

### 3 Material e Procedimento Experimental

#### 3.1. Material

Para este estudo foi utilizado um tubo API 5L X80 fabricado pelo processo UOE. A chapa para a confecção do tubo foi fabricada através do processo de laminação controlada sem utilizar a técnica do resfriamento acelerado. Para isto, foi utilizado um projeto de liga capaz de produzir uma microestrutura fina com alta taxa de encruamento, resultando em uma microestrutura final com matriz ferrítica e dispersão fina do microconstituente AM (austenita-martensita) além de pequena quantidade de perlita. A análise metalográfica realizada em fábrica revelou um tamanho de grão ASTM igual 12 para todas as chapas amostradas da corrida estudada. As dimensões do tubo usado no curvamento estão mostradas na Figura 43.

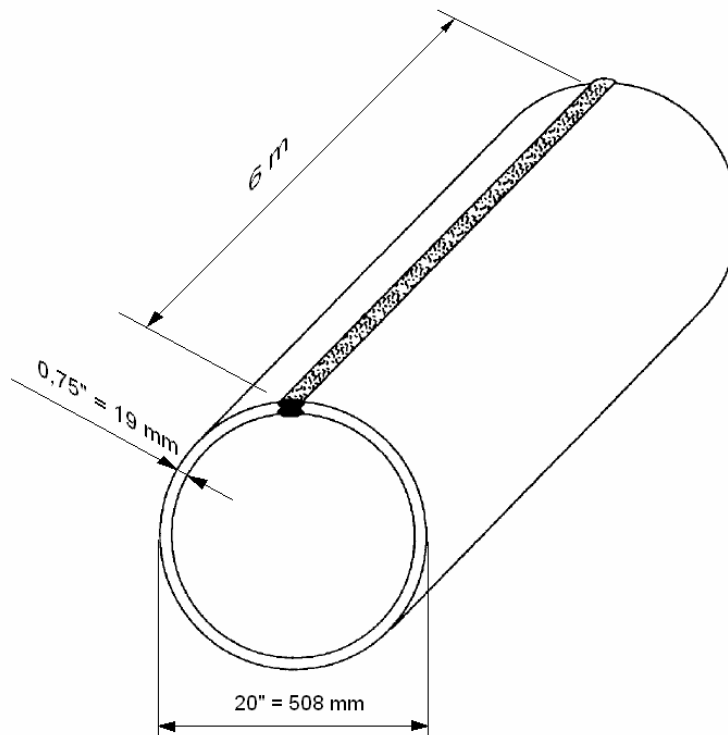


Figura 43- Dimensões do tubo API 5L X80 utilizado no estudo.

A Tabela 9 mostra a composição química da chapa utilizada para a fabricação do tubo e os valores de carbono equivalente.

Tabela 9- Composição química.

Elementos (% em peso)											
C	Mn	Si	Nb	V	Ti	Mo	Cr	Cu	Ceq (IIW)	Ceq (Pcm)	Nb+V+Ti
0,05	1,76	0,17	0,066	0,025	0,016	0,20	0,15	0,02	0,42	0,17	0,11
Elementos (em ppm)											
P	S	Sn	As	B	Ca	Ni	N	Al			
160	20	20	20	3	30	200	57	350			

Foram realizados pelos fabricantes do aço e do tubo, ensaios de tração transversal (Figura 44) para quinze chapas e tubos originados da mesma corrida do tubo deste estudo. Observe que, após a conformação em tubo, ocorreu um aumento de 45 MPa, em média, no limite de escoamento, sendo este valor suficiente para que o aço ficasse dentro dos limites pré-estabelecidos por norma.

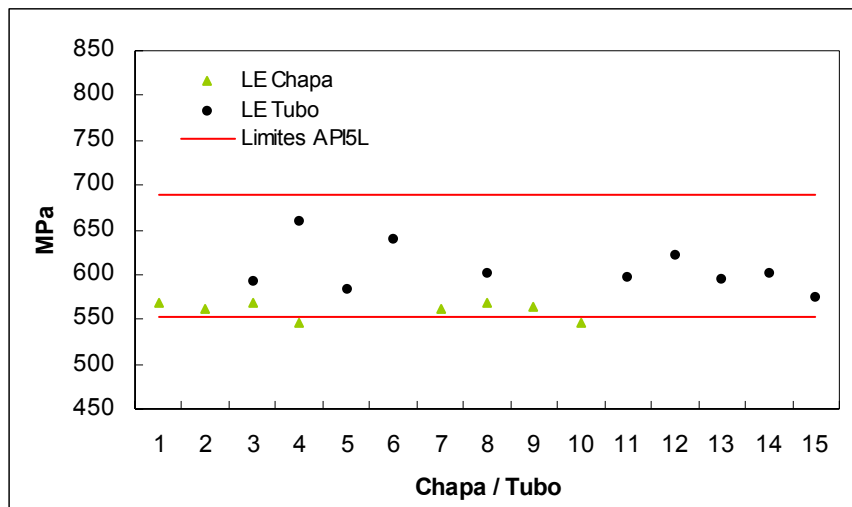


Figura 44- Comparação entre o limite de escoamento da chapa e do tubo.

Os aços que apresentam apenas microestrutura ferrítica-perlítica são mais sensíveis ao efeito Bauschinger e deste modo, após conformação em tubo, ocorre queda significativa no limite de escoamento [37]. Tornando-se necessário produzir chapas com limite de escoamento superior aquele requerido para o tubo.

Neste caso, o aumento no limite de escoamento ocorre porque na microestrutura obtida, as áreas duras do microconstituente AM quando tensionadas introduzem alta densidade de discordância na ferrita em torno,

resultando em um elevado encruamento. Deste modo estes aços se tornam pouco suscetíveis ao efeito Bauschinger.

A tenacidade ao impacto destas chapas e tubos foi avaliada por meio do ensaio de impacto Charpy-V (Figura 45), realizado pelos fabricantes nas temperaturas de  $-20^{\circ}\text{C}$  para a chapa e  $0^{\circ}\text{C}$  para o tubo. A morfologia da fratura foi 100% dúctil para todos os corpos de prova.

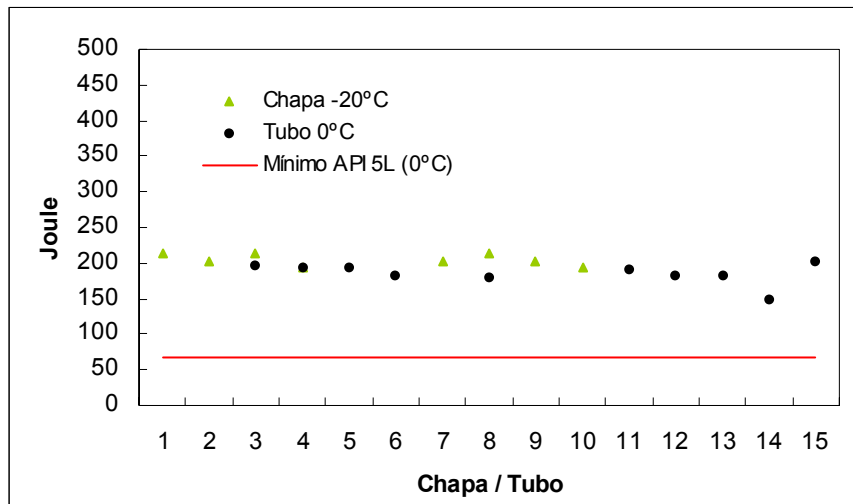


Figura 45- Resultado do ensaio Charpy-V.

Muito embora os testes de impacto dos tubos (realizados a  $0^{\circ}\text{C}$ ) tenham apresentado valores de energia absorvida bem próximos aos da chapa (testada a  $-20^{\circ}\text{C}$ ), a ocorrência de perda de tenacidade em função do processo de conformação à frio ainda não pode ser identificada, uma vez que os valores de energia absorvida para a chapa e tubo estão no patamar superior da curva de transição (100% de fratura dúctil).

## 3.2. Procedimento Experimental

### 3.2.1. Curvamento

O curvamento foi realizado na PROTUBO\* através do processo de indução por alta frequência. A Tabela 10 mostra as variáveis do processo.

Tabela 10- Variáveis do processo de curvamento.

Variáveis	Valores
Comprimento curvado	3 m
Raio de curvamento (R)	5D = 100'' = 2,54 m
Relação D/t	27
Ângulo de curvamento	70°
Velocidade de curvamento	0,6 mm/s
Temperatura de curvamento	~ 1050 °C
Meio de resfriamento	Água
Pressão do meio de resfriamento	0,3 kgf/cm <sup>2</sup>
Potência de indução	105 kW

Kondo et al [31] comentam que a temperatura ideal de aquecimento para tubos com baixo carbono contendo Nb, geralmente está na faixa de 950 a 1050 °C.

O raio de curvamento de 5D foi escolhido por ser o valor mais crítico normalmente utilizado em dutos. O ângulo, é função do comprimento curvado e do raio de curvamento, sendo neste caso 70°.

As figuras 46 a 48 mostram a seqüência do teste de curvamento, onde na Figura 47, é mostrada a retirada do tubo e na Figura 48 estão indicadas as diferentes regiões que serão avaliadas: parte reta, zona de transição e curva.

---

\* Protubo- Primus Processamento de Tubos S.A. Empresa onde foram realizados os testes de curvamento.



Figura 46- Curvamento por indução realizado na PROTUBO.

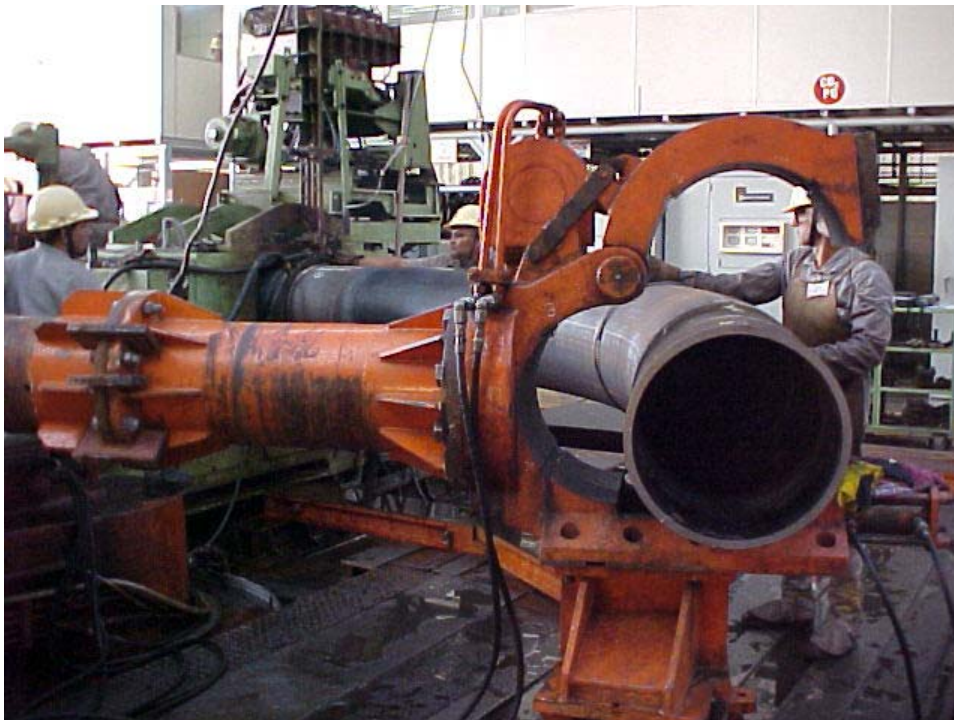


Figura 47- Retirada do tubo após o curvamento.

O aquecimento foi aplicado somente na região curvada, criando duas zonas de transição; uma ao ligar a bobina e outra no desligamento. As extremidades retas permaneceram em seu estado original (Figura 48).



Figura 48- Tubo curvado.

### 3.2.2. Metodologia de Avaliação do Curvamento

Para avaliar o efeito do curvamento nas propriedades do tubo, foram realizados ensaios mecânicos de tração, microdureza e Charpy-V em 10 regiões da curva (Figura 49):

- |                                     |                                       |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 1- Solda da parte reta.             | 6- Linha neutra na zona de transição. |
| 2- Zona de transição do extradorso. | 7- Intradorso.                        |
| 3- Extradorso.                      | 8- Linha neutra na curva.             |
| 4- Solda na curva.                  | 9- Zona de Transição do intradorso.   |
| 5- Solda na zona de transição.      | 10- Parte reta.                       |

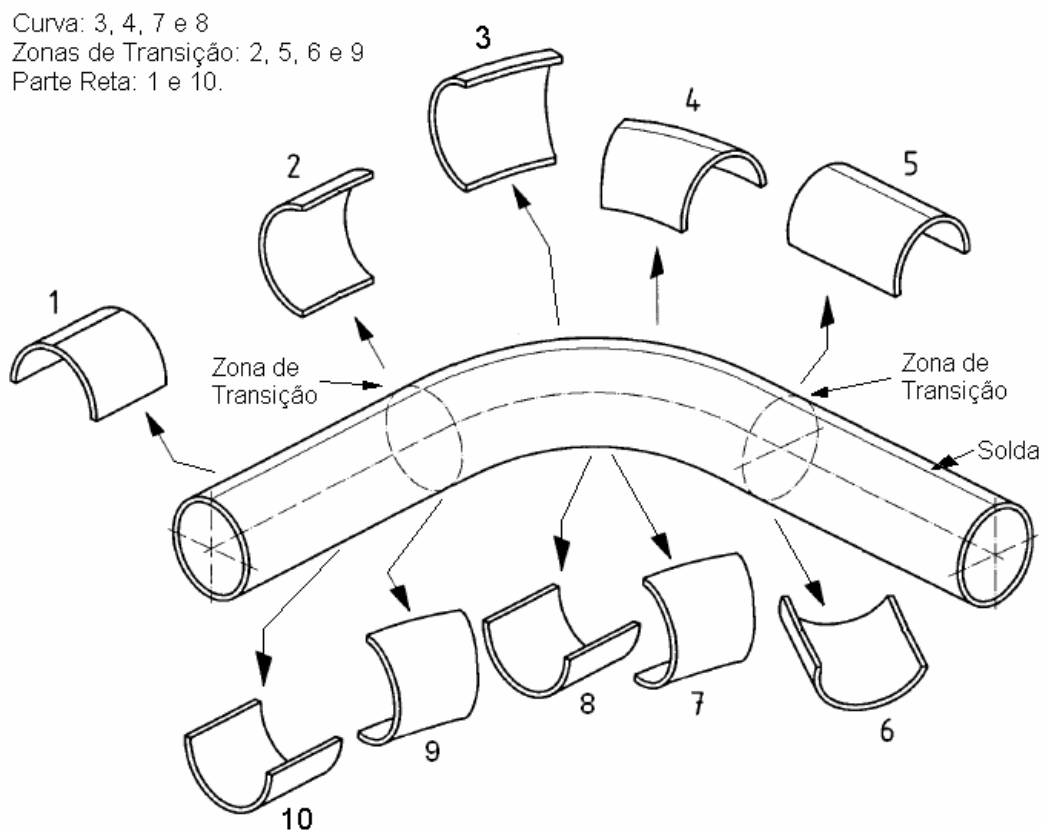


Figura 49- Regiões avaliadas com ensaios mecânicos e metalografia.

Adicionalmente, foi realizada uma avaliação metalográfica para caracterizar a microestrutura do tubo curvado e comparar com a microestrutura original não afetada pelo calor.

### 3.2.3. Ensaio de Tração

Para o ensaio de tração foram utilizados corpos de prova retirados na direção longitudinal e transversal em relação ao sentido de laminação da chapa. Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com a norma API 5L [16]. As dimensões podem ser vistas na Figura 50. Os tipos utilizados estão identificados por um retângulo.

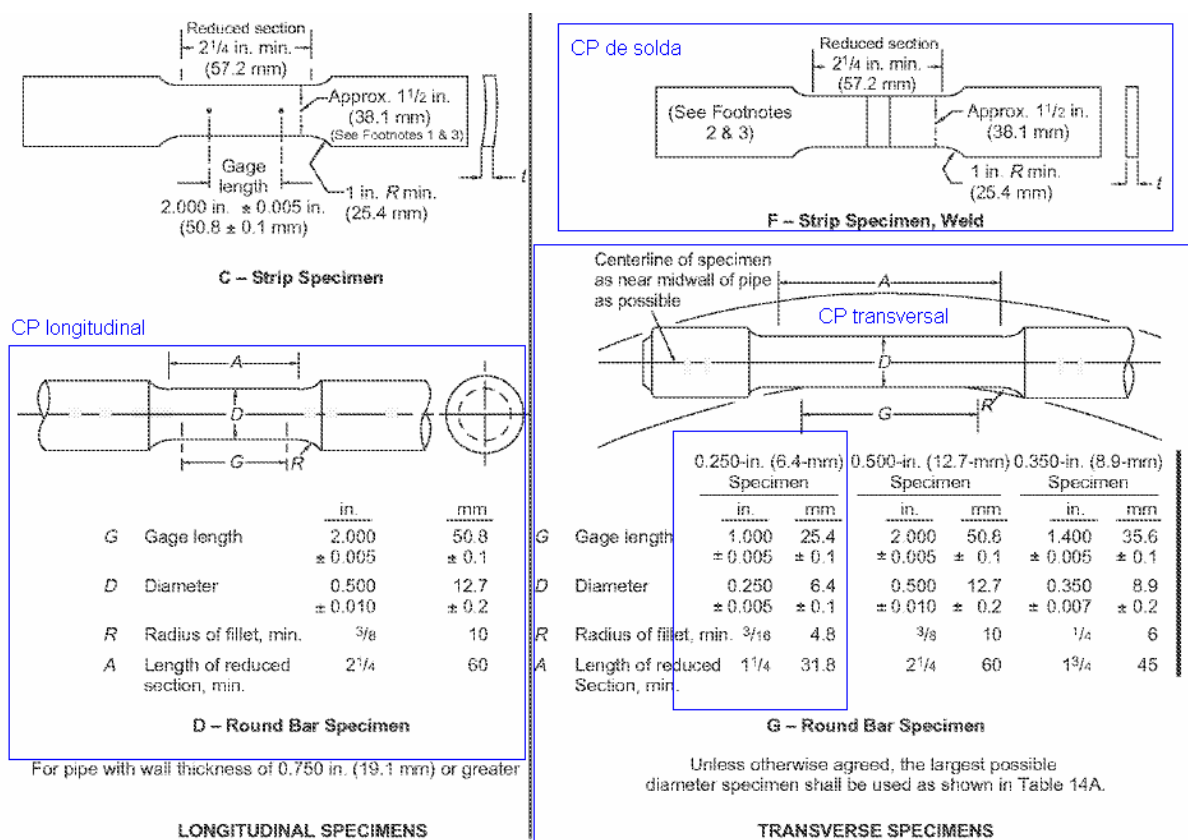


Figura 50- Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração. Extraído da API 5L [16].

A Figura 51 mostra a orientação em que foram retirados os corpos de prova.



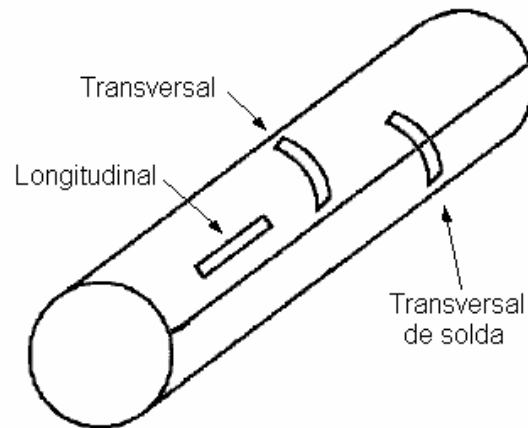


Figura 51- Orientação dos corpos de prova de tração.

O ensaio foi realizado segundo as normas API 5L [16] e ASTM A 370 [40].

### 3.2.4. Ensaio Charpy

O ensaio Charpy foi realizado segundo as normas API 5L [16] e ASTM A 370 [40]. Foram utilizados corpos de prova com as dimensões de 10 x 10 x 55 mm e entalhe em V. Os corpos de prova foram retirados nos sentidos longitudinal e transversal em relação à direção de laminação. A Figura 52 mostra a orientação do entalhe e dos corpos de prova no tubo.

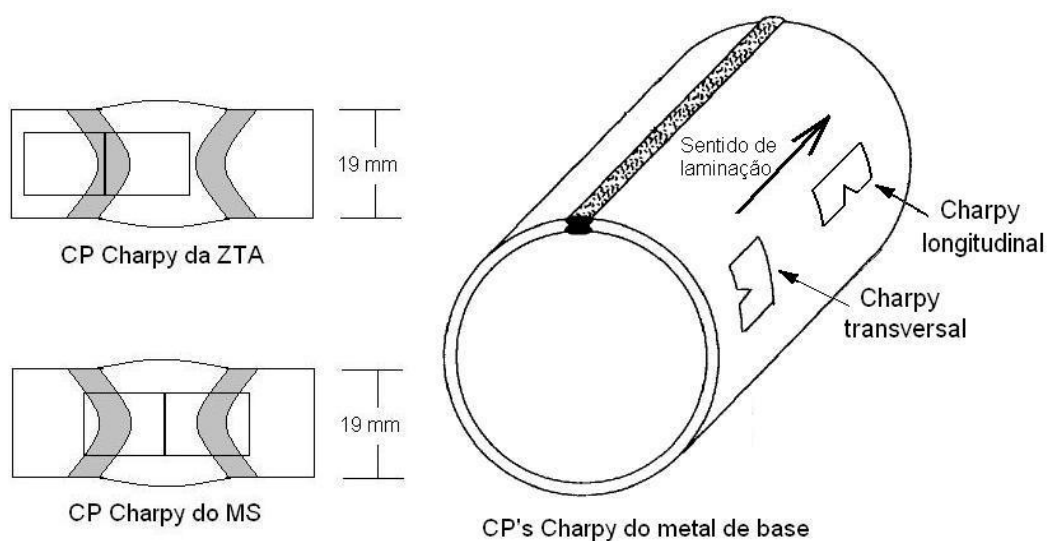


Figura 52- Orientação dos corpos de prova e do entalhe para o ensaio Charpy.

O ensaio foi realizado nas temperaturas de 0, -20, -40, -60 e -80, com 3 CP's para cada temperatura de ensaio.

### 3.2.5. Ensaio de Microdureza

Para o ensaio de microdureza foi utilizado o método Vickers com carga aplicada de 100gf por 15s. As medições de microdureza foram realizadas em três regiões ao longo da espessura: a 2 mm da superfície interna do tubo, no centro da espessura e a 2 mm da superfície externa. Para cada região analisada, uma série de leituras foi feita, registrando-se a média de 3 impressões. Os pontos vermelhos da Figura 53 indicam os locais onde foram realizadas as leituras de microdureza na junta soldada.

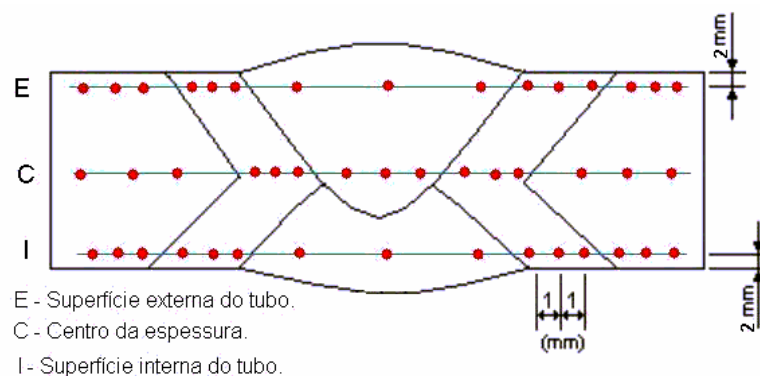


Figura 53- Local de medição da microdureza Vickers das juntas soldadas.

### 3.2.6. Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural foi feita através de microscopia ótica e eletrônica de varredura (MEV) no metal de base (em todas as regiões estudadas) e microscopia ótica no metal de solda e ZTA. As amostras para microscopia ótica foram lixadas, polidas e atacadas em uma solução de nital 2%.

Para identificar o microconstituente AM e distinguí-lo de carbonetos, foi realizado um ataque eletrolítico em duas etapas [41, 42]. Após o ataque, as amostras foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV).