

Izeds Bassetto

AVALIAÇÃO DA PERDA DE RESISTÊNCIA DA JUNTA SOLDADA EM TUBOS API 5L X70

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

02/2012

Izeds Bassetto

(Engenheiro Mecânico, Escola de Engenharia Mauá, 1975)

AVALIAÇÃO DA PERDA DE RESISTÊNCIA DA JUNTA SOLDADA EM TUBOS API 5L X70

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração:
Engenharia da Soldagem

Orientador:
Doutor Freddy Poetscher

São Paulo

02/2012

*"Maior que a tristeza de não haver vencido é a vergonha de não ter
lutado"*

Rui Barbosa

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Ana Maria e meus filhos Ized

Felipe e Ana Francisca.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Freddy Poetscher pela orientação e estímulo que permitiu a conclusão deste trabalho.

Ao professor Sérgio Duarte Brandi pelo estímulo e embasamento propiciado.

Aos amigos da Camargo Corrêa Marcelo Ricci e Ulisses Fernando de Souza pelo apoio na elaboração do TCC.

A minha família pelo estímulo, em especial ao meu filho Izeds Felipe que foi um grande companheiro de turma e que muito me apoiou durante o curso e realização do TCC.

A Camargo Corrêa que viabilizou a participação no curso de Especialização.

A TeamLab e LabMetal que realizaram os ensaios necessários a este trabalho.

Ao amigo Adelino "Paraná" da Tecnosolda pelo apoio prestado

CURRICULUM VITAE

Formação Acadêmica

Escola de Engenharia Mauá - 1975
Engenheiro Mecânico

Técnico em Construção de Máquinas e Motores - 1970
Escola Técnica Estadual Getúlio Vargas

Cursos de Extensão

Curso de Engenharia de Inspeção de Equipamentos e Caldeiraria - 1976
Petróleo Brasileiro SA – Petrobras

Curso de Engenharia de Segurança do Trabalho - 1979
Fundação Armando Álvares Penteado

Pós Graduação

MBA Gerenciamento de Projeto: Ênfase em Qualidade – 2008
Fundação Getúlio Vargas / PROMINP

Experiência Profissional

Construções e Comércio Camargo Corrêa SA – 2001 até o momento
Gerente da Qualidade em Obras de Dutos

Petróleo Brasileiro SA – Petrobras – de 1976 a 1998
Engenheiro de Equipamentos

RESUMO

Visando a redução de custos no transporte de combustíveis a indústria do petróleo vem utilizando cada vez mais dutos com maiores extensões e diâmetros gerando a necessidade de aços cada vez mais resistentes. Atualmente no Brasil diversos gasodutos e oleodutos têm sido construídos tubos API 5L X70 fabricados com aços ARBL – Alta Resistência Baixa Liga. As indústrias que começaram a atuar no ramo do petróleo no Brasil eram de origem Norte Americana e utilizaram as Normas API – American Petroleum Institute. A Norma API 5L Specification for Line Pipe normaliza as características físicas e químicas dos aços. Neste estudo foi conduzido para tubos API 5L X70. O grau X70 indica que o material do tubo apresenta um limite mínimo de escoamento de 70 ksi. Para garantir as propriedades necessárias de resistência, limite de escoamento, soldabilidade e tenacidade, os aços ARBL têm sido produzidos com baixo teor de carbono, adição pequenas quantidades de elementos de ligas e refinamento de grão. O refinamento de grão é obtido com a associação da composição química com tratamento termomecânico gerados na laminação controlada e resfriamento acelerado. Esta combinação gera uma microestrutura, para os aços de tubos API 5L X70, ferítica-perlítica alongada com grãos de tamanho na ordem de 5 micras. Os aços ARBL produzidos para tubos API 5L X70 tem uma microestrutura suscetível ao efeito Bauschinger. O efeito Bauschinger, nos aços pré-deformados por tração, caracteriza-se por apresentar um limite de escoamento à compressão inferior ao limite de escoamento atingido na pré-deformação. Neste trabalho procura-se analisar as

consequências estruturais dos dutos devido às alterações do efeito Bauschinger na ZAC da junta circunferencial. A análise foi baseada em dados gerados em recentes construções de dutos terrestres. Foram analisados os dados obtidos na qualificação, de curvas efetuadas em tubos, curvados por aquecimento por indução. Foram realizados ensaios metalográficos da ZAC e metal base de nipples oriundos de dutos, ensaios de dureza e de tração. Foi analisado um lote de tubos, buscando através de estudo estatístico com o software Minitab, verificar a correlação entre a composição química do aço, suas propriedades mecânicas e processo de laminação controlada com resfriamento acelerado.

ABSTRACT

To reduce the transport cost the oil industry is applying oil pipe lines longer and wider creating the need of stronger steels. Currently in Brazil several gas and oil pipes have been manufacture with API 5L X70 pipes made of high strength low alloy steels (HSLA). The first companies in Brazil to work at this field came from United States and uses API standards, American Petrol Institute. The API 5L Specification for Line Pipe gathers steel mechanical and chemical properties. This paper studies API 5L X70 pipes. X70 grade indicates that pipe material has a minimum yield point of 70Ksi. To assure the toughness, yield point, weldability and tenacity needed properties, the HSLA have been produced with low carbon and alloy content and grain refinement. Grain refinement is obtained with the join of chemical composition and thermo-mechanical treatment, caused by controlled hot work and fast cooling. This combination creates a long ferritic-perlitic microstructure with grain size of 5 microns for API 5L X70 steel pipes. HSLA steels produced for API 5L X70 pipes has a Bauschinger effect susceptible microstructure. Bauschinger effect is characterized by present a yield point lower than the one achieved before the pipe cold work, pre-stress. This paper brings the consequent pipe structural analysis caused by Bauschinger effect alterations in circumferential weld join TAZ. The analyzed data were obtained from the pipes induction heating curvature qualification. Metallographic tests were made from pipe nipples coupons and hardness test samples of ZAT and base material. Through Minitab,

statistical software, were searching steels correlation from chemical, mechanical properties and thermomechanical controlled rolled.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1.1- Evolução de graus API ao longo dos anos [7]	11
Figura 4.4.1- Desenvolvimento dos aços API 5L, elementos de liga e rota de produção [9].....	19
Figura 4.4.2 – Diagrama de temperature-tempo mostrando as etapas da laminação controlada: reaquecimento, laminação de desbaste, laminação de acabamento e resfriamento [12]	20
Figura 4.5.1 – Fluxo de laminação das chapas grossas da série Sincron da Usiminas – Usina de Ipatinga [22]	21
Figura 4.5.2 - Efeito dos principais elementos microligantes na temperatura de recristalização [12]	22
Figura 4.5.3 - Curvas de resfriamento do processo CLC no equipamento acelerado da Usiminas [22]	23
Figura 4.5.4 – Estrutura metalográfica de aços ARBL, laminação convencional e CLC – Continuos on-line control , patente Nippon Steel para chapas, produzidas pelo processo de laminação controlada e resfriamento acelerado [22]	23
Figura 4.6.1.1 - Desenho esquemático das quatro etapas de conformação a frio do processo UOE [2]	24
Figura 4.6.1.2 - Esquema de fabricação de tubos UOE. Catálogo Tenaris Confab [20].....	25
Figura 4.6.1.3 – Ilustração da poça de fusão do processo de soldagem SAS [1].	26
Figura 4.6.1.4 - Soldagem por arco submerso, com múltiplos arames – Processo Tandem [34].	27
Figura 4.7.1.1 A e B – Diagrama de tensão deformação, figura A para um aço no primeiro ciclo e a figura B para uma aço pré deformado [4].	29
Figura 4.7.2.1 – Gráfico Tensão x Deformação para: tração, tração após o descarregamento e compressão após a tração [3].....	30
Figura 4.7.2.2 - Ilustração do efeito Bauschinger. Fig, "a" teoria das tensões internas. Fig. "b" teoria das discordâncias [18].....	31
Figura 5.1.1 A – Vista de máquina de curvamento por indução da Protubo [21]	44
Figura 5.1.1 B- Vista da máquina de curvamento por indução da Protubo [21]	44
Figura 5.2.1 A - Vista de máquina de curvamento a frio com comando hidráulico.....	45
Figura 5.2.1 B - Vista de máquina de curvamento a frio com comando hidráulico.....	46
Figura 5.3.1 - Vista do lançamento de um duto de 24" na vala	47
Figura 5.3.2 - Vista do lançamento de um duto de 24" na vala	47
Figura 6.1.1 - Posição dos corpos de provas removidos das curvas a quente	53
Figura 6.3.1.1 - Micrografia 200X do metal base da junta do tubo API 5L X70 PSL 2 de 28". Ataque com nital 2%	55
Figura 6.3.1.2 - Micrografia 200X na ZAC da junta do tubo API 5L X70 PSL 2 de 28". Ataque nital a 2%	56

Figura 6.3.1.3 - Micrografia 100X do metal base da junta do tubo API 5L X70 PSL 2 de 24", ataque de nital a 2%	56
Figura 6.3.1.4 - Micrografia 1000X do metal base da junta do tubo API 5L X70 PSL 2 de 24", ataque de nital a 2%	57
Figura 6.3.1.5 - Micrografia 1000X do metal base da junta do tubo API 5L X70 PSL 2 de 24", ataque com Klemm 1.....	58
Figura 6.3.1.6 - Micrografia 1000X da ZAC da junta do tubo API 5L X70 PSL 2 de 24", ataque com Klemm 1.....	58
Figura 6.3.1.7 - Micrografia 500X da ZAC do tubo API 5L X70 PSL 2 de 24", ataque com Klemm 1.....	59
Figura 6.3.2.1 - Macrografia da junta do tubo API 5L X70 PSL de 24".....	60
Figura 6.3.2.2 - Gráfico Tensão x Deformação, do tubo API 5L X70 de 24"..	61
Figura 6.3.2.3 - Gráfico Tensão x Deformação da junta do tubo API 5L X70 de 24"	61
Figura 6.5.1 - Gráfico de dispersão dos dados e linha de tendência.....	63
Figura 6.5.2 - Gráfico da distribuição dos dados do percentual de carbono ..	64
Figura 6.5.3 - Gráfico da dispersão do percentual de carbono.....	64
Figura 6.5.4 - Gráfico da distribuição do percentual de carbono equivalente	65
Figura 6.5.5 - Gráfico de dispersão do percentual de carbono equivalente.....	65
Figura 6.5.6 - Gráfico da distribuição do Limite de escoamento.....	66
Figura 6.5.7 - Gráfico da Dispersão do Limite de Escoamento.....	66
Figura 6.5.8 - Gráfico da distribuição do Limite de resistência.....	67
Figura 6.5.9 - Gráfico de dispersão do Limite de Resistência.....	67
Figura 6.5.10 - Gráfico da distribuição do alongamento.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.2.1.1 - Composição Química de aço para Tubos API 5L X70 PSL 1 espessuras ≤ 25 mm	14
Tabela 4.2.1.2 - Composição Química de aço para Tubos API 5L X70 PSL 2 espessuras ≤ 25 mm	14
Tabela 4.2.2.1 - Resultados Requeridos para Ensaio dos Aços API 5L X70 PSL 1	15
Tabela 4.2.2.2 - Resultados Requeridos Para Ensaio Dos Aços API 5L X70 PSL 2	15
Tabela 4.4.1 - Tabela com elementos de liga normalmente utilizados nos aços ARBL	18
Tabela 4.8.2.1 - Fator de Projeto, conforme a Norma NBR 15280	34
Tabela 4.8.2.2 - Fator de eficiência de junta conforme Norma NBR 15280	35
Tabela 4.8.2.3 - Pressões de Ensaio Hidrostático, conforme Norma NBR 15280	35
Tabela 4.8.3.1 - Fator de Eficiência de Junta "E". conforme a Norma ASME B 31.4	36
Tabela 4.8.3.2 - Ensaio Hidrostático, conforme Norma ASME B 31.4	37
Tabela 4.8.4.1 - Fator de Projeto em função da classe de locação, conforme a Norma ABNT NBR 12712	38
Tabela 4.8.4.2 - Fator de Eficiência de junta, conforme a Norma ABNT NBR 12712.....	38
Tabela 4.8.4.3 – Fator de temperature T, conforme a Norma ABNT NBR 12712.....	39
Tabela 4.8.4.4 - Pressões para Ensaio Hidrostático, conforme a Norma ABNT NBR 12712	39
Tabela 4.8.5.1 - Fator de Projeto em função da Classe de Locação, conforma a Norma ASME B 31.8	40
Tabela 4.8.5.2 - Fator de eficiência de junta, em função do tubo, conforme a Norma ASME B31.8	41
Tabela 4.8.5.3 - Fator de Temperatura, conforme a Norma ASME B 31.8	41
Tabela 4.8.5.4 - Pressões para Ensaio Hidrostático, conforme a Norma ASME B 31.8.	42
Tabela 6.1.1 A - Resultado dos ensaios mecânicos da primeira qualificação das curvas por indução em tubo API 5L X70 28", 15,9 mm de espessura PSL 2....	51
Tabela 6.1.1 B - Resultado dos ensaios mecânicos da primeira qualificação das curvas por indução em tubo API 5L X70 28", 12,7 mm de espessura PSL 2	52
Tabela 6.1.2 - Tabela de propriedades mecânicas reduzidas, acrescida das variações proporcionais do LE e LR da região aquecida.....	53
Tabela 6.3.2.1 - Perfil de Dureza Vickers HV10, levantado na junta do tubo API 5L X70 PSL 2 de 28"	60
Tabela 6.3.2 - Propriedades mecânicas dos ensaios de tração realizados no tubo e na junta do tubo API 5L X70 de 24"	61
Tabela 6.5.1 - Correlação: LE (PSI), Carbono (%), Carbono Equivalente, LR (PSI), Alongamento	68

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
API:	American Petroleum Institute
ARBL:	Alta Resistência – Baixa Liga
ASTM:	American Society For Testing And Materials
ASME:	American Society of Mechanical Engineers
C:	Carbono
CE:	Carbono Equivalente
CLC:	Continuous on-line Control
CNP:	Conselho Nacional do Petróleo.
ERW:	Electrical Resistance Welding
FCAW-G:	Flux Cored Arc Welding – Gas Shielded
FCAW-S:	Flux Cored Arc Welding – Self Shielded
GMAW:	Gas Metal Arc Welding
GTAW:	Gas Tungsten Arc Welding
HSLA:	High Strength – Low Alloy
IIW:	International Institute of Welding
LE:	Limite de Escoamento
LR:	Limite de Resistência
MA:	Martensita – Austenita

MIG:	Metal Inert Gas
MAG:	Metal Active Gas
Pcm:	Critical Metal Parameter
PSL:	Product Specification Level
RQPS:	Relatório de Qualificação de Procedimento de Soldagem
SAW:	Submerged Arc Welding
SMAW:	Shielded Metal Arc Welding
SMY:	Minimum Strength Yield
TMCR:	Thermomechanical Controlled Rolling
UOE:	Dobramento em "U", Dobramento em "O" e Expansão "E"
ZAC:	Zona Afetada pelo Calor
$\beta\sigma$:	Parâmetro de Tensão Bauschinger
σ_e :	Tensão de Escoamento
σ_p :	Tensão de Pré-deformação
σ_r :	Tensão de Ruptura

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS	iii
CURRICULUM VITAE.....	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	xii
SUMÁRIO.....	xiv
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. OBJETIVO:.....	5
3. HISTÓRICO.....	6
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
4.1 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL)	9
4.2 AÇOS PARA TUBOS API 5L.....	12
4.2.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	14
4.2.2 VALORES DE PROPRIEDADES MECÂNICAS	15
4.3 REQUISITOS DO API 1104 – WELDING OF PIPELINES AND RELATED FACILITIES.....	16
4.4 ASPECTOS METALÚRGICOS DO PROCESSAMENTO DOS AÇOS ARBL	17
4.5 FABRICAÇÃO DE CHAPAS DE AÇOS ARBL	21
4.6 FABRICAÇÃO DOS TUBOS.....	23
4.6.1 TUBOS UOE SOLDADOS POR ARCO SUBMERSO.....	24
4.7 DEFORMAÇÃO PLÁSTICA E O EFEITO BAUSCHINGER.....	28
4.7.1 TEORIA DA PLASTICIDADE.....	28
4.7.2 - EFEITO BAUSCHINGER	29
4.8 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DOS DUTOS.....	32
4.8.1. ENSAIO DE PRESSÃO	33
4.8.2. NORMA ABNT NBR 15280-1 DUTOS TERRESTRE PARTE 1-PROJETO.	34
4.8.3. NORMA ASME B 31.4 – PIPELINE TRANSPORTATION SYSTEMS FOR LIQUID HYDROCARBONS AND OTHER LIQUIDS.....	35
4.8.4. NORMA ABNT NBR 12712 – PROJETO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE GÁS COMBUSTÍVEL	37
4.8.5 ASME B 31.8 – GAS TRANSMISSION AND DISTRIBUTION PIPING SYSTEMS	39
5. METODOLOGIA E PRÁTICAS DE MONTAGEM	42
5.1. CURVAS REALIZADAS A QUENTE COM AQUECIMENTO POR INDUÇÃO	42
5.2. CURVAS REALIZADAS A FRIO	44
5.3 TENSÕES NO DUTO	46
5.4 ENSAIOS DE TRAÇÃO E METALOGRAFICOS.	48
5.5 TRATAMENTO ESTATÍSTICO.....	49
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
6.1. AVALIAÇÃO DOS TUBOS CURVADOS A QUENTE	51
6.2 CURVAS EFETUADAS A FRIO.....	54

6.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA	55
6.3.1 MICROGRAFIAS	55
6.3.2 MACROGRAFIA, PERFIL DE DUREZA E ENSAIO DE TRAÇÃO	59
6.4 EFEITO BAUSCHINGER.....	61
6.5 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE DADOS.....	63
6.6 TENSÕES NO DUTO.	69
7. CONCLUSÃO	71
8. SUGESTÃO DE NOVO TRABALHO	72
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
10. ANEXO I.....	78

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Visando a redução de custos nas construções de dutos, a indústria vem utilizando aços de maior resistência. Na indústria do petróleo, no Brasil, os dutos têm sido construídos com aços API 5LX grau 70, com tensão de escoamento mínimo de 70 ksi. A indústria já começa a se preparar para a montagem de dutos com tubos API 5L X80.

Para a fabricação de tubos API 5L X70 PSL 2 pelo processo UOE são utilizadas chapas de aços ARBL – Alta resistência Baixa Liga, que atingem altos níveis de resistência, apresentam alta tenacidade e boa soldabilidade. Para obtenção das características mecânicas os tubos combinam a composição química com o tratamento termomecânico obtido durante a laminação controlada e resfriamento acelerado. Nos tubos com costura longitudinal, as boas características mecânicas são parcialmente desfeitas na ZAC – Zona Afetada pelo Calor da junta, mas a resistência mecânica é reestabelecida pelo escoamento do tubo durante a expansão mecânica do tubo.

Neste trabalho procura-se avaliar qual a consequência da perda de resistência mecânica na ZAC da junta circumferencial nos dutos construídos com tubos fabricados com aços ARBL. Os tubos com estrutura policristalina estão sujeitos ao efeito Bauschinger que eventualmente também pode afetar a montagem dos dutos. Os maiores níveis de solicitação do duto são atingidos durante o teste hidrostático, quando a linha é submetida a pressões até o aço atingir tensões próximas ao limite de escoamento.

Os dados utilizados foram obtidos em três obras de construção de dutos, a primeira foi na construção de um gasoduto em 2004, a segunda na construção de um gasoduto em 2008 e a terceira na construção de um duto de líquidos em iniciado em 20011.

Nas três obras foram utilizados tubos API 5L X70 PSL 2, com solda longitudinal e fabricados pelo processo UOE.

A perda da resistência mecânica foi observada inicialmente no processo de curvamento a quente, utilizado na obra do gasoduto de 2004. As curvas de raio curto, da ordem de 5 diâmetros, são fabricadas a partir de tubos da própria obra aquecidos por indução. O procedimento de curvamento é qualificado a partir dos tubos da obra para cada espessura. Na obra do gasoduto Campinas Rio foram qualificadas curvas de tubos API 5LX grau 70 PSL 2 com diâmetro de 28" e espessuras de 0,500" e 0,625". Os tubos foram curvados na Protubo.

Na primeira etapa foram escolhidos tubos aleatoriamente. Durante a qualificação constatou-se a redução da tensão de escoamento abaixo dos limites definidos pelo código de construção ASME B 31.8.

A temperatura de aquecimento por indução para o curvamento é da ordem de 1000 °C. Apesar do resfriamento efetuado junto à bobina de indução, o encruamento é parcialmente eliminado, causando a redução da tensão de escoamento abaixo do limite da fabricação do tubo.

Após estudo efetuado pela empresa de curvamento, para a nova qualificação foram alterados os parâmetros de aquecimento e resfriamento e foram selecionados tubos com maior carbono equivalente 0,4%.

Analizando-se a lista de tubos de aço API 5L X70 PSL 2, de 28" de diâmetro e 0,625" de espessura, fornecidos para o gasoduto verificou-se que, aparentemente, não há correlação entre a tensão de escoamento, tensão de ruptura e o nível de carbono e o nível de carbono equivalente.

Mais recente obra de construção de um gasoduto de 68 km, com aproximadamente 4600 juntas soldadas, foram recebidos tubos também de 28" aço API 5L X70, com tensão de escoamento variando entre 71 e 85 ksi. Para a confecção de curvas a quente foram selecionados os tubos com maior sobresspessura e carbono equivalente acima de 0,4% - Pcm.

Aproveitando-se os dados tabelados desta obra, através de dados estatísticos, buscamos avaliar a correlação entre o percentual de carbono, o carbono equivalente, o limite de escoamento, o limite de resistência e o alongamento.

As simulações efetuadas indicam haver correlação entre o σ_r com o %C e com o %CE, mas não entre o σ_e com o %C e CE. O limite de resistência é correlacionado com a composição química, dentro da rota de produção de laminação controlada com resfriamento acelerado.

O limite de escoamento das chapas somente é medido durante o processo de fabricação. Para aprovação do relatório de qualificação do procedimento de soldagem – RQPS, a referência é o limite de resistência e não o de escoamento.

O dutos no Brasil são construídos basicamente com os códigos: ASME B 31.4 [28] / ASME B 31.8 [29]; NBR 15280 [22] e NBR 12712 [24]. Todos eles adotam as práticas de soldagem do API 1104 [26].

Foram efetuados ensaios de tração e metalográficos de juntas soldados buscando verificar a perda de resistência na ZAC da junta circunferencial e a consequência desta perda no duto montado.

2. OBJETIVO:

Avaliação das consequências da redução da tensão de escoamento na ZAC de soldas circunferenciais, na montagem de dutos com tubos fabricados pelo processo UOE, com aços de alta resistência, sujeitos ao efeito Bauschinger utilizados na construção de dutos enterrados.

3. HISTÓRICO

O petróleo, assim como o betume e o asfalto, são conhecidos desde os primórdios da civilização. O betume foi usado por Nabucodonosor como material de liga na construção dos Jardins Suspensos da Babilônia, também era usado na impermeabilização de embarcações. Os egípcios usaram para embalsamar os mortos e na construção de pirâmides. Marcopolo descreveu o mercado de petróleo em Baku, no atual Azerbaijão. A indústria do petróleo surgiu nos Estados Unidos com a descoberta de petróleo em um poço em Tuttsville, Pensilvânia em 1849, por Edwin Drake. O petróleo começou a ser destilado para obtenção de querosene, que era utilizado para iluminação e também com fins medicinais como tônico cardíaco e remédio para cálculos renais, todos os demais derivados eram jogados fora. No Brasil a primeira concessão para perfuração de petróleo foi outorgada por Dom Pedro II em 1858, mas a primeira perfuração de um poço de petróleo ocorreu em Bofete, São Paulo, entre 1892 e 1897. O petróleo efetivamente foi encontrado no Brasil em Lobato, na Bahia, em 1939. O consumo de combustíveis no Brasil passou a ter relevância após o término da Primeira Guerra Mundial devido à expansão da malha rodoviária e do uso de caminhões. O consumo de combustíveis fosseis aumentou gradativamente na década de 50. No período, o consumo era de 170.000 barris por dia, quase todo constituído por derivados de petróleo importados, enquanto a produção nacional de petróleo era de 2.700 barris por dia. Nesta época, a grande dependência brasileira de petróleo importado fez com que a logística de refino ficasse instalada primordialmente no litoral. Com o

aumento da demanda do consumo de combustíveis o transporte efetuado por caminhões e trens começou a ser substituído pelo transporte dutoviário. Os dutos são o meio mais econômico e seguro para o transporte de grandes volumes a grandes distâncias de petróleo e seus derivados, líquidos ou gasosos. A utilização do transporte dutoviário possibilita a retirada das estradas de centenas de caminhões. Oficialmente a história dos oleodutos começou no Brasil com o Conselho Nacional do Petróleo - CNP, que em 1946 analisou o anteprojeto dos oleodutos entre Santos e São Paulo. No final dos anos quarenta, foi instalado o oleoduto Candeias-Mataripe, com diâmetro de 6" e extensão de 4 km. O projeto dos oleodutos Santos a São Paulo foi elaborado pela firma Willian Brothers de Tulsa – USA, com praticamente todo material adquirido dos Estados Unidos. A indústria do petróleo no Brasil até 1968 era conduzida por técnicos estrangeiros. A partir de 1968 os técnicos estrangeiros passaram a ser substituídos por técnicos brasileiros especializados no exterior. Os dutos no Brasil foram projetados pelas Normas da American Society of Mechanical Engineers ASME, sendo a ASME B 31.4 - Pipeline Transportation Systems For Liquid Hydrocarbons and Other Liquids para transporte de líquidos e a ASME B 31.8 – Gas Transmission and Distribution Piping Systems para transporte de gases. Para a construção dos dutos foram adotadas as Normas do American Petroleum Institute, o API 1104 – Welding of Pipelines and Related Facilities, o API 1110 – Pressure Testing of Liquid Petroleum Pipelines para o teste de dutos e o API 5L – Specification for Line Pipe, para a fabricação de tubos para a construção de dutos. Somente em 1993 foi emitida a Norma NBR 12712 para Projeto de Sistemas de Transmissão e Distribuição de gás

combustível, a NBR 15280-1 Dutos Terrestre Parte 1: Projeto, em 2009 e a NBR 15280-2 Dutos Terrestres Parte 2: Construção e Montagem, em 2005. Com o aumento dos volumes transportados e a distâncias cada vez maiores os dutos passaram a ter maiores diâmetros e são construídos com aços mais resistentes, para ficarem com espessuras menores. As chapas utilizadas no Brasil para fabricação dos tubos API 5L X70 atingem a tensão mínima de escoamento de 70 ksi no processo de laminação controlada com resfriamento acelerado.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL)

Os aços de Alta Resistência e Baixa Liga, são aços que atingem altos níveis de resistência, combinados com alta tenacidade e boa soldabilidade. Os aços ARBL possuem baixo teor de carbono e são obtidos através da adição de pequenas quantidades de elementos de liga e atingem limites de escoamento acima de 276 MPa. As propriedades dos aços ARBL também resultam de tratamentos termomecânicos e são obtidas principalmente pelo refino de grão, endurecimento por solução sólida e precipitação. Os tubos fabricados dentro da Norma API 5LX enquadram-se na classificação de aço ARBL.

No final da década de 40 foi criada a especificação API 5L. A partir daí os aços ARBL vem sofrendo constante evolução. No início do século 20 a produção dos aços estruturais de alta resistência era embasada no limite de resistência, desconsiderando a soldabilidade e tensão de escoamento. O teor de carbono era da ordem de 0,3% e o de manganês na faixa de 0,7% a 1,2%. O aumento da resistência era obtido pelo aumento da quantidade de perlita e apesar de serem fabricados por laminação não havia controle de temperatura. Com a substituição das uniões rebitadas por juntas soldadas começaram a surgir os problemas de fraturas frágeis, levando à busca de melhor tenacidade dos aços. Paralelamente passou-se a considerar que os altos limites da tensão de escoamento eram mais importantes do que os altos limites dos limites de resistência.

Os aços para tubos API 5L abrangem os graus A25; A; B; X42; X46; X52; X56; X60; X65; X70; X80; X90; X100 e X120. Para os graus "X" os algarismos representam a tensão mínima de escoamento do aço em ksi. Durante a década de 60 a maior parte dos dutos de alta pressão foram produzidos com aços semi-acalmados sem requisitos de tenacidade e teor médio de carbono de 0,16%. Atualmente o teor de carbono dos aços ARBL vem sendo reduzido até a ordem de 0,05%, obtendo-se melhoras substanciais na soldabilidade, porém com o aumento da razão elástica do tubo (LE/LR). O aumento da razão elástica diminui a capacidade do aço de tolerar deformações plásticas.

A evolução dos aços para tubos API ocorreu com a adição de elementos microligantes, como o Nb, V e Ti. Baixas quantidades destes elementos, da ordem de 0,01% a 0,1%, propiciam aumentos significativos nas propriedades mecânicas dos aços. Estes elementos tem que ser mantidos em pequenas quantidades pois formam carbonetos e nitretos de baixa solubilidade no aço. Nos aços microligados a perlita é substituída por outros mecanismos de endurecimento pelo refino do grão ferrítico e precipitações, melhorando muito a tenacidade. Paralelamente a laminação passou a ser controlada com resfriamento acelerado gerando o tratamento termomecânico melhorando o limite de escoamento, tenacidade e soldabilidade. Estas propriedades passaram a ser associadas a uma determinada rota de produção.

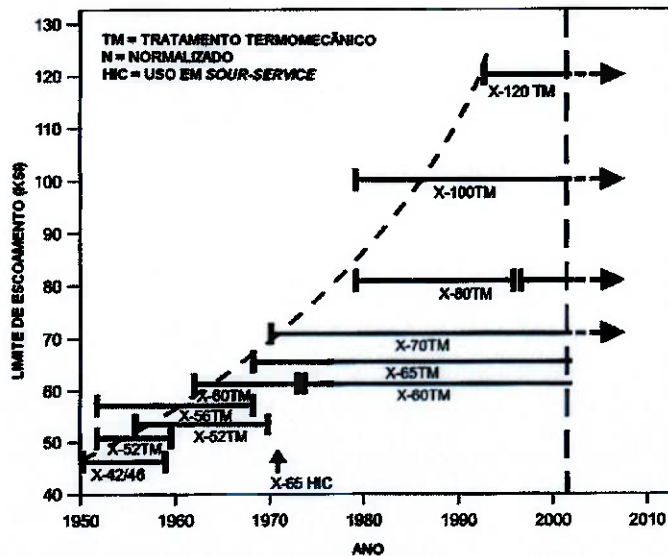


Figura 4.1.1- Evolução de graus API ao longo dos anos [7]

A composição dos aços ARBL pode variar com a espessura da chapa, para atender requisitos mecânicos. Os teores de carbono normalmente situam-se entre 0,05% e 0,12% e o teor de manganês até 2%, conferindo boa soldabilidade. Os aços são produzidos com a combinação de adições de Cr; Ni; Mo; Cu; N; V; Nb; Ti e Zr.

Os aços ARBL para a construção de dutos podem ser classificados em três grupos [2]:

1. Microligados ferríticos-perlíticos com adições de até 0,15% de elementos formadores de carbeto e carbonitreto, como o Nb, V e Ti para endurecimento por precipitação, refino de grão e controle da temperatura de transformação;
2. Ferríticos, bainíticos de baixo carbono ou ferrita circular, com carbono inferior a 0,05%, que conferem alta tensão de escoamento (da ordem de 100 ksi), boa soldabilidade, formabilidade e boa tenacidade;
3. Multifásicos com matriz ferrítica, com dispersão de regiões martensíticas, bainíticas e carbonetos precipitados, que resultam em alta

resistência e boa tenacidade. Os aços de classe X100 e X120 ainda não tem sido aplicados comercialmente.

4.2 AÇOS PARA TUBOS API 5L

A Norma API – Specification for Line Pipes, do American Petroleum Institute (API), foi especificamente desenvolvida para aplicação em dutos. A norma de 2007 aplica-se a tubos com e sem costura e define dois níveis de qualidade: PSL 1 e PSL 2. Para o PSL 1 são especificados os requisitos mínimos de escoamento e resistência. Para o PSL 2 são especificados os limites mínimos e máximos de escoamento e de resistência, além de requisitos mandatórios: para carbono equivalente, tenacidade (ensaio de impacto Charpy). Os limites da composição química possuem ligeiras diferenças entre os dois padrões, conforme tabela 4.2.1.1 e 4.2.1.2.

Conforme o API 5L, o carbono equivalente dos aços PSL 2 devem ser calculados pela fórmula do Pcm para teores de carbono menores ou iguais a 0,12% e pela fórmula do IIW para teores de carbono acima de 0,12%.

A fórmula Pcm é conhecida como a fórmula de Ito-Bessyo. Foi desenvolvida no Japão na década de 60, especificamente para os novos aços com teores de carbono mais baixos.

A fórmula IIW é conhecida como a fórmula do International Institute of Welding. Foi desenvolvida na década de 40, para aços normalizados de alto teor de carbono.

$$CE_{Pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15}$$

Os símbolos dos elementos representam o percentual em massa.

Os limites impostos para composição química e propriedades mecânicas garantem boas características de soldabilidade e curvamento do tubos no campo, melhorando a performance de construção do duto, Freire [2].

As normas API foram adotadas por praticamente todas as empresas de petróleo do Brasil, pela origem norte americana das principais empresas, e pela inexistência de norma brasileira. Apenas recentemente passou a existir norma brasileira para a construção de gasodutos e oleodutos. As normas API abrangem todas as etapas desde o projeto, construção, operação e manutenção de um duto. São abordados aspectos dimensionais, composição química, propriedades mecânicas, diretrizes de ensaios mecânicos, critérios de aceitação e marcação. As normas brasileiras de projeto e construção de dutos: ABNT 12712 e 15280 1/2, respectivamente para gasodutos e oleodutos, são baseadas nas normas ASME B 31.8 e B 31.4 que adotam as normas API para montagem dos dutos e fabricação dos tubos.

A norma API 5L estabelece os limites de expansão dos tubos fabricados pelo processo UOE. O processo UOE é descrito em 4.6.1. A relação de expansão a frio "r" deve estar entre 0,015 e 0,003, considerando:

$$r = \frac{(D_d - D_a)}{D_a}$$

Onde:

D_a é o diâmetro externo do tubo antes da expansão

D_d é o diâmetro externo depois da expansão

4.2.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A tabela 4.2.1.1 apresenta os limites da concentração dos elementos de liga especificados pelo API 5L para os aços de fabricação de tubos API 5L X70 PSL 1 e a tabela 4.2.1.2 para tubos API 5L X70 PSL 2.

Tabela 4.2.1.1 - Composição Química de aço para Tubos API 5L X70 PSL 1
espessuras ≤ 25 mm

Especificação PSL 1	Fração em Massa %					
	C	Mn	P	S	V+N _b	V+N _b +T _i
	máx	máx	máx	Máx	$\leq$	$\leq$
Sem costura	0,28	1,40	0,03	0,03	0,06	0,15
Soldados	0,26	1,65	0,03	0,03	0,06	0,15

Notas:

- Para cada redução de 0,01% abaixo da máxima concentração de carbono é permitido um acréscimo de 0,05% na concentração de manganês até o limite de 2%.
- Concentrações máximas: cobre 0,5%; Níquel 0,5%; Cromo 0,5%; Molibdênio 0,15%

Tabela 4.2.1.2 - Composição Química de aço para Tubos API 5L X70 PSL 2
espessuras ≤ 25 mm

Espec. PSL 2	Fração em Massa %								CE	
	C	Si	Mn	P	S	V+N _b	V+N _b +T _i	Outros	Máx	
	máx	máx	máx	máx	máx	$\leq$	$\leq$		IIW	P _{cm}
S/cost e Soldado	0,18	0,45	1,80	0,025	0,015	0,06	0,015	b	0,43	0,25
Soldado	0,12	0,45	1,70	0,025	0,015	0,06	0,015	b	0,43	0,25

Notas:

- Para cada redução de 0,01% abaixo da máxima concentração de carbono é permitido um acréscimo de 0,05% na concentração de manganês até o limite de 2%.
- Concentrações máximas: cobre 0,5%; Níquel 0,5%; Cromo 0,5%; Molibdênio 0,15%

4.2.2 VALORES DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

A tabela 4.2.2.1 apresenta os limites requeridos para os ensaios mecânicos especificados pelo API 5L para os aços de fabricação de tubos API 5L X70 PSL 1 e a tabela 4.2.2.2 para tubos API 5L X70 PSL 2.

Tabela 4.2.2.1 - Resultados Requeridos para Ensaios dos Aços API 5L X70 PSL 1

Grau do Tubo	Tubo sem costura e soldado		
	Tensão de escoamento(*)	Tensão de Ruptura	Alongamento
	Mínimo (Ksi) MPa	Mínimo (Ksi) MPa	Mínimo %
X70	(70,3) 485	(82,7) 570	A _f

Nota (*) A tensão de escoamento é a tensão nominal que provoca um alongamento de 0,5%, sob carga.

Alongamento para Unidades Inglesas

$$A_f = 625000 \frac{A^{0,2}}{82,7^{0,9}}$$

Alongamento para Unidades do SGI

$$A_f = 1940 \frac{A^{0,2}}{570^{0,9}}$$

Onde

A é função da seção transversal sujeita à tensão de teste, em pol² para unidades inglesas ou mm² para unidades do SGI.

Para maiores detalhes ver Tabela 6 do API 5L:2007

Tabela 4.2.2.2 - Resultados Requeridos Para Ensaios Dos Aços API 5L X70 PSL 2

Grau do Tubo	Tubo sem costura e soldado					Relação tensão escoamento / tensão ruptura	Alongamento %
	Tensão de escoamento(*)		Tensão de Ruptura				
	(Ksi) MPa		(Ksi) MPa				
	Mín.	Max.	Mín.	Max.			
X70	(70,3)485	(92,1)625	(82,7)570	(110,2)760	0,93	A _f	

Notas: (*) A tensão de escoamento é a tensão nominal que provoca um

alongamento de 0,5%, sob carga. Para aços grau X90 e maiores é a tensão que provoca uma deformação elástica de 0,2%.

Alongamento para Unidades Inglesas

$$A_f = 625000 \frac{A^{0,2}}{82,7^{0,9}}$$

Alongamento para Unidades do SGI

$$A_f = 1940 \frac{A^{0,2}}{570^{0,9}}$$

Onde

A é função da seção transversal sujeita à tensão de teste, em pol² para unidades inglesas ou mm² para unidades do SGI.

Para maiores detalhes na Tabela 7 do API 5L:2007

4.3 REQUISITOS DO API 1104 – WELDING OF PIPELINES AND RELATED FACILITIES

A Norma API 1104 é referenciada pelas Normas ABNT NBR 12712 e ASME B 31.8 para construção de gasodutos e pelas Normas NBR 15280 1/2 e ASME B 31.4 para construção de oleodutos.

A tensão de ruptura da solda, incluindo a zona fundida de cada corpo de prova, tem que ser igual ou maior do que a tensão mínima especificada para o material do tubo, mas não precisa ser igual ou maior do que a resistência real do tubo ensaiado.

Se o corpo de prova rompe no material do tubo, fora da solda e da zona afetada pelo calor, e encontra a tensão mínima requerida pela especificação, a junta é considerada aprovada.

Conforme FREIRE [2], as empresas normalmente adotam o nível de qualidade PSL 2 para dutos, devido aos seguintes benefícios:

- a. Redução da probabilidade de rompimento do duto em condições extremas, do enrugamento e efeito mola durante o curvamento a frio em função do estabelecimento do limite superior da tensão de escoamento;
- b. Garantia dos níveis mínimos de tenacidade devido à realização do ensaio de impacto Charpy, obrigatório na temperatura de 0°C.
- c. Redução do nível de anomalias devido à proibição de reparo com solda no metal de base do tubo;
- d. Emissão de certificados de composição química e de ensaios mecânicos realizados;
- e. Rastreabilidade para identificação da corrida e do lote de cada tubo.

4.4 ASPECTOS METALÚRGICOS DO PROCESSAMENTO DOS AÇOS ARBL

Conforme já comentado, os aços estruturais tinham aproximadamente 0,3% de carbono, microestrutura ferrítica com tamanho de grão da ordem de 30 a 50 micras e cerca de 30% a 50% em volume de perlita. A laminação a quente visava a redução de espessura. A transformação da austenita em ferrita e perlita ocorria a partir de uma austenita recristalizada. O teor de carbono e a microestrutura geral destes aços apresentavam tenacidade e temperatura de transição dúctil-frágil incompatíveis com as modernas estruturas soldadas.

A evolução dos aços ARBL ocorreu com mudança da composição, do processamento e conseqüentemente da microestrutura. O teor de carbono foi reduzido para a faixa de 0,1%, chegando hoje na ordem de 0,05%, causando a redução de perlita e melhora na soldabilidade. A resistência mecânica gerada

pela perlita passou a ser garantida pela presença de ferrita de grão refinado, com tamanho da ordem de 5 micras. O refino de grão é o mecanismo que é capaz de aumentar o limite de escoamento e melhorar a tenacidade. A adição de manganês, na ordem de 1,5%, contribui para o aumento da resistência pelo refino de grão e também, de uma forma secundária, para o aumento da resistência pelo endurecimento por solução sólida.

A adição de outros elementos em pequenas quantidades contribuem para melhora das características dos aços ARBL. Elementos normalmente utilizados: Si; Al; V; Nb; Cr; Mo; Ni e Ti – Tabela 4.4.1.

Tabela 4.4.1 - Tabela com elementos de liga normalmente utilizados nos aços ARBL.

Elemento de Liga	Efeito Pretendido
Alumínio	Desoxidante e refino de grão
Silício	Desoxidante e endurecedor por solução sólida
Nióbio	Refino de grão austenítico e ferrítico, com aumento da tenacidade e resistência mecânica
Vanádio	Aumento da resistência, devido a precipitação de carboneto de níbio.
Titânio	Boa tenacidade na ZAC
Molibdênio	Adicionado em conjunto com o níbio aumenta a quantidade de precipitados e proporciona o aumento da resistência mecânica.
Cromo	Aumento da resistência mecânica, tenacidade e soldabilidade
Níquel	Aumento da tenacidade

A composição típica de uma aço ARBL moderno possui aproximadamente 0,05% a 0,1% de C; 1,5% a 2,0% de Mn, elementos microligantes como o Ti; Nb e V; e elementos substitucionais como o Cr; Ni e Mo. Os elementos químicos não podem ser tratados de forma dissociada do processo de obtenção da chapa, como a laminação a quente e o resfriamento subsequente.

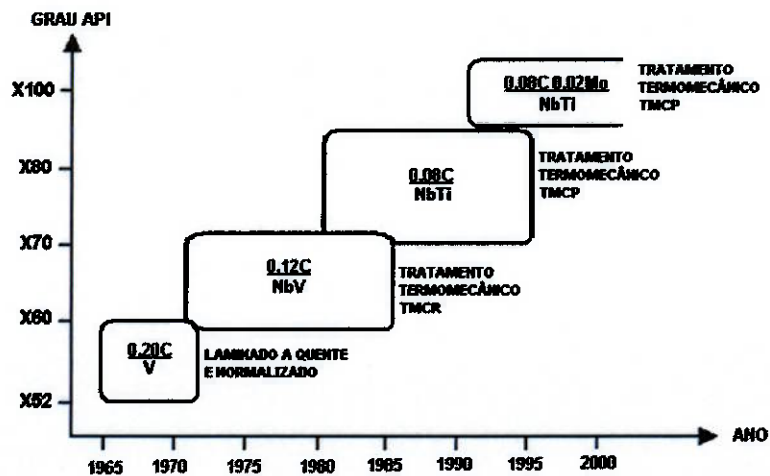


Figura 4.4.1- Desenvolvimento dos aços API 5L, elementos de liga e rota de produção [9].

Conceitos associados à laminação na produção dos aços ARL:

- Temperatura de transformação da austenita
- Formação da ferrita abaixo da temperatura de transformação, a partir da austenita altamente deformada na laminação a quente.

Resumidamente o processo de produção das chapas de aço ARL seguem as seguintes etapas:

- Aquecimento do aço na faixa de 1150 °C a 1250 °C com formação da matriz austenítica e solubilização dos elementos microligantes. A temperatura de reaquecimento é função do tipo de aço.
- Redução da espessura da chapa através do desbaste. Durante esta fase a austenita se deforma e recristaliza entre passes. O desbaste ocorre até a temperatura de aproximadamente 1100 °C.
- Em temperaturas da ordem de 1000 °C é iniciado o acabamento, através da laminação com controle da taxa de resfriamento. O termino da laminação em temperatura abaixo da temperatura de não recristalização propiciará a formação da austenita altamente deformada. Ao final desta etapa é obtida a

ferrita com tamanho de grão da ordem de 5 μm e a precipitação de carbonetos, nitretos e elementos microligantes.

A temperatura de transformação diminui com o aumento da taxa de resfriamento e pode aumentar com a presença de elementos de liga. As temperaturas mais baixas aumentam os esforços nos laminadores. Para a produção dos aços ARBL é feita uma combinação entre esses fatores, que variam em função da espessura da chapa a ser produzida.

A figura 4.4.2 mostra as etapas de laminação de um aço ARBL com controle de resfriamento.

Com o resfriamento acelerado podem ser obtidos aços com grau X70 e superiores, que dificilmente são obtidos com o resfriamento ao ar.

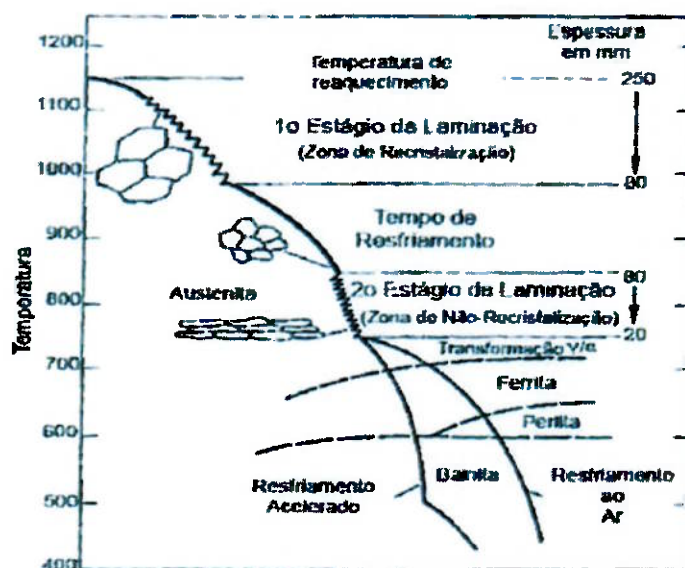


Figura 4.4.2 – Diagrama de temperatura-tempo mostrando as etapas da laminação controlada: reaquecimento, laminação de desbaste, laminação de acabamento e resfriamento [12]

Por exemplo, a produção de bobinas de chapas de aço de 13 mm (processo de tiras a quente para fabricação de tubos com costura helicoidal) para atender a especificação do tubo API 5L X70. Composição: 0,1 % C; 1,5 % Mn; 0,05 % Ni;

0,04 % V e 0,01 % Ti. O desbaste para redução de 250 mm para 30 mm é efetuado entre 1250 °C e 1100 °C. O acabamento é realizado entre 1000 °C e 880 °C. A tira é rebobinada a 600 °C. A microestrutura encontrada é de aproximadamente 75 % de ferrita em volume e com tamanho de grão da ordem de 4 μm e 25 % de perlita [2].

4.5 FABRICAÇÃO DE CHAPAS DE AÇOS ARBL

No Brasil historicamente os aços ARBL para a produção de tubos UOE a serem utilizados na construção de dutos, FREIRE [2], são produzidos pelo processo de laminação de chapas grossas. Normalmente os laminadores de chapas grossas se constituem em uma única cadeia, que combina a laminação controlada do aço com resfriamento acelerado e a adição de elementos de ligas.

Exemplo de uma cadeia de laminação de chapas grossas, com controle de laminação e resfriamento acelerado, constituído de uma cadeia de desbaste e uma cadeia de acabamento.

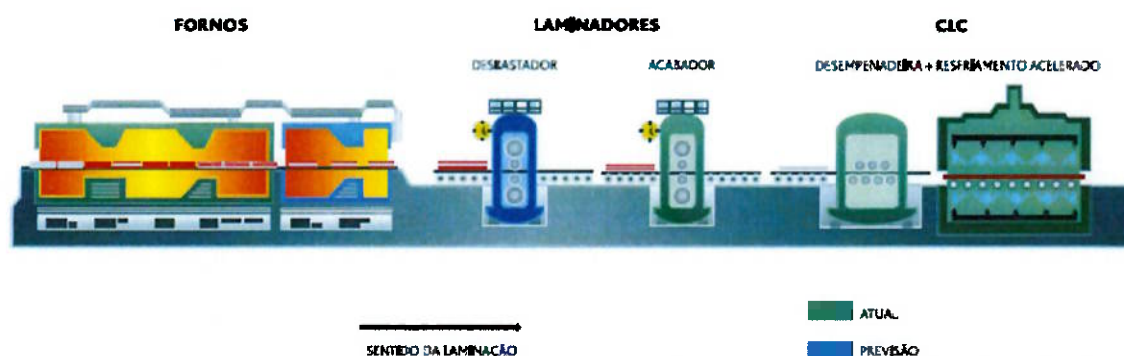


Figura 4.5.1 – Fluxo de laminação das chapas grossas da série Sincron da Usiminas – Usina de Ipatinga [22]

As chapas produzidas neste tipo de laminadores possuem espessuras na faixa de 8 mm a 40 mm e larguras de até 5 m.

A laminação de desbaste é efetuada na faixa de temperatura de 950 °C a 1100 °C. A laminação de acabamento é concluída em temperaturas que chegam a abaixar até aproximadamente 700 °C. Na laminação de acabamento é feito o ajuste da espessura e busca-se obter a austenita fortemente deformada.

A figura 4.5.2. ilustra a influência de alguns elementos de liga na temperatura de recristalização.

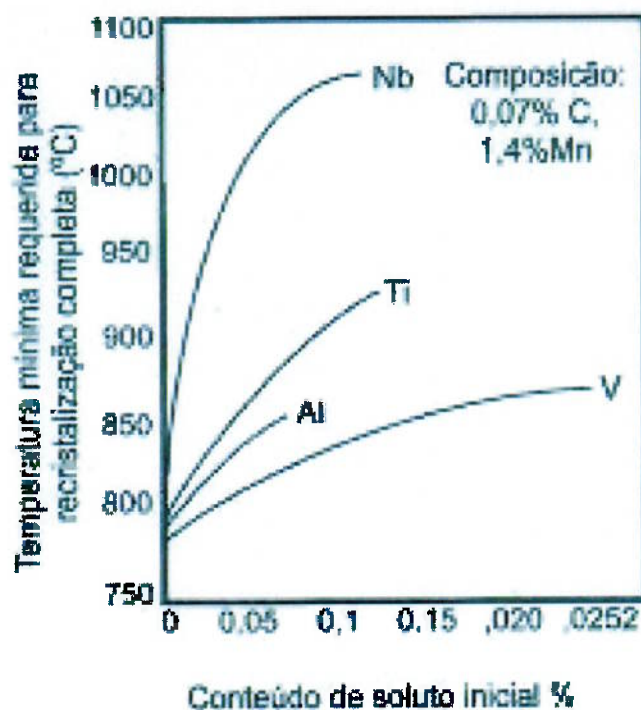


Figura 4.5.2 - Efeito dos principais elementos microligantes na temperatura de recristalização [12]

O aumento da temperatura de recristalização da austenita é fundamental para redução dos esforços de laminação e garantir a formação da austenita altamente deformada.

O resfriamento acelerado propicia a formação de uma microestrutura ferrítica com grão refinado. As figuras 4.5.3. e 4.5.4. representam a estruturas de aços ARBL produzidos pela Usiminas [22].

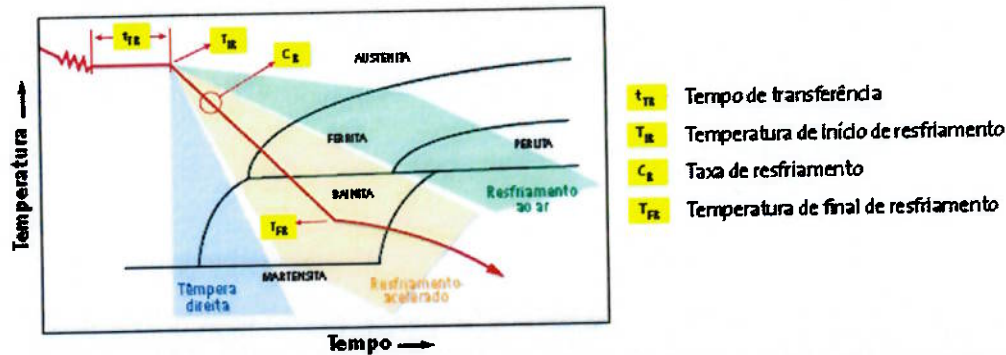
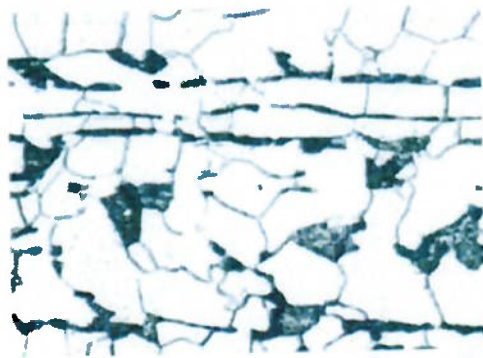


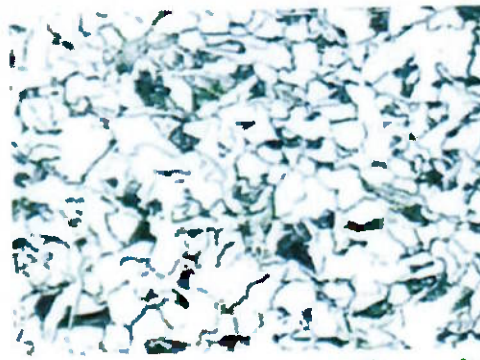
Figura 4.5.3 - Curvas de resfriamento do processo CLC no equipamento acelerado da Usiminas [22]

Laminação convencional



50 μ m

CLC



50 μ m

Figura 4.5.4 – Estrutura metalográfica de aços ARBL, laminação convencional e CLC – Contínuos on-line control, patente Nippon Steel para chapas, produzidas pelo processo de laminação controlada e resfriamento acelerado [22]

4.6 FABRICAÇÃO DOS TUBOS

Os tubos para atenderem a Norma API podem ser fabricados com ou sem costura. Os tubos com costura podem ter solda longitudinal ou helicoidal. Os tubos sem costura são produzidos por extrusão ou laminação oblíqua. Os tubos com costura são produzidos a partir de chapas planas com ou sem material de adição.

4.6.1 TUBOS UOE SOLDADOS POR ARCO SUBMERSO

Neste processo os tubos são fabricados por conformação a frio, a partir de chapas planas. O tubo é obtido pela conformação da chapa: prensagem das bordas, dobramento "U", dobramento "O", expansão "E", conforme figuras 4.6.1.1 e figura 4.6.1.2.

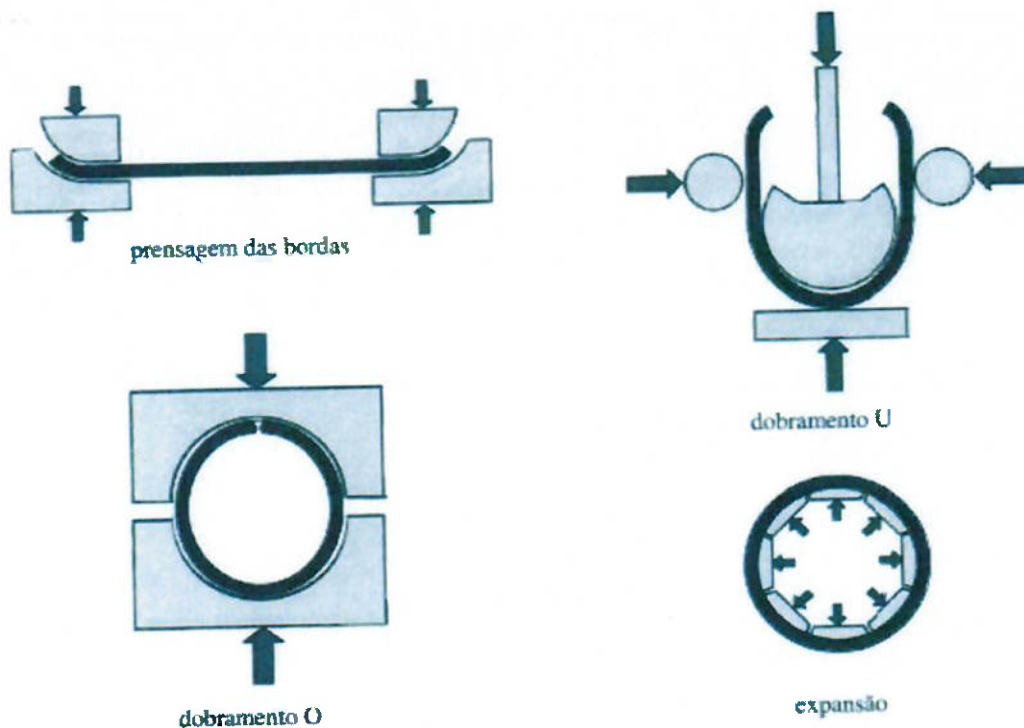


Figura 4.6.1.1 - Desenho esquemático das quatro etapas de conformação a frio do processo UOE [2]

No Brasil são produzidos tubos UOE com diâmetros de 12" a 48" , espessuras de 0,250" a 1,25" e comprimentos entre 6m e 12,4 m.

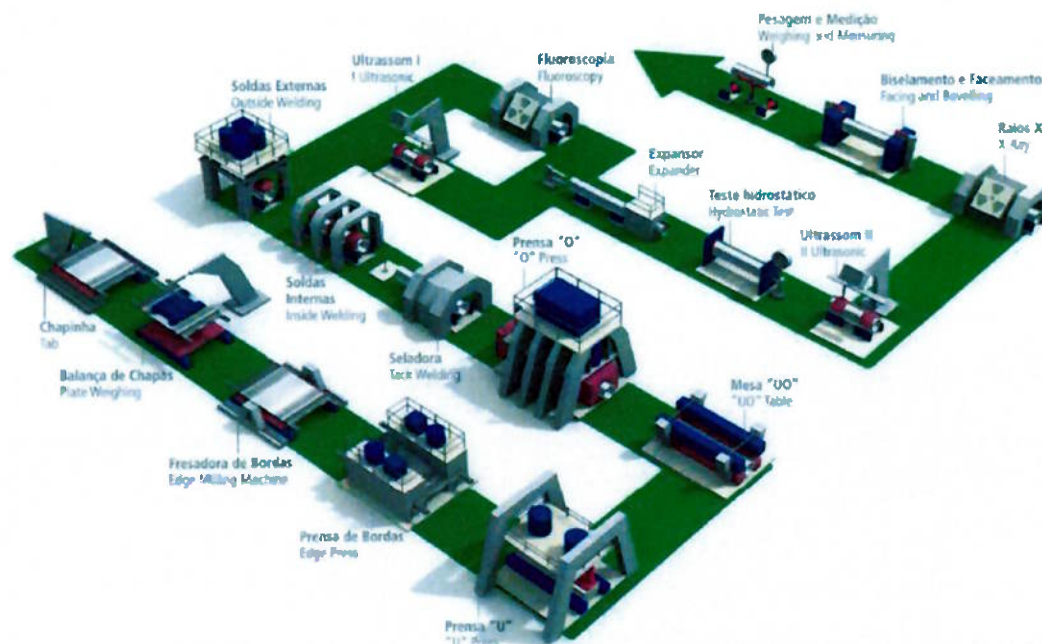


Figura 4.6.1.2 - Esquema de fabricação de tubos UOE. Catálogo Tenaris Confab [20]

Etapas de fabricação:

Usinagem das bordas – Fresamento para requadramento das chapas, ajustagem para o perímetro do tubo a ser produzido e preparação do chanfro em “X” da solda longitudinal.

Prensagem das bordas – prensagem das bordas para obtenção de “formato circular” e evitar defeitos dimensionais e de alinhamento.

Prensagem “U” – Como mostrado na figura 4.6.1., a chapa é prensada com a parte inferior adquirindo aproximadamente o raio de curvatura do tubo e as paredes laterais ficando paralelas.

Prensagem “O” – Nesta etapa é efetuada a prensagem com matrizes semicirculares para obtenção do formato circular na chapa.

Selamento, faceamento e soldagem de apêndices – Após a prensagem o tubo é lavado para remoção dos resíduos (lubrificantes) e secado. Através de roletes é efetuado o ajuste da junta a ser soldada. Simultaneamente é efetuada uma solda de selamento (MIG ou MAG) na raiz do chanfro. Após inspeção da solda é

efetuada a usinagem das extremidades e soldados os apêndices para início e termino da solda por arco submerso.

Soldagem interna e soldagem externa – A soldagem interna e externa é realizada pelo processo Arco Submerso – SAW. Primeiramente é efetuada a solda interna na posição plana, em seguida gira-se o tubo e é realizada a solda externa também na posição plana. O processo de soldagem é automático e envolvem dois a quatro eletrodos (processo Tandem). Todos os eletrodos ficam sobre a mesma poça de fusão, proporcionando uma solidificação uniforme. Cada eletrodo tem controle de velocidade de alimentação independente, com o objetivo de ajustar a penetração, o perfil e o acabamento.

A figura 4.6.1.3. mostra de forma esquemática a soldagem por arco submerso e a figura 4.6.1.4. demonstra a soldagem com múltiplos arames – processo Tandem.

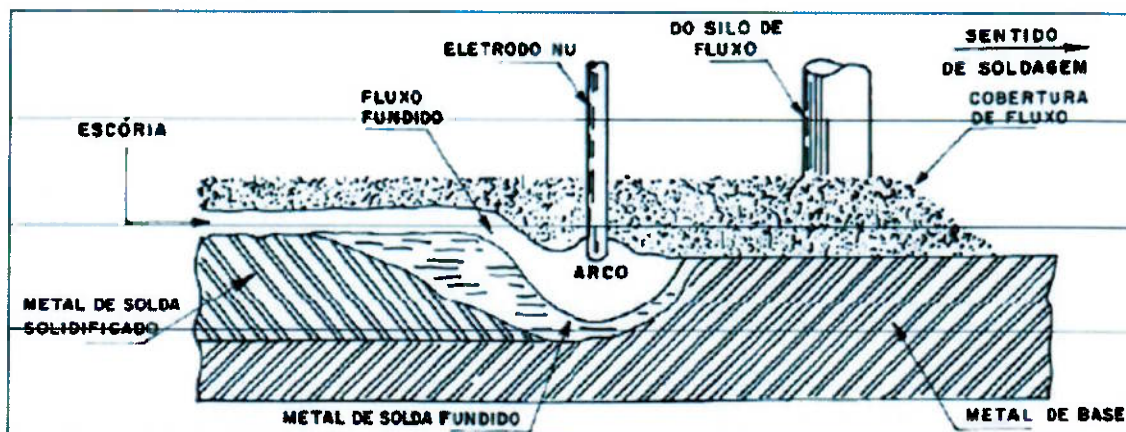


Figura 4.6.1.3 – Ilustração da poça de fusão do processo de soldagem SAS [1].

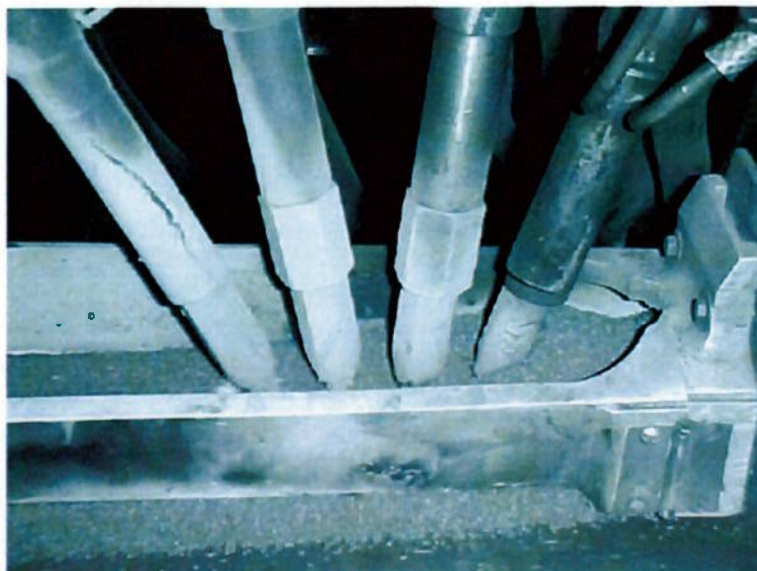


Figura 4.6.1.4 - Soldagem por arco submerso, com múltiplos arames – Processo Tandem [34].

Após a soldagem é efetuada a inspeção por ultrassom, nas extremidades.

Expansão a frio – A expansão é efetuada por um mandril hidráulico, segmentado em 8, 10 ou 12 partes, que se expandem radialmente. O mandril ajusta a forma e dimensões do tubo a fim de atender as tolerâncias de fabricação. Conforme a Norma API 5L a expansão a frio deve estar entre 0,3% a 1,5% em relação ao diâmetro externo antes da expansão.

Ensaio hidrostático – O ensaio hidrostático é realizado em todos os tubos. Conforme o API 5L, são aplicadas pressões que gerem tensões circunferenciais de 60%, 75%, 85% e 90%, por 5 ou 10 segundos. Os parâmetros de teste são função do diâmetro e grau de resistência do tubo.

Após o ensaio hidrostático o tubo é reinspecionado por ultrassom e radiografado. A seguir as extremidades são faceadas e biseladas e o tubo é dimensionado e pesado.

4.7 DEFORMAÇÃO PLÁSTICA E O EFEITO BAUSCHINGER

4.7.1 TEORIA DA PLASTICIDADE

A teoria da plasticidade lida com o comportamento de materiais deformados, quando as deformações não seguem a Lei de Hooke, isto é a deformação deixa de ser proporcional à tensão. Diversos aspectos da deformação plástica fazem a formulação matemática da teoria da plasticidade mais difícil do que a descrição do comportamento de um sólido elástico. A deformação elástica é reversível, dependendo apenas dos estados iniciais e finais de tensão, enquanto a deformação plástica é irreversível. A deformação plástica depende graduação do carregamento até que o estado final de carregamento seja alcançado.

Na deformação plástica a relação tensão deformação não é facilmente mensurável como o Módulo de Young para a deformação elástica. O fenômeno do encruamento é difícil de ser equacionado sem introduzir considerável complexidade matemática. Além disso, vários aspectos do comportamento real do material, tais como anisotropia plástica, histerese elástica, e o efeito Bauschinger não podem ser tratados facilmente pela teoria da plasticidade. No entanto, a teoria da plasticidade tem estado em contínuo desenvolvimento e progresso, na resolução de importantes problemas de engenharia.

Do ponto de vista de projeto a teoria da plasticidade está preocupada com a carga máxima que pode ser aplicada a um corpo sem causar excessiva deformação.

No diagrama Tensão x Deformação, figura 4.7.1.1 A constatamos evolução da deformação de um corpo de prova em função da carga de tração aplicada. A

deformação apresentada é típica para um material recozido. Pelo diagrama podemos perceber a existência do limite elástico, em que a deformação é reversível e o patamar onde ocorre o escoamento, deformação irreversível. Na figura 4.7.1.1 B podemos observar a mudança de comportamento elástico do material ao sofrer uma deformação de laminação, onde praticamente desaparece o patamar de escoamento.

A figura 4.7.1.1 "A" ilustra a deformação de um material submetido à tensão de tração e a figura 4.7.1.1 "B" ilustra a deformação de um material também submetido à tensão de tração, porém pré deformado.

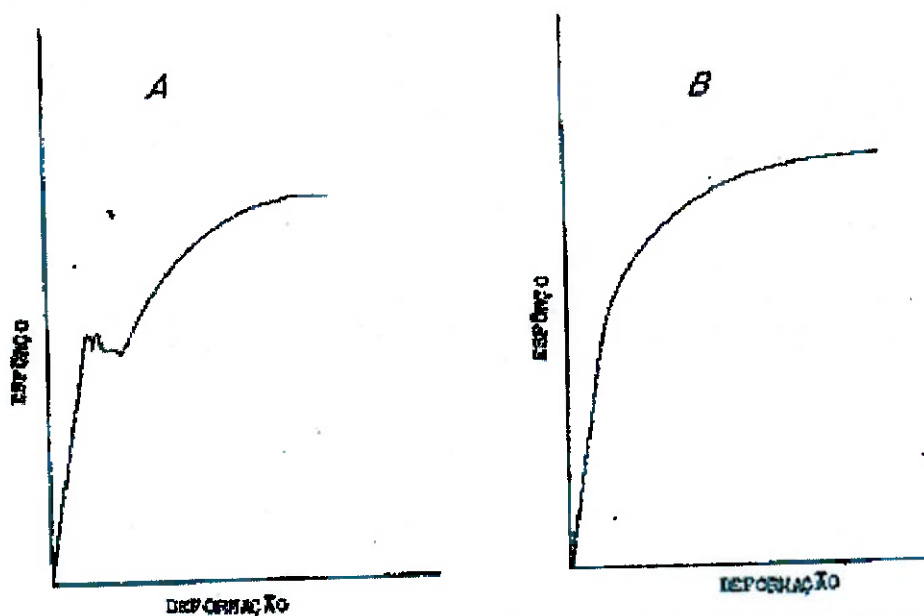


Figura 4.7.1.1 A e B – Diagrama de tensão deformação, figura A para um aço no primeiro ciclo e a figura B para um aço pré-deformado [4].

4.7.2 - EFEITO BAUSCHINGER

Nas chapas de aços ARBL, utilizadas para a fabricação de tubos com elevado nível de resistência, boa tenacidade e boa soldabilidade, as propriedades mecânicas são obtidas através da combinação do tratamento termodinâmico do processo de laminação com resfriamento controlado e a adição de elementos de liga. Os mecanismos de melhoria da qualidade do aço são o endurecimento

pelo refino de grão, por solução sólida e por precipitação de carbonetos e nitretos. A participação relativa de cada mecanismo depende da composição do aço e dos parâmetros do processo de laminação.

O mecanismo observado nos aços, que sofreram tensões de compressão após o metal ser submetido a tensões de tração acima da tensão de escoamento, de apresentarem uma menor resistência de escoamento à compressão é chamado de efeito Bauschinger.

A figura 4.7.2.1. ilustra a ocorrência do efeito Bauschinger, comparando as deformações de uma solicitação à tração, com um material tracionado descarregado e retracionado e um material submetido à compressão após a tração.

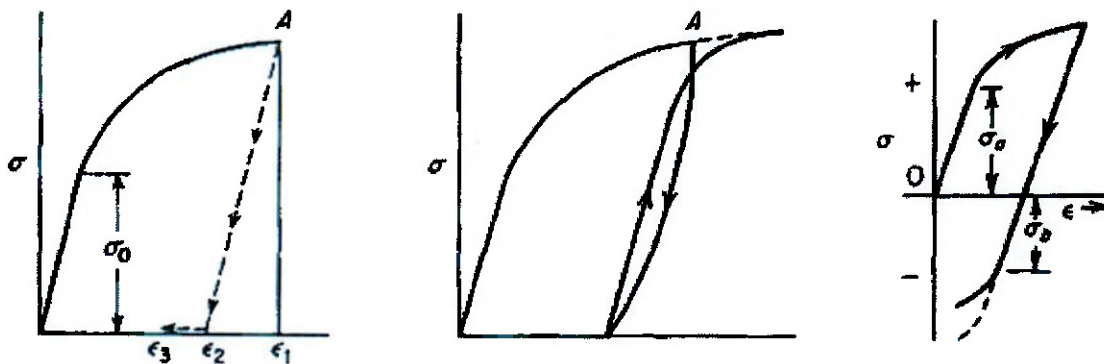


Figura 4.7.2.1 – Gráfico Tensão x Deformação para: tração, tração após o descarregamento e compressão após a tração [3].

As propriedades mecânicas no sentido inverso podem ser avaliadas pelo parâmetro de tensão Bauschinger, definido como [17]:

$$\beta_{\sigma} = \frac{\sigma_p - \sigma_r}{\sigma_p}$$

Onde:

σ_p = máxima tensão de tração pré-aplicada, que causou o escoamento – **pre-stress**.

σ_r = tensão de escoamento no sentido inverso (compressão) – **reverse stress**

Os mecanismos que geram o Efeito Bauschinger são bastante complexos, mas existem duas principais escolas, Simsir [14], que procuram explicar o efeito denominadas: tensões internas teoria da discordância. Os estudos da teoria das tensões internas datam do início do século XX e consideram o efeito das tensões internas devido a deformação não homogênea nos metais policristalinos. A teoria das discordâncias internas começou a ser adotada na tentativa de explicação da ocorrência do Efeito Bauschinger também nos metais monocristalinos.

No primeiro estudo realizado por Heyn em 1914 ele procurou demonstrar o efeito Bauschinger considerando as tensões residuais existentes em materiais previamente escoados – **back stress**.

Os estudos que procuram explicar o Efeito Bauschinger através da teoria do deslocamento são relativamente novos de acordo com Mott e Seeger et al. consideram que as pilhas de discordâncias e as barreiras microestruturais, tais como o contorno de grãos e partículas de segunda fase geradas a partir da austenita severamente deformadas, auxiliam a deformação durante o carregamento reverso, conforme ilustrado na figura 4.7.2.2.

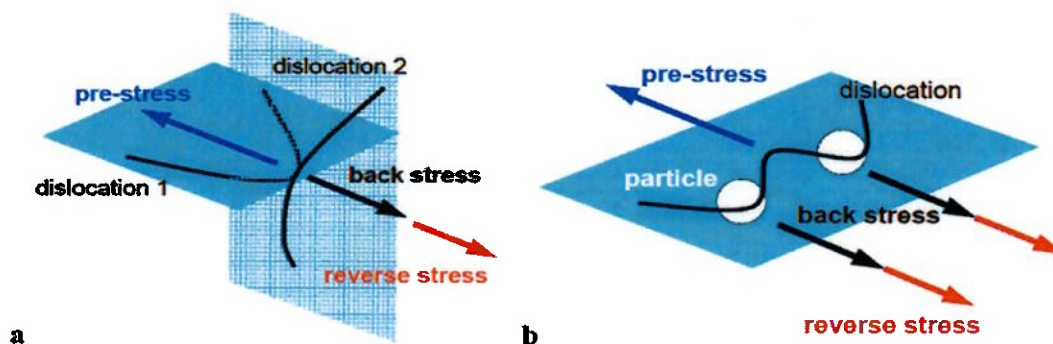


Figura 4.7.2.2 - Ilustração do efeito Bauschinger. Fig. "a" teoria das tensões internas. Fig. "b" teoria das discordâncias [18]

Segundo Bott [6] os aços com estrutura bainítica tem menor perda de propriedades mecânicas devido ao efeito Bauschinger, do que os aços com estrutura ferrítica-perlítica.

4.8 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DOS DUTOS

As Normas ABNT NBR 15280-1, ASME B31.4, ABNT NBR 12712 e ASME B31.8 adotam a equação de Barlow para dimensionamento da espessura da parede do duto. A equação de Barlow calcula a espessura do duto como um cilindro aberto, que é o comportamento do trecho enterrado do duto:

$$e = \frac{P \cdot D}{2\sigma_{adm}}$$

$$\sigma_{longitudinal} = 0$$

A equação de Barlow é considerada conservadora quando comparada com outros critérios de dimensionamento de dutos, tais como: expressão de Lamé, critério de Von Mises, equação de membrana ou do diâmetro interno.

Para o trecho de afloramento do duto pode ser adotado o critério de Von Mises, que é o comportamento de um cilindro de extremidades fechadas. A espessura calculada pela equação de Von Mises é de aproximadamente 87% da espessura calculada pela equação de Barlow.

$$e = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sqrt{3} \cdot P}{\sigma_{adm}}} \right)$$

$$\sigma_{longitudinal} = P \frac{d^2}{(D^2 - d^2)}$$

Onde:

- e é a espessura do duto
- D é o diâmetro externo
- D é o diâmetro interno
- P é a pressão de projeto

σ_{adm} é a tensão admissível, específica para cada Norma

4.8.1. ENSAIO DE PRESSÃO

O ensaio de pressão, ou ensaio hidrostático, habilita cada ponto do duto a operar a uma pressão interna igual ou inferior à pressão de ensaio dividida pelo fator de ensaio, limitada à pressão de projeto. É dividido em duas etapas:

- a. Ensaio de resistência mecânica.
- b. Ensaio de estanqueidade.

As pressões utilizadas estão definidas em cada norma utilizada.

A Norma Petrobras N 464 – Construção, Montagem e Condicionamento de Duto Terrestre define o ciclo abaixo para o teste hidrostático do duto:

- a. Enchimento do duto e eliminação do ar.
- b. Pressurização até 50% da pressão do teste de resistência e manutenção por 24 h.
- c. Pressurização controlada até 100% da pressão do teste de resistência e manutenção por 4 h.
- d. Despressurização controlada até a pressão do teste de estanqueidade e manutenção da pressão por 24 h.
- e. Despressurização controlada.

4.8.2. NORMA ABNT NBR 15280-1 DUTOS TERRESTRE PARTE 1-

PROJETO.

Escopo: Projeto de sistemas de dutos para movimentação de produtos líquidos ou liquefeitos, tais como: álcoois líquidos, petróleo, nafta, gasolina, diesel, querosene, condensados de gás natural, gasolina natural, gás liquefeito de petróleo, amônia anidra líquida e biocombustíveis.

Dimensionamento:

$$e_c = \frac{P \cdot D}{2\sigma_{adm}}$$

onde:

e_c é a espessura calculada de parede,
 D é o diâmetro externo nominal do duto,
 P é a pressão de projeto,

σ_{adm} é a tensão admissível do material do duto.

$$\sigma_{adm} = F \cdot E_j \cdot SMYS$$

onde:

F é o fator de projeto, conforme tabela 4.8.1.1.
 E_j é o fator de eficiência de junta, conforme tabela 4.8.2.1
 $SMYS$ é a tensão mínima de escoamento do material do tubo.

Tabela 4.8.2.1 - Fator de Projeto, conforme a Norma NBR 15280

Tipo de Instalação	Fator de Projeto*	
	Categoria I	Categoria II
Geral	0,72	0,60
Cruzamento ferrovia/rodovia com tubo camisa	0,72	0,60
Cruzamento ferrovia /rodovia sem tubo camisa	0,60	0,6
Travessias (rios e alagados)	0,6	0,6
Bases, terminais, estações, lançadores / receptores de "pigs"	0,6	0,6

Notas (*)

- Categoria I - fluidos com pressão de vapor absoluta igual ou inferior a 1,1 bar a 38°C
- Categoria II – fluidos com pressão de vapor absoluta maior a 1,1 bar a 38°C

Tabela 4.8.2.2 - Fator de eficiência de junta conforme Norma NBR 15280

Eficiência de Junta Ej	Processo de Fabricação do Tubo
1	Tubo sem costura Soldagem por arco submerso SAW ou DSAW) Soldagem por resistência elétrica (ERW) Soldagem por indução elétrica (EIW)
0,8	Soldagem por fusão elétrica (EFW)
0,6	Soldagem de topo em fornalha

À espessura calculada deverá ser somada a sobre espessura de corrosão e a sobre espessura para compensar a profundidade de rosca.

Tabela 4.8.2.3 - Pressões de Ensaio Hidrostático, conforme Norma NBR 15280

Categoria	Ensaio Hidrostático			
	Ensaio de Resistência		Ensaio de Estanqueidade	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
I	1,25 vezes a pressão máxima de operação	Pressão que produz uma tensão circunferencial equivalente a 100% do SMY	1,1 vezes a pressão máxima de operação	Pressão que produz uma tensão circunferencial equivalente a 90% do SMY
II	1,5 vezes a pressão máxima de operação	Pressão que produz uma tensão circunferencial equivalente a 100% do SMY	1,1 vezes a pressão máxima de operação	Pressão que produz uma tensão circunferencial equivalente a 100% do SMY
Nota: As pressões mínimas são medidas no ponto mais alto do trecho em teste. As pressões máximas são medidas no trecho mais baixo do trecho em teste.				

4.8.3. NORMA ASME B 31.4 – PIPELINE TRANSPORTATION SYSTEMS FOR LIQUID HYDROCARBONS AND OTHER LIQUIDS.

Escopo: Código com os requisitos mínimos de engenharia para projeto, especificação de materiais, construção, inspeção e ensaio hidrostático em sistemas de transporte de hidrocarbonetos líquidos, tais como: petróleo, condensado, gasolina natural, gás liquefeito de petróleo, dióxido de carbono, álcoois, amônia anidra líquida e outros derivados de petróleo líquidos.

Dimensionamento:

$$t = \frac{P_i \cdot D}{2S}$$

onde:

S é a tensão admissível

P_i é a pressão interna de projeto

D é o diâmetro externo do tubo

$$S = 0,72 \cdot E \cdot SMYS$$

onde:

0,72 é o fator de projeto baseado na espessura nominal, que inclui a tolerância de espessura de fabricação do tubo.

E é o fator de junta, conforme tabela 4.8.3.1.

SMYS é a tensão mínima de escoamento do tubo.

Tabela 4.8.3.1 - Fator de Eficiência de Junta "E". conforme a Norma ASME B 31.4

Eficiência de Junta E	Processo de Fabricação do Tubo	Material
1,0	Tubo sem costura	Todos
1,0	Soldagem por resistência elétrica	Todos
1,0	Soldagem por fusão elétrica	ASTM A 671; ASTM A 672;
0,8	Soldagem por fusão elétrica	ASTM A 134; ASTM A 139;
1,0	Soldagem por indução elétrica	API 5L
1,0	Soldagem por arco submerse	ASTM A 381; API 5L
0,6	Soldagem de topo em fornalha	ASTM A 53; API 5L

Tabela 4.8.3.2 - Ensaio Hidrostático, conforme Norma ASME B 31.4

Ensaio Hidrostático			
Ensaio de Resistência		Ensaio de Estanqueidade	
Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
1,25 vezes a pressão de projeto	Não especificada. Quando a pressão de teste gerar uma tensão circunferencial acima de 90% do SMY deverão ser tomados cuidados especiais para evitar excesso de solicitação	1,1 vezes a pressão de projeto	Não Especificada
Nota: As pressões mínimas são medidas no ponto mais alto do trecho em teste. As pressões máximas são medidas no trecho mais baixo do trecho em teste.			

4.8.4. NORMA ABNT NBR 12712 – PROJETO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE GÁS COMBUSTÍVEL.

Escopo: Fixar as condições mínimas exigíveis para projeto, especificação de materiais e equipamentos, fabricação de componentes e ensaios dos sistemas de transmissão e distribuição de gás combustível por dutos.

Dimensionamento:

$$e = \frac{P.D}{2S_y.F.E.T}$$

onde:

e é a espessura requerida de parede

P é a pressão de projeto

D é o diâmetro externo do tubo

S_y é a tensão mínima de escoamento do tubo.

F é o fator de projeto

E é o fator de eficiência de junta

T é o fator de temperatura

O fator de projeto é função da classe de locação do trecho de duto. A classe de locação leva em consideração a quantidade de imóveis próximos ao duto. A

quantificação de habitações em uma faixa de 200 m de cada lado da tubulação e que se estende por 1600 m de duto é denominada unidade de classe de locação.

A classe de locação é um parâmetro que traduz o grau de atividade humana capaz de gerar riscos ao duto, por atividades próximas ao duto, como obras de infraestrutura.

Tabela 4.8.4.1 - Fator de Projeto em função da classe de locação, conforme a Norma ABNT NBR 12712

Classe de locação	Fator de Projeto		Ocupação por Unidade de Classe de Locação
	Normal	Cruzamentos e Travessias	
1	0,72	0,60	Dez ou menos habitações
2	0,60	0,50	Entre dez e menos de quarenta e seis habitações
3	0,50	0,50	Quarenta e seis ou mais habitações Prédios ou áreas de uso coletivo situadas a menos de 90 m do duto
4	0,40	0,40	Predominância de edificações com quatro ou mais andares, destinados à ocupação humana.

Tabela 4.8.4.2 - Fator de Eficiência de junta, conforme a Norma ABNT NBR 12712.

Especificação do Tubo	Processo de fabricação do Tubo	Fator E
ASTM A 53	Tubo sem costura e soldado	1,00
ASTM A 106	Tubo sem costura	1,00
ASTM A 134 ASTM A 139	Soldagem por fusão elétrica (EFW) Soldagem por arco submerso (SAW) Junta longitudinal ou helicoidal	0,80
ASTM A 135	Solda por resistência elétrica (SRW)	1,00
ASTM A 211	Soldagem por fusão elétrica (EFW) Soldagem por arco submerso (SAW) Solda helicoidal	0,80
ASTM A 333	Tubo sem costura e soldado	1,00
ASTM A 381	Solda por arco submerso (SAW)	1,00
ASTM A 671 ASTM A 672	Soldagem por fusão elétrica (EFW) Soldagem por arco submerso (SAW) Classes 13, 23, 33, 43, 53 Junta longitudinal	0,80
API 5L	Tubo sem costura e soldado	1,00

Tabela 4.8.4.3 – Fator de temperatura T, conforme a Norma ABNT NBR 12712

Temperatura de Projeto °C	Fator de Temperatura (T)
Até 120	1,000
150	0,966
180	0,929
200	0,905
230	0,870

Nota:

Para valores intermediários da temperatura de projeto o fator de temperatura pode ser obtido por interpolação linear.

Tabela 4.8.4.4 - Pressões para Ensaio Hidrostático, conforme a Norma ABNT NBR 12712

Ensaio Hidrostático				
Classe de Locação	Ensaio de Resistência		Ensaio de Estanqueidade	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
1	1,1 vezes a pressão de projeto	Não especificada. Quando a pressão de teste gerar uma tensão circunferencial acima do SMY o ensaio deve ser realizado no menor tempo possível	Não especificada	Não Especificada
2	1,25 vezes a pressão de projeto	Não especificada. Quando a pressão de teste gerar uma tensão circunferencial acima do SMY o ensaio deve ser realizado no menor tempo possível	Não especificada	Não especificada
3 e 4	1,4 vezes a pressão de projeto	Não especificada. Quando a pressão de teste gerar uma tensão circunferencial acima do SMY o ensaio deve ser realizado no menor tempo possível	Não especificada	Não especificada
Nota: As pressões mínimas são medidas no ponto mais alto do trecho em teste. As pressões máximas são medidas no trecho mais baixo do trecho em teste.				

4.8.5 ASME B 31.8 – GAS TRANSMISSION AND DISTRIBUTION PIPING SYSTEMS

Escopo: O código abrange o projeto, fabricação, instalação, inspeção e teste de dutos usados para o transporte de gás.

Dimensionamento:

$$P = \frac{2 S t}{D} F \cdot E \cdot T$$

onde:

- t é a espessura nominal da parede do duto
- P é a pressão de projeto
- D é o diâmetro nominal externo do tubo
- S é a tensão mínima de escoamento do tubo.
- F é o fator de projeto
- E é o fator de eficiência da junta longitudinal
- T é o fator de temperatura

O fator de projeto é função da classe de locação do trecho de duto. A classe de locação leva em consideração a quantidade de habitações em uma faixa de um quarto de milha de largura, com o duto como eixo da faixa e uma extensão de uma milha. Esta faixa é denominada unidade de classe de locação.

Tabela 4.8.5.1 - Fator de Projeto em função da Classe de Locação, conforma a Norma ASME B 31.8

Classe de locação		Fator de Projeto		Ocupação por Unidade de Classe de Locação
		Normal	Cruzamentos e Travessias (*)	
1	Divisão 1	0,80	0,60	Dez ou menos habitações
	Divisão 2	0,72	0,60	
2		0,60	0,60	Entre dez e quarenta e seis habitações
3		0,50	0,50	Quarenta e seis ou mais habitações Prédios ou áreas de uso coletivo situadas a menos de 90 m do duto
4		0,40	0,40	Predominância de edificações com quatro ou mais andares

Nota (*)

- a. Condição mais crítica

b. Indicação resumida, para detalhes ver a Norma ASME B 31.8 Tabela

841.114B

Tabela 4.8.5.2 - Fator de eficiência de junta, em função do tubo, conforme a Norma ASME B31.8

Especificação do Tubo	Processo de fabricação do Tubo	Fator E
ASTM A 53	Tubo sem costura	1,00
	Soldagem por resistência elétrica	1,00
	Soldagem de topo em fornalha	0,60
ASTM A 106	Tubo sem costura	1,00
ASTM A 134	Soldagem por arco elétrico	0,80
ASTM A 135	Soldagem pó resistência elétrica	1,00
ASTM A 139	Soldagem por fusão elétrica	0,80
ASTM A 211	Solda helicoidal	0,80
ASTM A 333	Tubo sem costura	1,00
	Soldagem por resistência elétrica	1,00
ASTM A 381	Solda por arco submerso	1,00
ASTM A 671 ASTM A 672	Soldagem por fusão elétrica Classes 13; 23; 33; 43; 53	0,80
	Classes 12; 22; 32; 42; 52	1,00
API 5L	Tubo sem costura	1,00
	Soldagem por resistência Elétrica	1,00
	Soldagem por arco submerso	1,00
	Soldagem de topo em fornalha	0,60

Tabela 4.8.5.3 - Fator de Temperatura, conforme a Norma ASME B 31.8

Temperatura de Projeto °F	Fator de Temperatura (T)
Até 250	1,000
300	0,967
350	0,933
400	0,900
450	0,867

Nota:

Para valores intermediários da temperatura de projeto o fator de temperatura pode ser obtido por interpolação linear.

Tabela 4.8.5.4 - Pressões para Ensaio Hidrostático, conforme a Norma ASME B 31.8.

Classe de locação		Ensaio Hidrostático			
		Ensaio de Resistência		Ensaio de Estanqueidade	
		Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
1	Divisão 1	1,25 vezes a pressão máxima de operação	Não definida*	Não definida	Não definida
	Divisão 2	1,1 vezes a pressão máxima de operação	Não definida*	Não definida	Não definida
2		1,25 vezes a pressão máxima de operação	Não definida*	Não definida	Não definida
3 e 4		1,40 vezes a pressão máxima de operação	Não definida*	Não definida	Não definida

Nota:

As pressões mínimas são medidas no ponto mais alto do trecho em teste.

As pressões máximas são medidas no trecho mais baixo do trecho em teste.

(*) Quando a pressão de teste gerar uma tensão no tubo acima da tensão de escoamento deverão ser adotados controles adicionais do volume de água injetado, conforme previsto no Apêndice N – Práticas Recomendadas para Teste Hidrostático do Duto no Campo.

5. METODOLOGIA E PRÁTICAS DE MONTAGEM

5.1. CURVAS REALIZADAS A QUENTE COM AQUECIMENTO

POR INDUÇÃO

Os dados de foram obtidos do relatório de Qualificação de Curvas a Quente de uma obra de 2004. A qualificação do curvamento a quente foi efetuado pela Primus Processamento de Tubos SA – PROTUBO. Os tubos foram produzidos pela Tenaris Confab, que também realizou os ensaios dos cupons de qualificação.

Pelas Normas de Projeto e Construção de Dutos, para dutos com diâmetro nominal acima de 20" as curvas realizadas a frio (a partir de tubos retos) com raio de curvatura menores do que 30 diâmetros, devem ter o procedimento de curvamento qualificado. O raio mínimo de curvamento depende das características do tubo, qualidade de equipamento de curvamento e habilidade do curvador. As curvas analisadas são de um gasoduto de 28", espessuras entre 0,406" e 0,625" de tubo API 5 L X70 PSL 2. No curvamento a frio consegue-se curvas da ordem de 3° por metro de tubo reto. Pelas normas analisadas não são admitidas rugas nas curvas a frio. Curvas com raio de curvatura menores do que os qualificados no curvamento a frio devem ser efetuadas a quente.

O curvamento é efetuado aquecendo-se o tubo por indução na faixa de temperatura entre 950°C e 1050°C e efetuando-se o curvamento guiado, com resfriamento simultâneo na região aquecida.

Para a primeira qualificação foram escolhidos tubos com maiores espessuras, de forma a compensar a perda de espessura no dorso da curva durante o curvamento. Nesta etapa não foram levados em consideração a composição química do tubo nem as características mecânicas.

Na primeira etapa de qualificação houve uma perda significativa da tensão de escoamento na região aquecida reprovando o processo.

Após análise da falha, o processo foi ajustado, escolhendo-se tubos com carbono equivalente da ordem de 0,4% e aumentando-se a severidade do resfriamento, qualificando-se o processo de curvamento.

As figuras 5.1.1 A e B ilustram o curvamento por indução efetuado na Protubo [21].

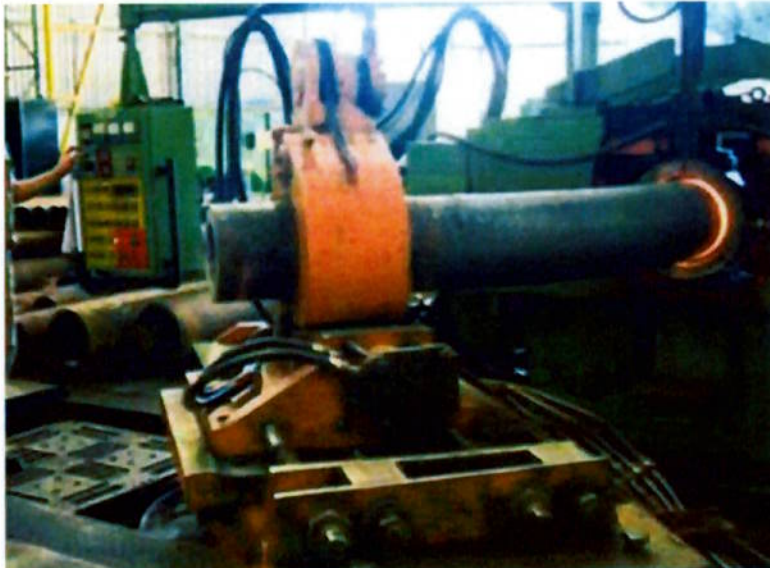


Figura 5.1.1 A – Vista de máquina de curvamento por indução da Protubo [21]



Figura 5.1.1 B - Vista da máquina de curvamento por indução da Protubo [21]

5.2. CURVAS REALIZADAS A FRIO

As curvas cujo raio de curvamento levam a deformações acima da deformação elástica são efetuadas em tubos retos, do mesmo material e espessura utilizados na obra, em curvadeiras mecânicas. O curvamento é efetuado com a

utilização de sela externa, específica para o diâmetro do tubo e mandril interno, no mesmo diâmetro interno do tubo. A sela e os dispositivos tem por finalidade garantir a deformação o mais uniforme possível, prevenindo o enrugamento e ovalização da curva. O curvamento propriamente dito é efetuado através da deformação do tubo por um pistão perpendicular ao tubo, acionado ao longo do tubo a ser curvado. O controle de qualidade da curva consiste na verificação do raio de curvatura; ovalização; enrugamento e perda de espessura no extradorso da curva (conforme o código de construção para raios de curvamento inferiores a 30 D). Para o curvamento de tubos com costura a sola longitudinal deve se situar próxima à linha neutra da curva.



Figura 5.2.1 A - Vista de máquina de curvamento a frio com comando hidráulico



Figura 5.2.1 B - Vista de máquina de curvamento a frio com comando hidráulico.

5.3 TENSÕES NO DUTO

O projeto do duto é efetuado após o levantamento do perfil do terreno já regularizado. Nesta etapa são definidos os trechos retos, trechos com curvatura do duto dentro do limite elástico do tubo, curvas a serem executadas a frio e as que deverão ser executadas a quente por indução.

O duto é construído acima do solo e posteriormente lançado dentro da vala. O içamento do duto é efetuado com equipamentos denominados "side boom". A quantidade de "side booms" e distanciamento entre eles é calculada de forma que durante o lançamento na vala o duto não sofra deformações plásticas. Caso a temperatura de montagem seja muito diferente da temperatura de operação, o duto pode ser lançado com tensões de tração (temperatura de operação acima da de fabricação) ou tensões de compressão (temperatura de operação abaixo da de montagem). De qualquer forma, independente do planejamento, é normal que o duto fique tensionado ao ser lançado na vala. Durante o ciclo de ensaio hidrostático haverá a acomodação do duto na vala,

uma vez que nessa fase o solo de reaterro ainda está fofo. Após o teste hidrostático é passada uma placa calibradora por dentro do duto para verificar se na operação de abaixamento na vala e teste hidrostático o duto não sofreu deformações acima dos valores previstos no código de projeto do duto.



Figura 5.3.1 - Vista do lançamento de um duto de 24" na vala



Figura 5.3.2 - Vista do lançamento de um duto de 24" na vala

Pelos códigos de construção de dutos, o teste hidrostático pode ser realizado a pressões que gerem uma tensão circunferencial de até 100% do limite de

escoamento. A pressão de teste associada às tensões criadas durante o lançamento do duto na vala podem gerar tensões acima do limite mínimo de escoamento do tubo.

5.4 ENSAIOS DE TRAÇÃO E METALOGRÁFICOS.

Os ensaios foram realizados a partir de dois nipples de tubos contendo uma junta soldada. O primeiro nipple, nipple 1, foi retirado de um tubo API 5L X70 PSL 2 diâmetro 28" e 15,9 mm de espessura, utilizado no teste hidrostático de um tubo do gasoduto montado em 2007/2008. O segundo nipple, nipple 2, foi retirado de um tubo API 5L X70 PSL 2 de 24" de diâmetro e 8,7 mm de espessura, utilizado na qualificação do procedimento de soldagem do duto iniciado em 2011.

No nipple 1 foram realizados quatro ensaios na junta circunferencial. Um perfil de dureza perpendicularmente à solda, respectivamente no metal base, ZAC, zona fundida, ZAC e metal base. Uma macrografia da junta solda. Uma micrografia na ZAC e uma micrografia do metal base.

Relatório de Ensaios do nipple 1 - Nº 9963/11.

No nipple 2 foram realizados cinco ensaios. Dois testes de tração em corpos de provas padrão API com 38 mm de largura, um retirado perpendicularmente à junta circunferencial e o outro na mesma direção no metal base. Uma micrografia no metal base com ataque com nital a 2%. Duas micrografias com ataque de reagente Klemm 1 (*), uma no metal de base e outra na ZAC. As micrografias com reagente Klemm 1 foram analisadas com filtro azul para identificação da microestrutura Martensita-Austenita – MA (regiões brancas).

Nota(*) Reagente Klemm 1 – O reagente é constituído com a adição de 1 g de metabissulfito de potássio em 50 ml de solução saturada de tiossulfeto de sódio.

Relatórios de Ensaio do nipple 2:

- a. USP 0002C/11
- b. USP – 0002/11
- c. USP – 002CC/11

Os relatórios de ensaios encontram-se no Anexo I

5.5 TRATAMENTO ESTATÍSTICO.

Visando analisar a variação dos limites de escoamento, limite de ruptura e alongamento com o percentual de carbono e percentual de carbono equivalente nos tubos ARBL foi efetuado o tratamento estatístico de dados, utilizado o software Minitab 15.

O Minitab é um software de análise estatística com recursos gráficos, utilizado para análise de gerenciamento de dados. Possui ferramentas de Controle da Qualidade, Planejamento de Experimentos (DOE), Análise de confiabilidade e Estatística Geral.

A análise dos dados foi efetuada em duas etapas. Na primeira etapa foi analisada a distribuição, através de gráficos de dispersão e gráficos de normalidade da distribuição. Na segunda etapa foi analisada a correlação entre as variáveis, isto é: a correlação entre a percentagem de carbono e de carbono equivalente com o limite de escoamento e limite de ruptura dos tubos utilizados na construção do duto.

A correlação entre duas variáveis pode ficar no intervalo de -1 a +1. A correlação -1 significa correlação linear total, porém há decréscimo do valor de uma variável com o crescimento da outra. Valor zero significa falta total de correlação. A correlação +1 significa que há variação linear entre as duas variáveis. Através dos gráficos de dispersão é possível analisar a possibilidade de uma correlação não linear. O Minitab faz a verificação da correlação através do teste de hipótese "P", onde "P" varia de 0 a 1. Para valores de $P \geq 0,05$ significa que com uma certeza de 95% não há correlação entre as variáveis.

O teste de normalidade de **Anderson-Darling** é efetuado com a comparação da distribuição da amostra com a curva normal. No teste de hipótese "P" efetuada pelo Minitab quando os valores forem $P \leq 0,05$ significa que com uma certeza de 95% a distribuição não é normal.

A simulação estatística foi efetuada com os dados do gasoduto de 2008. Os dados foram tabulados visando a escolha de tubos com maior %CE, para a realização de curvas a quente. A análise foi efetuada com 99 tubos, um de cada lote de fabricação. Os tubos foram fabricados entre 2007 e 2008, sendo de aço API 5L X70 PSL 2, 28" de diâmetro e espessuras de 0,625". Para a escolha o cliente disponibilizou 4153 tubos pertencentes a 99 lotes de fabricação das chapas. Durante a seleção constatou-se que as tensões de escoamento variaram de 72,4 ksi a 87,8 ksi, o limite de resistência entre 88,9 MPa e 106,6 MPa, o percentual de carbono entre 0,07% e 0,14%, o CE entre 0,33% e 0,41%. Nem sempre os tubos com mais alta resistência possuíam o maior teor de carbono ou carbono equivalente, assim como nem sempre os tubos com

menor resistência tinham os menores teores de carbono ou carbono equivalente.

Em uma obra normal de duto tensão de escoamento não é medida, utilizando-se os dados de fabricação do tubo. Durante a qualificação do procedimento de soldagem só é medida a tensão de resistência da junta soldada. A única exceção é durante a qualificação do procedimento de curvamento a quente em que é medida a tensão de escoamento.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. AVALIAÇÃO DOS TUBOS CURVADOS A QUENTE

Na tabela 6.1.1 A e B são apresentados os resultados dos ensaios realizados na primeira qualificação das curvas aquecidas por indução, com tubos selecionados aleatoriamente.

Tabela 6.1.1 A - Resultado dos ensaios mecânicos da primeira qualificação das curvas por indução em tubo API 5L X70 28", 15,9 mm de espessura PSL 2.

Cupon	Locations	Direcion	Identification	YS (MPa)	UTS (MPa)	EI (%)
1	weld-stop transition area	Transversal	3-DZSCF	-	685	-
2	extrados-start transition area	Longitudinal	3-DZTL	398	664	40,2
3	intrados-start transition area	Longitudinal	3-DZCL	424	650	31,1
4	extrados-arc area	Longitudinal	3-DTL	404	669	39,4
5	intrados-arc area	Longitudinal	3-DCL	430	672	42,9
6	intrados-arc area	Transversal	3-DCC	472	678	40,6
7	extrados-arc area	Transversal	3-DTC	450	671	39
8	weld-start transition area	Transversal	3-DZSCI	-	683	-
9	intrados-start transition area	Transversal	3-DZCC	477	685	41,5
10	extrados-start transition area	Transversal	3-DZTC	482	690	40,6
11	weld-tangent length	Transversal	3-OSL	-	688	-
12	tangent length	Longitudinal	3-OL	515	624	39
28	weld-arc area	Transversal	3-DS	-	718	-

Tabela 6.1.1 B - Resultado dos ensaios mecânicos da primeira qualificação das curvas por indução em tubo API 5L X70 28", 12,7 mm de espessura PSL 2.

Cupon	Locations	Direction	Identification	YS (MPa)	UTS (MPa)	EI (%)
29	Cupon	Transversal	2-DZSCF	-	774	-
30	extrados-start transition area	Longitudinal	2-DZTL	422	675	25
31	intrados-start transition area	Longitudinal	2-DZCL	495	654	31,7
32	extrados-arc area	Longitudinal	2-DTL	438	725	33,5
33	intrados-arc area	Longitudinal	2-DCL	434	719	38
34	intrados-arc area	Transversal	2-DCC	501	746	35,8
35	extrados-arc area	Transversal	2-DTC	485	746	37,2
36	weld-start transition area	Transversal	2-DZSCI	-	770	-
37	intrados-start transition area	Transversal	2-DZCC	508	743	37,4
38	extrados-start transition area	Transversal	2-DZTC	466	736	35,4
39	weld-tangent length	Transversal	2-OSL	-	692	-
40	tangent length	Longitudinal	2-OL	515	642	31,7
56	weld-arc area	Transversal	2-DS	-	759	-

A figura 6.1.1 indica a posição de remoção dos corpos de provas para ensaios.

O primeiro número corresponde ao corpo de provas removido da curva de 15,9 mm de espessura e o segundo número ao cupom removido da curva de 12,7 mm de espessura.

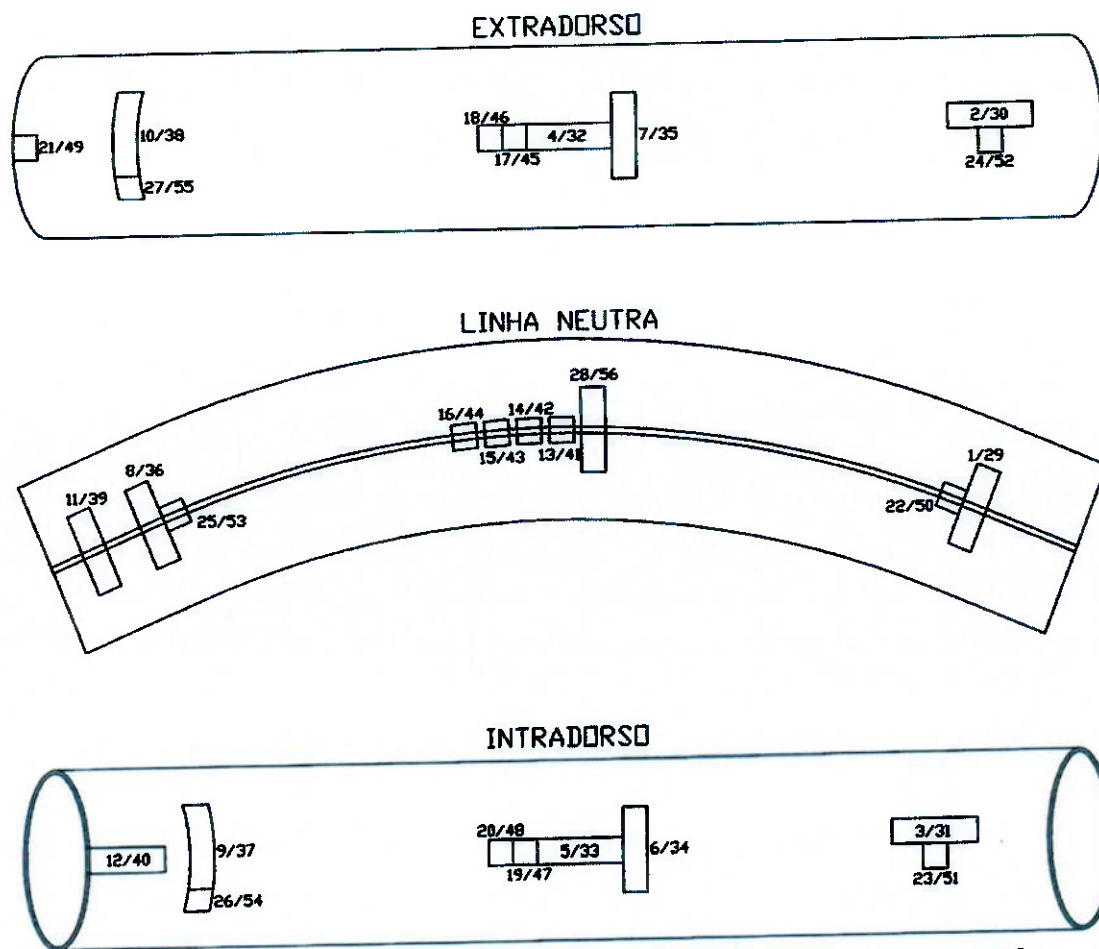


Figura 6.1.1 - Posição dos corpos de prova removidos das curvas a quente

As curvas produzidas a quente tem o limite de escoamento reduzido na região aquecida, neste primeiro teste ficando abaixo dos limites normativos dos tubos API 5L X70, possivelmente pelo rearranjo cristalino.

Tabela 6.1.2 - Tabela de propriedades mecânicas reduzidas, acrescida das variações proporcionais do LE e LR da região aquecida

Tubo	Cupom	Posição	Direção	LE (MPa)	LE/LE* %	LR (MPa)	LR/LR* %	Along. %
15,9 mm	2	Transição Extradorso	Longitud.	398	77	664	106	40,2
	3	Transição Intradorso	Longitud.	424	82	650	104	31,1
	4	Extradorso	Longitud.	404	78	669	107	39,4
	5	Intradorso	Longitud.	430	83	672	108	42,9
	12	Extremidade*	Longitud.	515*	100	624	100	39
12,7 mm	30	Transição Extradorso	Longitud.	422	82	675	105	25
	31	Transição Intradorso	Longitud.	495	96	654	102	31,7
	32	Extradorso	Longitud.	438	85	725	113	33,5
	33	Intradorso	Longitud.	434	84	719	112	38
	40	Extremidade*	Longitud.	515*	100	642	100	31,7

Nota(*)

Nas extremidades da curva o tubo não sofre aquecimento nem trabalho mecânico, mantendo as propriedades originais do tubo.

Pela tabela 6.1.2 constatamos abaixamento do limite de escoamento na região aquecida e na região de transição. A queda média foi de 84%, enquanto houve um aumento médio de 107% no limite de resistência.

Na região aquecida houve a recristalização com alteração das propriedades mecânicas. Os valores do LE apresentam uma redução percentual dos limites de mesma ordem de grandeza entre os dois tubos e mesmo entre as regiões tracionadas (extradorso) e comprimida (intradorso). A recristalização também levou ao aumento do limite de resistência proporcionalmente com valores da mesma ordem de grandeza, comparando-se as regiões tracionadas e comprimidas dos dois tubos.

A escolha de tubos com CE mais alto e aumento do rigor de esfriamento garante o endurecimento do tubo pelo ciclo térmico sofrido do aço, conforme o novo procedimento qualificado.

6.2 CURVAS EFETUADAS A FRIO

Tubos que apresentem um alto valor do parâmetro Bauschinger – β_{σ} tem maior dificuldade de curvamento a frio, devido ao deslocamento da linha neutra e consequente maior deformação na região comprimida do que na tracionada. Este fato aumenta a possibilidade de enrugamento e ovalização das curvas.

6.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA

6.3.1 MICROGRAFIAS

A figura 6.3.1.1 apresenta a micrografia realizada no metal de base da junta do tubo API 5L X70 PSL 2 de 28". Pode ser observada a estrutura ferrita-perlita com textura alinhada. Na ZAC figura 6.3.1.2 pode ser observada a recristalização com eliminação da perlita alinhada.

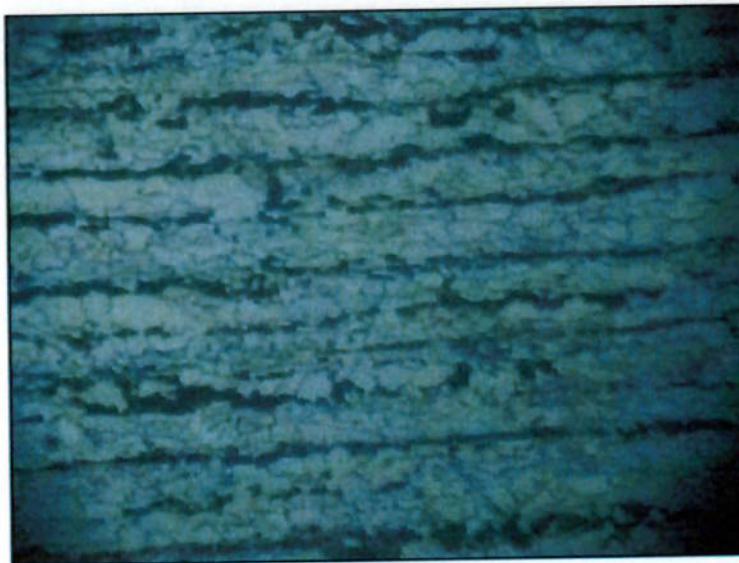


Figura 6.3.1.1 - Micrografia 200X do metal base da junta do tubo API 5L X70 PSL 2 de 28". Ataque com nital 2%.



**Figura 6.3.1.2 - Micrografia 200X na ZAC da junta do tubo API 5L X70 PSL 2 de 28".
Ataque nital a 2%.**

Estrutura similar com perlita alongada pode ser observada na micrografia do tubo API 5L X70 PSL 2 de 24", figura 6.3.1.3 e 6.3.1.4, mostrando também a estrutura ferrita-perlita alinhada.



Figura 6.3.1.3 - Micrografia 100X do metal base da junta do tubo API 5L X70 PSL 2 de 24", ataque de nital a 2%.

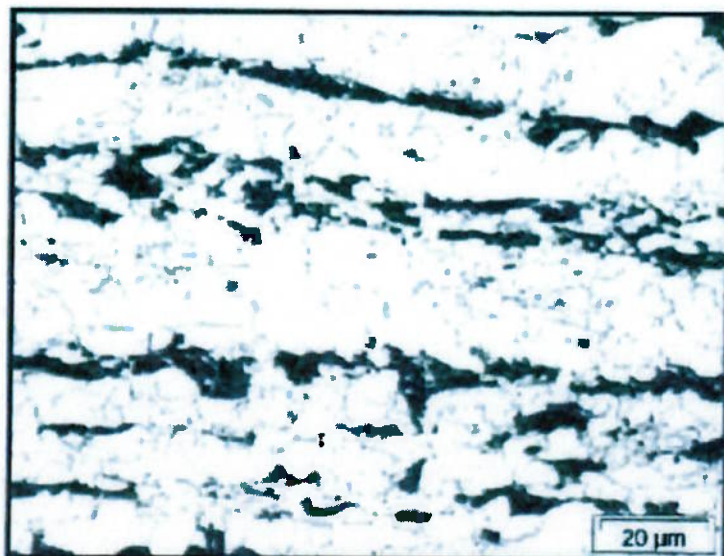


Figura 6.3.1.4 - Micrografia 1000X do metal base da junta do tubo API 5L X70 PSL 2 de 24", ataque de nital a 2%.

Podemos constatar também a semelhança da estrutura, perlita alinhada, apresentada pelo fabricante da chapa, para processo convencional de laminação, conforme figura 4.5.4.

As figuras 6.3.5 e 6.3.6 mostram a estrutura do metal atacado com o reagente Klemm 1 e analisadas com filtro azul. Apresentam grãos grosseiros na ZAC e estrutura ferrítica com bainita granular e grãos finos de agregados de carbono. O metal de base apresenta uma estrutura ferrítica e perlítica com grãos alongados no sentido da laminação. Verificamos também a presença de microestrutura MA, de forma bastante dispersa e refinada no metal de base e de forma mais grosseira na ZAC. O aumento da presença da microestrutura MA indica maior ocorrência do Efeito Bauschinger, Kostyryzhev [35].

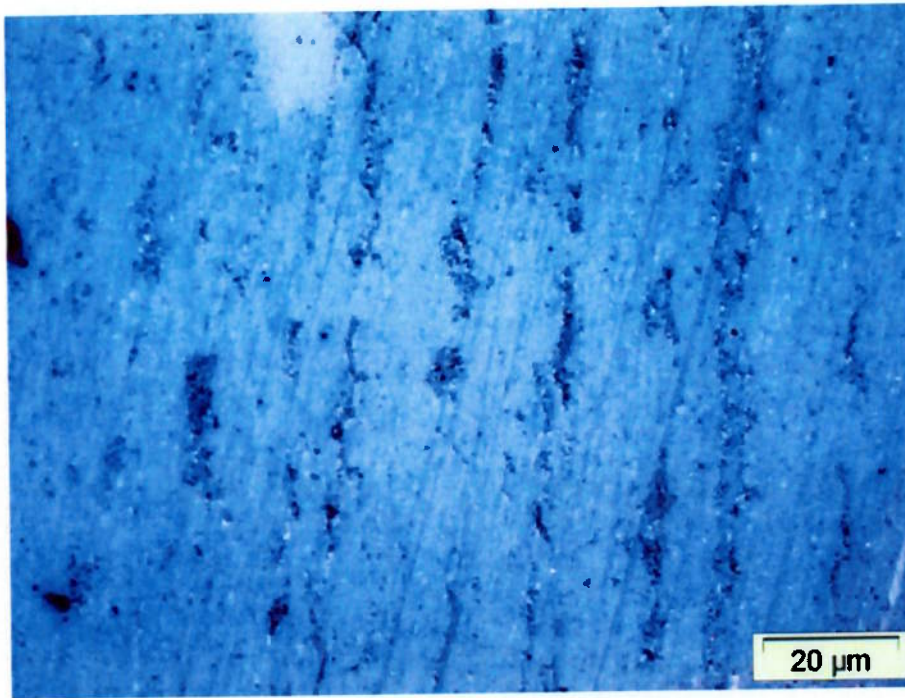


Figura 6.3.1.5 - Micrografia 1000X do metal base da junta do tubo API 5L X70 PSL 2 de 24", ataque com Klemm 1

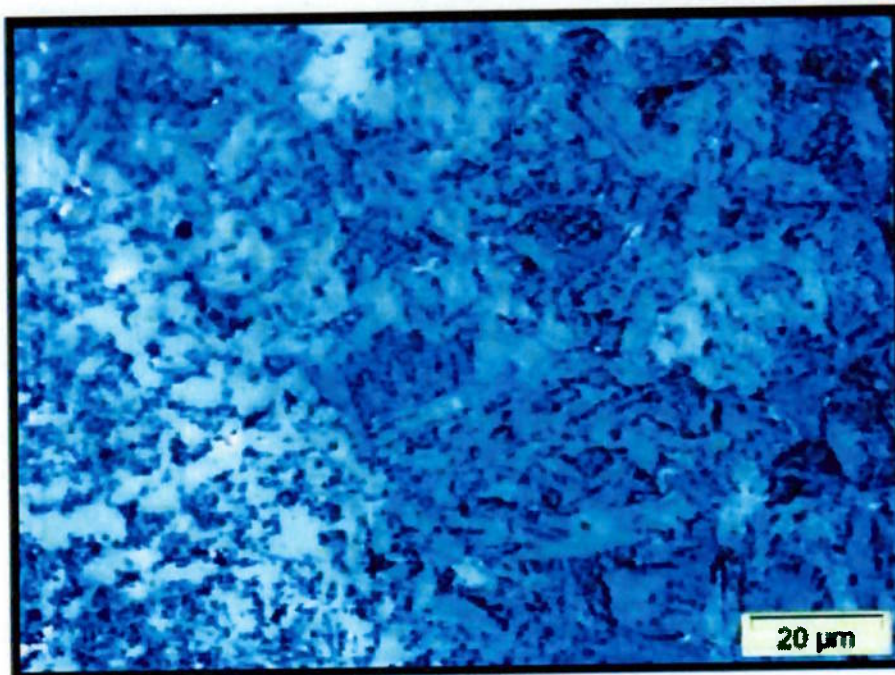


Figura 6.3.1.6 - Micrografia 1000X da ZAC da junta do tubo API 5L X70 PSL 2 de 24", ataque com Klemm 1.

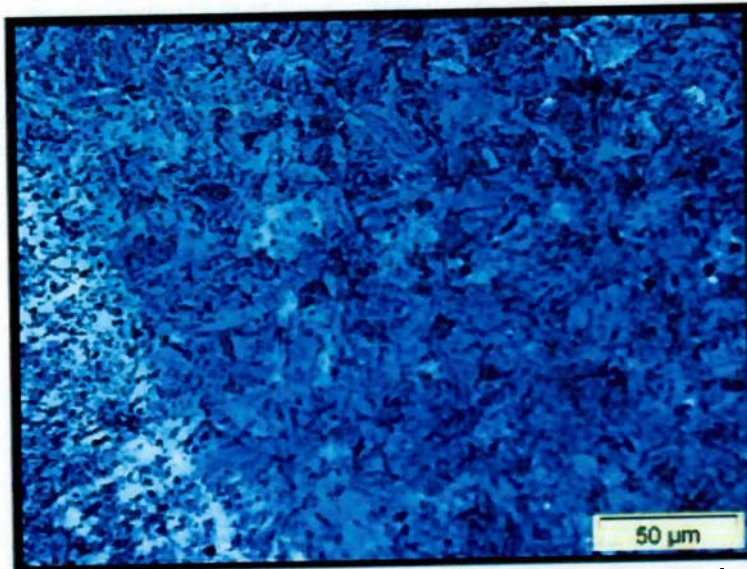


Figura 6.3.1.7 - Micrografia 500X da ZAC do tubo API 5L X70 PSL 2 de 24", ataque com Klemm 1

6.3.2 MACROGRAFIA, PERFIL DE DUREZA E ENSAIO DE TRAÇÃO

A figura 6.3.2.1 indica a zona fundida e a ZAC da junta soldada do tubo API 5L X70 de 24". No meio da espessura foram medidas as durezas, respectivamente: metal base; ZAC; zona fundida; ZAC e metal base. Os valores encontrados estão indicados na tabela 6.3.2.1.

Como podemos observar uma pequena variação nos valores encontrados de dureza. Considerando a proporcionalidade entre a dureza e o Limite de Resistência podemos concluir não há perda significativa de resistência à tração na ZAC.

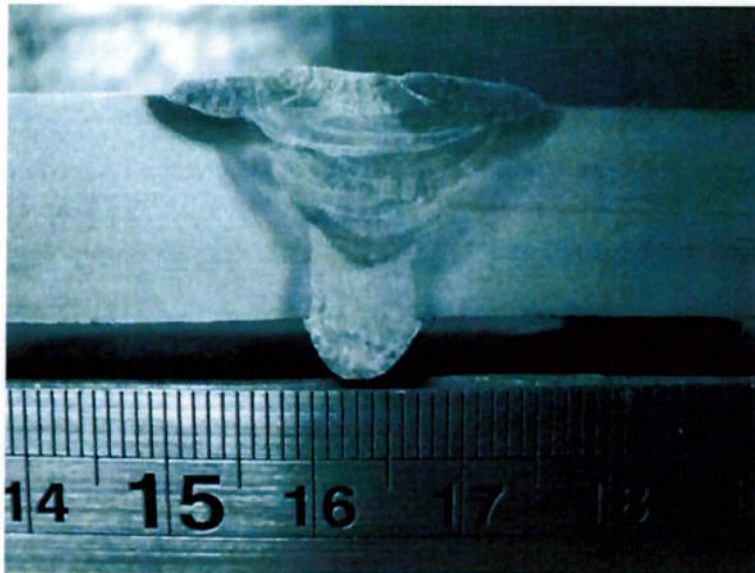


Figura 6.3.2.1 – Macrografia da junta do tubo API 5L X70 PSL de 24"

Tabela 6.3.2.1 - Perfil de Dureza Vickers HV10, levantado na junta do tubo API 5L X70 PSL 2 de 28"

MB	ZTA	SOLDA	ZTA	MB
194	185	191	182	186

A figura 6.3.2.2 apresenta o gráfico Tensão x Deformação do corpo de prova longitudinal, padrão API, retirado do tubo API 5L X70 de 24" . A figura 6.3.2.3 apresenta o gráfico Tensão x Deformação do corpo de prova padrão API, retirado da junta soldada do tubo API 5L X70 de 24". A Tabela 6.3.2.2 apresenta os valores dos limites de escoamento, ruptura e alongamento. Os valores foram determinados conforme a Norma API 5L.

O cupom da junta soldada apresenta um aumento de 1,7% do limite de ruptura e um decréscimo de 5,7% do limite de escoamento, indicando que não há perda de resistência do tubo devido ao ciclo térmico.

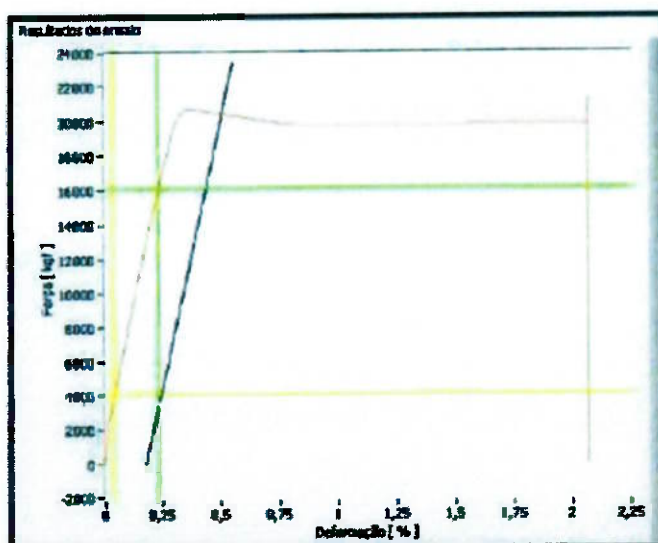


Figura 6.3.2.2 - Gráfico Tensão x Deformação, do tubo API 5L X70 de 24"

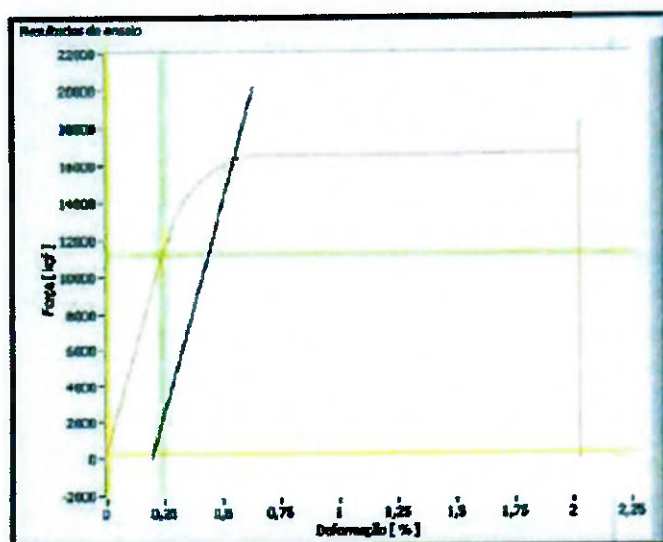


Figura 6.3.2.3 - Gráfico Tensão x Deformação da junta do tubo API 5L X70 de 24"

Tabela 6.3.218- Propriedades mecânicas dos ensaios de tração realizados no tubo e na junta do tubo API 5L X70 de 24"

Propriedades Mecânicas - Comparativo		
Propriedade	Metal de Base	Junta Soldada
Límite de Ruptura (MPa)	637	648
Límite de Escoamento (MPa)	612	577
Alongamento (%)	26,3	21,4

6.4 EFEITO BAUSCHINGER

Os aços ARBL utilizados na fabricação dos tubos API 5L X70 estão sujeitos ao efeito Bauschinger (FREIRE). Sua ocorrência é justificada de duas formas:

- a. Devido às tensões residuais de laminação;
- b. Pela teoria dos deslocamentos.

Os aços ARBL possuem em sua composição elementos de liga que criam precipitados, grão finos e estrutura ferrítica-perlítica obtida pela recristalização da austenita altamente deformada.

Através do tratamento estatístico de dados, ensaios de dureza, tração e metalográficos procuramos avaliar a ocorrência do efeito Bauschinger.

Analisando-se o tratamento estatístico verifica-se não haver correlação do limite de escoamento com a concentração de carbono e de carbono equivalente. Isto nos faz supor que existe grande influencia do processo de laminação controlada com resfriamento acelerado no limite de escoamento. Considerando-se a grande dispersão de limites de escoamento encontrados podemos pressupor que o processo de laminação sofre grandes influencias externas, variando o nível de encruamento, apesar de atender os limites especificados pelo API 5L para o grau 70.

As micrografias com reagente KLEMM 1 demonstram, através da microestrutura Martensita-Austenita, discreta no metal base e mais acentuada na ZAC indicando a ocorrência do Bauschinger. Além da estrutura MA, a queda do LE caracteriza a ocorrência do Efeito Bauschinger.

Na montagem do duto, o efeito Bauschinger somente é crítico na realização de curvas a frio em que tubos com altos parâmetros $\beta\sigma$ tem maior probabilidade de enrugamento. Esta situação pode ser minimizada na prática com a escolha dos tubos com menor limite de escoamento para efetuar as curvas mais acentuadas.

A redução do LE da ZAC pode levar a novos escoamentos da região por solicitação mecânica, mas como ocorre na expansão de fabricação do tubo UOE, não há comprometimento estrutural.

6.5 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE DADOS

São apresentados os gráficos de dispersão, teste de normalidade e correlação entre variáveis. O teste de normalidade foi efetuado pelo critério de Anderson-Daring.

A amostra analisada contém 4153 tubos API 5L X70 PSL 2 de 28", fabricados a partir de 99 lotes de chapas. A tabulação foi efetuada com um tubo de cada lote de chapa, uma vez que as análises químicas se repetem para cada lote de chapa.

A dispersão dos valores do carbono e do carbono equivalente, apresentam concentrações lineares nas frações centesimais. Para uma análise mais acurada é desejável que estes componentes sejam medidos até a terceira casa decimal.

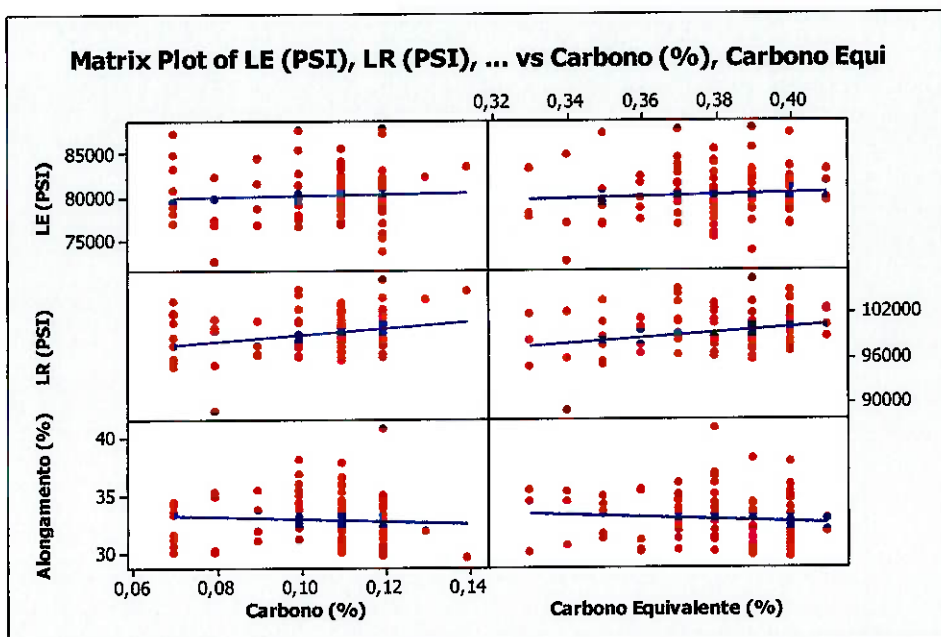


Figura 6.5.1 - Gráfico de dispersão dos dados e linha de tendência

Pela dispersão das variáveis constatamos não haver nenhuma tendência bem definida entre o %C e %CE com o LE e alongamento. Para o LR existe uma tendência de aumento do limite de resistência como aumento do %C e %CE.

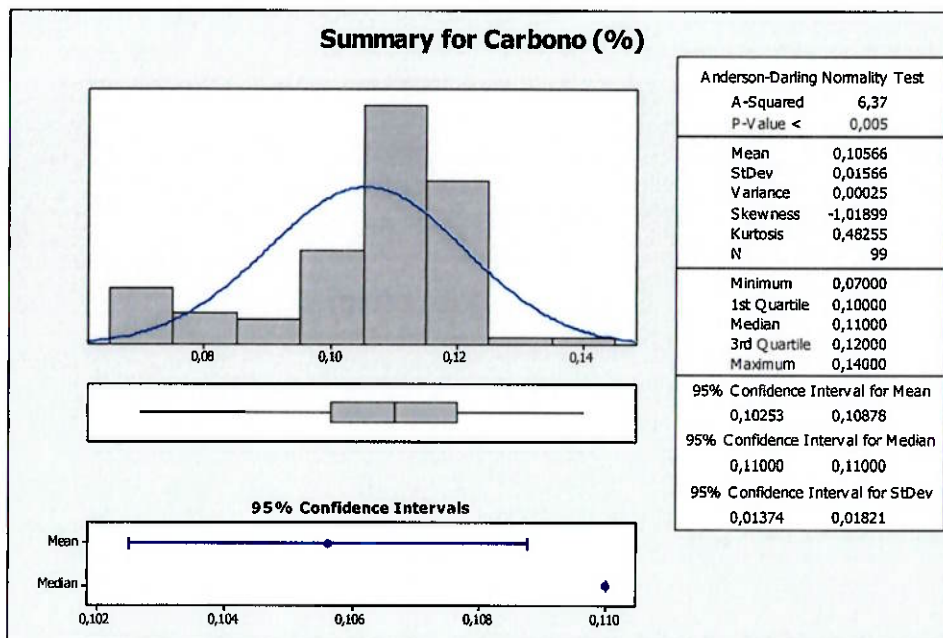


Figura 6.5.2 - Gráfico da distribuição dos dados do percentual de carbono

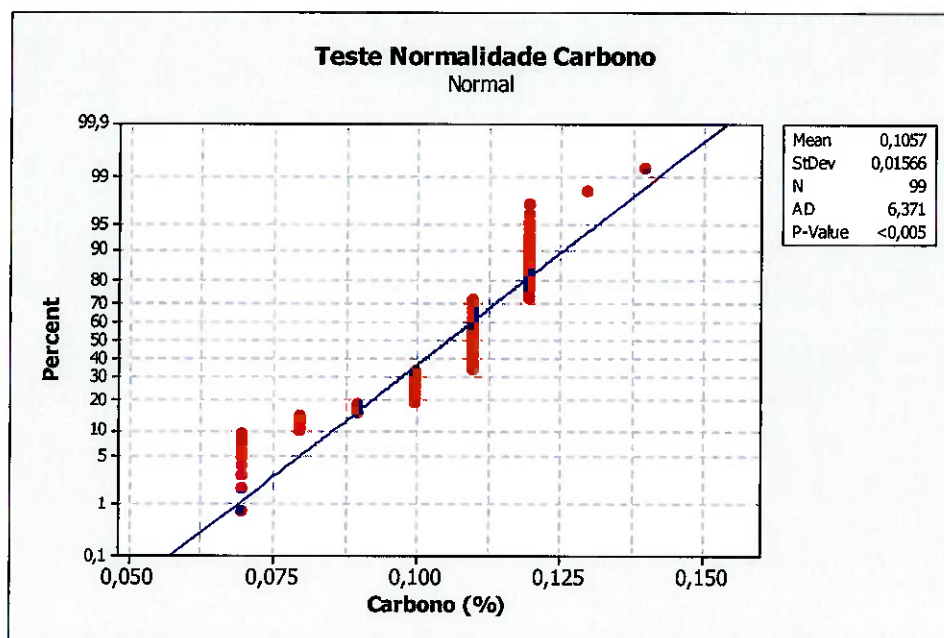


Figura 6.5.3 - Gráfico da dispersão do percentual de carbono.

A distribuição apresenta $P < 0,005$, portanto com 95% de probabilidade a distribuição do %C não é normal.

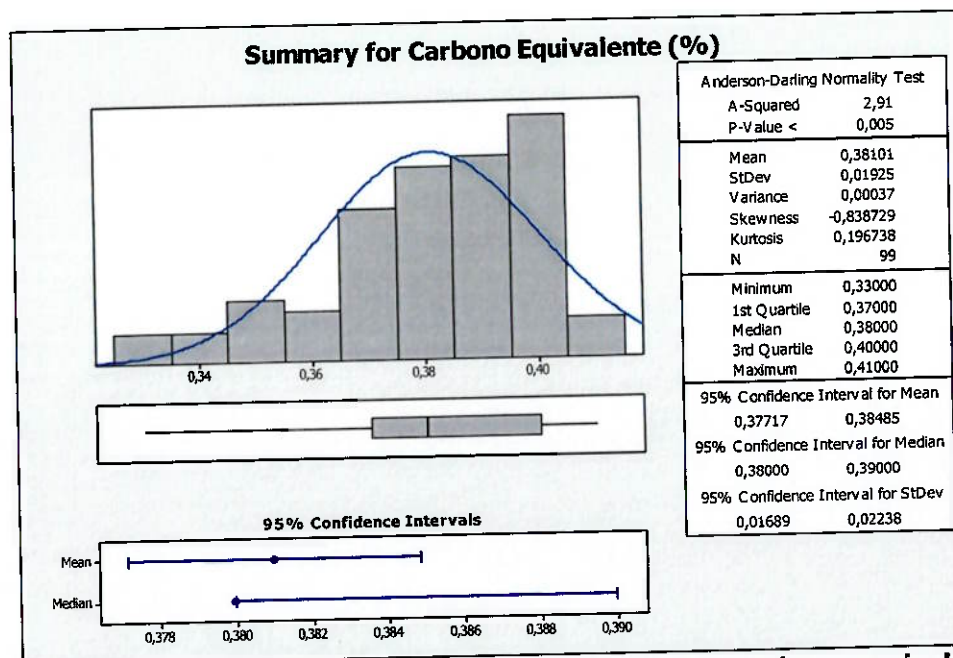


Figura 6.5.4 - Gráfico da distribuição do percentual de carbono equivalente

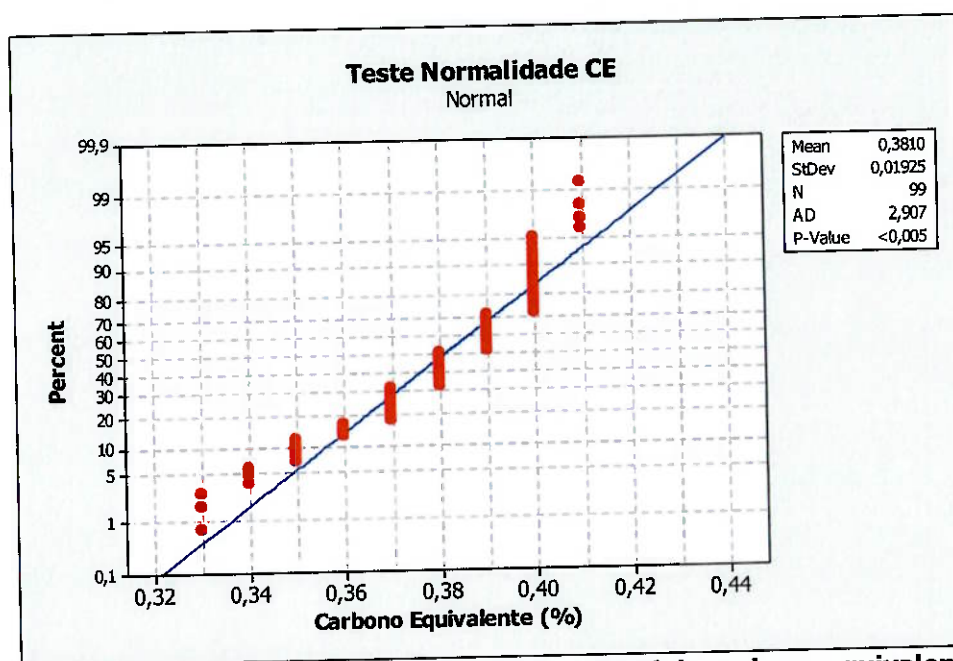


Figura 6.5.5 - Gráfico de dispersão do percentual de carbono equivalente

A distribuição apresenta $P < 0,005$, portanto com 95% de probabilidade a distribuição do %CE não é normal.

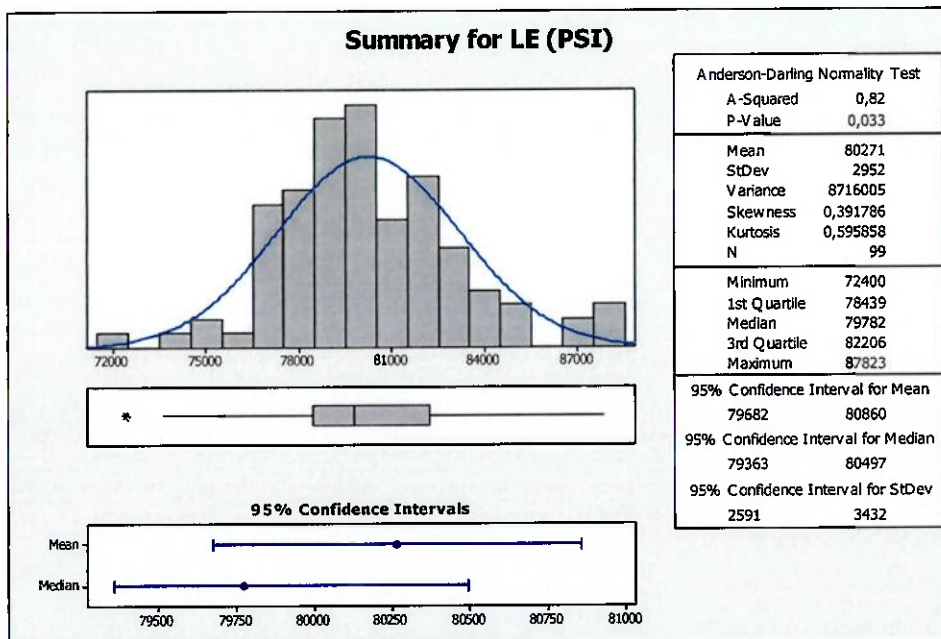


Figura 6.5.6 - Gráfico da distribuição do Limite de escoamento

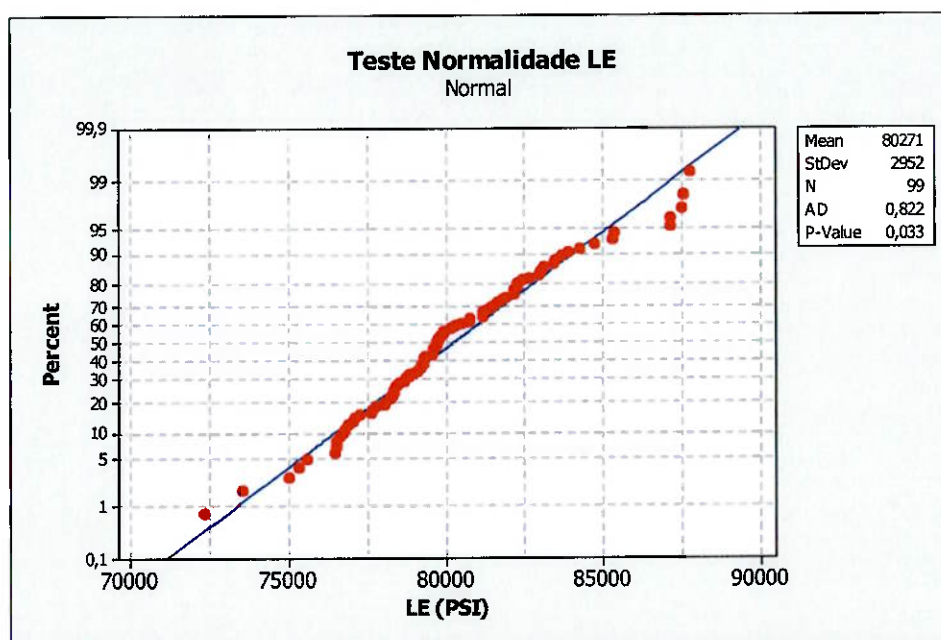


Figura 6.5.7 - Gráfico da Dispersão do Limite de Escoamento

A distribuição apresenta $P=0,03$, portanto $P<0,05$. Com 95% de probabilidade a distribuição do LE não é normal.

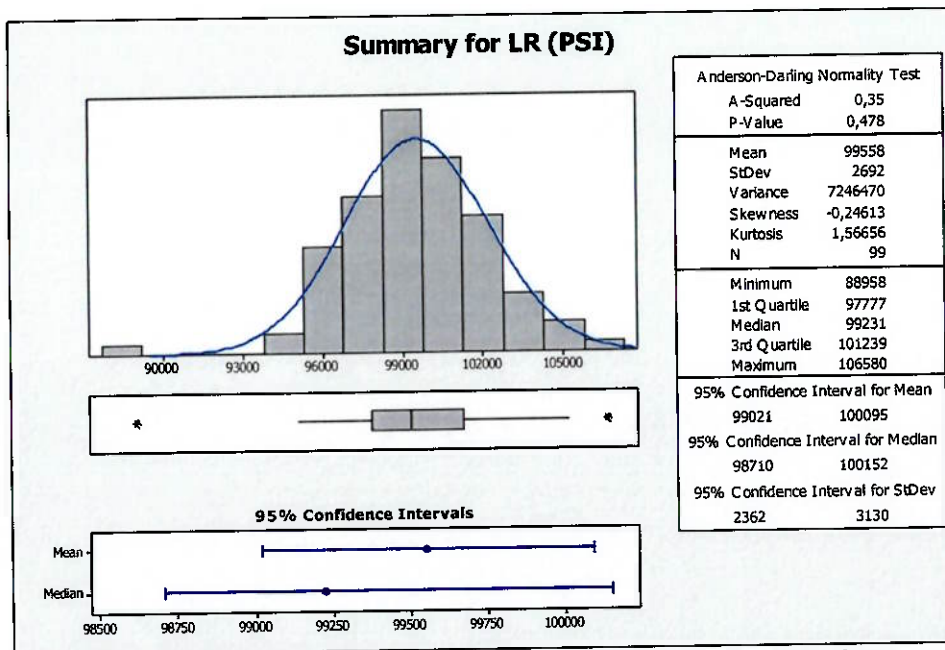


Figura 6.5.8 - Gráfico da distribuição do Limite de resistência

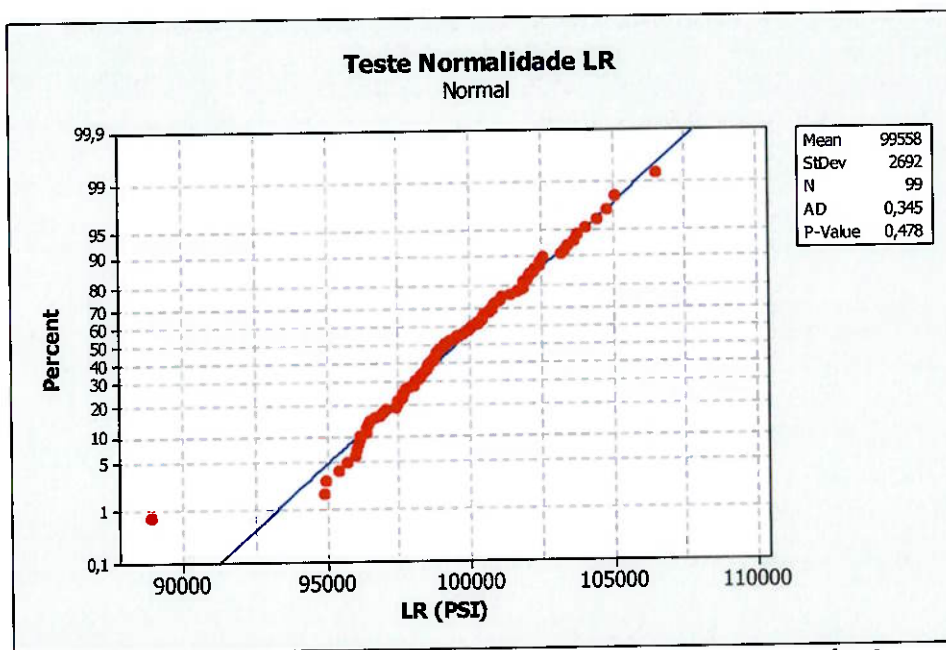


Figura 6.5.9 - Gráfico de dispersão do Limite de Resistência

A distribuição apresenta $P=0,478$, portanto $p>0,05$. Com 95% de probabilidade a distribuição de dados aproxima-se da curva normal.

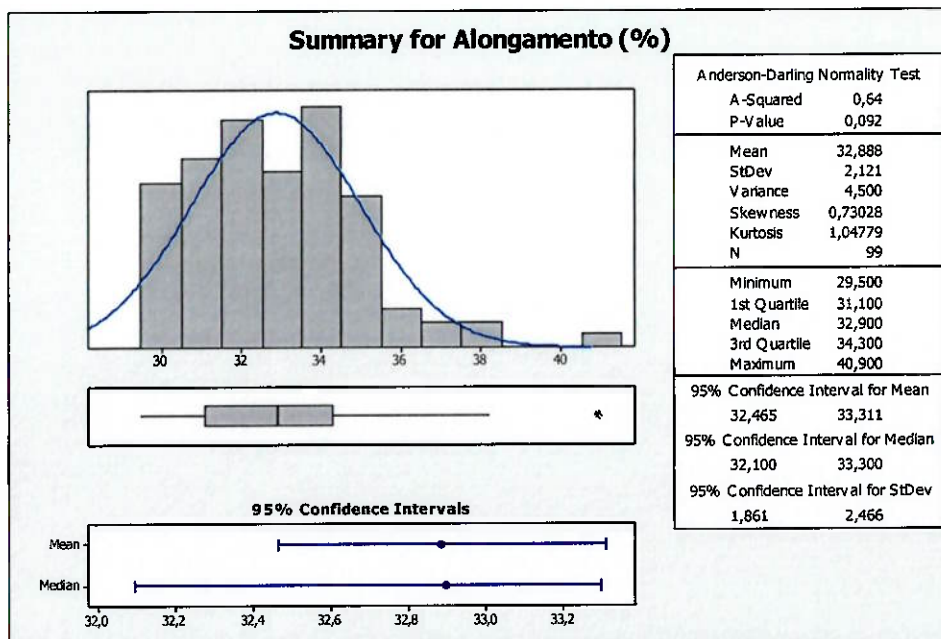


Figura 6.5.10 - Gráfico da distribuição do alongamento

A distribuição apresenta $P=0,092$, portanto $P>0,05$. Com 95% de probabilidade a distribuição do alongamento é normal.

Tabela 6.5.1 - Correlação: LE (PSI), Carbono (%), Carbono Equivalente, LR (PSI), Alongamento

	LE (PSI)	Carbono (%)	Carbono Equivale
Carbono (%)	0.047 0.646		
Carbono Equivale	0.065 0.523	0.851 0.000	
LR (PSI)	0.847 0.000	0.265 0.008	0.261 0.009
Alongamento (%)	-0.345 0.000	-0.083 0.414	-0.103 0.310
Alongamento (%)	LR (PSI) -0.351 0.000		

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Pela tabela em função do parâmetro "P" verificamos haver probabilidade com 95% de certeza de correlação do LR com %C, %CE, porém com 95% de

probabilidade não há correlação entre o LE e do alongamento com o %C e %CE.

A falta de correlação entre o limite de escoamento e os percentuais de carbono e carbono equivalente indicam haver mais fatores influenciando o limite de escoamento. Se considerarmos que nos aços ARBL o limite de escoamento tem influencia direta das variações na laminação com resfriamento controlado, a falta de correlação indica que o processo de laminação não é finamente controlado, mesmo atendendo as especificações API.

A Norma API 5L possui faixas relativamente amplas de composição química e propriedades mecânicas, inclusive alterando os limites de alguns elementos em função dos limites de outros. Como exemplo temos o aumento da concentração de manganês com a redução do teor de carbono. Este fato associado com a produção por lotes e não seriada justificam a distribuição não normal do percentual de carbono e de carbono equivalente.

A distribuição do LE também não normal possivelmente pela falta de indicadores das tensões, temperaturas e taxa de resfriamento de laminação, que são essenciais na obtenção do LE.

O LR para esta classe API apresenta uma distribuição normal indicada pela correlação com a composição e pelo fato de não sofrer sensíveis alterações no processo de laminação com resfriamento controlado.

6.6 TENSÕES NO DUTO.

O teste hidrostático do duto pode gerar tensões circunferenciais de até 100% do limite de escoamento, porém a junta soldada é solicitada por tensões

longitudinais que são 50% das circunferenciais. No trecho enterrado as tensões longitudinais geradas pelo ensaio são praticamente nulas, ficando apenas as tensões geradas pelo lançamento do duto na vala. No trecho aéreo as tensões longitudinais associadas com tensões externas podem superar o LE e causar o escoamento da ZAC apesar de que pelos estudos de Von Mises as solicitações externas devido ao TH serem 87% do trecho enterrado.

Em todas as análises efetuadas, ou seja: nas curvas com aquecimento por indução, ensaios de tração e medições de dureza, constata-se que em todos os ciclos térmicos e de trabalho até a montagem do duto, não há queda do limite de resistência.

Pelo tratamento estatístico verifica-se haver correlação entre o LR com o percentual de carbono e carbono equivalente, e assim sendo podemos concluir que, na rota de produção adotada pelo fornecedor brasileiro, o LR está correlacionado com a composição química do aço. Já a falta de correlação do LE com o %C e %CE, indicam haver grande influência do processo nos valores obtidos. A grande variação somente pode ser explicada por agentes externos não totalmente controlados, apesar de atender às especificações API 5L X70.

Pelas análises efetuadas através: dos ensaios das curvas, ensaios de tração percebe-se a queda do limite de escoamento nas regiões reaquecidas. As micrografias mostram a recristalização das ZACs, com eliminação da estrutura alongada adquirida na laminação com resfriamento controlado.

Tensões eventualmente geradas durante a fabricação dos dutos, associadas às tensões geradas durante o ensaio hidrostático podem levar as ZACs ao escoamento.

Para a parte enterrada do duto não há nenhum comprometimento estrutural, já para a parte aérea pode haver algum comprometimento estético, porém bastante discreto considerando-se que as deformações concentram-se na ZAC.

7. CONCLUSÃO

7.1 O Efeito Bauschinger existente nas chapas ARBL que atendem à Norma API 5L X70 dificulta a fabricação de curvas efetuadas a frio, a partir de tubos retos. A dificuldade pode ser contornada com a seleção de tubos com os menores LE.

7.2 O aumento da presença da microestrutura MA na ZAC da junta possibilita a presença do Efeito Bauschinger, que pode ter ocorrido uma vez que houve redução do LE na ZAC.

7.3 Pode haver aumento do encruamento na ZAC por associação de tensões externas com as pressões internas do duto. Após o novo escoamento haverá acomodação do duto sem consequências, uma vez que eventuais deformações são discretas, considerando-se as dimensões da ZAC em relação às dimensões do duto.

7.4 Não há queda do LR do tubo em consequência dos ciclos térmicos ou trabalhos mecânicos durante a montagem do duto. Todos os coeficientes de segurança, se associados ao LR, estão preservados.

7.5 O LR das chapas de aço ARBL para tubos API 5L X70 estão correlacionadas com a composição química do aço, não sofrendo grandes influências do processo de fabricação, considerando-se a mesma rota de produção utilizada atualmente.

7.6 Os aços dos tubos fabricados de 2007 a 2011 apresentaram microestrutura ferrita-perlita alongadas, similares entre si, mas diferentes do processo CLC.

8. SUGESTÃO DE NOVO TRABALHO

Avaliação comparativa da recristalização e efeito Bauschinger durante o processo de laminação com resfriamento controlado, na produção de aços ARBL.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio D.; HOMEM DE MELLO, Fábio D. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blücher, 2004. 494 p.
2. FREIRE, José Luiz F. (Org.). Engenharia de Dutos. Rio de Janeiro: ABCM, 2009.
3. DIETER, George E. Mechanical Metallurgy: SI Metric Edition. Adapted by David Bacon. London: McGraw-Hill, 1988.
4. BLAIN, Paul. Laminação e Forjamento dos Aços. Tradução de João Mendes França e Jardel Borges Ferreira. São Paulo: ABM, 1964. 486 p.
5. COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1997. 412 p.
6. BOTT, I. S. et al. High-Strength Steel Development for Pipelines: A Brazilian Perspective. Metallurgical and Materials Transactions A, vol 36A, p. 443-454. 2005.
7. GRAY, J. M. A Guide for Understanding & Specifying Chemical Composition of High Strength Linepipe Steels, Technical Report. Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, 2007.
8. RATNAPULI, R. C. Considerações Metalúrgicas de Fabricação dos Aços para Tubos API 5L. 62º Congresso Anual da ABM, 2007, Vitória. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2007
9. BAI, Y. Pipelines and Risers. Elsevier. 2001. p. 353-380

10. Ramirez, M. F. G. Estudo da Transformação Durante o Resfriamento Contínuo e da Microestrutura do Aço Microligado X80 Utilizado Na Construção de Tubos para Transporte de Gás Natural e Petróleo, 2008, 158 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo: 2008
11. ROCHA, D. B. Estudo soldabilidade de Tubo API do Tubo API 5L X80 Utilizando os Processos de Soldagem: MAG com Transferência Controlada e Eletrodo Tubular, 2010, 218p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
12. HULKA, K.; GRAY, M. High Temperature Processing of Pipelines Steel, Niobium Science & Technology, TMS, 587-612, 2001.
13. KOSTRYZHEV, A. G.; STRANGWOOD, M.; DAVIS, C. L. Mechanical Property Development During UOE Forming of Large Diameter Pipeline Steels, Taylor & Francis, Birmingham, 2010
14. SIMSIR, Caner et. al. The Bauschinger Effect in Supercooled Austenite of SAE 52100 Steel, Elsevier, 2010.
15. SEN, M. et al. Mechanical Properties of Cold Bend Pipes, Journal of Pressure Vessel Technology, v 130, May 2008, <<http://www.asme.org>> acesso em 01/08/2011.
16. KOSTRYZHEV, A. G.; STRANGWOOD, M.; DAVIS, C. Bauschinger Effect in Microalloyed Steels: Part II. Influence of Work Softening of Strength Development During UOE Pipe Forming, Metallurgical and Materials Transactions A, v 42, May 2011.

17. KOSTRYZHEV, A. G.; STRANGWOOD, M.; DAVIS, C. Influence of Microalloying Precipitates on Bauschinger Effect During UOE Forming of Line Pipe Steels, *Materials Technology*, v 22, 2007.
18. KOSTRYZHEV, A. G.; STRANGWOOD, M.; DAVIS, C. Bauschinger Effect in Nb and V Alloyed Line-Pipe Steels, *Ironmaking and Steelmaking*, v 36, 2009.
19. ORTON, J. P. An Overview of Line Pipe, Micro Alloying 75 Proceedings, Pub. Union Carbide, Washington, 1977, p. 334-347
20. TENARISCONFAB: Processo de Fabricação SAW Longitudinal (U-O-E), Catálogo de Produto, <<http://www.tenaris.com>>, acesso 26/08/2011.
21. PRIMUS PROCESSAMENTO DE TUBOS – Protubo: Curvamento por Indução, <<http://www.protubo.com.br>>, acesso em 26/08/2011.
22. USIMINAS, Catálogo de Produtos: Sincron, <<http://www.usiminas.com>>, acesso em 26/08/2011.
23. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15280-1: Dutos Terrestres Parte 1: Projeto, 2 ed. Rio de Janeiro, 2009.
24. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15280-2: Dutos Terrestres Parte 2: Construção e Montagem, Rio de Janeiro, 2005.
25. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12712: Projeto de Sistemas de Transmissão e Distribuição de Gás Combustível, Rio de Janeiro, 2002.
26. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 1110: Pressure Testing of Steel Pipelines for Transportation of Gas, Petroleum Gas, Hazardous Liquids,

- Highly Volatile Liquids or Carbon Dioxide: API Recommended Practice 1110, 15 th ed, 2007.
27. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 1104: Welding of Pipelines and Related Facilities: API Standard 1104, 20 th ed, 2005.
28. PETROBRAS CONTEC. N 464, revisão H: Construção, Montagem e Condicionamento de Duto Terrestre, Rio de Janeiro, 2008.
29. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B31.4: Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids, 2006.
30. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B31.8: Gas Transmission and Distribution Piping Systems, 2003.
31. CANELAS, A. L. S., Investimentos em Exploração e Produção Após a Abertura da Indústria Petrolífera no Brasil: Impactos Econômicos, 2004, 107 p. Monografia (Bacharelado em Economia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
32. BARROS FILHO, O. L.; BOJUNGA, Sylvia (orgs). Potência Brasil: Gás Natural, Energia Limpa para um futuro Sustentável. Capítulo Monteiro Lobato e a Emergência da Política do Petróleo no Brasil escrito por Paulo Roberto de Almeida, Porto Alegre: Laser Press Comunicação, 2008, 144p.
33. HISTÓRIA E LENDAS DE CUBATÃO – OLEODUTO SANTOS/SÃO PAULO. Disponível em <<http://WWW.novomilenio.inf.br/Cubatão/ch028a.htm>>, consultado em setembro de 2011.

34. SOUZA, A. C. Especialização em Engenharia de Soldagem: Processos de Soldagem e Junção. Pece Poli. Notas de Aula. São Paulo, 2010
35. KOSTRYZHEV, A. G. Bauschinger Effect in Nb and V Microalloyed Line Pipe Steels, 2009, 198 p. Tese (Doctor of Philosophy) – University of Birmingham. Birmingham: 2009.

10. ANEXO I

Relatório Lab Metal – nº 9963/11

Relatório Team Lab – nº USP – 0002C/11

Relatório Team Lab – nº USP – 0002/11

Relatório Team Lab – nº USP – 0002CC/11

Cliente: TCC - USP

Identificação:

CORPO I

Ensaios realizados:

01 Dureza Vickers;

01 Macro;

01 Micrografia

1 – Ensaio de Dureza Vickers HV10

MB	ZTA	SOLDA	ZTA	MB
194	185	191	182	186

Equipamento utilizado: Microdurômetro MD 01 – Microtest HV-10 B.
Certificado de calibração: nº. CC11 02484 – Val. 04/2012.

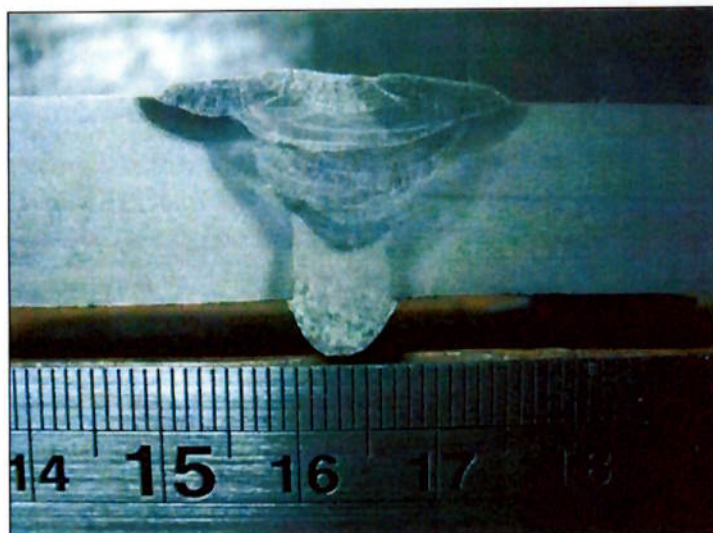
2 – Ensaio de Macrografia

Foto 01: Amostra isento de descontinuidades

3 – Análise Micrográfica



Foto 01 – Região analisada ZTA 200X

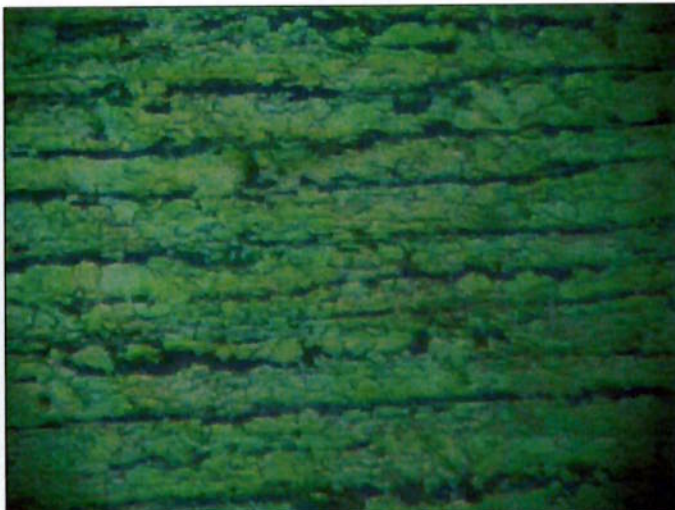


Foto 02 – Região analisada MB 200X

Conclusão: região analisada, pode-se observar estrutura composta de perlita e ferrita com tamanho de grãos irregulares.

Recepção	Realização	Emissão
24/10/2011	01/12/2011	São José dos Campos 01 de dezembro de 2011
Inspetor de Soldagem  Renato Micheletto Laurino SNQC: IS-10300-N1		Técnico em Mecânica  Valéria Aparecida de Andrade CREA:2608426093
Controle de Revisões		
Numero	Data	Revisão
00	01/12/2011	Emissão Original
Laudo ☐ Aprovado ☐ Reprovado Data __/__/__		
Inspetor de Soldagem Nível 2		

Este relatório é válido exclusivamente para a amostra analisada nas condições do recebimento, não sendo estendido a quaisquer outras amostras, mesmo que similares.
A reprodução deste documento somente poderá ser feita integralmente, sem quaisquer alterações.

Rua: Araguaia, 180 – Vila São Bento – São José dos Campos – CEP: 12231-380.

Fone/Fax (12) 3923 6168

e-mail: labmetal@labmetaltale.com.br

LABORATÓRIO DE ENSAIO PERTENCENTE À REDE BRASILEIRA DE LABORATÓRIOS DE ENSAIOS – RBLE

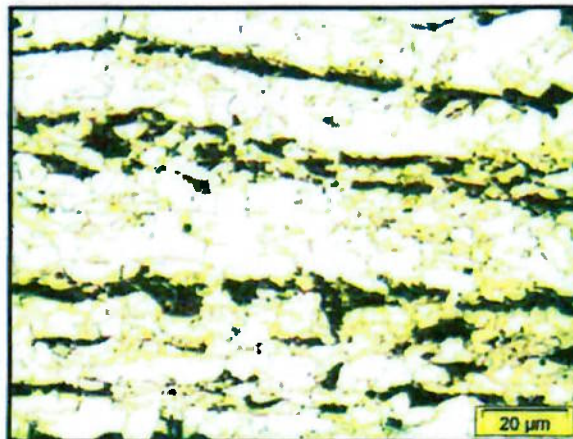
Solicitante/Interessado: **IZEDS BASSETTO**

Endereço: **Rua Frei Donato, 320 - Centro - Lemes-SP - CEP 13610-290**
Informações fornecidas pelo solicitante:

Aplicação:.....Análise micrográfica do metal de base

Norma de referência.....ANSI/API Specification 5L: 2007 + Addendum 2

Metal de base.....API 5L Grau X70


1 – MICROGRAFIA

Reagente utilizado.....Nital 2%
Sentido (MI).....Transversal
Ampliação.....100 e 1000 vezes
Máquina de Ensaio.....Microscópio Gx 41

Identificação	Análise Micrográfica
MI	Consiste de grãos encruados de ferrita e perlita em contorno de grãos, com textura alinhada

Preparação:.....ASTM E 3 - 07
Método de ensaio:.....ASTM E 7 - 03
Critério de aceitação.....Informativo

Microscópio
Identificação:.....TL-061
Régua Graduada.....TL-062
Certificado de calibração:.....D15588/11
Data de emissão:.....05 / 08 / 11
Entidade emitente:.....Feinmess

- ✓ Este relatório atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE/INMETRO, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.
- ✓ O ensaio foi realizado nas condições ambientais: (21 +/- 1) °C.
- ✓ Os resultados apresentados neste relatório têm significação restrita às amostras ensaiadas, não sendo extensivo a qualquer lote. É proibida a reprodução parcial deste relatório.

Ensaio realizado em 15 de Novembro de 2011.

Emissão de relatório em 15 de Novembro de 2011


José Batista Damasceno
Supervisor do Laboratório


Engº José de Deus Brito
Inspetor de Soldagem – SNQC 0207N2

LABORATÓRIO DE ENSAIO PERTENCENTE À REDE BRASILEIRA DE LABORATÓRIOS DE ENSAIOS - RBLE

Solicitante/Interessado: **IZEDS BASSETTO**

Endereço: **Rua Frei Donato, 320 - Centro - Lemes-SP - CEP 13610-290**

Informações fornecidas pelo solicitante:

Aplicação:.....Comparativo entre propriedades mecânicas do metal de base e a junta soldada

Norma de referência.....ANSI/API Specification 5L: 2007 + Addendum 2

Metal de base.....API 5L Grau X70

1 - ENSAIO DE TRACÃO (Metal Base)

Identificação	Espessura (mm)	Largura (mm)	Área (mm²)	Carga de Escoamento		Carga Máxima		L ₀ (mm)	L _r (mm)	D _r (mm)
				Kgf	(N)	Kgf	(N)			
T-MB	8,6	38,0	362,8	20.392	199 980	21 238	208.270	50,0	63,16	-

Identificação	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
T-MB	612	637	26,3

- Incerteza de Medição (I) = +/- 0,5%

2 - ENSAIO DE TRACÃO (Junta Soldada)

Identificação	Espessura (mm)	Largura (mm)	Área (mm²)	Carga de Escoamento		Carga Máxima		LC ₀ (mm)	LC ₁ (mm)	D _r (mm)
				Kgf	(N)	Kgf	(N)			
T-JS	7,25	38,1	276,2	16.247	159.330	18.252	178.990	50,0	60,7	-

Identificação	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)	Local de Ruptura
T-JS	577	648	21,4	Metal Base

Cálculo do alongamento da junta soldada

L ₀ (mm) - cordão de solda	L _r (mm) - cordão de solda	Alongamento do cordão de solda (%)	LC ₀ (mm)
12,4	14,46	16,6	L ₀ + 37,6 = 50,0

- Incerteza de Medição (I) = +/- 0,5%

Preparação:.....ASTM A 370-10, Figura A2.5

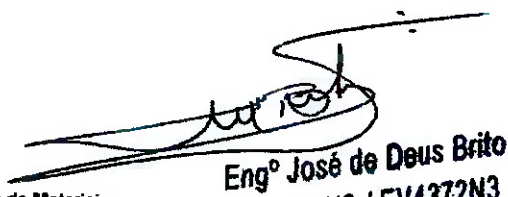
Método de Ensaio:.....ASTM A 370-10

Critério de Aceitação:.....API 5L, tabela 6

Limite de resistência especificado.....Min. 570 MPa (Metal base e solda)

Limite de escoamento especificado.....Min. 485 MPa (Metal base)

Alongamento.....Min. 27% (Metal base)

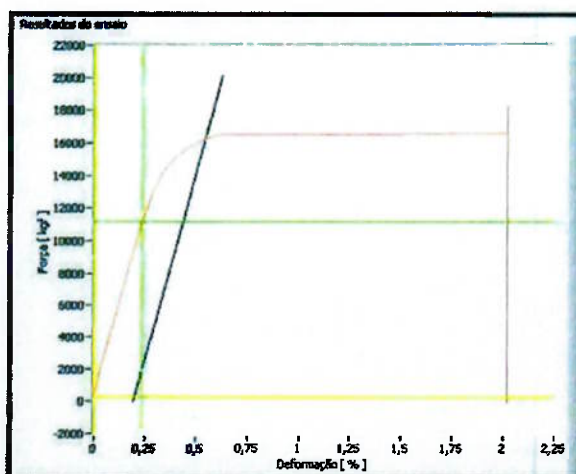
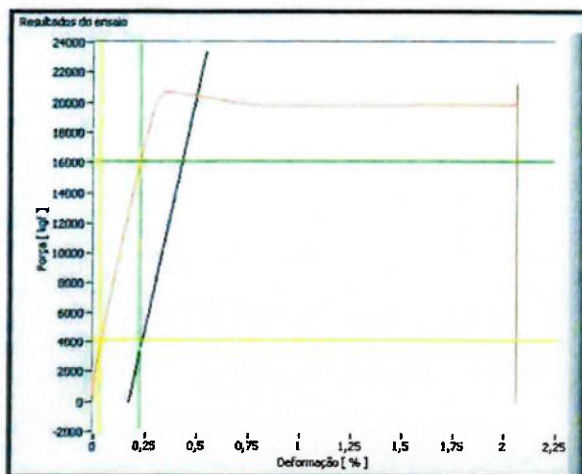


Engº José de Deus Brito
ISO207N2 / EV4372N3

TEAM LAB – Tecnologia em Ensaio e Análises de Materiais

Rua Dr. Pelágio Marques, 51 – Vila Matilde – São Paulo – SP – CEP: 03512-010

www.teamlab.com.br - Telefone: 2537-9007 / 2537-9009 / 2082-3406 / 2082-3415 / 2082-3399



Gráficos - Metal Base e Solda respectivamente

Propriedades Mecânicas - Comparativo		
Propriedade	Metal de Base	Junta Soldada
Limite de Ruptura (MPa)	637	648
Limite de Escoamento (MPa)	612	577
Alongamento (%)	26,3	21,4

- ✓ Este relatório atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE/INMETRO, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.
- ✓ Os ensaios foram realizados nas condições ambientais: (21 +/- 1) °C.
- ✓ A incerteza expandida declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada pelo fator de abrangência k=2, fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- ✓ Os resultados apresentados neste relatório têm significação restrita às amostras ensaiadas, não sendo extensivo a qualquer lote. É proibida a reprodução parcial deste relatório.

Ensaio realizado em 18 de Novembro de 2011.

Emissão de relatório em 18 de Novembro de 2011


José Batista Damasceno
Supervisor do Laboratório

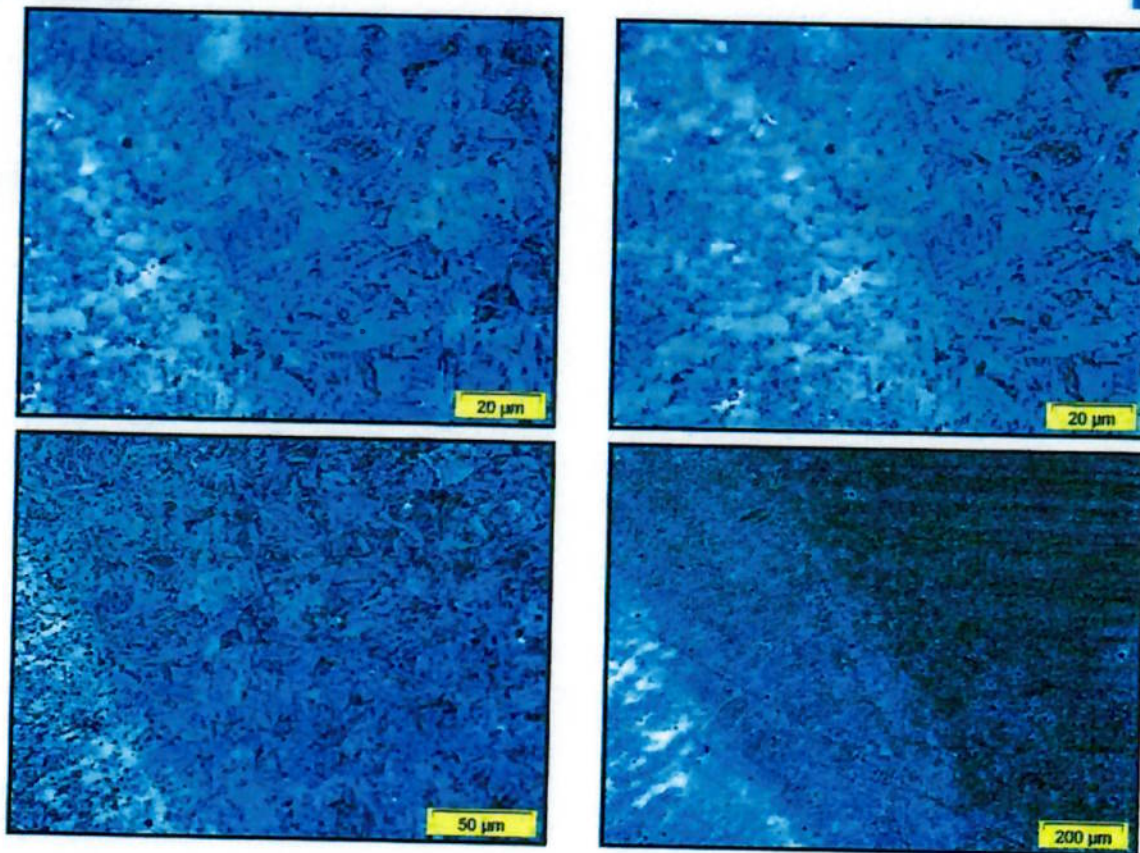

Eng. José de Deus Brito
Inspetor de Soldagem - SNQC 0207N2

LABORATÓRIO DE ENSAIO PERTENCENTE À REDE BRASILEIRA DE LABORATÓRIOS DE ENSAIOS – RBLE

Solicitante/Interessado: **IZEDS BASSETTO**

Endereço: **Rua Frei Donato, 320 - Centro - Lemes-SP - CEP.13610-290**
Informações fornecidas pelo solicitante:

Aplicação:Análise micrográfica
Norma de referência:ANSI/API Specification 5L: 2007 + Addendum 22
Metal de baseAPI 5L Grau X70

1 - MICROGRAFIA

Reagente utilizadoKLEMM 1
Sentido (MI)Transversal

Ampliação..... 100, 500 e 1000 vezes
Máquina de Ensaio.....Microscópio Gx 41

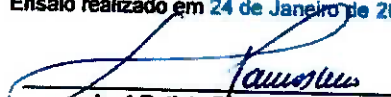
Identificação	Análise Micrográfica
MI	Metal Base: Estrutura ferrítica e perlítica, com grãos alongados no sentido de laminação Transição Metal Base e ZTA: Apresenta estrutura equiaxial ferrita e perlita ZTA: Região de grãos grosseiros, matriz ferrítica com bainita granular e grãos finos de agregados de carbono. Não apresenta bandas de segregação de Fósforo (P).

Preparação:ASTM E 3 - 07
Método de ensaio:ASTM E 7 - 03
Critério de aceitaçãoInformativo

Microscópio
Identificação:TL-061
Régua GraduadaTL-062
Certificado de calibração:D15588/11
Data de emissão:05 / 08 / 11
Entidade emitente:Feinmess

- ✓ Este relatório atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE/INMETRO, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.
- ✓ O ensaio foi realizado nas condições ambientais: (21 +/- 1) °C.
- ✓ Os resultados apresentados neste relatório têm significação restrita às amostras ensaiadas, não sendo extensivo a qualquer lote. É proibida a reprodução parcial deste relatório.

Ensaio realizado em **24 de Janeiro de 2012.**

Emissão de relatório em **24 de Janeiro de 2012.**

José Batista Damasceno
Supervisor do Laboratório


Eng. José de Deus Brito
Inspetor de Soldagem – SNQC 0207N2

TEAM LAB – Tecnologia em Ensaio e Análises de Materiais

Rua Dr. Pelágio Marques, 51 – Vila Matilde – São Paulo – SP – CEP: 03512-010

www.teamlab.com.br - Telefone: 2537-9007 / 2537-9009 / 2082-3406 / 2082-3415 / 2082-3399