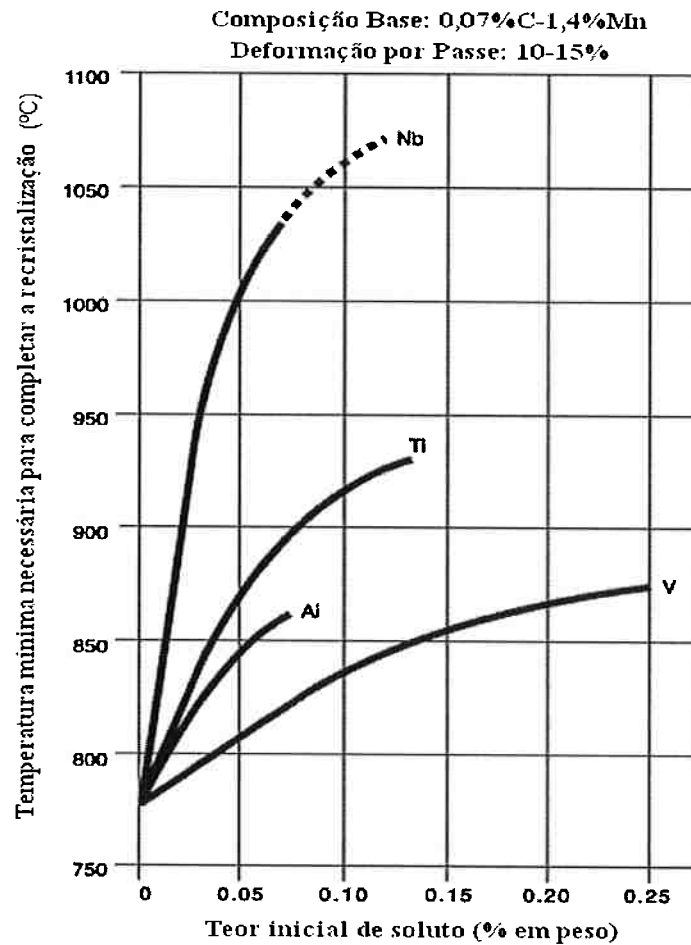


Figura 6 - Influência dos elementos de liga no retardo da recristalização da austenita [8,11].

- **Vanádio:** o típico X70 utilizado em tubos para dutos no início da década de 80 utilizava aproximadamente 0,10%C com adições de V para atingir os níveis requeridos de resistência através de endurecimento por precipitação. Para estes aços, o mecanismo predominante de endurecimento envolve a precipitação de nitreto de vanádio na matriz ferrítica [8]. A precipitação do V na ferrita acicular formada no resfriamento acelerado aumenta a capacidade de encruamento do aço, elevando a resistência mecânica [15].
- **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 [8].

- **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 [8].
- **Boro:** o boro é utilizado para aumentar a temperabilidade do aço. O B 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 B através de adições de Ti que tem maior afinidade pelo N. A adição de B deve ser limitada em torno de 0,002%. Teores acima destes podem levar à precipitação de Fe_2B ou $Fe_{23}(CB)_6$, favorecendo a nucleação da ferrita poligonal. Isto pode ser prevenido através da adição de Ti ou Nb que têm maior afinidade pelo C [8].
- **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 [8].

2.3. O Processo ERW

Os tubos utilizados para o estudo proposto nesse trabalho foram fabricados pelo processo de formação contínua, e soldados pelo processo conhecido como ERW (Electric Resistance Welding), soldagem por resistência elétrica. A grande produtividade (velocidade de até 20 metros por minuto) da linha de fabricação de tubos pelo processo ERW com alta frequência torna estes tubos altamente competitivos para as mais diversas aplicações, na condução de gás, petróleo e água. Vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos ao longo dos tempos, visando garantir um bom processo de fabricação e bom sistema de inspeção, além de desenvolver aços em forma de bobina para serem utilizados nessa linha de fabricação. A seguir o processo será apresentado detalhadamente.

2.3.1. Etapas do Processamento

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. Essa etapa está representada na Figura 7:



Figura 7 – Etapa de desbobinamento [16].

Aplainamento: consiste no aplainamento 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. Essa etapa está representada na Figura 8:



Figura 8 – 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. Essa etapa está representada na Figura 9.



Figura 9 – Etapa de pré-formação dos tubos [16].

Formação de bordas: o formador de bordas é um conjunto de rolos côncavos e convexos que tem por finalidade formar nas bordas da “tira” com 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. A etapa está representada na Figura 10:



Figura 10 – 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 frequência, 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 frequência. 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. A etapa de soldagem dos tubos está representada na Figura 11:



Figura 11 – 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, conseqüentemente, 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. Essa etapa está representada na Figura 12:



Figura 12 – Etapa de identificação dos tramos [16].

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 provocado 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. Essa etapa está representada na Figura 13:



Figura 13 – 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 14. Todo o item 2.3 foi retirado do relatório da Confab Industrial S.A. "Processos Produtivos" [16], de circulação interna da empresa.

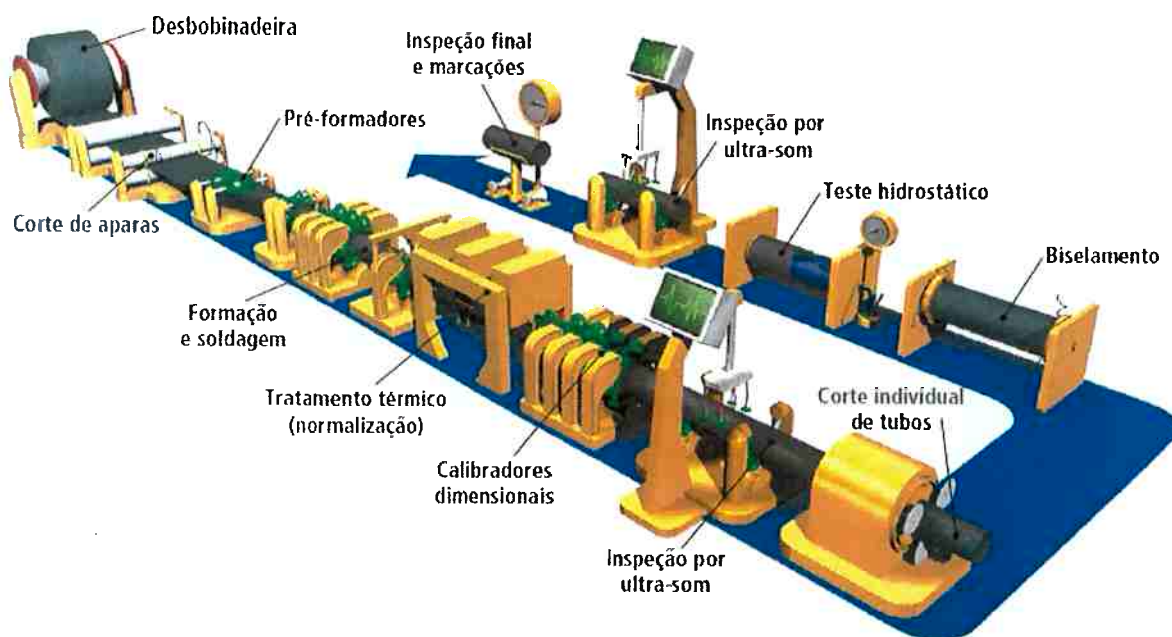


Figura 14 - Fabricação dos tubos por formação contínua e soldagem ERW [16].

2.4. O Efeito Bauschinger

2.4.1. Mecanismos do Efeito Bauschinger

Costuma-se conceituar que, para monocristais, em um determinado plano de escorregamento, geralmente uma tensão mais baixa é requerida para reverter a direção do escorregamento do que em relação a um escorregamento contínuo na direção original.

O mecanismo do efeito Bauschinger ocorre na estrutura do estado deformado a frio. Orowan [18] mostrou que durante a deformação plástica as discordâncias vão se acumulando em barreiras no emaranhado, e eventualmente formam células. Quando a carga é retirada, as linhas das discordâncias não se movem apreciavelmente porque a estrutura está mecanicamente estável. Entretanto, quando a direção do carregamento é invertida, algumas delas podem mover-se por uma distância considerável, sob a ação de tensões cisalhantes baixas, porque as barreiras atrás das discordâncias não são tão fortes e próximas quanto as barreiras imediatamente à sua frente. Isso provoca um nível de tensão mais baixa para o escoamento quando a direção de carregamento é invertida.

Esse fenômeno pode ser verificado em corpos de prova submetidos a ensaios de tração/compressão, exemplificado na Figura 15. Nota-se que a tensão inicial de escoamento do material em tração é dada pelo ponto A. Se o mesmo material dúctil fosse testado em compressão, a tensão de escoamento seria aproximadamente a mesma, indicada pelo ponto B da curva pontilhada. Agora, consideremos que um novo corpo de prova é carregado em tração, passando a tensão de escoamento até C ao longo do caminho O-A-C. Se o mesmo for então descarregado, ele seguirá o caminho C-D, desprezando um pequeno efeito de histerese elástica. Se agora uma tensão compressiva for aplicada, o escoamento plástico se iniciará numa tensão correspondente ao ponto E, apreciavelmente mais baixa que a tensão compressiva de escoamento do material. Enquanto a tensão de escoamento em tração foi aumentada pelo encruamento de A até C, em compressão a mesma foi diminuída. Isso ocorre devido ao efeito Bauschinger, que pode ser medido pela deformação de Bauschinger, β , que é a diferença na deformação entre as curvas de tração e compressão numa dada tensão.

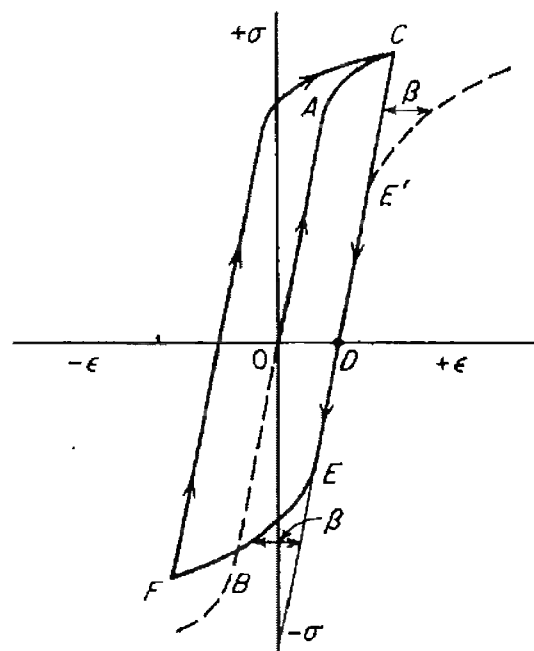


Figura 15 - Curva Tensão-Deformação considerando o Efeito Bauschinger [17].

Simplificando, se o corpo de prova é deformado plasticamente em tração, além do limite de escoamento, e depois descarregado até a tensão zero, e então carregado na direção oposta (em compressão), o limite de escoamento em compressão será inferior ao de tração. Na Figura 16, percebe-se que $\sigma_b < \sigma_a$.

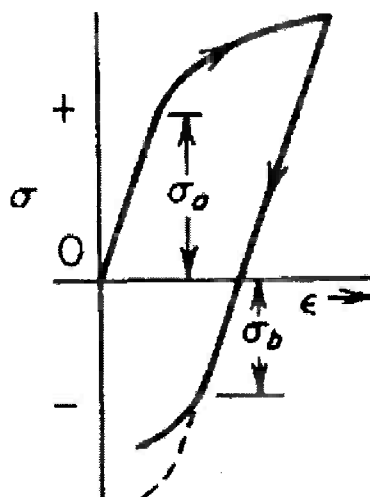


Figura 16 - Curva Tensão-Deformação de um corpo de prova submetido a tração seguida de compressão. σ_b é menor que σ_a devido ao Efeito Bauschinger [17].

2.4.2 Importância do Efeito Bauschinger para a Fabricação de Tubos

Historicamente, a perda de resistência mecânica se tornou um problema em tubos para oleodutos e gasodutos fabricados por laminação controlada, onde cerca de metade do aumento de limite de escoamento, proveniente do refino de grão, formação de subestruturas e precipitados, era perdido durante a conformação dos tubos. Hoje se sabe que a relação espessura/diâmetro (t/D) da chapa/bobina e a taxa de encruamento do processo de fabricação influenciam na variação das propriedades mecânicas. A tendência geral é que o material se torne menos resistente mecanicamente nos novos aços ARBL, devido às altas tensões residuais, porém controlando o processo de fabricação do aço, sua composição química, e, conseqüentemente, sua microestrutura, pode-se inclusive obter-se um aumento dessa resistência dos tubos em relação às chapas/bobinas [19].

Em aços com microestrutura ferrítica-perlítica, os efeitos provocados pela conformação do tubo causam geralmente um escoamento descontínuo, e por essa razão o material é susceptível a perda de resistência durante a fabricação do tubo devido ao efeito Bauschinger. Para fins práticos, a diferença na resistência ao escoamento entre a chapa/bobina e o tubo acabado é igual ao aumento de resistência devido ao encruamento menos o efeito Bauschinger, porém uma vez que a quantidade de encruamento é muito pequeno nos aços ferríticos-perlíticos, o efeito

da conversão chapa – tubo é uma redução na resistência do tubo. No entanto, nos aços de microestrutura de ferrita acicular, as áreas duras de segunda fase introduzem uma alta densidade de discordâncias na ferrita circunvizinha, por isso o coeficiente de encruamento é alto e a deformação ocorre acima da resistência ao escoamento da chapa, resultando uma curva contínua tensão – deformação. Assim, os processos de fabricação atuam nas propriedades do tubo, em alguns aços abaixa a resistência do tubo comparado com a da chapa e em outros aumenta, mas em quase todos os aços a tenacidade é reduzida pelo encruamento que estes materiais sofrem [10].

Alguns autores constataram que frações relativamente altas de constituinte AM (austenita-martensita) na microestrutura reduziram a razão elástica e o efeito Bauschinger, fato que, a princípio, facilitaria seu processamento industrial. É provável que esse fenômeno decorra da plasticidade induzida pela transformação da austenita residual em martensita. Contudo, esse efeito não foi confirmado na prática, em função das baixas frações de AM típicas dos aços API comerciais [20].

2.5. Objetivos do Trabalho

Esse trabalho tem por objetivo principal estudar a variação das principais propriedades mecânicas ocorrida na fabricação de tubos de aço API pelo processo de formação contínua e soldagem por resistência elétrica (ERW), relacionando-a com as principais variáveis que as afetam. Averiguar-se-á a influência da dureza, da composição química, das propriedades mecânicas das bobinas, e da microestrutura final na variação de propriedades de bobinas para tubos. Também serão tratadas a relação do efeito Bauschinger e do encruamento do material com essas variáveis, e, conseqüentemente, com a variação que se deseja investigar, e a importância desses efeitos na fabricação dos tubos. Serão apresentados os materiais em estudo e os métodos utilizados para a caracterização química, mecânica e metalográfica desses materiais. A seguir, serão apresentados os resultados obtidos nos diversos ensaios, as discussões acerca desses resultados, e as conclusões e sugestões para a melhoria desse trabalho e para o desenvolvimento de trabalhos posteriores visando um aprofundamento desse estudo, com o intuito de entender ainda mais os fenômenos ocorridos nos processos de fabricação desses materiais.

3. Materiais e Métodos

3.1. Materiais

Nesse trabalho, foram utilizadas 12 amostras retiradas de tubos do início de 12 bobinas de aço, vindas da usina. O material utilizado atende a norma API 5L PSL2 Ed. 2004, e é um aço de grau X70 (limite de escoamento mínimo de 70 ksi, ou 482 MPa). Essas 12 bobinas são provenientes de 6 corridas da usina fornecedora do aço². As bobinas foram fabricadas pelo processo termomecânico de laminação controlada (TMCP – Thermo Mechanical Control Process), também conhecido como Bobina a Quente, ou Laminação de Tiras a Quente, já tratado no item 2.2. A composição química de produto das 12 bobinas utilizadas no estudo (numeradas conforme a seqüência das amostras do trabalho) é mostrada abaixo na Tabela 2, constando dos principais elementos químicos para esse tipo de aplicação, e também dos valores de carbono equivalente (CE), que, como já citado anteriormente, é um conceito de suma importância para materiais para essa aplicação, pois está diretamente relacionado com a soldabilidade dos mesmos.

Tabela 2 – Composição Química de produto das 12 bobinas utilizadas no trabalho (conforme Certificado da usina).

Am.	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Mo	V	Nb	N	Ti	CE
1	0,07	0,21	1,61	0,016	0,005	0,037	0,181	0,002	0,032	0,056	0,005	0,024	0,382
2	0,06	0,21	1,62	0,018	0,005	0,040	0,173	0,002	0,032	0,054	0,006	0,023	0,372
3	0,07	0,21	1,57	0,013	0,005	0,033	0,169	0,002	0,031	0,054	0,005	0,022	0,373
4	0,06	0,21	1,62	0,018	0,005	0,040	0,173	0,002	0,032	0,054	0,006	0,023	0,372
5	0,06	0,18	1,63	0,018	0,003	0,028	0,197	0,002	0,031	0,052	0,003	0,025	0,379
6	0,06	0,18	1,63	0,018	0,003	0,028	0,197	0,002	0,031	0,052	0,003	0,025	0,379
7	0,06	0,21	1,62	0,018	0,005	0,040	0,173	0,002	0,032	0,054	0,006	0,023	0,372
8	0,07	0,21	1,57	0,013	0,005	0,033	0,169	0,002	0,031	0,054	0,005	0,022	0,373
9	0,06	0,20	1,64	0,017	0,005	0,032	0,180	0,002	0,036	0,058	0,004	0,024	0,377
10	0,07	0,21	1,61	0,016	0,005	0,037	0,181	0,002	0,032	0,056	0,005	0,024	0,382
11	0,07	0,21	1,57	0,013	0,005	0,033	0,169	0,002	0,031	0,054	0,005	0,022	0,373
12	0,06	0,22	1,61	0,014	0,005	0,034	0,193	0,002	0,031	0,058	0,003	0,024	0,375

² Por razões de sigilo, referer-se-á à fabricante das bobinas de aço como usina.

As medidas de dureza Vickers (HV10) realizadas no laboratório da usina estão representadas na Tabela 3. As duas tabelas foram construídas a partir dos dados encontrados no Certificado de Qualidade (CQ) da usina. Vale sempre lembrar que todos os valores obtidos nos ensaios de dureza, análise química e mecânicos, tanto para bobinas na usina, quanto para tubos estão dentro das especificações da norma API 5L-PSL2, Ed. 2004, para grau X70.

Tabela 3 – Medidas de dureza Vickers (HV10) das bobinas (conforme Certificado da usina).

AMOSTRA	BOBINA	CORRIDA	DUREZA HV10
1	7809040	2557656	195
2	7808569	3012268	211
3	7807860	2557672	219
4	7809037	3012268	211
5	7808564	2557731	220
6	7809380	2557731	220
7	7808573	3012268	211
8	7807862	2557672	224
9	7806865	3012330	208
10	7808857	2557656	220
11	7806858	2557672	203
12	7809025	2557698	208

3.2. Métodos

As amostras utilizadas nesse trabalho foram retiradas de anéis cortados de tubos do início das respectivas bobinas, após as mesmas terem sido conformadas e soldadas, como já citado no item 2.3.1. Esses anéis vão para a usinagem, são cortados e desempenados (planificados), e são retirados os corpos de prova (CP) para a realização de ensaios mecânicos, químicos e análise metalográfica. As 12 amostras utilizadas no trabalho, destinadas às análises química e metalográfica, podem ser vistas a seguir, na Figura 17, com os respectivos números de CP de tubos, que identificam os tubos de origem dos CP's. Todos os ensaios realizados na empresa fabricante dos tubos seguem a norma API 5L PSL2, Ed. 2004, que rege a fabricação de tubos destinados à condução de gás e petróleo. Todos os valores obtidos para os ensaios mecânicos e de dureza, e para a análise química devem estar dentro dos limites estabelecidos pela norma.



Figura 17 – Amostras utilizadas no trabalho para as análises química e metalográfica.

3.2.1. Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados na própria empresa fabricante dos tubos, no setor de Laboratório Mecânico, Químico, Metalográfico e de Revestimentos do Departamento da Qualidade, e são descritos abaixo:

- Ensaio de tração: utiliza CP's transversais aos tubos, a 180° do cordão de solda, com dimensões de 57,2 mm de comprimento da área reduzida (50, 8 mm de comprimento nominal para medida de alongamento) e 38,1 mm de largura, conforme a norma API 5L PSL2, Ed. 2004. Esse ensaio mecânico consiste em submeter o corpo de prova (CP) a uma tensão crescente, gerando a curva Tensão x Deformação do material, e fornece os dados de

limite de escoamento (LE, em MPa), limite de resistência (LR, em MPa), razão elástica (LE/LR, em %) e alongamento (AL, em %). Essas grandezas são propriedades mecânicas muito importantes para materiais com aplicações estruturais, como os aços API para a fabricação de tubos, já que os mesmos são submetidos constantemente a grandes esforços mecânicos durante sua utilização. Essas propriedades são importantes parâmetros para o desenvolvimento desse estudo, sendo que os valores de algumas delas para bobinas e tubos serão comparados para o estudo da variação das propriedades proposto pelo trabalho. O ensaio foi realizado na máquina de tração MFL Systeme, de fabricação alemã, que pode ser vista na Figura 18 abaixo:



Figura 18 – Máquina de tração utilizada no ensaio de tração.

- **Ensaio de resistência ao impacto Charpy:** esse ensaio mede a tenacidade, ou resistência ao impacto, do material, e consiste em um pêndulo, que é liberado de uma altura pré-definida, e causa a ruptura do corpo de prova (fixado num suporte na base da máquina de ensaio) pelo efeito da carga instantânea. A altura de elevação do martelo após o impacto dá a medida da energia absorvida pelo corpo de prova, em Joules (J). O teste foi conduzido na

temperatura de -20°C , para avaliar o comportamento do material em baixas temperaturas, em que o mesmo sofre fragilização. O corpo de prova para esse ensaio também é transversal ao tubo, e tem as seguintes medidas: $10 \times 10 \times 55$ mm, com entalhe em "V" de 2 cm, e 45° de abertura, conforme a norma API. O ensaio foi realizado na máquina Wolpert D-6700, mostrada abaixo na Figura 19:



Figura 19 – Máquina de ensaio Charpy.

A retirada dos CP's dos ensaios mecânicos de tração e ensaio Charpy está representada na Figura 20 abaixo:

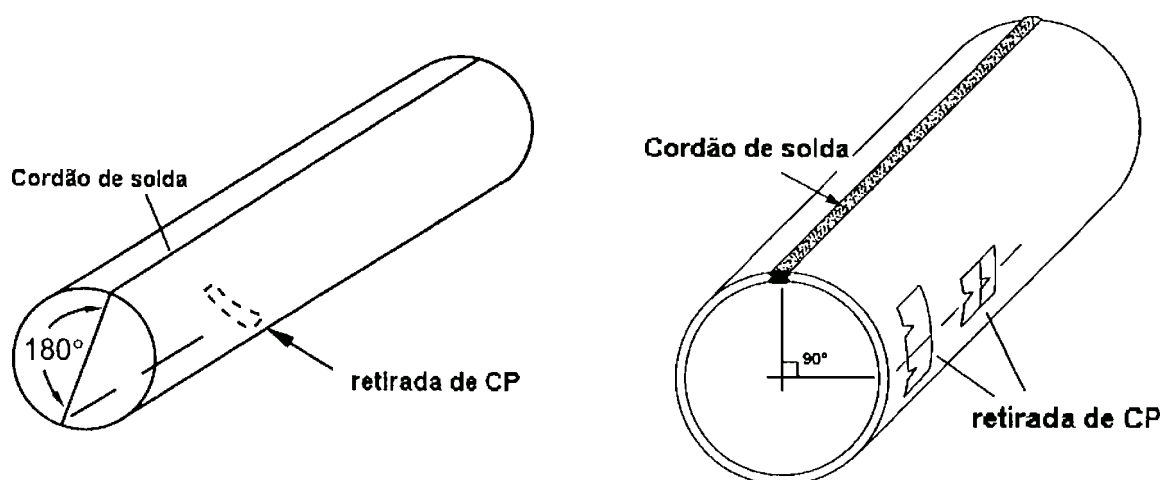


Figura 20 – Esquema da retirada de amostras dos ensaios mecânicos – tração (esquerda) e ensaio Charpy (direita).

3.2.2. Análise Metalográfica

A metalografia é uma etapa importante para a caracterização do material, pois nos revela a microestrutura do mesmo, que, como já tratado no item 2.2.2, é um dos parâmetros mais importantes para o desenvolvimento dos materiais metálicos, e, em especial, dos aços para a fabricação de tubos para oleodutos e gasodutos. A preparação das amostras para a realização da micrografia e ensaio de dureza consiste em algumas etapas, detalhadas adiante. A retirada das amostras para o ensaio de dureza e para a realização da microscopia das amostras está representada na Figura 21 abaixo, mostrando que a observação das microestruturas se dá na espessura dos tubos:

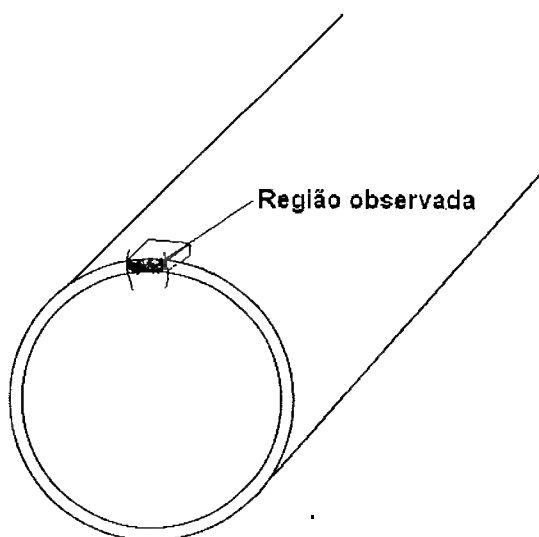


Figura 21 – Esquema da retirada das amostras e da região observada na análise metalográfica (ensaio de dureza Vickers e microscopia).

- **Corte das amostras:** a partir das 12 amostras recebidas da empresa fabricante dos tubos, utilizou-se um equipamento denominado "Cut-Off" para realizar um corte preciso das mesmas, através de um fino disco abrasivo e farta refrigeração, a fim de não provocar alterações por calor na amostra.
- **Lixamento:** depois de cortadas, as amostras foram lixadas, com lixas do tipo "Lixa d'água", fixadas em discos rotativos. Iniciou-se o lixamento com a lixa de granulometria 100, seguida pelas lixas 220, 320, 400, 600 e 1200. Todo o processo de lixamento foi feito sob refrigeração com água.

- Polimento: a etapa do polimento foi executada com panos especiais, colados a pratos giratórios, com pasta de diamante de 6, 3 e 1 microns. Durante o polimento as amostras foram refrigeradas com a utilização de álcool. As amostras ainda foram polidas em um outro pano especial, com a utilização de abrasivo (alumina) de granulometria de 0,3 micron, e refrigeradas com água.
- Ataque Químico: o ataque foi feito por imersão da amostra, durante um período de aproximadamente 10 segundos, para que assim a microestrutura seja revelada. O reagente utilizado foi o NITAL (solução de ácido nítrico em álcool etílico), com 3% de HNO_3 , que funciona para a grande maioria dos metais ferrosos.

Microscopia: todas as amostras foram observadas na seção transversal ao tubo, ou seja, na própria espessura dos tubos. Inicialmente, as amostras foram levadas ao microscópio óptico (MO), da marca Olympus, modelo BX60M, onde foram observadas como polidas para a identificação de inclusões (a título exploratório, já que as seções observadas para essa classificação deveriam ser longitudinais ao tubo), com aumento de 100x, segundo a classificação feita pela Jernkontoret – Associação dos Siderurgistas Suecos, de Estocolmo. Essa classificação divide as inclusões em 4 classes: A (tipo sulfureto), B (tipo alumina), C (tipo silicato) e D (tipo óxido, globular). Cada uma das classes se subdivide em 5 grupos numerados de 1 a 5, segundo a quantidade de inclusões que ocorrem por unidade de superfície. O n° 1 designa uma quantidade pequena de inclusões e o n° 5 uma quantidade elevada, de acordo com aspectos micrográficos representados por desenhos, com ampliação de 100x, e que servem para comparação [21].

Logo após, foram atacadas, para realizar-se a análise dos constituintes microestruturais presentes, em diversos aumentos (50X, 100X, 200X, 500X e 1000X), no MO. Foram geradas diversas fotomicrografias, que serão apresentadas mais adiante. Toda a preparação das amostras para a microscopia e a própria análise ao MO se deram no Laboratório de Caracterização Microestrutural “Hubertus Colpaert”, no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PMT-EPUSP). As amostras também foram observadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), da marca JEOL, modelo JSM-6360, na empresa fabricante dos tubos, onde foram analisadas com aumentos de 500x a 3000x. Também foram geradas imagens da microestrutura do

material, que serão apresentadas no item 4. Resultados. Os microscópios utilizados na análise metalográfica do material são apresentados abaixo, na Figura 22:

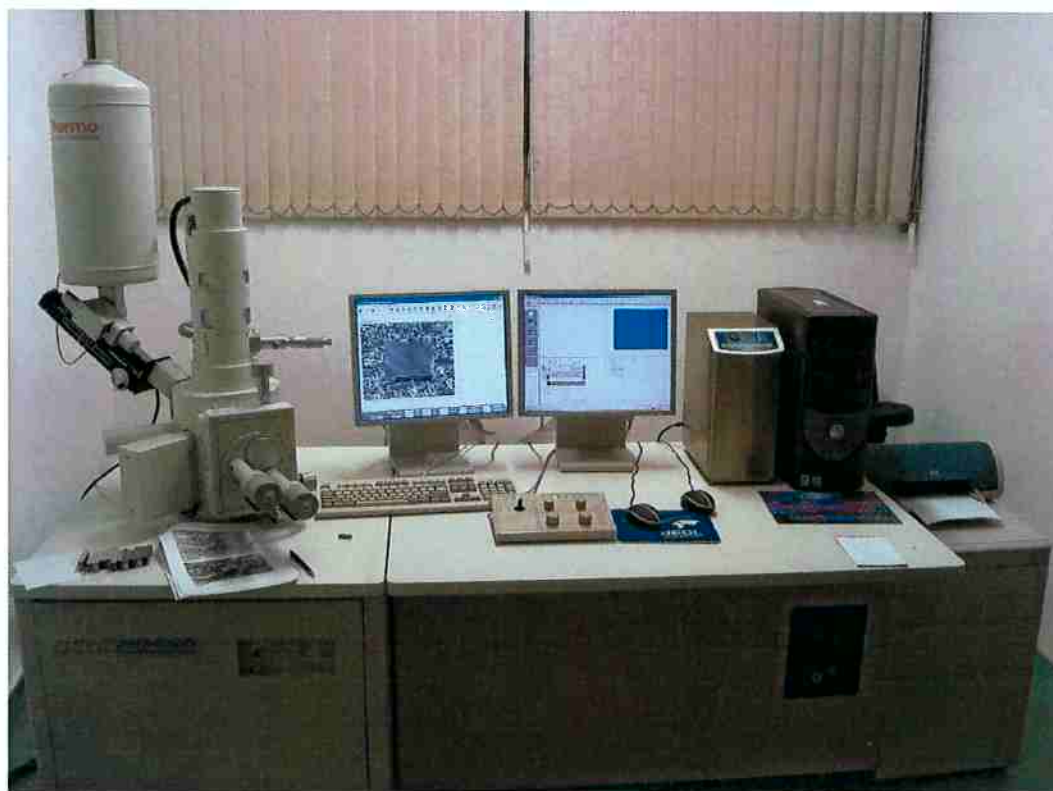
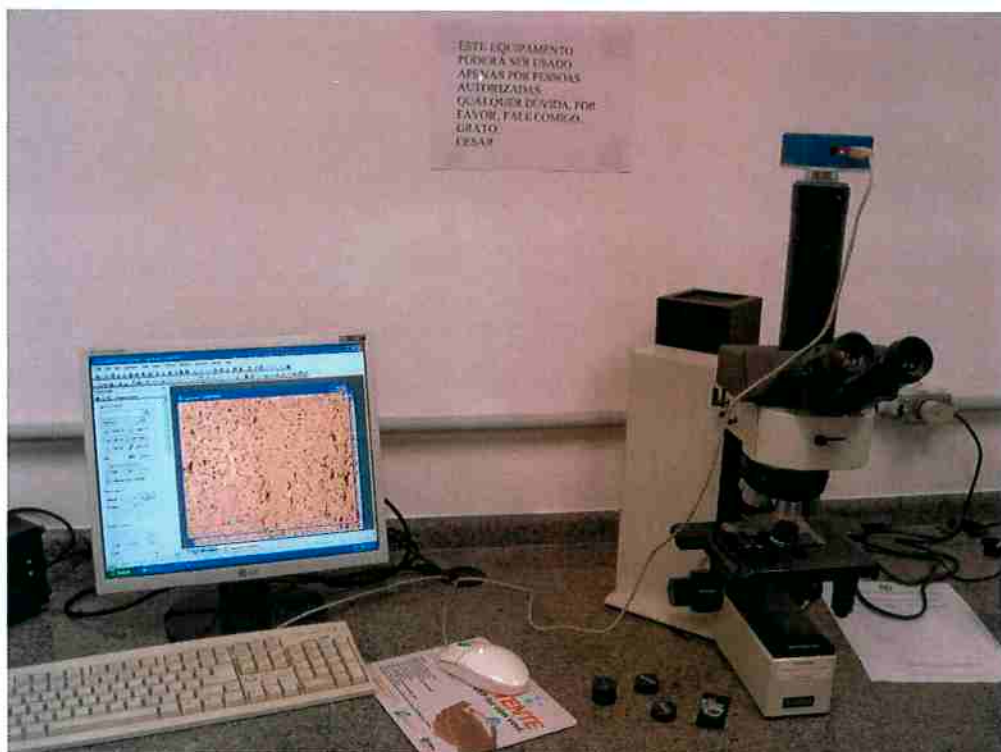


Figura 22 – Microscópio Óptico (acima) e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) (abaixo).

Ensaio de dureza: as amostras também foram submetidas ao ensaio de dureza Vickers, que se baseia na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136° , sob uma determinada carga. O durômetro utilizado foi o Wilson Wolpert Universal Testor 390, mostrado na Figura 23. Foram realizadas 6 medidas para cada amostra, utilizando-se então a média como referência. Os pontos de impressão utilizados estão representados na Figura 24, sendo os superiores identificados como A, e os inferiores como B.



Figura 23 – Durômetro Vickers.

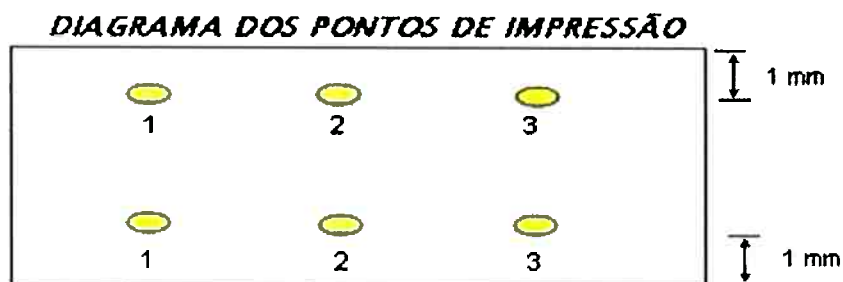


Figura 24 – Disposição dos pontos de impressão no ensaio de dureza Vickers.

3.2.3. Análise Química

As 12 amostras tiveram uma das superfícies fresadas para a realização da análise química. Essa análise foi feita utilizando um espectrômetro de emissão óptica, da marca ARL 3460 Metals Analyzer (Figura 25), e, assim como os ensaios mecânicos e de dureza, foi realizada no setor de Laboratório da empresa fabricante dos tubos. Esta técnica engloba uma série de métodos que se baseiam na emissão de radiação característica de elementos químicos em contato com fontes térmicas ou elétricas. Estas fontes excitam os átomos a níveis maiores de energia que a energia do Estado Fundamental. Quando retornam do estado excitado ao estado fundamental, emitem uma radiação característica de comprimento de onda específica para cada elemento.



Figura 25 – Espectrômetro de emissão óptica para análise química.

4. Resultados

4.1. Análise Química

A Tabela 4 abaixo apresenta os valores dos teores dos principais elementos químicos das 12 amostras utilizadas como objeto de estudo desse trabalho. Como já explicado, essas amostras foram retiradas dos tubos de início de 12 bobinas vindas da usina, e que foram utilizadas como base para a comparação de propriedades mecânicas entre bobinas e tubos, na fabricação de tubos por formação contínua e soldagem ERW. Como esse estudo não visa comparar as análises químicas de bobinas e tubos, já que a variação entre elas é muito pequena, além de não representar um parâmetro tão importante quanto a variação das propriedades mecânicas, esse item só visa a apresentação dos dados obtidos no ensaio das amostras dos tubos. De qualquer forma, observou-se que as amostras dos tubos apresentaram maiores teores de carbono e menores teores de manganês, em relação aos dados obtidos nos ensaios realizados na usina, utilizando amostras de produto das bobinas. Os valores obtidos na análise química das amostras dos tubos estão dentro das especificações da norma API X70. A seqüência apresentada na tabela segue a numeração das 12 amostras utilizadas no trabalho.

Tabela 4 – Análise Química das amostras de tubos.

Am.	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Mo	V	Nb	N	Ti	CE
1	0,08	0,19	1,59	0,018	0,003	0,032	0,185	0,003	0,032	0,054	0,004	0,022	0,389
2	0,07	0,19	1,59	0,021	0,003	0,033	0,176	0,003	0,031	0,051	0,006	0,020	0,378
3	0,08	0,19	1,55	0,018	0,002	0,027	0,178	0,003	0,031	0,054	0,005	0,019	0,379
4	0,07	0,19	1,58	0,021	0,003	0,034	0,175	0,003	0,031	0,051	0,006	0,020	0,377
5	0,08	0,18	1,62	0,021	0,003	0,024	0,198	0,003	0,031	0,051	0,004	0,023	0,395
6	0,08	0,17	1,62	0,021	0,003	0,023	0,201	0,003	0,030	0,049	0,004	0,023	0,395
7	0,07	0,19	1,57	0,021	0,003	0,035	0,176	0,003	0,031	0,050	0,006	0,020	0,377
8	0,08	0,19	1,55	0,015	0,002	0,027	0,170	0,003	0,031	0,051	0,005	0,019	0,379
9	0,07	0,19	1,60	0,020	0,002	0,026	0,182	0,003	0,036	0,055	0,004	0,021	0,385
10	0,08	0,19	1,59	0,019	0,002	0,031	0,183	0,003	0,033	0,053	0,005	0,022	0,394
11	0,08	0,19	1,53	0,015	0,002	0,028	0,172	0,003	0,031	0,050	0,005	0,019	0,379
12	0,07	0,20	1,58	0,017	0,003	0,029	0,197	0,003	0,030	0,054	0,004	0,022	0,379

4.2. Ensaio Mecânicos

Os resultados dos ensaios mecânicos (ensaio de tração e resistência ao impacto Charpy) obtidos no setor de Laboratório da empresa fabricante dos tubos foram comparados com os dados obtidos pela usina fornecedora das bobinas. Os resultados dos ensaios de tração realizados estão representados na Tabela 5. A tabela consta dos números das amostras e dos respectivos CP's. A variação dessas propriedades, que é o grande foco desse trabalho, para cada uma das 12 bobinas utilizadas no estudo, pode ser vista na Tabela 6. Nessa tabela, estão inclusos também os números das corridas e das bobinas, que originaram as amostras e os respectivos CP's utilizados nesse trabalho.

Tabela 5 – Dados obtidos no ensaio de tração para tubos e bobinas.

AMOSTRA	CP	Tubos				Bobinas			
		LE (MPa)	LR (MPa)	LE/LR	AL (%)	LE (MPa)	LR (MPa)	LE/LR	AL (%)
1	2539	573	703	0,81	33,9	532	619	0,86	36,0
2	2633	540	677	0,8	37,2	568	665	0,85	33,0
3	2618	546	689	0,79	35,6	562	658	0,85	32,0
4	2671	552	666	0,83	33,3	568	665	0,85	33,0
5	2563	559	700	0,8	32,3	583	688	0,85	31,0
6	2549	586	715	0,82	31,7	583	688	0,85	31,0
7	2543	538	684	0,79	37,2	568	665	0,85	33,0
8	2542	561	675	0,83	31,3	571	680	0,84	33,0
9	2529	561	707	0,79	31,3	553	647	0,85	33,0
10	2570	552	697	0,79	33,9	605	706	0,86	30,0
11	2528	577	709	0,81	28,9	576	686	0,84	31,0
12	2617	567	689	0,82	33,5	540	647	0,83	36,0

Tabela 6 – Variação de bobina para tubo das propriedades obtidas no ensaio de tração.

CORRIDA	BOBINA	AMOSTRA	CP	VARIÇÃO BOBINA-TUBO			
				LE (MPa)	LR (MPa)	LE/LR	AL (%)
2557656	7809040	1	2539	41	84	-0,05	-2,1
3012268	7808569	2	2633	-28	12	-0,05	4,2
2557672	7807860	3	2618	-16	31	-0,06	3,6
3012268	7809037	4	2671	-16	1	-0,02	0,3
2557731	7808564	5	2563	-24	12	-0,05	1,3
2557731	7809380	6	2549	3	27	-0,03	0,7
3012268	7808573	7	2543	-30	19	-0,06	4,2
2557672	7807862	8	2542	-10	-5	-0,01	-1,7
3012330	7806865	9	2529	8	60	-0,06	-1,7
2557656	7808857	10	2570	-53	-9	-0,07	3,9
2557672	7806858	11	2528	1	23	-0,03	-2,1
2557698	7809025	12	2617	27	42	-0,01	-2,5
			MÉDIA	-13	21	-0,05	0,5

Com os dados fornecidos por essas tabelas, foram construídos gráficos relacionando as propriedades de bobinas e tubos obtidas no ensaio de tração. Os Gráficos 1 e 2 mostram a variação ocorrida no limite de escoamento e no limite de resistência de bobinas para tubos, respectivamente. Percebe-se que mais da metade das amostras (7 de 12) apresentaram queda para o limite de escoamento, com grandes variações (desde um aumento de 41 MPa até uma queda de 53 MPa). As amostras de bobinas apresentaram para essa propriedade média de 568 ± 20 MPa, enquanto as amostras de tubos tiveram média de 560 ± 15 MPa. Para o limite de resistência, apenas 2 das 12 amostras apresentaram pequena queda, enquanto a grande maioria delas teve essa propriedade aumentada, chegando a variações de 84 MPa de bobina para tubo. As amostras de bobinas tiveram média de 665 ± 24 MPa, e as amostras de tubos apresentaram média de 693 ± 15 MPa.

Os Gráficos 3 e 4 também comparam essas duas propriedades, porém no eixo das ordenadas estão representados os valores de cada propriedade para os tubos, e já no eixo das abscissas os valores de bobinas. Os pontos acima da relação linear $y=x$ representam corpos de prova de tubos que obtiveram um valor da propriedade acima do valor obtido pela respectiva bobina, no ensaio realizado na usina. Os gráficos são apresentados abaixo:

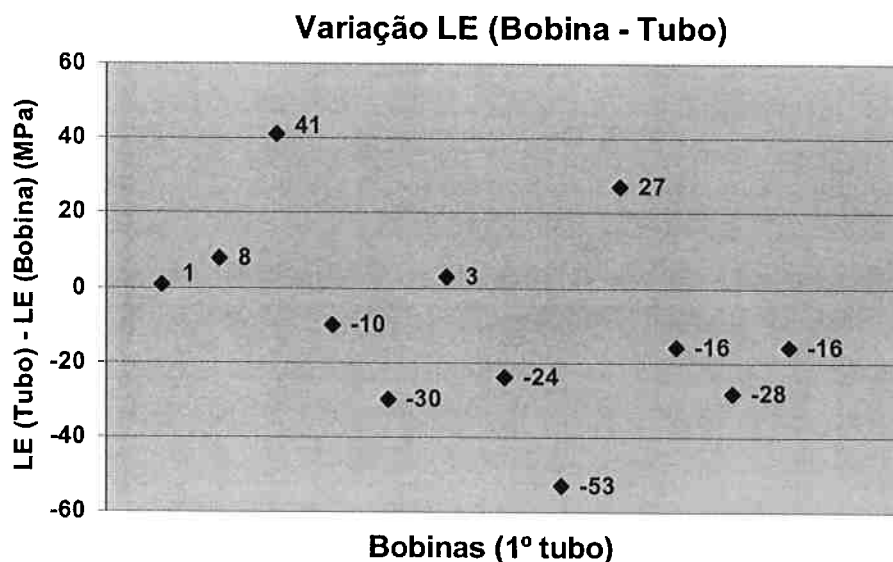


Gráfico 1 – Variação do LE de bobinas para tubos para as 12 bobinas do estudo.

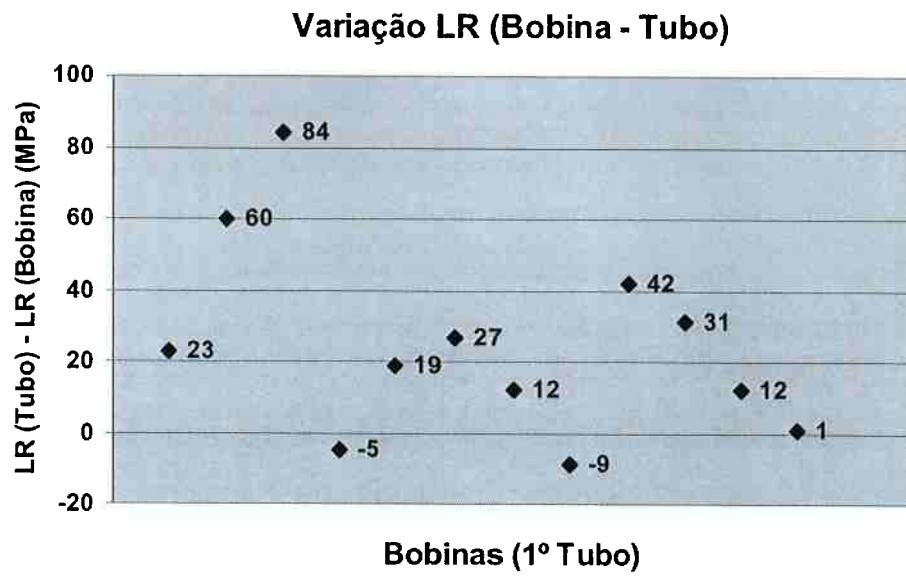


Gráfico 2 – Variação do LR de bobinas para tubos para as 12 bobinas do estudo.

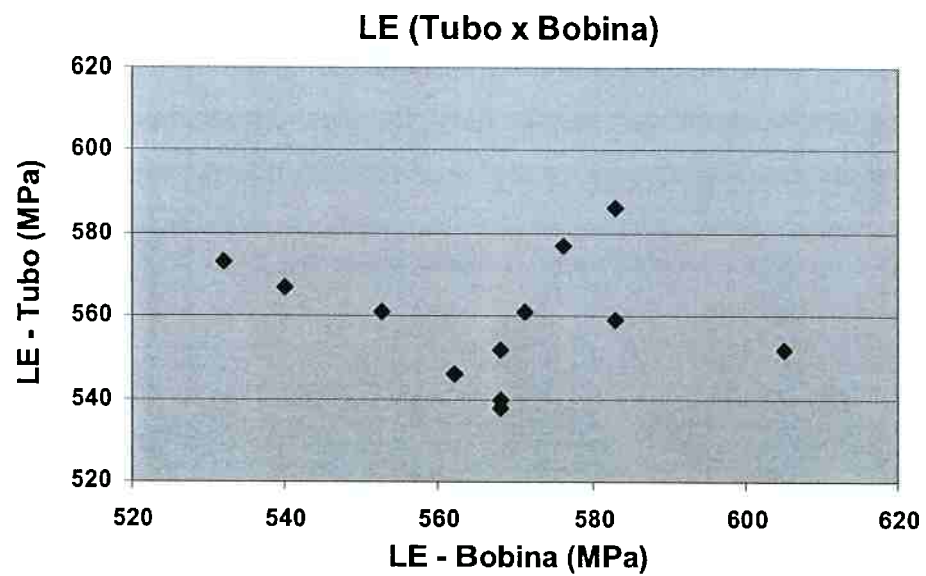


Gráfico 3 – Correlação entre os dados de LE de tubos e bobinas.

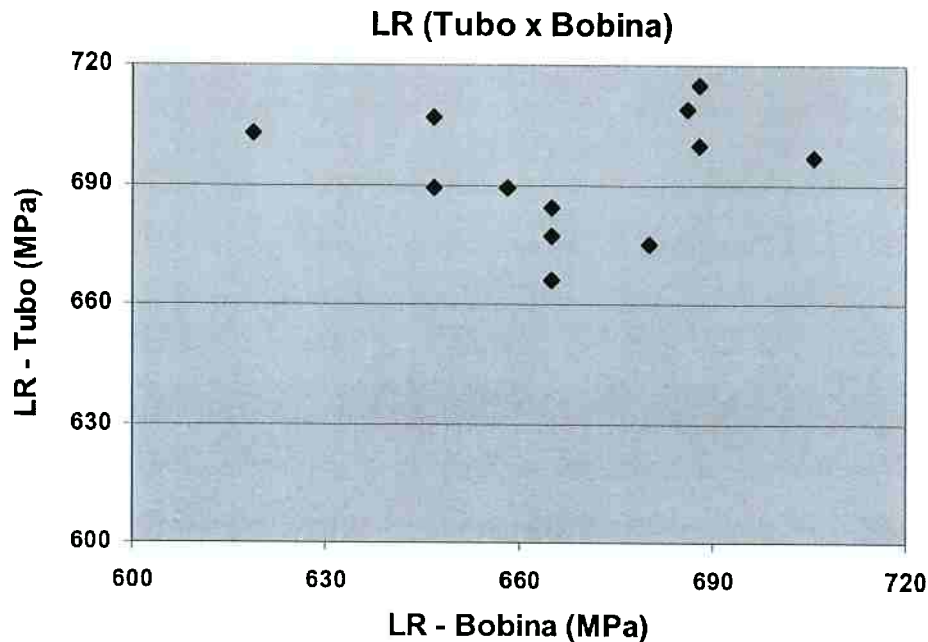


Gráfico 4 – Correlação entre os dados de LR de tubos e bobinas.

Também foram traçados outros gráficos, a fim de se relacionar as propriedades mecânicas do ensaio de tração de bobinas e tubos. Os Gráficos 5, 6 e 7 relacionam a variação do LE de bobina para tubo com o limite de escoamento, o limite de resistência e a razão elástica das bobinas, respectivamente. Nos três casos, nota-se uma tendência de diminuição do limite de escoamento dos tubos em relação às bobinas, para bobinas com valores altos de LE, LR e razão elástica. Portanto, bobinas com baixos valores de LE, LR e razão elástica tendem a ter o seu limite de escoamento aumentado depois da conformação e fabricação do tubo. Vale lembrar que, para o Gráfico 7, foi desconsiderada uma das amostras, que apresentava comportamento diferente das outras 11 amostras. Já o Gráfico 8 relaciona essa mesma variação com a variação do alongamento, mostrando que as mesmas também são inversamente proporcionais. Os Gráficos 9 e 10 relacionam a variação do LR de bobina para tubo com o LE e o LR da bobina. Nesses casos, a tendência verificada é semelhante à variação do LE, já que bobinas com elevados valores de LE e LR, tendem a apresentar diminuição ou menores aumentos para o limite de resistência.

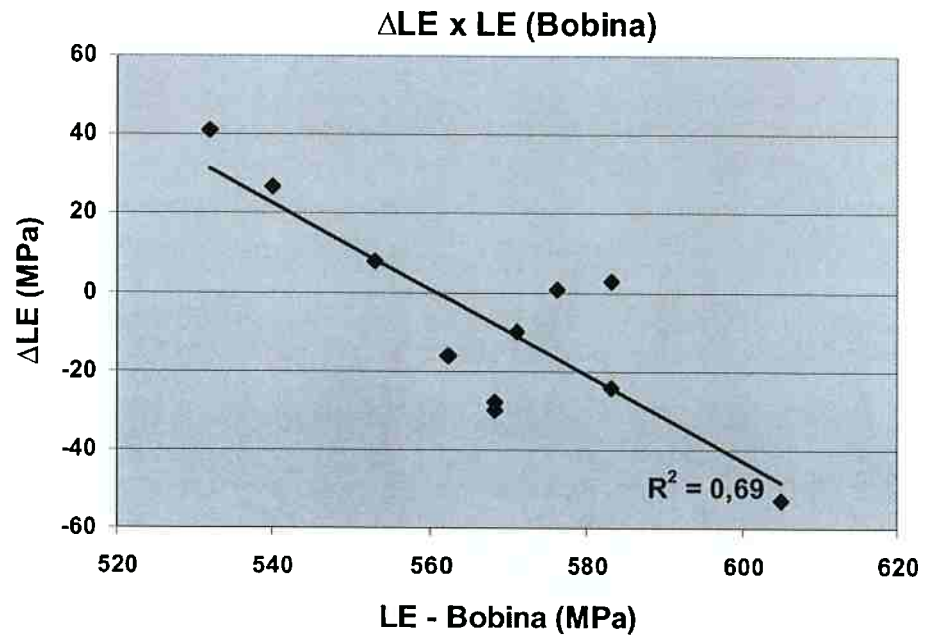


Gráfico 5 – Relação entre variação do LE de bobina para tubo e LE da bobina.

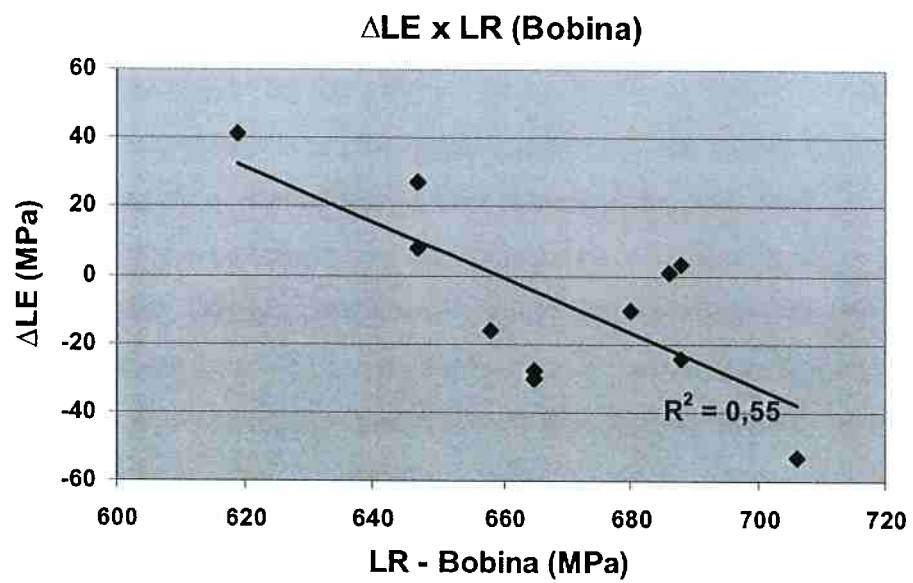


Gráfico 6 – Relação entre variação do LE de bobina para tubo e LR da bobina.

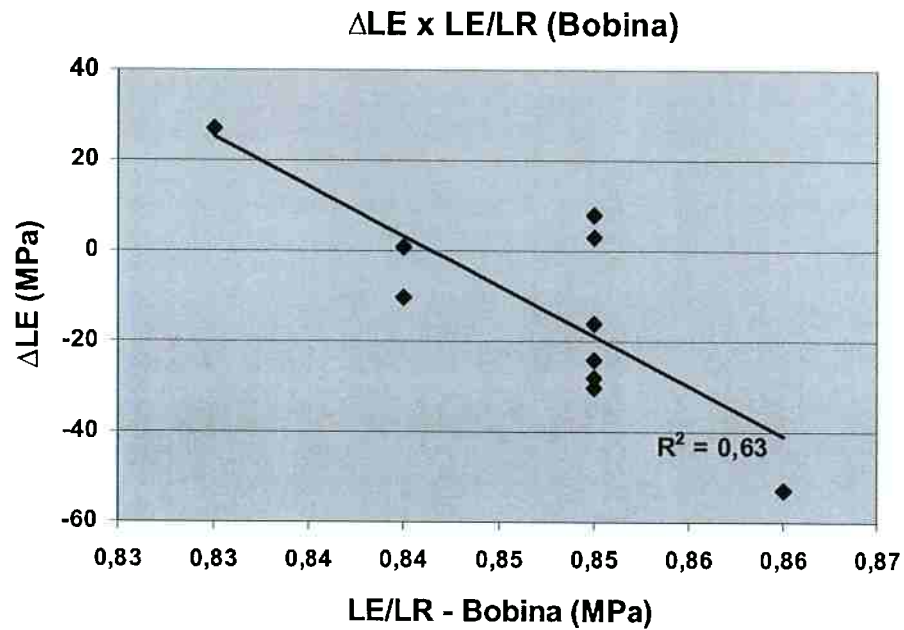


Gráfico 7 – Relação entre variação do LE de bobina para tubo e razão elástica da bobina.

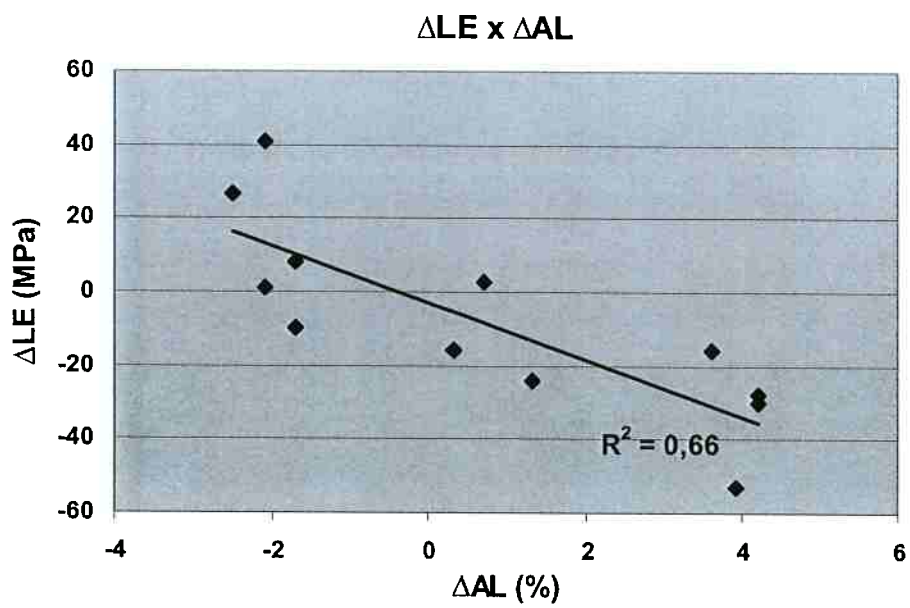


Gráfico 8 – Relação entre variação do LE e alongamento de bobina para tubo.

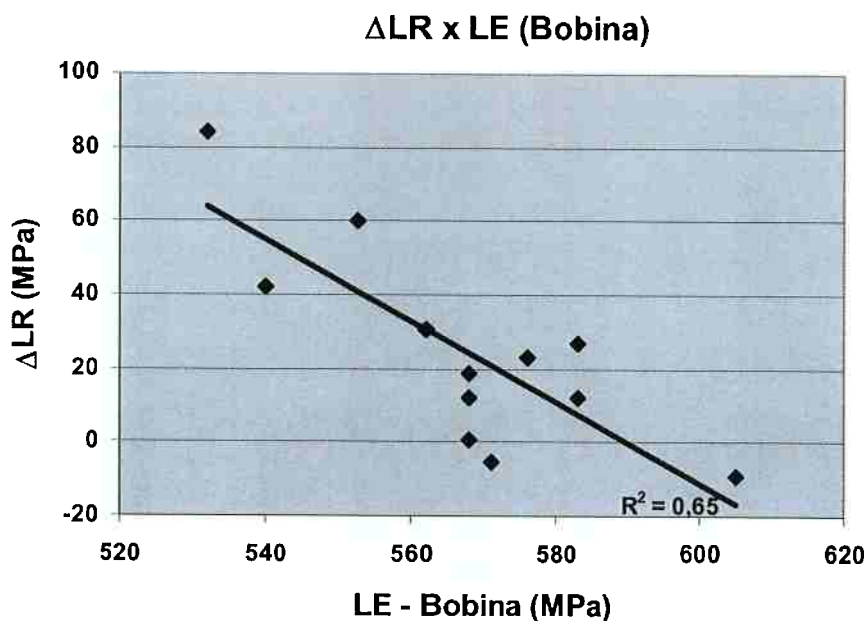


Gráfico 9 – Relação entre variação do LR de bobina para tubo e LE da bobina.

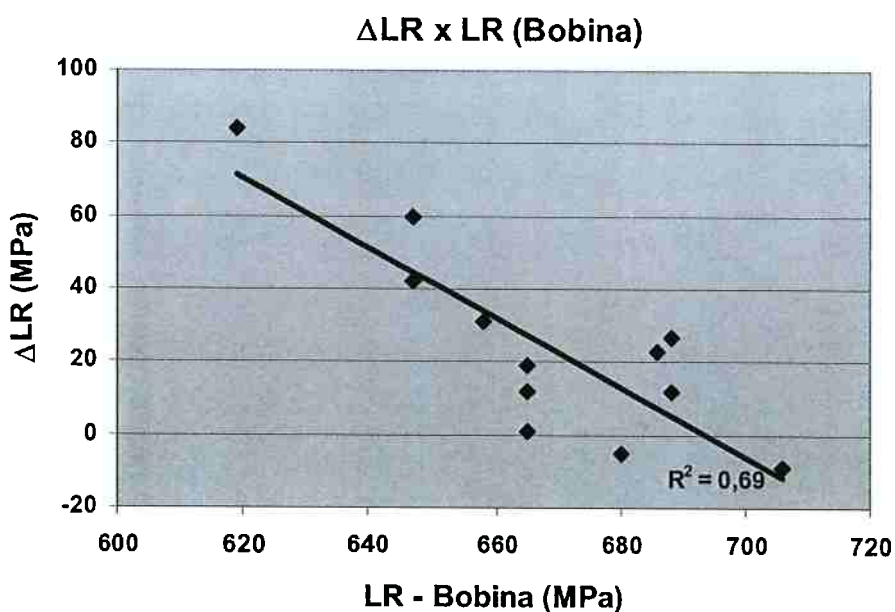


Gráfico 10 – Relação entre variação do LR de bobina para tubo e LR da bobina.

O ensaio de resistência ao impacto Charpy, que mede a tenacidade do material, foi realizado para cada corrida, portanto, para efeito de comparação dos dados obtidos para bobinas e para tubos, só gerou 6 medidas. No caso dos ensaios para os CP's de tubos, foram feitas duas medidas para cada corrida, uma para a Amostra A e outra para a Amostra C da corrida em questão. Os valores médios

dessas medidas foram comparados com os valores obtidos pela usina, para as bobinas. A Tabela 7 contém os dados deste ensaio para as 6 corridas que originaram as bobinas e os tubos estudados nesse trabalho, e as respectivas variações ocorridas na fabricação. O Gráfico 11 mostra a relação entre os valores obtidos nesse ensaio para tubos (eixo y) e bobinas (eixo x). Percebe-se que houve uma tendência de redução da tenacidade, o que já é esperado quando se trata da fabricação de tubos por conformação a frio das bobinas, que introduz um alto teor de discordâncias no material (devido ao encruamento), o que diminui a capacidade do material absorver energia no impacto.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de impacto Charpy para bobinas e tubos, e as respectivas variações, para cada corrida.

IMPACTO CHARPY (em J)

CORRIDA	CP	AMOSTRA	TUBOS			BOBINAS	VARIACÃO
			AMOSTRA A	AMOSTRA C	MÉDIA		
2557656	2539	1	233	179	206	375	-169
3012268	2633	2	205	217	211	232	-21
2557672	2618	3	221	168	195	175	20
2557731	2563	5	161	143	152	150	2
3012330	2529	9	171	154	163	244	-82
2557698	2617	12	132	73	103	184	-82
		MÉDIA	188	161	179	208	-51

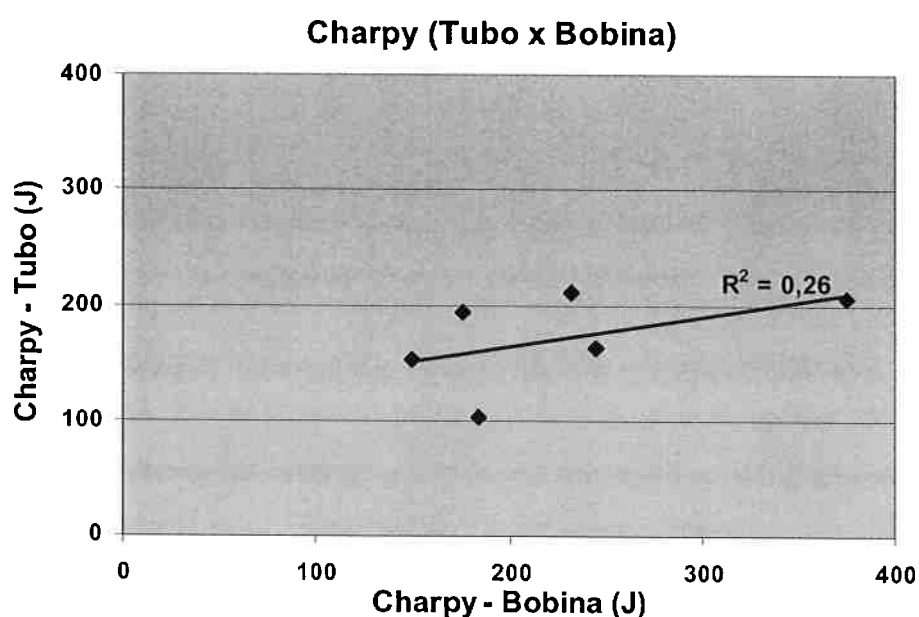


Gráfico 11 – Correlação entre os dados do ensaio Charpy de tubos e bobinas.

Linhas de tendência: os gráficos 5 a 10 apresentam tendências encontradas nas variações das principais propriedades mecânicas abordadas nesse estudo, obtidos a partir de relações entre os dados fornecidos pelo ensaio de tração de bobinas e tubos. Foram apresentadas linhas de tendência, que aproximam os pontos dos gráficos por curvas de funções de 1° grau. Cada uma dessas aproximações possui um coeficiente de determinação, R^2 , que é a medida relativa de adequação do ajuste, isto é, a relação entre a variação explicada pela equação fornecida pela aproximação e a variação total da variável dependente (dada pelo eixo y). Se $R^2=0,75$, isto significa que 75% da variância é explicada pelo modelo. As curvas obtidas apresentaram R^2 entre 0,55 e 0,69, o que mostra que houve grande dispersão dos dados, porém são boas aproximações para as tendências verificadas, e indicam que essas tendências representam relações verdadeiras entre os parâmetros utilizados, no caso as propriedades mecânicas do ensaio de tração e suas variações ocorridas na fabricação dos tubos e dos CP's. Considerando o fato de que a maioria dessas relações e tendências foram verificadas em estudos anteriores, as curvas indicam que os resultados do estudo expressam de forma satisfatória as variações das propriedades ocorridas na fabricação dos tubos, e suas relações com os parâmetros escolhidos, que de um modo geral foram as propriedades das bobinas.

Relação variação das propriedades mecânicas x processo de fabricação: é muito importante ressaltar que as bobinas sofrem diversas deformações a frio no processo de fabricação de tubos por formação contínua com soldagem ERW. Portanto, é fundamental, para um pleno entendimento da relação deformação da bobina x variação das propriedades mecânicas, que seja conhecida a curva tensão-deformação considerando todas as etapas do processo de formação dos tubos. Só assim é possível entender de que forma se dá a influência do efeito Bauschinger e do encruamento do material na variação das propriedades mecânicas de bobina para tubo. Nesse estudo, considerou-se a deformação das bobinas em apenas um sentido, ou seja, o efeito Bauschinger só foi considerado na confecção dos corpos de prova, onde os anéis dos tubos são desempenados, sofrendo deformação no sentido inverso da inicial. Essa simplificação só pode ser averiguada tendo em mãos a curva tensão-deformação considerando todas as etapas de formação do processo de fabricação dos tubos. Portanto, nesse estudo, a variação das propriedades mecânicas foi considerada simplesmente como o balanço entre o efeito Bauschinger

(que diminui a resistência mecânica dos tubos em relação às bobinas) e o encruamento (que aumenta a resistência mecânica), em um ciclo tração-compressão simples, como o da Figura 16.

4.3. Ensaios Metalográficos

4.3.1. Dureza

O ensaio de dureza Vickers das amostras dos tubos forneceu os dados apresentados na Tabela 8. Os valores obtidos nesse ensaio apresentaram pequena dispersão, estando todos bem próximos, com valor médio de 244 ± 3 HV.

Tabela 8 – Medidas do ensaio de Dureza Vickers (HV10) das amostras de tubos.

AMOSTRA	CP	POSIÇÃO	DUREZA HV10			MÉDIA
			1	2	3	
1	2539	A	238	239	237	241 ± 5
		B	238	247	248	
2	2633	A	240	242	231	237 ± 5
		B	239	239	232	
3	2618	A	250	246	250	245 ± 5
		B	238	243	241	
4	2671	A	248	248	244	243 ± 5
		B	238	237	243	
5	2563	A	254	255	249	250 ± 4
		B	247	248	245	
6	2549	A	244	250	241	247 ± 4
		B	252	250	247	
7	2543	A	238	240	247	242 ± 4
		B	238	246	244	
8	2542	A	241	242	241	244 ± 5
		B	240	250	250	
9	2529	A	244	248	246	245 ± 2
		B	246	244	242	
10	2570	A	252	239	240	242 ± 5
		B	238	240	242	
11	2528	A	250	247	246	246 ± 5
		B	252	241	241	
12	2617	A	248	245	246	243 ± 4
		B	241	238	239	

4.3.2. Microscopia

A observação das inclusões encontradas nas amostras teve caráter exploratório, já que as seções observadas deveriam ser no sentido longitudinal ao

tubo (o que possibilitaria analisar a presença de inclusões alinhadas na direção de laminação das tiras), e não transversal, como foi o caso.

As microestruturas das 12 amostras utilizadas no estudo desse trabalho foram observadas tanto no Microscópio Óptico (MO) quanto no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Para a análise no MO com ampliação de 500x, são apresentadas apenas 6 das 12 amostras observadas (Figura 26), porém para 1000x todas são mostradas nas Figuras 27 e 28. Para todas as imagens geradas foram analisadas as regiões de $\frac{1}{4}$ de espessura das amostras dos tubos. De um modo geral, a microestrutura do material do estudo foi bastante refinada, com grãos ferríticos deformados, e presença considerável de segunda fase, que ao MO não pôde ser identificada. A quantidade de segunda fase foi bastante variada nas amostras, assim como o tamanho de grão médio, o que será discutido mais adiante. Lembrando que todas as microestruturas observadas foram de seções transversais ao tubo.

Já para análise no MEV, são apresentadas as microestruturas de 6 das 12 amostras para a ampliação de 1000x (Figura 29), enquanto para o aumento de 2200x todas as amostras estão representadas, nas Figuras 30 e 31. Nesse caso, se tornou possível identificar a composição de segunda fase presente, cujos constituintes são colônias finas de aglomerados ferrita-cementita e também carbonetos precipitados no contorno de grão. A região analisada novamente foi a $\frac{1}{4}$ de espessura dos tubos. Algumas amostras apresentaram baixas proporções de agregado ferrita-cementita e de segunda fase de um modo geral, enquanto em outras foram observadas quantidades maiores, chegando a frações consideráveis de segunda fase, em algumas regiões das amostras.

Além dessas imagens, no próximo item também serão apresentadas e discutidas outras imagens, geradas ao MO, para algumas amostras especificamente, com o intuito de se comparar as diferentes porcentagens e distribuições de 2ª fase presente nessas amostras, visando relacionar essas variáveis com a variação das propriedades mecânicas ocorrida na fabricação dos tubos. Também será mostrada uma imagem obtida ao MEV com a finalidade de apresentar um aspecto geral da microestrutura das amostras, e algumas imagens, com diferentes aumentos, com o objetivo de se identificar com mais precisão a composição da fase constituída como um agregado ferrita-cementita.

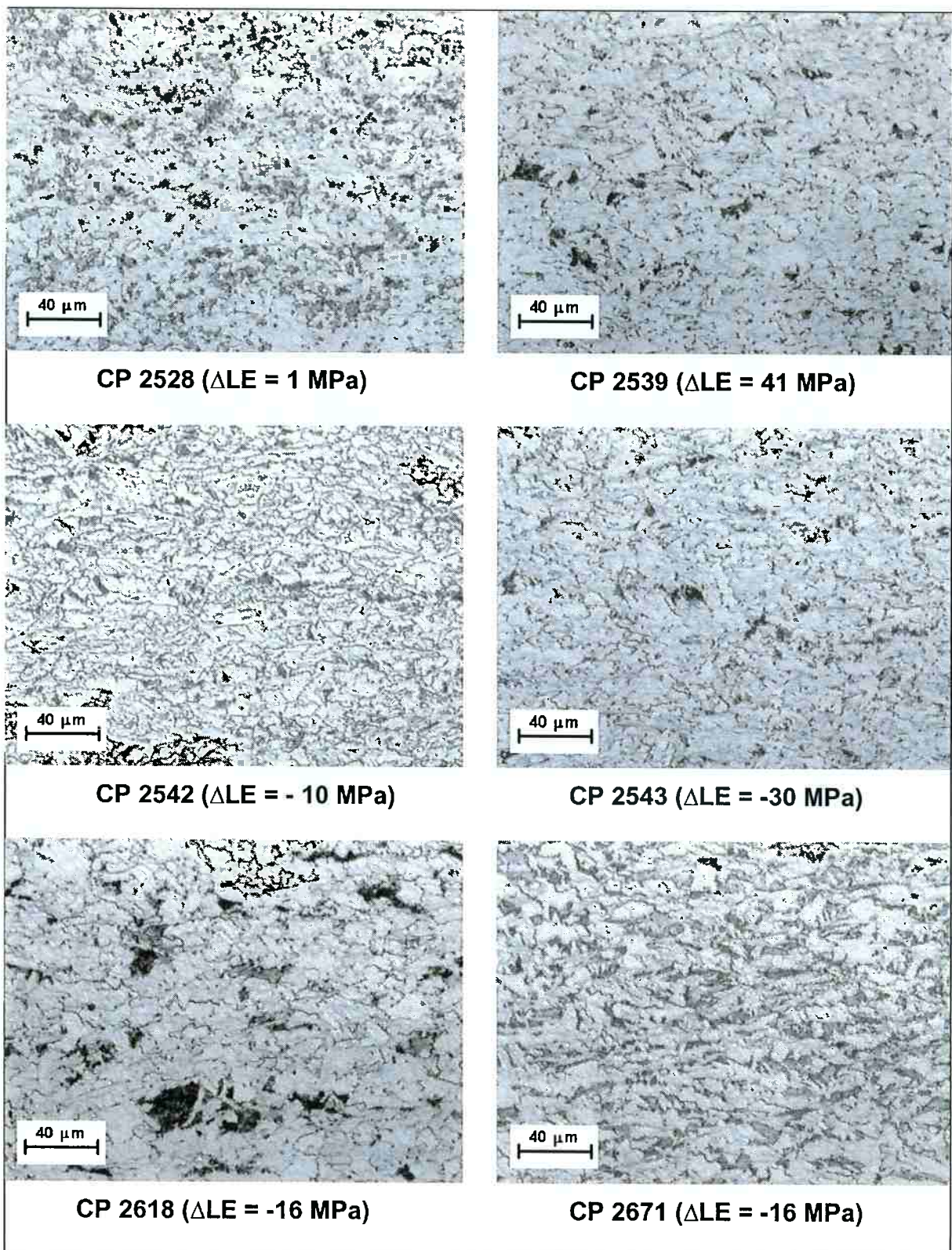


Figura 26 – Exame microestrutural de amostras dos tubos. MO. Ataque: Nital 3%. Ampliação: 500x. Região observada a $\frac{1}{4}$ de espessura do tubo. Corte transversal. Observam-se microestruturas ferrítico-perlíticas com diferenças na morfologia de grãos ferríticos (fase clara) e na proporção de agregado ferrita-cementita (regiões escuras).

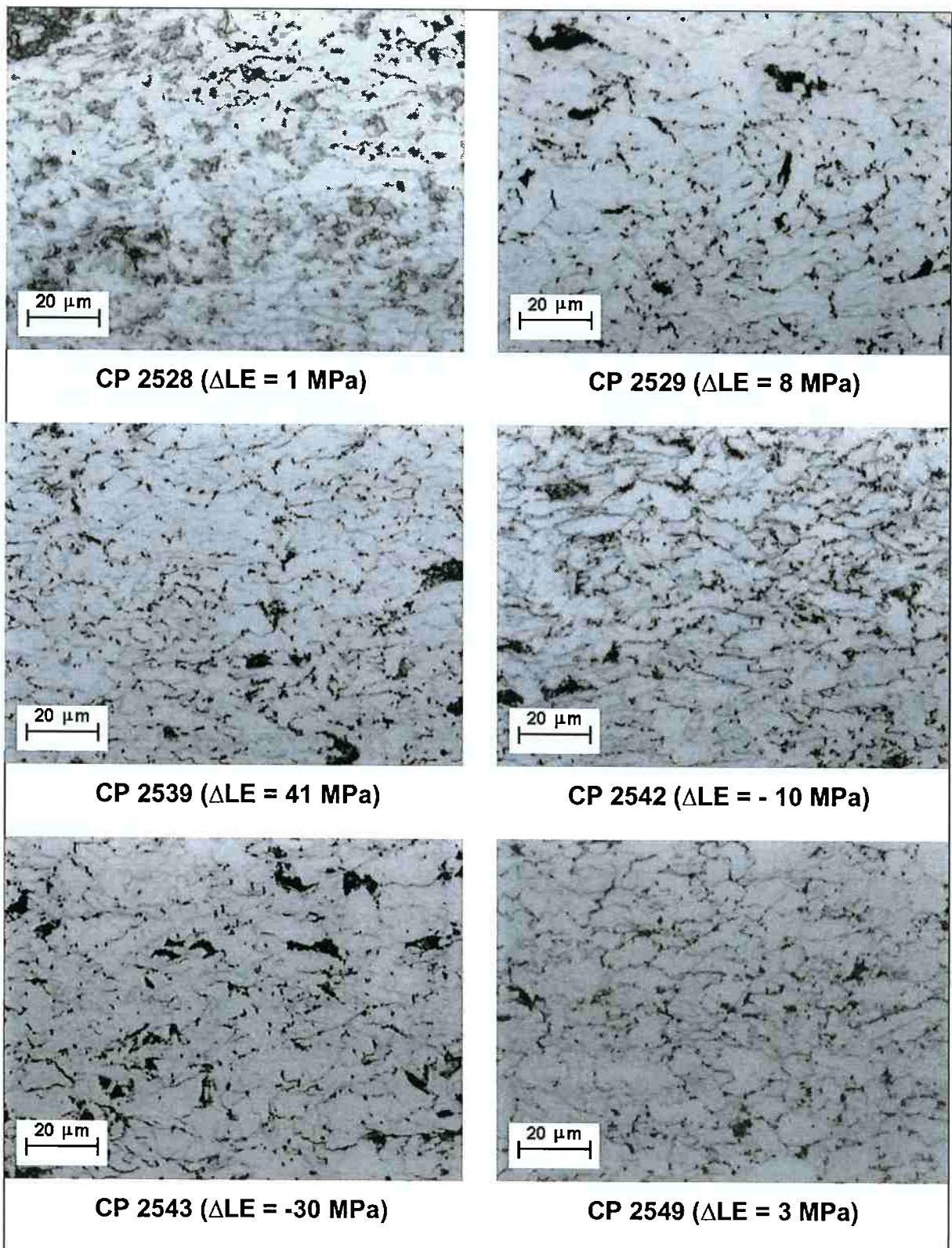


Figura 27 – Exame microestrutural das amostras dos tubos. MO. Ataque: Nital 3%. Ampliação: 1000x. Região observada a $\frac{1}{4}$ de espessura do tubo. Corte transversal. Observam-se microestruturas ferrítico-perlíticas com diferenças na morfologia de grãos ferríticos (fase clara) e na proporção de agregado ferrita-cementita (regiões escuras).

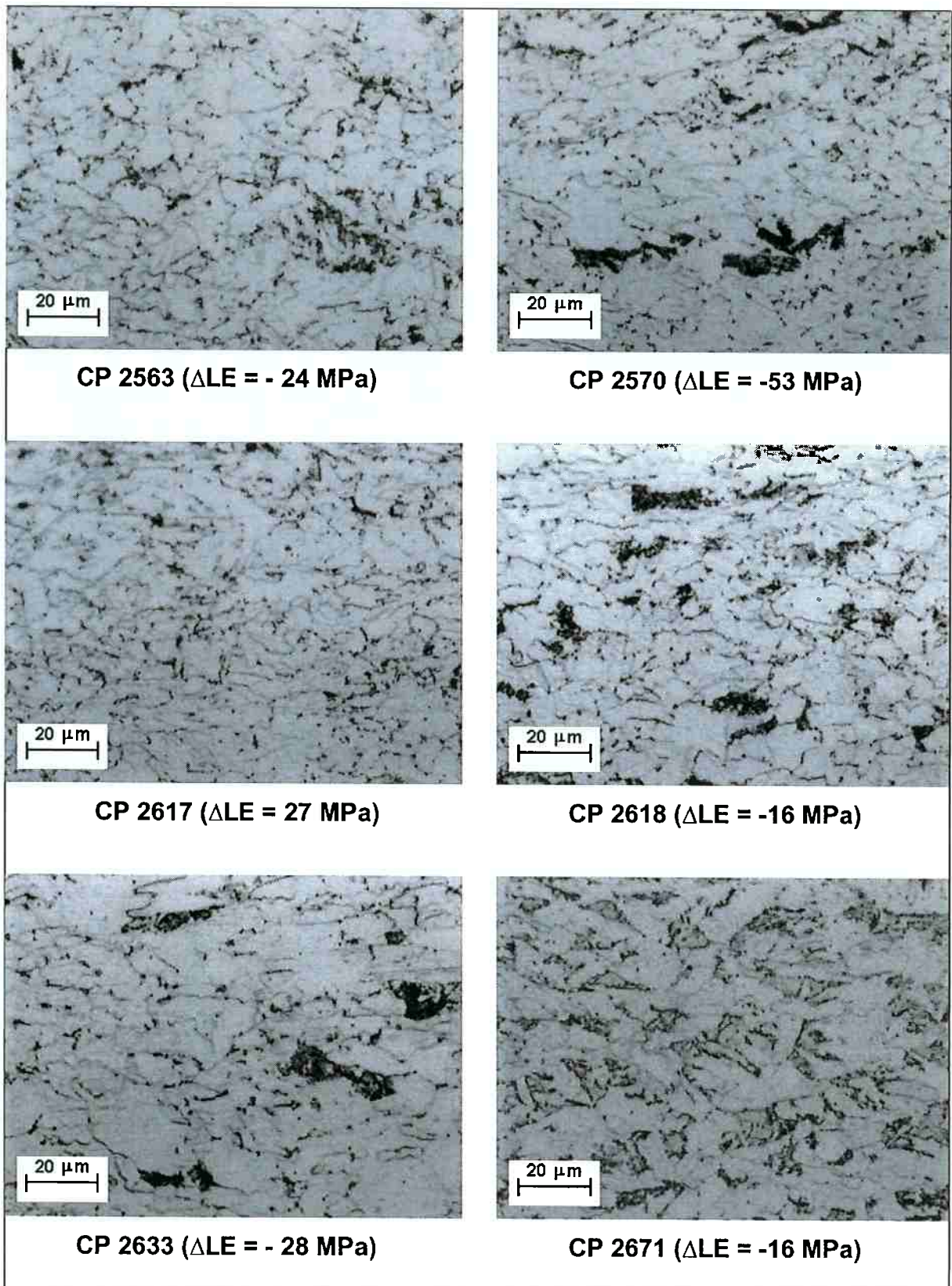


Figura 28 – Exame microestrutural das amostras dos tubos. MO. Ataque: Nital 3%. Ampliação: 1000x. Região observada a $\frac{1}{4}$ de espessura do tubo. Corte transversal. Observam-se microestruturas ferrítico-perlíticas com diferenças na morfologia de grãos ferríticos (fase clara) e na proporção de agregado ferrita-cementita (regiões escuras).

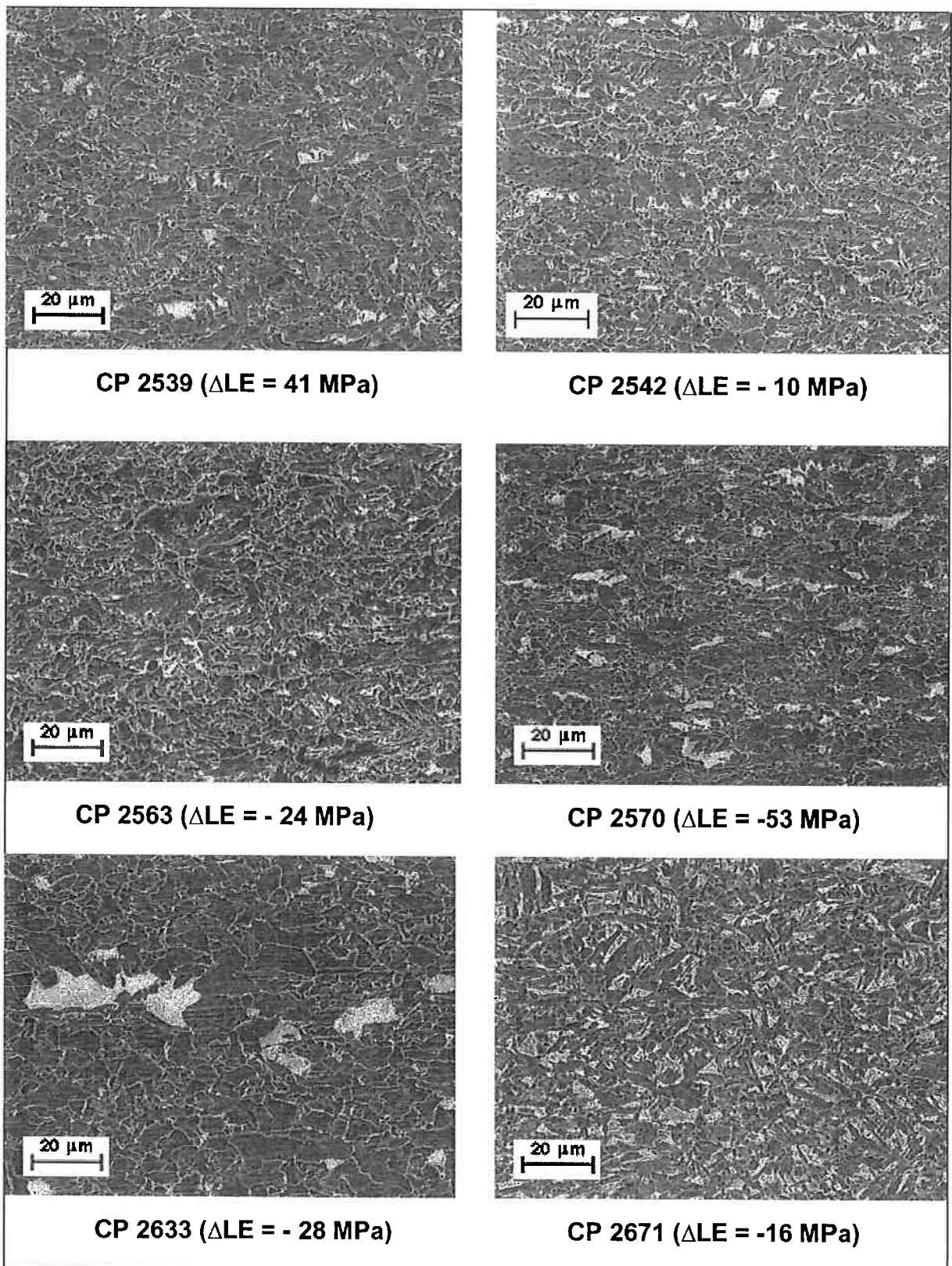


Figura 29 – Exame microestrutural de amostras dos tubos. MEV. Ataque: Nital 3%. Ampliação: 1000x. Região observada a $\frac{1}{4}$ de espessura do tubo. Corte transversal. Observam-se microestruturas ferrítico-perlíticas com diferenças na morfologia de grãos ferríticos (fase escura) e na proporção de agregado ferrita-cementita (regiões claras), além da presença de carbonetos precipitados nos contornos de grão.

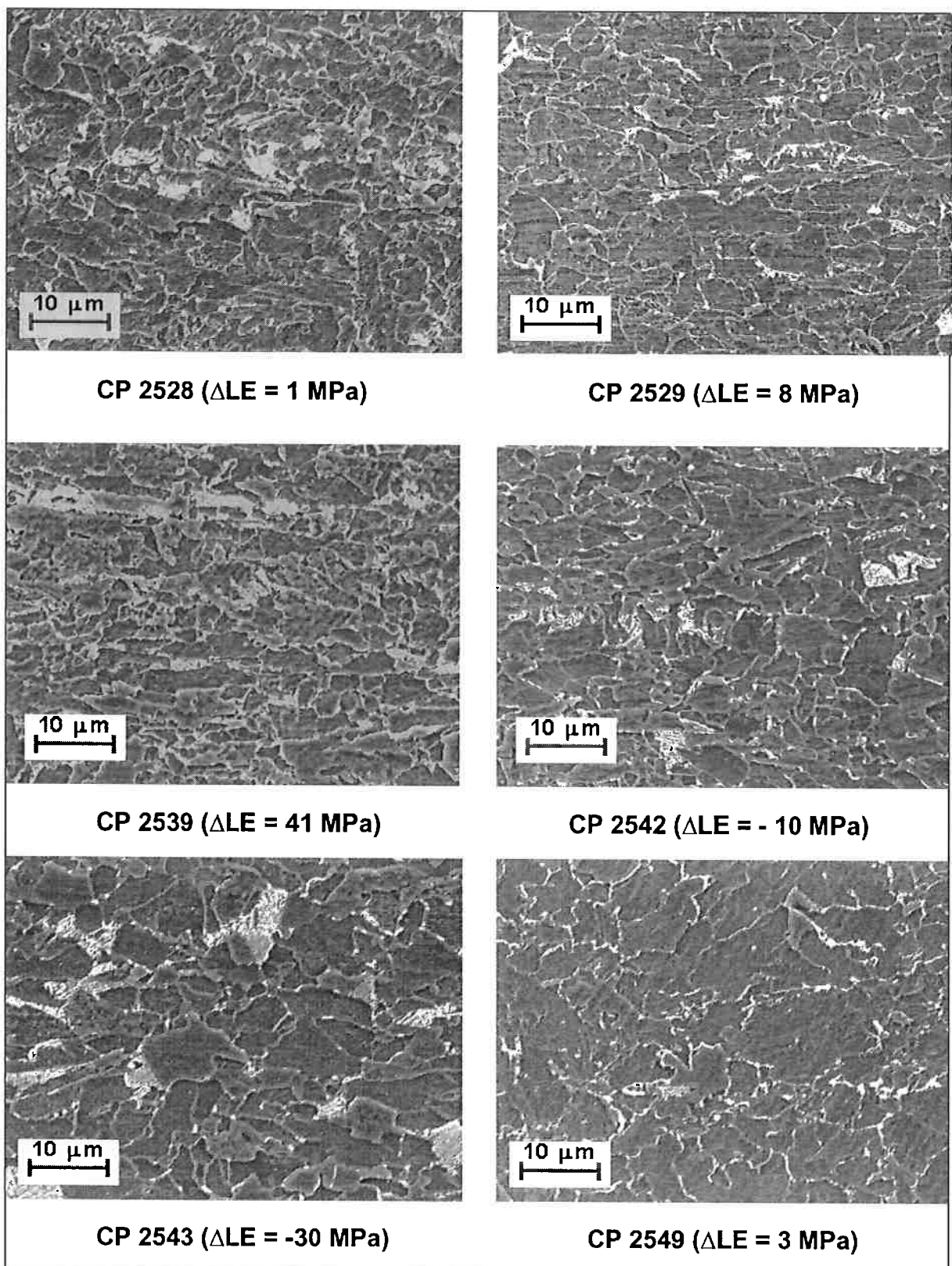


Figura 30 – Exame microestrutural das amostras dos tubos. MEV. Ataque: Nital 3%. Ampliação: 2200x. Região observada a $\frac{1}{4}$ de espessura do tubo. Corte transversal. Observam-se microestruturas ferrítico-perlíticas com diferenças na morfologia de grãos ferríticos (fase escura) e na proporção de agregado ferrita-cementita (regiões claras), além da presença de carbonetos precipitados nos contornos de grão.

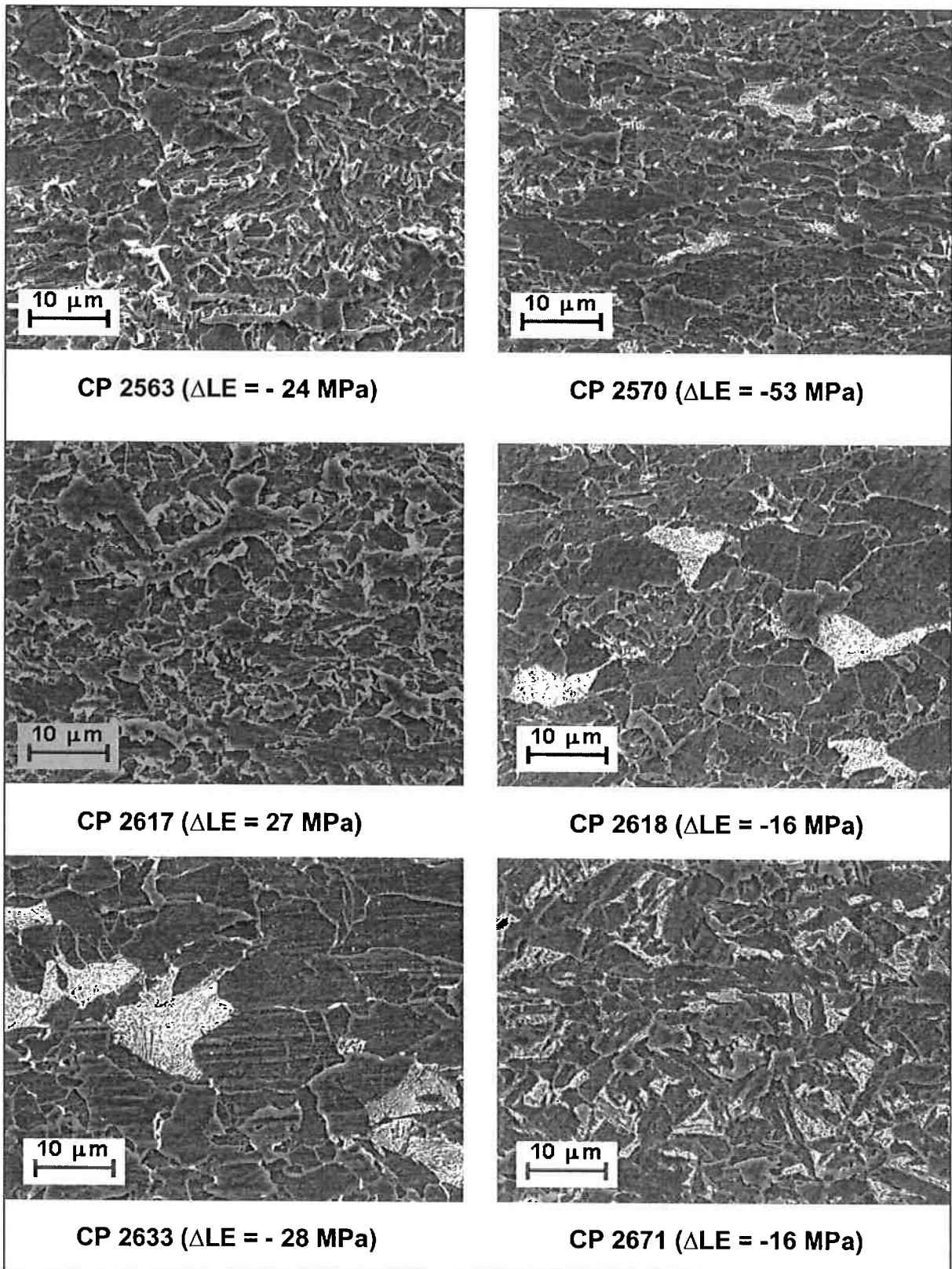


Figura 31 – Exame microestrutural das amostras dos tubos. MEV. Ataque: Nital 3%. Ampliação: 2200x. Região observada a $\frac{1}{4}$ de espessura do tubo. Corte transversal. Observam-se microestruturas ferrítico-perlíticas com diferenças na morfologia de de grãos ferríticos (fase escura) e na proporção de agregado ferrita-cementita (regiões claras), além da presença de carbonetos precipitados nos contornos de grão.

5. Discussões

Os resultados de análise química e de dureza das amostras de tubos apresentaram pequena dispersão, o que impossibilita relacionar essas grandezas com a variação de propriedades mecânicas ocorrida na fabricação dos tubos. Os valores obtidos nos ensaios tanto para as bobinas quanto para os tubos estiveram sempre dentro das especificações da norma. No caso da análise química, não houve variação considerável dos teores dos elementos químicos, comparando-se as amostras de produto da usina e as de tubos. Estas últimas apresentaram de um modo geral um pequeno aumento no teor de manganês, e menores teores de carbono, como já tratado no item 4.1. Essa pequena variação também não permite traçar uma relação com a variação das propriedades mecânicas.

Já no caso do ensaio de dureza, as amostras de tubos apresentaram um aumento considerável para essa propriedade, de 213 ± 8 HV para as bobinas para 244 ± 3 HV para as amostras de tubos. Admitindo-se que existe uma relação linear entre a dureza Vickers e o LR do aço ($LR \text{ (MPa)} \approx 3,2 \text{ HV}$), os resultados do ensaio de dureza não são compatíveis com os valores de LR obtidos no ensaio de tração, portanto essa relação não foi confirmada. Uma das possíveis razões disso é que as posições dos pontos da amostra onde são feitas as medidas de dureza geram erros experimentais, já que desconsideram a região do meio da espessura dos tubos, e não refletem a segregação microestrutural desse material, típica de chapas e bobinas laminadas. Essa segregação será discutida mais adiante.

Em relação aos resultados dos ensaios mecânicos, podem-se notar algumas tendências na variação das diversas propriedades mecânicas, que ocorrem durante a fabricação de tubos por formação contínua e soldagem por resistência elétrica ERW, a partir de bobinas laminadas a quente. As variações encontradas nas amostras do estudo serão discutidas adiante:

5.1. Limite de Escoamento

No caso do limite de escoamento (LE), mais da metade das amostras (7 de 12) de tubos apresentou valores dessa propriedade menores que as amostras das bobinas correspondentes, como pode ser visto nos Gráficos 1 e 3. Apesar de ser

essa uma tendência já esperada na fabricação dos tubos estudados nesse trabalho [22-24], esse decréscimo de uma forma geral foi pequeno, em média, enquanto em alguns casos isolados foi bem considerável. Essa diminuição nos valores da propriedade se deve ao efeito Bauschinger, já tratado no item 2.3. De um modo geral, não há condições de se concluir que o limite de escoamento tende sempre a diminuir, e muito menos aumentar, devido à dispersão dos valores obtidos e das variações encontradas de bobina para tubo (desde um aumento de 41 MPa até uma queda de 53 MPa, e médias de 568 ± 20 MPa para bobinas, e de 560 ± 15 MPa para tubos, mostrando que, em média, essa variação não foi tão considerável).

Os valores de LE de tubos e bobinas apresentaram enorme dispersão, não permitindo afirmar que existe uma relação linear evidente entre os mesmos. Porém, foram traçadas relações entre a variação dessa propriedade de bobina para tubo e as propriedades das bobinas, apesar da grande dispersão de valores. De um modo geral, valores altos de limite de escoamento e de resistência das bobinas geram decréscimo do LE dos tubos, como pode ser visto nos Gráficos 5 e 6. Isso sugere que bobinas de alta resistência são mais suscetíveis ao efeito Bauschinger [22].

Já em relação à razão elástica das bobinas, sabe-se que essa propriedade reflete a capacidade de encruamento do material, que é tanto maior quanto menor a razão elástica. Se esta aumenta, o encruamento diminui, de forma que a influência do efeito Bauschinger sobre o valor do LE do tubo se torna mais predominante, aumentando a tendência de decréscimo do LE do tubo em relação à bobina [12, 24]. Com exceção de uma amostra que não correspondeu a essa tendência, podemos observar essa relação no Gráfico 7.

Adicionalmente foi traçada uma relação entre a variação do LE e a variação do alongamento, que também se mostraram inversamente proporcionais para as amostras utilizadas nesse estudo. Não foram encontradas na literatura explicações ou mesmo menções da existência dessa relação, o que nos leva a crer que pode ser mais um objeto de estudo para o entendimento das variações das propriedades mecânicas na fabricação de tubos. Essa relação pode ser encontrada no Gráfico 8.

5.2. Limite de Resistência

Em relação ao limite de resistência (LR), apenas duas amostras de tubos apresentaram valores dessa propriedade abaixo dos valores obtidos pelas bobinas correspondentes, como pode ser visto no Gráfico 2 e 4. Em ambos casos, esse decréscimo foi mínimo, portanto desprezível. Esses resultados seguiram uma tendência já esperada, já que o efeito Bauschinger tem uma influência menos acentuada sobre essa propriedade na fabricação de tubos [22, 25, 26]. Da mesma forma que para o limite de escoamento, devido à grande dispersão dos valores, não foi encontrada uma relação linear evidente entre os valores de LR de tubos e bobinas. Porém também foi percebido que para altos valores de LE e LR de bobina, menores foram as variações dessa propriedade de bobina para tubo, como pode ser visto nos Gráficos 9 e 10.

5.3. Razão Elástica e Alongamento

A razão elástica sofreu pequenos decréscimos para todas as amostras, o que já era esperado, considerando a tendência de diminuição dos valores de LE e aumento dos valores de LR. Já o alongamento, que representa a ductilidade do material, seguiu a tendência contrária ao LE, apresentando pequenos aumentos em mais da metade das amostras. Como já citado anteriormente, a literatura consultada não menciona a relação entre essas variações, e também não trata significativamente a variação do alongamento, pois geralmente essa propriedade não apresenta grandes variações, não comprometendo a integridade estrutural dos tubos, e se mantendo dentro das especificações, mesmo existindo uma tendência de diminuição dessa propriedade na fabricação dos tubos [22].

5.4. Ensaio Charpy

Para o ensaio ao impacto Charpy, que mede a tenacidade do material, que é a capacidade que o material tem para resistir à nucleação e avanço de uma trinca, foram avaliadas 6 amostras, correspondentes às 6 corridas utilizadas no estudo

desse trabalho. Em apenas duas dessas houve aumento na propriedade, sendo um deles insignificante, como pode ser visto na Tabela 7 e no Gráfico 11. A diminuição nos valores obtidos nesse ensaio já é esperada para as amostras dos tubos, já que as chapas são conformadas plasticamente a frio durante a fabricação dos tubos, e para a realização do ensaio, ainda sofrem desempenamento. Essas deformações geram discordâncias no interior do material, que fica altamente encruado, tornando-se mais frágil. Mesmo com esse decréscimo já esperado para a tenacidade dos tubos, os mesmos obtiveram altos valores nesse ensaio, alcançados principalmente pelo elevado refino de grão resultante de sua fabricação, e baixos teores de carbono utilizados em sua composição química. Com isso, os corpos de prova dos tubos apresentaram valores que atendem a norma exigida.

5.5. Microestrutura

A análise microestrutural das amostras utilizadas no estudo era o grande objetivo do trabalho, porém apresentou as maiores dificuldades, devido ao elevado refino de grão do material (a análise de produto realizada na usina teve como resultado um tamanho de grão médio equivalente ao ASTM 10), e também pelas limitações do Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado no estudo. As ampliações acima de 2200x geraram imagens com pequena nitidez, dificultando a identificação dos agregados ferrita-cementita presentes na microestrutura do material.

As imagens obtidas no MEV com ampliações de 500x e 2000x, apresentadas na Figura 32, levaram à conclusão que esses agregados, presentes em diferentes proporções e distribuições nas diversas amostras e regiões da espessura dos tubos analisados, correspondem a colônias bem finas e deformadas de perlita. Ambas imagens representam a região do meio da espessura dos tubos, onde está mais concentrada a segregação microestrutural presente em todas as amostras analisadas, em diferentes graus, e que será discutida adiante. A Figura 33 visa a mesma análise, porém a região analisada, nas ampliações de 1500x e 3000x, é a cerca de $\frac{1}{4}$ de espessura do tubo. Nesse caso, a identificação da morfologia do agregado ferrita-cementita torna-se um pouco mais difícil, porém sugere novamente

que o mesmo se trata de perlita. Também é verificada a presença de carbonetos precipitados nos contornos de grão (CG).

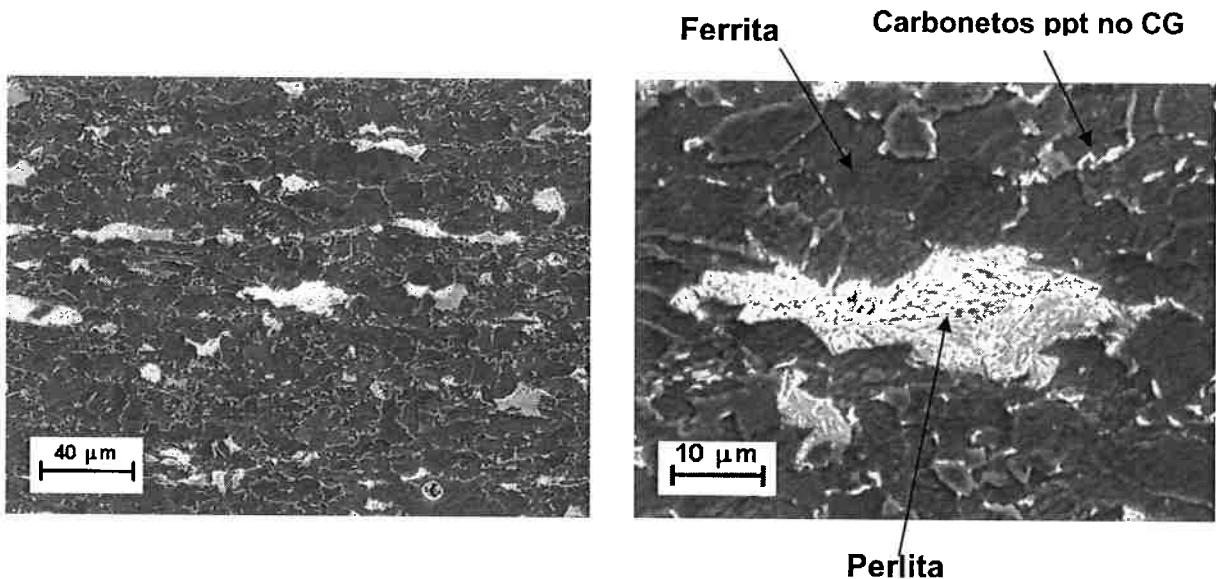


Figura 32 – Exame microestrutural do agregado ferrita-cementita. MEV. Ataque: Nital 3%. Ampliação: 500x e 2000x. Região analisada ao meio da espessura do tubo. Corte transversal. Observam-se as lamelas de cementita dentro do grão do agregado, indicando que o mesmo se trata de perlita. Amostra: 2 (CP 2633).

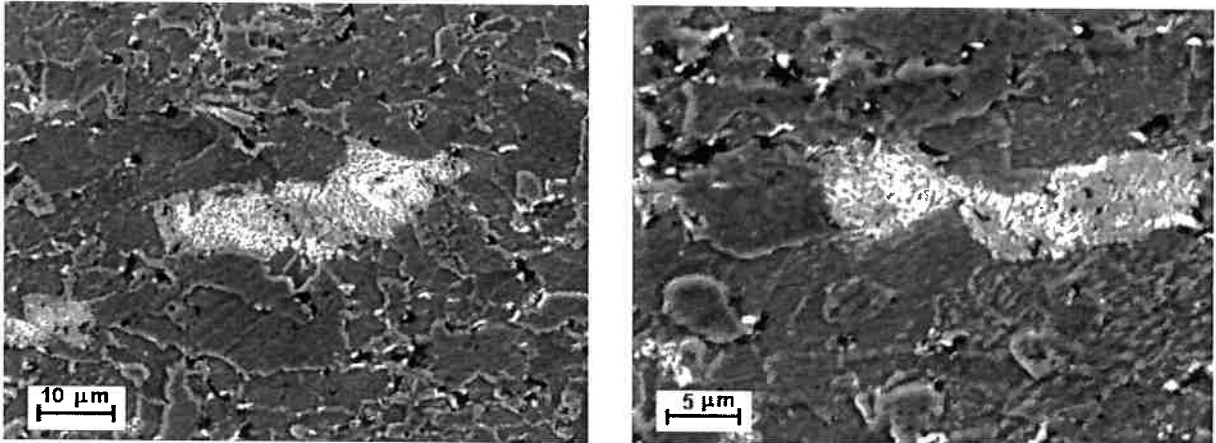


Figura 33 – Exame microestrutural do agregado ferrita-cementita. MEV. Ataque: Nital 3%. Ampliação: 1500x e 3000x. Região analisada a cerca de 1/4 da espessura do tubo. Corte transversal. Observam-se as lamelas de cementita dentro do grão do agregado, indicando que o mesmo se trata de perlita. Amostra: 2 (CP 2633).

A Figura 34 mostra uma imagem obtida no MEV para uma das amostras, exemplificando uma tendência verificada em todas as amostras. As mesmas apresentaram, em diferentes níveis e distribuições, uma visível segregação de microestrutura, principalmente na região do meio da espessura dos tubos, devido ao processo de fabricação das bobinas de aço. Esse fenômeno pode ser resultado de uma segregação química gerada durante a fabricação do aço, no lingotamento

contínuo, onde elementos mais leves, como o carbono e o nitrogênio, tender a ser segregados, se concentrando na região do centro da espessura das bobinas e chapas. Uma averiguação dessa segregação química poderia ter sido feita com a realização de análise química de pequenas porções das amostras, retiradas ao longo de toda a espessura. A análise química por WDS em diferentes regiões da espessura das amostras também poderia indicar a ocorrência de segregação química no aço.

Essa segregação tem grande presença de agregados ferrita-cementita, mais ricos em carbono. A região analisada foi a do meio da espessura do tubo, evidenciando a segregação presente nessa região em todas as amostras. A ampliação utilizada foi de 100x. Considerando que os CP's para os ensaios mecânicos de tração e resistência ao impacto Charpy são retirados transversalmente aos tubos, a presença de segregação no meio da espessura dos tubos tem sua ação fragilizante minimizada, pois esta seria maior se os CP's fossem retirados longitudinalmente aos tubos. De qualquer forma, o efeito da presença dessa segregação, vinculada a uma maior concentração de um constituinte mais duro e frágil (perlita), reduzem a tenacidade do material [27]. Uma sugestão para se analisar a influência da presença e da distribuição de segregação na mecânica da fratura das amostras é a realização de fractografias dos CP's submetidos aos ensaios mecânicos.

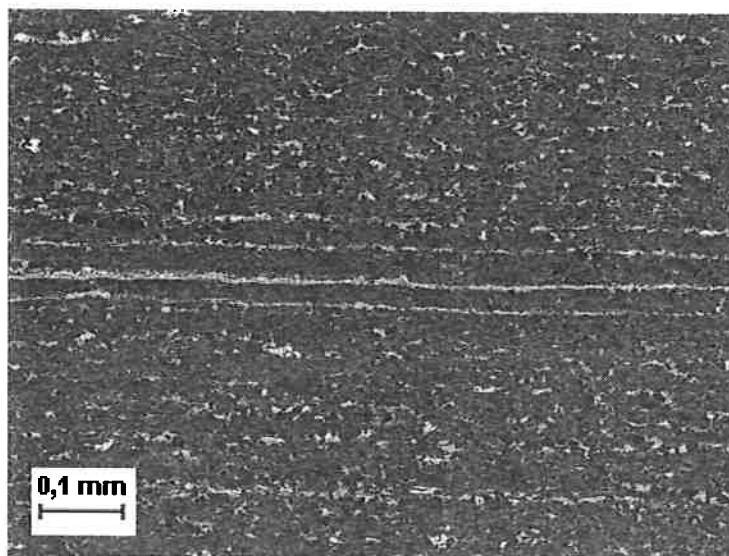


Figura 34 – Exame microestrutural de uma das amostras dos tubos. MEV. Ataque: Nital 3%. Ampliação: 100x. Região analisada ao meio da espessura do tubo, corte transversal. Observa-se a segregação ocorrida nessa região, e presente em todas as amostras. Amostra: 2 (CP 2633).

A Figura 35 apresenta microestruturas de 2 das 12 amostras utilizadas no estudo desse trabalho, observadas ao MO com ampliação de 200x. A região analisada foi a $\frac{1}{4}$ de espessura dos tubos. A comparação das mesmas visa relacionar a microestrutura dos materiais com a variação das propriedades mecânicas ocorrida durante a fabricação dos tubos, resultado da conformação (deformação plástica) das bobinas. Essa relação leva em conta a proporção e a distribuição de 2ª fase e o tamanho de grão, variáveis que foram verificadas apenas de forma visual e qualitativa, pois as análises quantitativas de determinação de tamanho de grão e fração de segunda fase não foram realizadas. Ambas análises, mesmo que realizadas, poderiam gerar resultados não confiáveis, como ocorreu em estudo anterior [24]. Esse fato se deve ao elevado refino de grão ocorrido na fabricação das bobinas de aço, e também pela impossibilidade de se diferenciar, ao MO, os tipos de segunda fase presentes na microestrutura.

A escolha das duas amostras analisadas está relacionada com o fato de que cada uma delas representa um diferente comportamento na variação dos limites de escoamento e de resistência de bobina para tubo. A amostra 1 (referente ao CP 2539) apresentou aumento de 41 MPa para o limite de escoamento e de 84 MPa para o limite de resistência do tubo em relação à bobina de origem, enquanto a amostra 10 (CP 2570) teve um decréscimo de 53 MPa no LE e de 9 MPa no LR de bobina para tubo.

Com a observação e a análise qualitativa das imagens das amostras obtidas no MO em diversas ampliações (desde 100x até 1000x), e no MEV (com ampliações de 1000x e 2200x), observaram-se diferentes microestruturas, que puderam ser relacionadas com a variação das propriedades mecânicas.

A amostra 1 apresentou o menor tamanho de grão entre as amostras analisadas, tanto para a matriz ferrítica quanto para os agregados ferrita-cementita. Também apresentou a distribuição mais homogênea de fases, a menor aglomeração de 2ª fase, além de colônias de perlita mais equiaxiais, menos alongadas.

Já a amostra 10, apesar de ter a mesma corrida de origem que a amostra 1, apresentou comportamento mecânico e microestruturas bem distintas e opostas, de um modo geral. Entre as amostras, teve o maior tamanho de grão, tanto em relação à ferrita quanto ao agregado ferrita-cementita. Também apresentou a distribuição de fases mais heterogênea, e colônias de perlita mais grosseiras e alongadas. Com essa análise qualitativa, torna-se possível uma discussão acerca das prováveis

relações entre a microestrutura do material e a variação das principais propriedades mecânicas de tubos fabricados por formação contínua, com soldagem por resistência elétrica ERW.

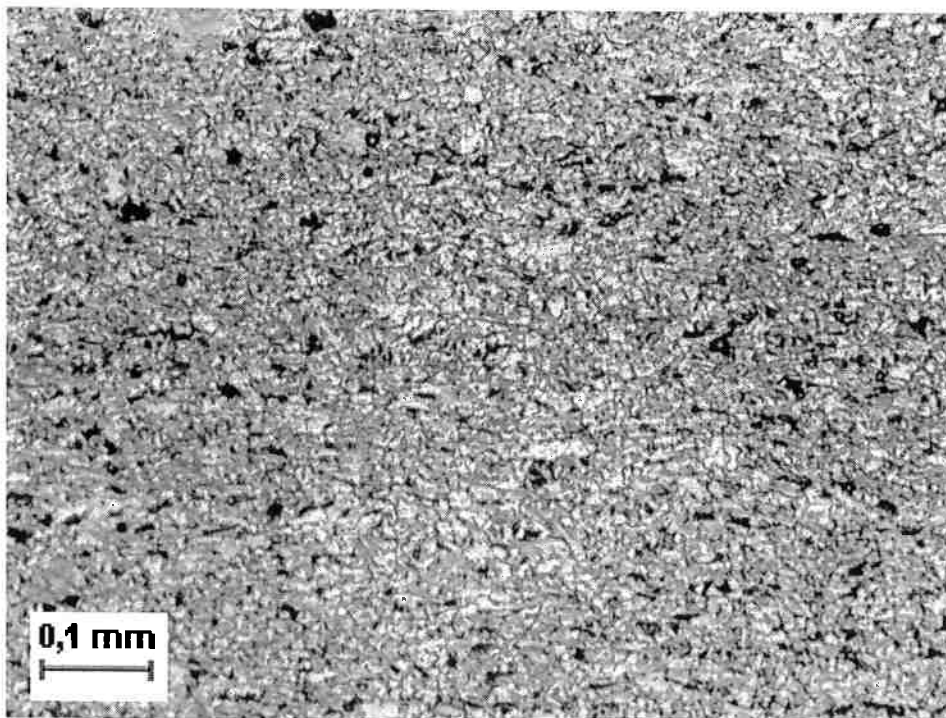
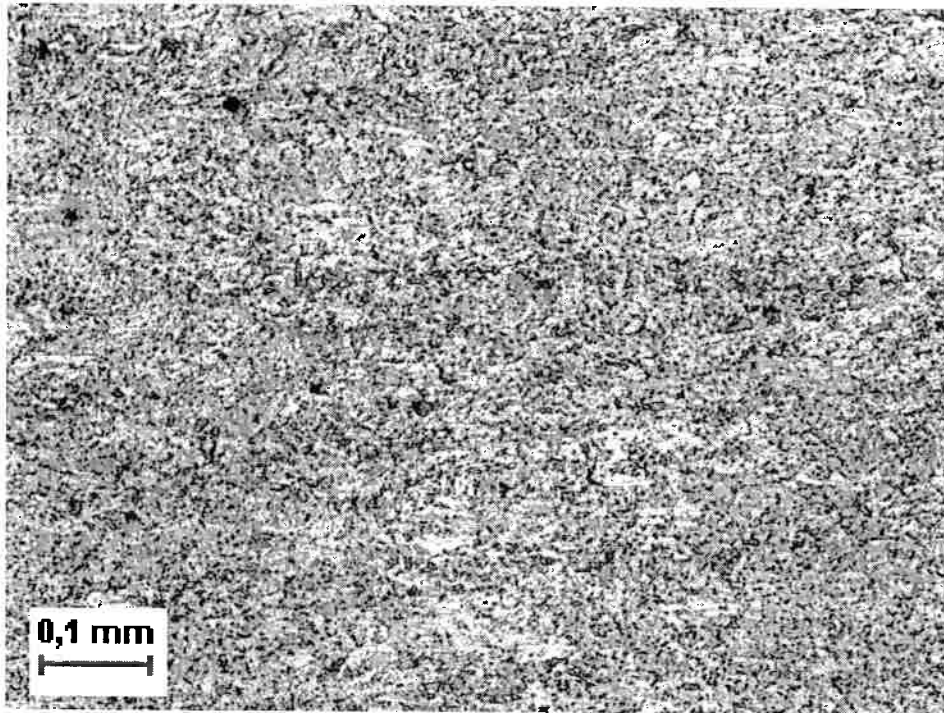


Figura 35 – Exame microestrutural de amostras dos tubos. MEV. Ataque: Nital 3%. Ampliação: 200x. Região analisada a $\frac{1}{4}$ da espessura do tubo. Corte transversal. Observam-se os diferentes tamanhos de grãos das fases presentes, assim como suas distribuições e morfologias. Amostras: 1 (CP 2539, acima) e 10 (CP 2570, abaixo).

6. Conclusões e Sugestões

- A composição química teve pequena variação de bobina para tubo e entre as amostras, portanto não foi possível relacioná-la com a variação das principais propriedades mecânicas avaliadas no estudo.
- Não foi constatada a relação linear entre LR e HV, e não se pôde traçar uma relação entre as medidas de dureza e suas variações de bobina para tubo com a variação das principais propriedades mecânicas.
- Bobinas com resistência mecânica elevada (altos valores de limites de escoamento e de resistência) tenderam a apresentar maiores perdas nos valores de LE e menores aumentos para o LR, sugerindo que o efeito Bauschinger é mais acentuado nesses casos.
- Os resultados sugerem que o efeito Bauschinger teve maior influência na variação do limite de escoamento do que para o limite de resistência, o que já tem sido verificado em estudos anteriores.
- Bobinas com elevada razão elástica tenderam a ter perdas maiores de limite de escoamento depois de conformadas em tubos.
- A razão elástica diminuiu para todas as amostras, já que o LE tende a diminuir, enquanto o LR tende a aumentar.
- A tenacidade do material (medida no ensaio de resistência ao impacto Charpy) apresentou tendência de queda para a maioria das amostras, o que já era esperado, devido ao encruamento (aumento da concentração de discordâncias no material) ocasionado pela conformação a frio das bobinas.
- A análise visual e qualitativa das microestruturas das amostras indica que a microestrutura mais favorável ao aumento da resistência mecânica dos tubos foi a de tamanho de grão mais refinado, com distribuição das fases mais homogênea (maior dispersão de segunda fase) e colônias equiaxiais e mais refinadas de agregado ferrita-cementita (perlita).
- A análise quantitativa da influência da microestrutura na variação das propriedades mecânicas pode ser feita por determinação do tamanho de grão e da fração de fases, apesar das dificuldades em se obter resultados confiáveis nessas análises, devido ao tamanho de grão refinado e difícil diferenciação das fases na microscopia óptica.

- Todas as amostras apresentaram segregação microestrutural em diferentes níveis na região do meio da espessura dos tubos, que pode ter sido causada por segregação química, resultado do lingotamento contínuo das placas na fabricação do aço.
- A causa da ocorrência dessa segregação pode ser determinada por análise química (por espectrometria de emissão óptica ou por WDS) de frações da amostra tiradas de diferentes regiões da espessura dos tubos, o que poderia evidenciar a presença de segregação química.
- Sugere-se o desenvolvimento de um estudo relacionando a segregação presente no aço e sua ação fragilizante nos ensaios mecânicos de tração e resistência ao impacto Charpy. Uma boa averiguação dessa relação é a realização da fractografia dos corpos de prova submetidos à ruptura nos respectivos ensaios.
- Um maior entendimento do comportamento mecânico de fratura das amostras/materiais pode ser obtido com a realização de fractografia quantitativa dos corpos de prova fraturados nos ensaios mecânicos de tração e Charpy. Essa análise se torna mais confiável se realizada com CP's retirados nas direções transversal e longitudinal.
- Uma boa forma de se relacionar microestrutura e variação de propriedades mecânicas de bobina para tubo é realizar a análise da microestrutura do material das bobinas, e não apenas dos tubos. Como a microestrutura muda durante a fabricação dos tubos (devido à conformação e à soldagem das bobinas), essa análise possibilita a relação entre microestrutura inicial e variação das propriedades.
- O exame microestrutural das amostras deveria ser realizado nas direções transversal e longitudinal, já que se trata de um material laminado, e que apresenta grande segregação microestrutural no meio da espessura (direção transversal). Devido a isso, essas direções apresentam microestruturas bem distintas entre si, o que gera mais parâmetros para o entendimento do estudo proposto pelo trabalho.
- Um maior entendimento da influência do efeito Bauschinger na fabricação dos tubos pode ser obtido pelo levantamento da curva tensão-deformação das bobinas considerando todas as etapas do processo de conformação dos

tubos. Com a retirada de amostras referentes a cada etapa do processo, e os resultados obtidos nos ensaios mecânicos, a influência do efeito Bauschinger e do encruamento na variação das propriedades mecânicas ocorrida no processo ficaria mais evidente e mensurável.

- Vale lembrar também que os valores dos ensaios mecânicos dos tubos são referentes aos CP's retirados de anéis dos tubos desempenados, portanto não correspondem exatamente às propriedades dos tubos em si, já que no desempenho dos anéis ocorre uma nova conformação a frio, que gera encruamento no material e induz a ocorrência do efeito Bauschinger.
- Como sugestão final, vale lembrar que é de suma importância realizar-se uma boa metodologia de amostragem nos procedimentos experimentais. Para esse estudo, o exemplo mais importante é o corte e a observação das amostras para a análise metalográfica. É fundamental que se saiba em qual sentido em relação ao tubo (transversal ou longitudinal) o corte e a observação estão sendo realizadas, e também qual região da espessura do tubo está sendo observada, pois o material apresenta diferentes microestruturas, dependendo do sentido e da região observada.

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. **Balanco Energético Nacional 2008: Ano base 2007 - Resultados Preliminares**. Rio de Janeiro: 2008. 44 p.
- [3] 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.
- [4] MARIANO, J. B. **Impactos Ambientais do Refino de Petróleo**. 2001. 261 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- [5] 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.
- [6] BRASIL. Ministério de Minas e Energia / Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2007: Ano base 2006 – Relatório Final**. Rio de Janeiro: 2007. 192 p.
- [7] TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. **Matriz energética brasileira: uma prospectiva**. *Novos Estudos – CEBRAP*, n.79. São Paulo: 2007.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] RITTMAN, R.; FREIER, K. **Niobum Containing Steels for Spiral and Electric Resistance Welded Line Pipe Production**. Development; Salzgitter Flachstahl GmbH 38239 Salzgitter, Germany.
- [12] RATNAPULI, R. C. **Considerações Metalúrgicas de Fabricação de Aços para Tubos API 5L**. Vitória: 62º Congresso Anual da ABM, Julho/2007.

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] WILLIAMS, J. G. **Advances in Steels for high strength ERW Linepipe Application in Australia.** Materials Forum Volume 31, 2007.
- [16] CONFAB INDUSTRIAL S.A. **Processos Produtivos - 001.** Pindamonhangaba: 2007. Arquivo .doc de circulação interna da empresa.
- [17] DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica.** Tradução de A. S. de S. e Silva, L. H. de Almeida e P. E. V. de Miranda. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 2ª Edição, 1981. 653 p.
- [18] BROWN, L.M. **Orowan's explanation of the Bauschinger effect.** ScriptaMetallurgica - Volume 11, Issue 2, February 1977, p. 127-131.
- [19] PYSHMINTSEV, Yu.; PUMPYANSKYI, D. A.; MARCHENKO, L. G.; STOLYAROV, V. I. **Strength and Bauschinger Effect in TMCP Line Pipe Steels.** Russian Research Institute for the Tube and Pipe Industries.
- [20] MARTIN, R. V.; LANDGRAF, F. J. G.; GOLDENSTEIN, H.; RAMIREZ, M. G.; RODRIGUES, A. C. P.; GORNI, A. A. **Caracterização Magnética do Aço X80 para Gasoduto.** Trabalho apresentando no Rio Pipeline Conference & Exposition 2007. Rio de Janeiro: 2007.
- [21] COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns.** 3ª ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1974. 412 p.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] ARAÚJO, C.S.; RODRIGUES, J.G. **Caracterização Microestrutural de Tubos ERW Fabricados com Aço API-X70.** Relatório Final de Estudo, Usiminas. Ipatinga: 2008.
- [25] SAGE, A. M. **Microalloyed Steels for Estructural Aplications.** Metals & Materials, 1989.

[26] SAGE, A. M. **Physical Metallurgy of high-strength, low-alloy line-pipe and pipe-fitting steels.** The Metals Society, 1983.

[27] MITCHELL, P. S. **The Effect of Vanadium on the Properties of Thick Wall API 5L X65-70 Linepipe.** Technical note.