

5

Tensões Residuais em Tubos

5.1. Existência

Processos como dobramento da chapa para formação do tubo, soldagem e expansão a frio, são geradores de tensões residuais significativas conforme já foi visto nos capítulos 1 e 2. Estes processos estão todos inclusos no processo UOE de fabricação, pelo qual os tubos analisados neste trabalho foram fabricados. Serão expostos neste capítulo, os procedimentos utilizados para as medições de tensões em dois tubos, bem como os resultados encontrados e suas análises.

5.2. Medições Laboratoriais

Foram analisados dois espécimes, um feito a partir do trecho de um duto API 5L X46 retirado de operação, após aproximadamente 30 anos de serviço e um espécime de um tubo API 5L X60 com cerca de vinte anos de fabricação, que nunca entrou em operação. Utilizou-se nas análises os métodos do furo cego e do furo elíptico, descritos respectivamente nos capítulos 3 e 4.

5.2.1. Medições com a Técnica do Furo Elíptico

O método do furo elíptico foi aplicado de duas formas em diferentes espécimes, com objetivos distintos. As fases dos processos de medição estão descritas a seguir.

5.2.1.1. Cortes com a fresa

A primeira parte dos experimentos foi realizada com o uso de uma fresadora nos cortes elípticos (figuras 5.1 a 5.4) e tinha como principais objetivos medir a variação das deformações lidas (até a estabilização) com a profundidade dos cortes e determinar o comportamento das tensões residuais circunferenciais e

longitudinais presentes ao longo de uma geratriz do espécime avaliado (o tubo API 5L X60).

Equipamentos e materiais utilizados

- Fresadora do laboratório de Termociências da PUC-Rio, mostrada na figura 5.1;
- Fresa circular de 2 milímetros de espessura;
- Tubo API 5L X60, com $12\frac{3}{4}$ polegadas (323,25 mm) de diâmetro e espessura de 9,7 milímetros, 510 mm de comprimento, módulo de elasticidade igual a 207 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e limite de escoamento de 420 MPa;
- Quinze extensômetros unidirecionais EA-06-I25AC-350, com resistência de 350 Ohm (Ω) e *gage factor* de 2,07;
- Década de resistência, para possibilitar a calibração da resposta adquirida no condicionador de sinais¹;
- Condicionador de sinais Sodmex, na qual é ligado o extensômetro, como descrito no capítulo 3 e mostrado na figura 3.1;
- Multímetro Fluke, onde o sinal de voltagem, correspondente à deformação, fornecido pelo condicionador é lido;
- Dois Comutadores para multiplexação de até 11 canais;



Figura 5.1. Fresadora com o tubo posicionado para cortes longitudinais.

¹ Ligação de uma resistência em paralelo com o extensômetro na Ponte de Wheatstone. Para *strain gages* com 350 Ω usa-se uma resistência de 174650 Ω , para simular uma deformação de 1000 $\mu\epsilon$.

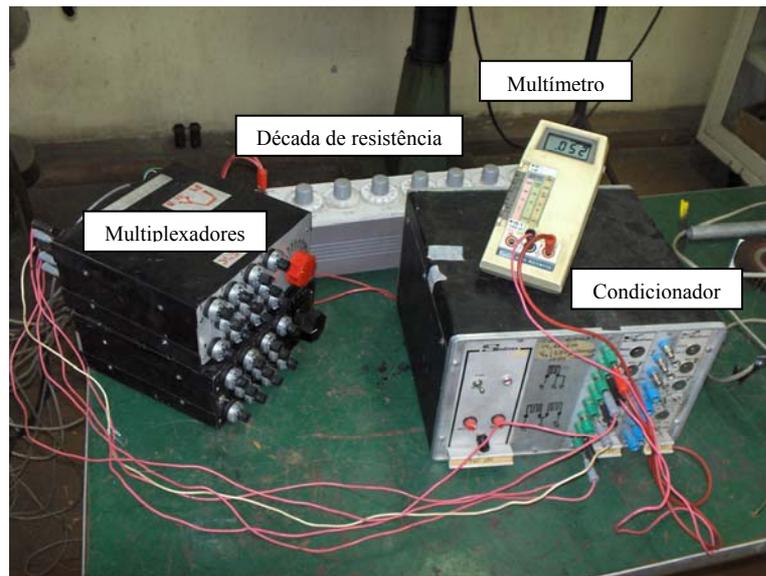


Figura 5.2. Equipamentos para a aquisição das deformações medidas.

Procedimento experimental

- Foram colados 15 extensômetros nas direções longitudinal e circunferencial, alternadamente, ao longo da circunferência do espécime e posicionados a partir do cordão de solda;
- O tubo foi posicionado e fixado na fresadora de modo a minimizar possíveis tensões geradas por essas ações;
- Os extensômetros foram ligados aos multiplexadores, sendo calibrados e balanceados através do condicionador;
- Foram feitos cortes, perpendiculares e paralelos aos extensômetros, a uma distância de 1 mm dos mesmos;
- Os cortes foram feitos em baixa rotação (300 rpm) para reduzir efeitos de encruamento e com passes de um milímetro na direção da espessura até que os valores de deformação obtidos estabilizassem;
- Após cada passe de um milímetro, movimentava-se a mesa da fresadora objetivando aumentar o comprimento dos cortes deixando-os superiores a quatro vezes o tamanho do *strain gage*, o que pode ser considerado razoável para eliminar os efeitos de concentração de tensões das pontas dos cortes sobre a deformação no *strain gage*;



Figura 5.3. Vista completa dos equipamentos utilizados e do tubo posicionado.

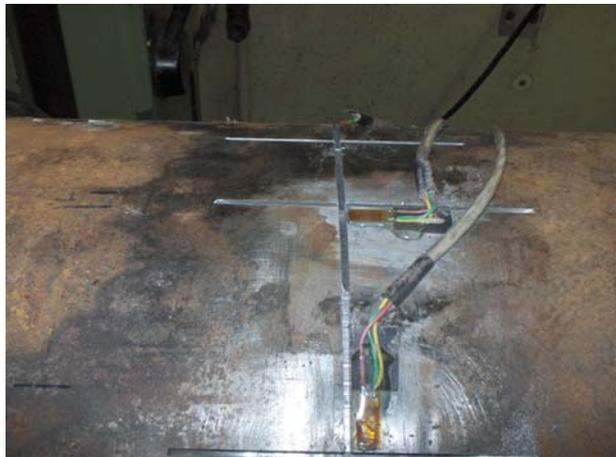


Figura 5.4. Imagem de alguns cortes e sua posição em relação aos extensômetros.

5.2.1.2. Cortes com a serra manual

Este experimento foi constituído de duas partes, nas quais o principal foco era dar suporte ao modelamento da técnica do furo elíptico com os resultados obtidos. Foi realizada no Laboratório de Integridade Estrutural da PUC-Rio e foi feita a análise sobre o cordão de solda em um tubo API 5L X46, que operou durante 30 anos.

5.2.1.2.a. Cortes com a serra manual: parte I

Teve como objetivo avaliar o comportamento das deformações aliviadas em relação à profundidade do corte e a influência do corte em extensômetros colados a uma distância relativamente grande.

Materiais e Equipamentos utilizados

- Strain gages EA-06-I25AC-350, com resistência de 350Ω e *gage factor* de 2,07;
- Tubo API 5L X46, com 18 polegadas de diâmetro, espessura de 6,5 milímetros, 900 mm de comprimento, módulo de elasticidade de 207 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e limite de escoamento de 314 MPa;
- Serras Starret RS1218 (12"/300mm-18T), 0,5 mm de espessura;
- Paquímetro Vonder;
- Resistência padrão de 174.650Ω ;
- Indicador de deformações Vishay Modelo P3 (figura 5.5).

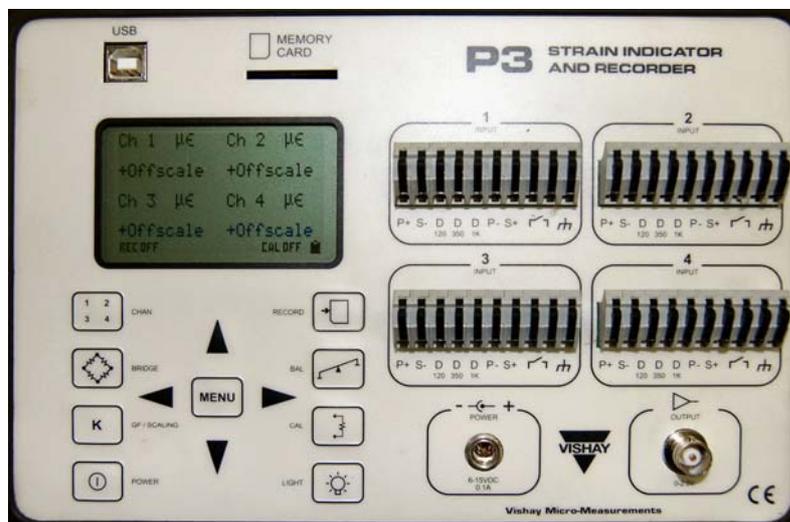


Figura 5.5. Indicador de deformações Vishay Modelo P3

Procedimentos experimentais

- Foram colados dois extensômetros no cordão de solda do espécime na direção longitudinal, distando 93 milímetros entre si na direção longitudinal

do tubo. Esta distância é considerada grande por ser aproximadamente 20 vezes o tamanho da grid dos extensômetros e 10 vezes a espessura do tubo (figura 5.6);

- Os extensômetros foram ligados nas pontes do indicador de deformações, que foi balanceado e calibrado com o auxílio da resistência padrão;
- Foi feito o primeiro corte (*gage 1*) em um único passe, sem avaliar a influência da profundidade do mesmo, até atravessar a espessura do tubo e tomou-se nota das deformações nos dois extensômetros;
- O segundo corte (*gage 2*) foi feito incrementalmente e sem balancear a ponte novamente, ou seja, o valor inicial de deformação foi igual ao obtido no final do primeiro corte. As deformações foram anotadas à medida que se avançava na espessura (como foi feito no experimento da fresa). Os passes de penetração foram medidos com o paquímetro.

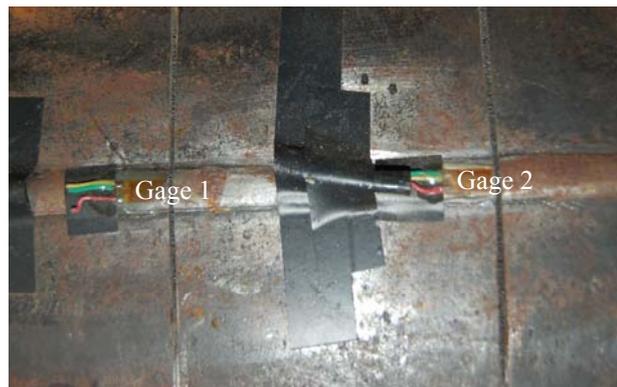


Figura 5.6. Os dois extensômetros do experimento da Parte I dos cortes com a serra

5.2.1.2.b. Cortes com a serra manual: parte II

Esta segunda parte objetivou: 1) avaliar a que distância do extensômetro um corte passante pode aliviar totalmente as tensões na região da área coberta pelo sensor; 2) conhecer o comportamento das deformações aliviadas pelo corte na face interna do cordão de solda.

Equipamentos e materiais utilizados: Foram usados os mesmos da Parte I.

Procedimentos experimentais

- Foram colados dois *strain gages* no cordão de solda exatamente na mesma posição longitudinal, um do lado externo e outro do lado interno e foram submetidos aos mesmos procedimentos extensométricos da parte I (figura 5.7);
- Foram feitos cortes a 50, 20, 10, 5 e 1 milímetro de distância dos *strain gages* nesta respectiva ordem;
- Os cortes também foram feitos de forma incremental, anotando-se as deformações a cada avanço;

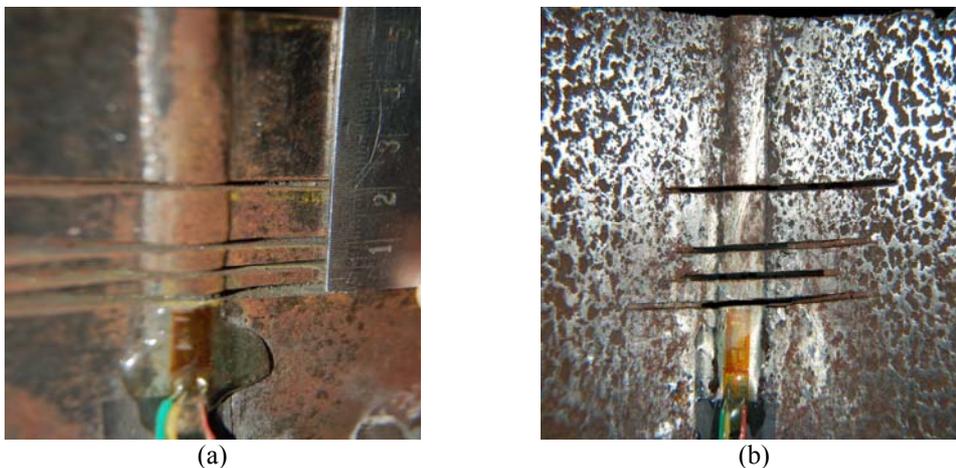


Figura 5.7. Fotos dos gages (a) externo e (b) interno do experimento corte com a serra: parte II

5.3. Medições com a Técnica do Furo Cego

As análises com a técnica do furo cego tiveram como objetivo determinar as distribuições longitudinais e circunferenciais das tensões residuais de fabricação dos tubos analisados. Foram feitas medições em espécimes dos tubos API 5L X60 e X46, já citados.

Equipamentos e materiais utilizados

- Mesmo espécime do tubo API 5L X46 usado nos experimentos com a serra;

- Espécime do API 5L X60 com comprimento de 910 mm e demais dimensões iguais aos do utilizado nos cortes com a fresa;
- Rosetas extensométricas triaxiais PA-06-062RE-120, F.S.: 2,04, Tipo A – ASTM 837-02 (figura 5.8), com diâmetro de alvo do furo de 1,59 mm (1/16”) e diâmetro médio das grades de 5,13 mm (0,202”);
- Indicador de deformações usado nos cortes com a serra;
- Resistência padrão de 59.880 Ω ;
- Guia de furação para centralização do furo (figura 5.9);
- Lupa (figura 5.9);
- Blocos em “U” com espessuras de 2, 1,5, 1 e 0,5 mm (figura 5.9);
- Furadeira com rotação máxima de 2.000 rpm (figura 5.9);
- Broca cônica de topo invertido (figura 3.9);

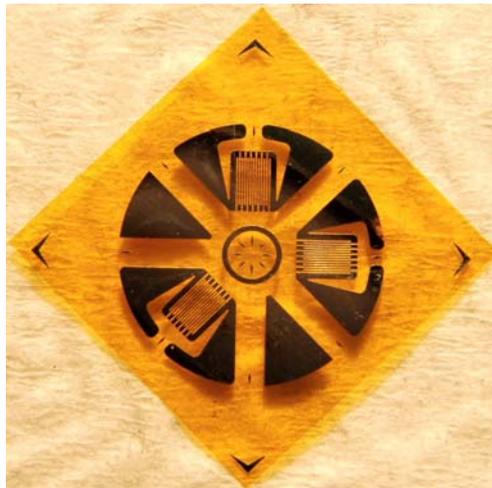


Figura 5.8. Roseta extensométrica triaxial PA-06-062RE-120



Figura. 5.9. Da esquerda para a direita: Guia de furação, blocos padrões em U, lupa e furadeira.

Procedimento experimental

Em cada tubo, foram coladas 10 rosetas na superfície externa de uma seção circunferencial a partir do cordão de solda, nas posições zero (solda), 22,5°, 45°, 90° e sucessivamente até completar o seu perímetro (figura 5.10). No tubo API 5L X60 o procedimento foi repetido em uma seção vizinha à primeira, ou seja, foram coladas 2 rosetas, a uma distância longitudinal igual a 16,6 mm entre seus alvos (figura 5.11), em todas as posições circunferenciais, menos na solda, onde foi assumido que obter-se-iam os mesmos valores de tensão, totalizando 19 rosetas para este tubo.

Os furos cegos foram feitos de forma incremental, com passes de meio milímetro, chegando-se a uma profundidade final de dois milímetros. O controle dos passes foi feito com o uso de blocos padrões em “U” com espessuras calibradas no Laboratório de Metrologia da PUC-Rio. No mais, as medições seguiram os procedimentos descritos no capítulo 3 e o tratamento dos dados de deformação foi feito segundo a Norma ASTM 837-02.

A figura 5.10 mostra parte das rosetas posicionadas no espécime do tubo API 5L X46:

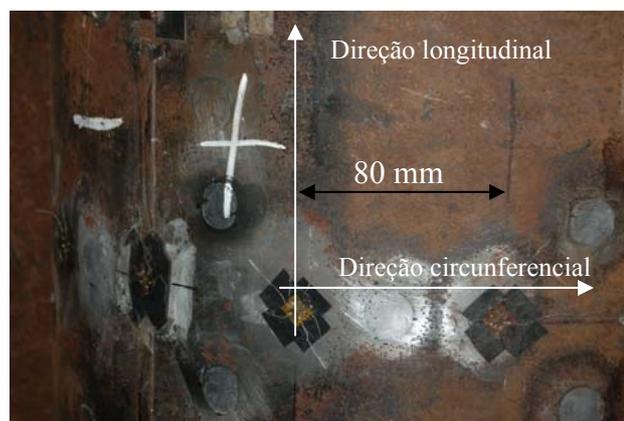


Figura 5.10. Rosetas posicionadas em uma no espécime do tubo API 5L X46

A figura 5.11 mostra em detalhe o furo realizado no cordão de solda do espécime do tubo API 5L X60:

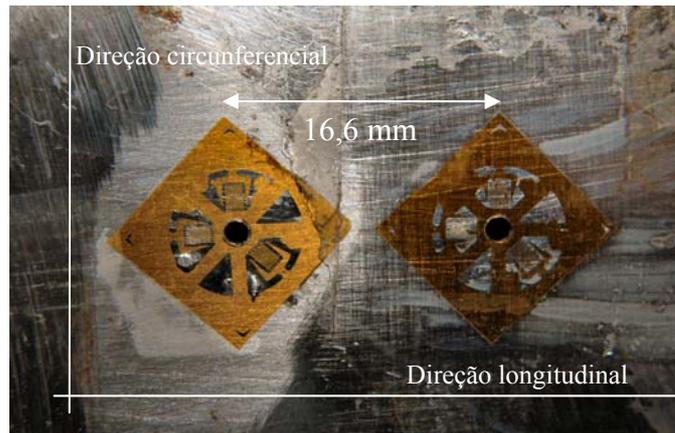


Figura 5.11. Furos realizados no espécime em pontos afastados de 16,6 mm na direção longitudinal do tubo API 5L X60

5.4. Apresentação e Análise dos Resultados

Serão mostrados neste tópico gráficos e tabelas de resultados das medições realizadas. A ordem de apresentação dos resultados seguirá a ordem dos experimentos mostrada nos tópicos 5.2 e 5.3. A tabela 5.1 mostra os parâmetros dimensionais usados nos experimentos e os respectivos coeficientes de alívio usados no cálculo das tensões.

Tabela 5.1. Parâmetros dimensionais usados nos experimentos e os respectivos coeficientes de alívio, a serem usados no cálculo das tensões.

	Fresa	Serra
Semi-eixo maior do furo (a)	50 mm	60 mm
Semi-eixo menor do furo (b)	1 mm	0,25 mm
Distância do meio do furo à grade de medição do extensômetro (df)	4 mm	3,25 mm
Comprimento da grade de medição do extensômetro (cg)	4 mm	4 mm
Largura da grade de medição do extensômetro (lg)	3 mm	3 mm
$\sigma_{\alpha E} = \sigma_{\alpha EI}^*$	-1	-1
$S_{\alpha E} = S_{\alpha EI}^*$	0	0
$\sigma_{\beta E}^*$	-0,758	-0,826
$\sigma_{\beta EI}^*$	-0,778	-0,842
$S_{\beta E} = S_{\beta EI}^{*2}$	0,033	0,034

² * Coeficientes calculados com as equações 4.17 e 4.18 a partir das dimensões especificadas na tabela 5.1.

5.4.1. Cortes com a fresa: resultados

O gráfico da figura 5.12 mostra as curvas do comportamento das tensões residuais na hipótese de a tensão aliviada agir exclusivamente na direção perpendicular aos cortes³ e as curvas com as tensões calculadas a partir do tratamento matemático da técnica do furo elíptico mostrado no capítulo 4, usando as equações 4.25 e 4.26, já que os cortes foram não passantes.

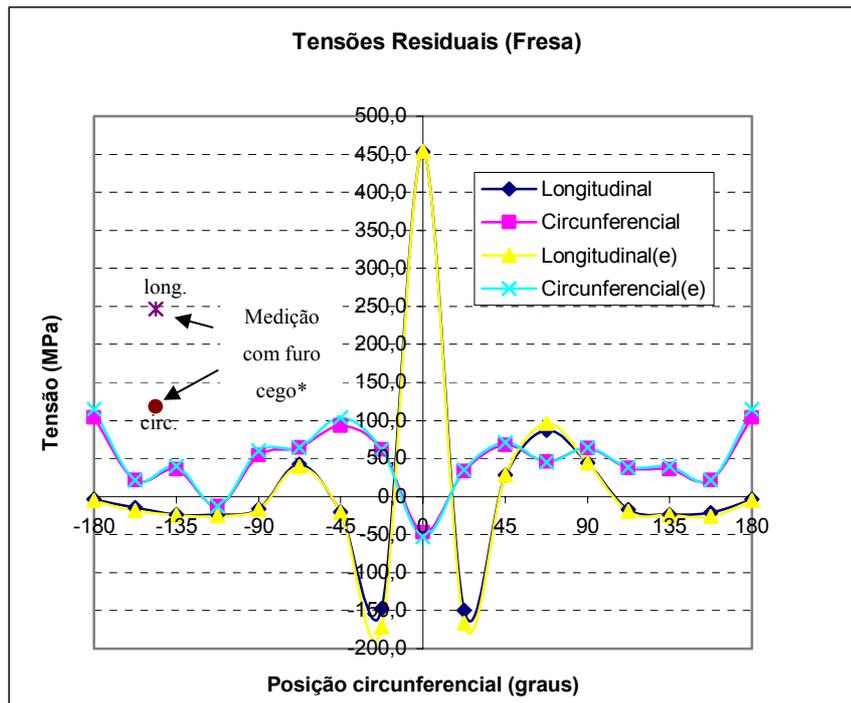


Figura 5.12. Gráfico comparativo das tensões calculadas pela simples multiplicação das deformações medidas pelo módulo de elasticidade do espécime e das calculadas com as equações do furo elíptico com simplificações (representados pelo índice “e”) ⁴.

Foi encontrada uma diferença máxima de 24 MPa entre os valores das curvas, na posição -22,5°. Alguns dos valores para certas posições foram exatamente iguais para as duas metodologias de cálculo. Isso se deve ao fato de os

³ $\sigma_{Li} = -E\varepsilon_{(cortecircunferencial)i}$ e $\sigma_{Ci} = -E\varepsilon_{(cortelongitudinal)i}$, para o caso de cortes perpendiculares ao extensômetro (figura 4.11 a); ou $\sigma_{Li} = -\frac{E\varepsilon_{(cortecircunferencial)i}}{\nu}$ e $\sigma_{Ci} = -\frac{E\varepsilon_{(cortelongitudinal)i}}{\nu}$, para cortes paralelos (figura 4.11 b).

⁴ * Os pontos destacados no gráfico correspondem a uma medição feita pelo Prof. José Luiz Freire, na mesma seção do espécime onde foram realizadas as medições com os cortes, onde $\sigma_{long.} = 246,6\text{MPa}$ e $\sigma_{circ.} = 118,2\text{MPa}$, para um ponto entre -135 e -157,5°.

coeficientes $\sigma_{\alpha E}$ e $\sigma_{\alpha EI}$, que representam o alívio de deformação referente à tensão perpendicular ao corte, serem iguais para o corte passante e o não passante a partir da profundidade que se nota a estabilização no valor de deformação lido. Também se deve ao fato de os termos $\sigma_{\beta E}$ e $\sigma_{\beta EI}$ (coeficientes de alívio de maior valor depois de $\sigma_{\alpha E}$ e $\sigma_{\alpha EI}$), serem considerados nulos no caso de cortes não passantes, como já foi dito no capítulo 4 e será explicado com os resultados do tópico 5.4.2. Será mostrado no referido tópico que, a influência dos coeficientes de alívio paralelos ao corte, praticamente só existe quando o corte é passante⁵. Então, o cálculo das tensões com a hipótese de alívio de tensão exclusivamente na direção perpendicular aos cortes pode ser feito, sem erros significativos.

No gráfico da figura 5.12, pode-se notar a semelhança do comportamento da curva de tensões longitudinais próximas à solda com as de tensões longitudinais de chapas soldadas (figura 2.2), o que serve como um parâmetro de qualidade para as medições realizadas.

Ainda sobre este gráfico, nota-se que o valor de tensão na solda ficou acima da resistência ao escoamento do material (que é de 420 MPa). Isto pode ter acontecido por ocasião de possíveis escoamentos provocados pelo corte, pois as tensões são realmente altas nessa região. Para este caso e acontecendo algo semelhante nos próximos resultados, entenda-se que a tensão naquele ponto pode ser considerada próxima ou igual à resistência ao escoamento do material no ponto medido.

5.4.2. Cortes com a serra manual: resultados

Os resultados destes experimentos foram essenciais para desenvolver o equacionamento da técnica do furo elíptico e para avaliar algumas hipóteses adotadas para aplicação desse equacionamento em medições com cortes passantes e não passantes.

⁵ Foi verificado experimentalmente que um corte com profundidade de cerca de 80% da espessura do espécime, os coeficientes $\sigma_{\beta E}$ e o $\sigma_{\beta EI}$ já começam a ter influência, mas só atingem os valores da tabela 5.1 quando o espécime é atravessado.

Parte I

A tabela 5.2 mostra as deformações lidas nos dois extensômetros (figura 5.6), quando é realizado o primeiro corte, antes e depois do atravessamento do espécime. O gráfico da figura 5.16 mostra a variação das deformações com a profundidade do segundo corte realizado a 1mm do extensômetro 2. O indicador de deformações não foi re-balanceado para o segundo corte, sendo as deformações iniciais no gráfico da figura 5.13 as deformações lidas após o primeiro corte.

Tabela 5.2. Deformações lidas com o corte (1) a 1mm do extensômetro 1 (X46)

	Extensômetro 1	Extensômetro 2
Antes de atravessar	-730	-62
Após atravessar	-523	-101

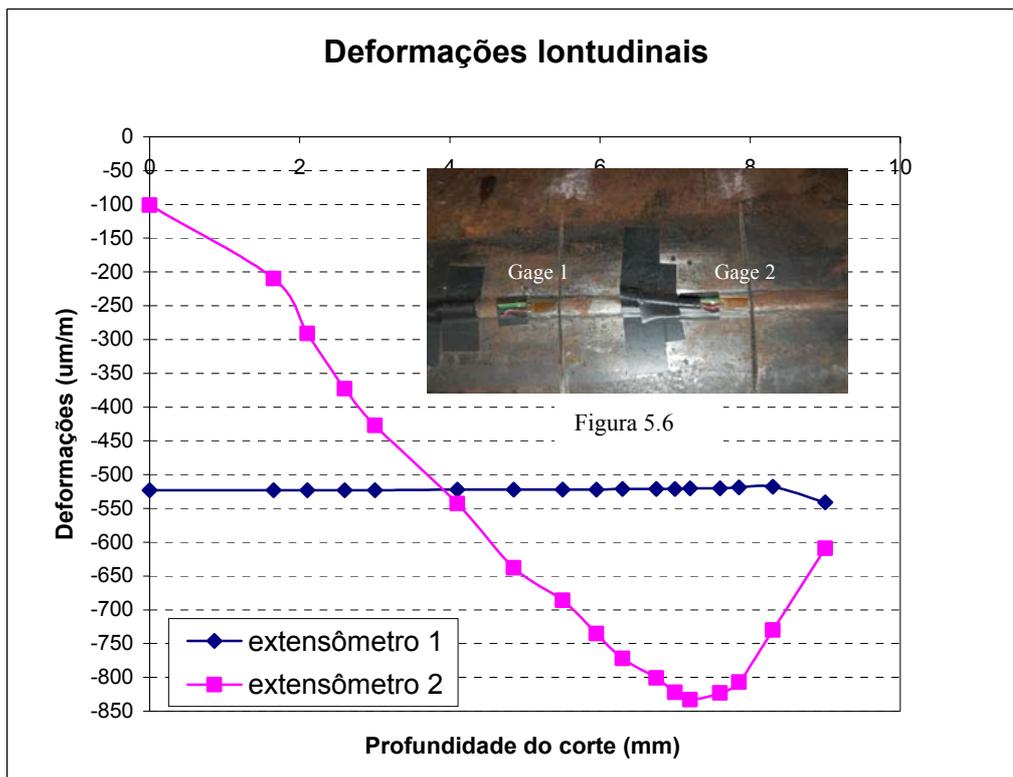


Figura 5.13. Gráfico da variação das deformações lidas com a profundidade do corte (2) realizado a 1mm do extensômetro 2 no tubo X46.

A deformação final lida no extensômetro próximo ao segundo corte foi maior que no primeiro, mas em termos de medição de tensões residuais a diferença não é significativa. Ainda assim, o extensômetro 1 está bem mais próximo do oxicorte feito no tubo, por isso pode-se dizer que uma parcela das

tensões que ali existiam já haviam sido aliviadas, ajudando a explicar a diferença para o valor do extensômetro 2.

Na tabela 5.2 e no gráfico da figura 5.13, percebe-se uma queda brusca no valor absoluto das deformações quando o espécime tem sua espessura atravessada. A hipótese mais provável para este acontecimento é a de que há uma redistribuição de tensões na espessura à medida que o corte é aprofundado. Esta redistribuição faz com que os coeficientes de alívio paralelos ao corte, representados principalmente por $\sigma_{\beta E}$ e $\sigma_{\beta E1}$, só ajam na superfície onde está colado o extensômetro, quando o espécime está prestes a ser atravessado. Estes coeficientes de alívio atingirão seus valores máximos (da tabela 5.1) quando o atravessamento for completado. Esta hipótese foi usada nas formulações da técnica do furo elíptico para o caso de cortes não passantes (tópico 4.5.2). Ela foi validada experimentalmente pelo seguinte procedimento:

Primeiro eliminou-se os termos multiplicados por $S_{\beta E}$ e $S_{\alpha E}$ da equação 4.18, que neste caso são desprezíveis (vide tabela 5.1):

$$\varepsilon_a = \frac{1}{E} \left[(\sigma_a \sigma_{\alpha E}) - \nu (\sigma_a \sigma_{\beta E}) \right] \quad (5.1)$$

Igualando-se as tensões atuantes no espécime antes e depois do atravessamento, tem-se:

$$\frac{\varepsilon_a^a}{\sigma_{\alpha E}} = \frac{\varepsilon_a^d}{\left[(\sigma_{\alpha E} - \nu (\sigma_{\beta E})) \right]} \quad (5.2)$$

onde ε_a^a é a deformação máxima lida antes do atravessamento, ou seja, quando $\sigma_{\beta E}$ ainda não agia na superfície e ε_a^d é a deformação lida após o atravessamento completo.

Usando os valores da tabela 5.1 e partindo dos valores de ε_a^a para os cortes um e dois que são -730 e -833 $\mu\varepsilon$, respectivamente, encontrou-se os valores para as deformações depois do atravessamento:

$$\varepsilon_a^{d1} = -549 \mu\varepsilon \quad \text{e} \quad \varepsilon_a^{d2} = -626 \mu\varepsilon$$

Sendo que os valores lidos foram de -523 e $-609 \mu\epsilon$, redundando em erros de 4,8 e 3,8%, respectivamente, que são erros aceitáveis quando se trabalha com extensometria. Assim, pode-se considerar boa a hipótese do uso dos coeficientes de alívio paralelos ao corte somente quando o mesmo atravessa o espécime.

Parte II

A figura 5.14 mostra o gráfico das deformações longitudinais medidas pelos *gages* localizados nas superfícies externa e interna do tubo, causadas por cortes a uma distância longitudinal de 50, 20, 10, 5 e 1 mm dos *gages*, no cordão de solda tubo X46. As deformações são referentes aos valores lidos após o atravessamento da espessura por cada corte. Já o gráfico da figura 5.15 mostra o comportamento das deformações em relação a profundidades causadas por cada corte feito.

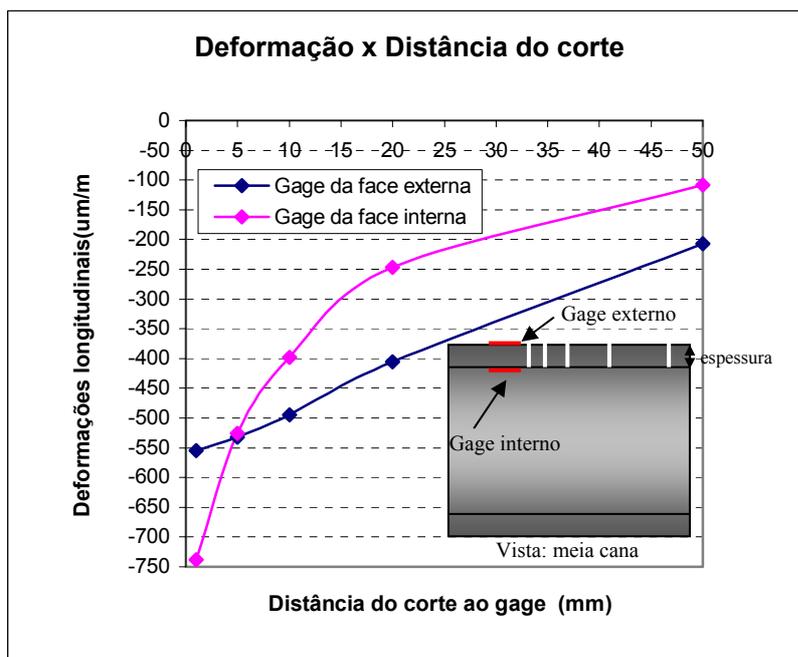


Figura 5.14. Gráfico das deformações medidas nos *gages* localizados nas superfícies interna e externa do tubo X46

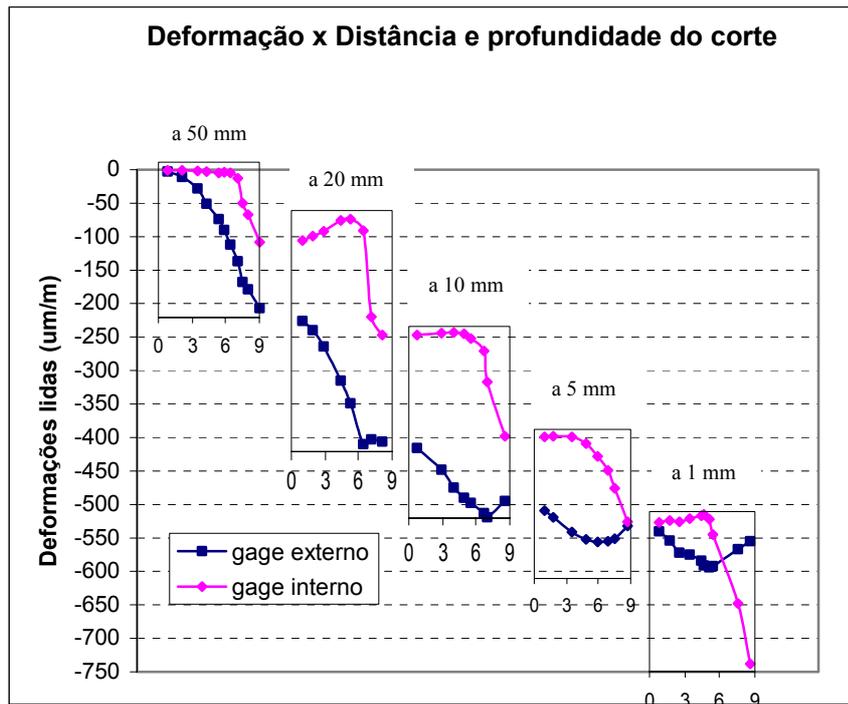


Figura. 5.15. Comportamento das deformações medidas nos gages localizados nas superfícies externa e interna em cada corte com relação à profundidade de corte.

Para analisar os gráficos das figuras 5.14 e 5.15, as fotos da figura 5.7 podem ser de grande valia. Nas fotos, pode-se perceber que, apesar do atravessamento, o comprimento do corte na face interna da solda não acompanha o da face externa. Sendo assim, os coeficientes de alívio válidos para a face externa não podem ser usados na face interna, pois estes variam com o comprimento do corte, como foi discutido no capítulo 4. Com os coeficientes de alívio correspondentes a uma elipse com $a = 10$ mm (valor aproximado), a tensão calculada para a face interna com o último valor de deformação lido no gráfico 5.14 é de 188 MPa, enquanto a tensão na face externa, usando-se os valores dos coeficientes de alívio da tabela 5.1, é de 163 MPa, indicando que as tensões residuais longitudinais devem ser praticamente uniformes no cordão de solda, o que era esperado já que a solda foi realizada nas faces interna e externa. Os gráficos da figura 5.15 ajudaram a comprovar a influência da distância sobre os coeficientes de alívio da técnica do furo elíptico. Neles foi verificado que os coeficientes de alívio transversais (representados principalmente por $\sigma_{\beta E}$) que agem no sentido de alongar o extensômetro quando o corte atravessa o tubo (vide análises da figura 5.13). Os valores não são significativos quando o corte é feito a 50 mm do sensor. O seu efeito só começa a ser verificado no corte a 20 mm para a

face externa. No *gage* da superfície interna este efeito não é percebido. Nesta superfície, os valores dos coeficientes de alívio axiais (que têm como seu principal representante o $\sigma_{\alpha E}$), que agem no sentido de comprimir o extensômetro, crescem progressivamente até o corte a 1 mm, juntamente com os coeficientes transversais. Na superfície externa, os valores dos coeficientes axiais variam pouco do corte a 20mm ao corte a 1 mm.

5.4.3. Furo cego: resultados

Os resultados das medições de tensões de tensões residuais nos tubos realizadas pelo método do furo cego foram os mais importantes para o objetivo principal deste estudo, que é que é a definição de propostas e possibilidades de medições em campo que permitam a separação das tensões residuais daquelas atuantes no duto causados pelos esforços externos.

Tubo API 5L X46

Primeiro foi testada a uniformidade das tensões ao longo da espessura do espécime para tornar o uso da Norma ASTM 837 [19] válido para o tratamento dos dados de deformação medidos. Tal verificação foi feita segundo o procedimento especificado anteriormente no *tópico 3.3.6*. Foram escolhidos dois pontos para avaliação: a solda e o ponto a 180° da solda. A tabela 5.3 mostra os termos usados na avaliação para os dois pontos e os erros em relação aos padrões da Norma.

Tabela 5.3. Avaliação da uniformidade das tensões na profundidade de medição para o tubo API 5L X46

Na solda										
h/d	$\epsilon_1(\text{circ.})$	$\epsilon_2(45^\circ)$	$\epsilon_3(\text{long.})$	p	q	t	pn/pf (%)	qn/qp (%)	e(p)	e(q)
0,1	5	-62	-123	-59	-64	3	66,3	46,4	12%	2,6%
0,2	24	-111	-197	-86,5	-110,5	24,5	97,2	80,1	4%	1,2%
0,3	39	-122	-222	-91,5	-130,5	30,5	102,8	94,6	0,8%	0,7%
0,4	49	-125	-227	-89	-138	36	100	100	0%	0%
180 graus										
h/d	$\epsilon_1(\text{circ.})$	$\epsilon_2(45^\circ)$	$\epsilon_3(\text{long.})$	p	q	t	pn/pf	tn/tf	e(p)	e(t)
0,1	-112	-42	-54	-83	29	-41	61,9	41,8	6,3%	2,8%
0,2	-172	-46	-79	-125,5	46,5	-79,5	93,7	81,1	0,7%	3,8%

0,3	-184	-39	-82	-133	51	-94	99,3	95,9	2,7%	2%
0,4	-186	-36	-82	-134	52	-98	100	100	0%	0%

onde:

- h/d = relação entre a profundidade do furo e o diâmetro da roseta
 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ = deformações medidas nas diferentes profundidades
 p, q, t = relações entre as deformações dadas no tópico 3.3.6
 $p_n/p_f, q_n/q_f, t_n/t_f$ = razões entre as relações de deformações numa dada profundidade e na profundidade final
 $e(p), e(q), e(t)$ = erros entre os valores de $p_n/p_f, q_n/q_f$ e t_n/t_f encontrados no espécime e os plotados na figura (5.a) da Norma ASTM 837[19]

A tolerância de erros limitada pela Norma é de $\pm 3\%$ para que as tensões ao longo da profundidade de realização da medição no espécime sejam ditas uniformes. A partir dos resultados mostrados nas colunas $e(p)$, $e(q)$ e $e(t)$ da tabela 5.3, pode-se notar que ocorreram apenas quatro erros acima desse limite. Para quatro destes a diferença ficou em torno de 1%. Julgando-se os resultados de um ponto na solda e de um no metal base, simétrico à solda, como representativos para o tubo, pode-se considerar que os dados de deformação medidos no espécime podem ser tratados pelos procedimentos da Norma sem maiores problemas. Os resultados apresentados a seguir são decorrentes deste tratamento.

A tabela 5.4 mostra os resultados de 3 medições realizadas em pontos diferentes do cordão de solda.

Tabela 5.4. Medições no cordão de solda do tubo API 5L X46.

Medição	Tensão Longitudinal (MPa)	Tensão Circunferencial (MPa)
1	243,8	56,6
2 (mesma seção do gráfico 5.19)	217,8	32,4
3	227	44,8

A distância entre os pontos de medição tabelados foi de aproximadamente 16 cm e os valores encontrados ficaram praticamente dentro da margem de erro da técnica do furo cego que é de ± 20 MPa [7], corroborando com a hipótese de que não há variações significativas no estado de tensões residuais ao longo da direção longitudinal.

Os resultados de tensões longitudinais calculados a partir das deformações obtidas com a técnica do furo elíptico (tabela 5.2, figuras 5.13 e 5.14) para a

superfície externa da solda do tubo X46 foram de aproximadamente: 155 MPa e 181 MPa, para os valores de deformação da tabela 5.2 e 163 MPa, para o valor de deformação na superfície externa das figuras 5.14 e 5.15. O corte realizado mais próximo à região onde foram feitas as medições com furo foi o que apresentou o valor de tensão de 181 MPa, que foi o mais próximo dos valores encontrados com o método do furo cego. Os valores de tensões menores foram obtidos com os cortes feitos próximos às extremidades do tubo, região que pode ter tido parte de suas tensões aliviadas pelos oxicortes, na retirada do espécime do duto em operação. Isto pode justificar o fato de seus valores terem sido menores. Mas em termos de resultados, se for estipulada uma margem de incerteza de ± 30 MPa (maior margem dentre as técnicas apresentadas no capítulo 2) para a técnica do furo elíptico, somando-se à margem de ± 20 MPa do furo cego, diferenças de 50MPa entre os valores das técnicas, para um mesmo ponto, são aceitáveis. Então, pode-se dizer que, os valores de tensões encontrados com a técnica do furo elíptico são bons.

A figura 5.16 mostra o comportamento das tensões residuais de fabricação longitudinal e circunferenciais para o espécime do tubo API 5L X46, medidas na mesma seção de uma das 3 medições na solda.

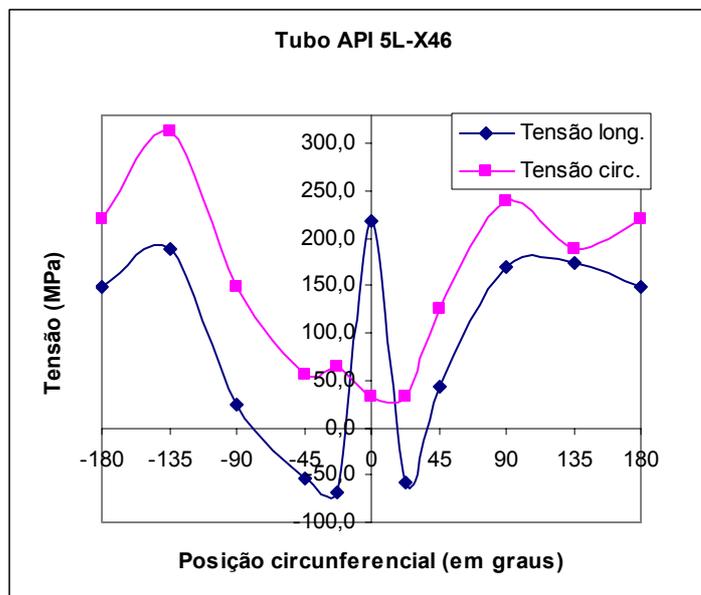


Figura 5.16. Comportamento das tensões residuais de fabricação do tubo API 5L X46

Nota-se no gráfico da figura 5.16 a semelhança do comportamento das tensões residuais longitudinais na região da solda com o encontrado como padrão para placas soldadas na literatura (figura 2.2).

Um diferencial deste gráfico é a alta magnitude das tensões residuais circunferenciais medidas, que em alguns pontos chegam a ser maiores do que a tensão longitudinal na solda e do que a resistência ao escoamento do tubo ($S_y = 314 \text{ MPa}$)⁶.

Novamente enfatiza-se que a técnica do furo cego só é válida para valores de tensão abaixo da metade da resistência ao escoamento ($0,5 S_y$) do material avaliado (como já foi dito no final capítulo 3). Para este espécime o valor médio de S_y medido no metal base foi de 314 MPa (apêndice A). Então, na tabela 5.3 e no gráfico da figura 5.16, entendam-se os valores de tensão acima de 170 MPa como aproximações (para mais) dos valores de tensão realmente existentes.

Já havia medições em outros tubos do trecho de onde foi retirado o X46⁷, que está sendo analisado neste trabalho. O gráfico da figura 5.17 mostra uma comparação das tensões máximas e mínimas encontradas no cordão de solda entre esses espécimes e o analisado nesta tese, que está representado no gráfico pelo algarismo 5.

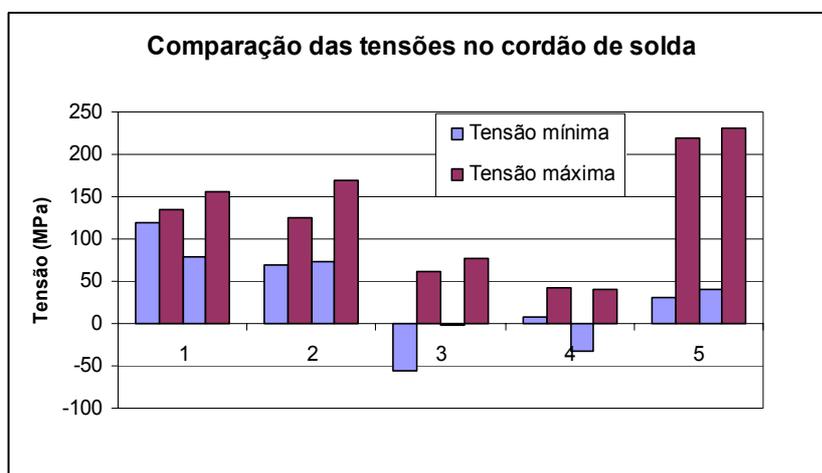


Figura 5.17. Gráfico comparativo das tensões máximas e mínimas encontradas no cordão de solda para diferentes tubos do trecho do duto de onde foi retirado o tubo X46 aqui analisado

⁶ Note-se que, nos ensaios de qualificação do material não foi atingido, com as amostras utilizadas, o mínimo limite de escoamento de 317 MPa, apesar do material ter sido categorizado como um API 5L X46. Mas, a nomenclatura foi mantida.

⁷ Tubos analisados por Bueno, S. I., na dissertação de mestrado “Avaliação Estrutural de Dutos com Defeitos de Corrosão Coincidentes com a Solda”. Nesta tese usa-se a nomenclatura ET11, 13, 14, 15 e 16, respectivamente, para os espécimes 1, 2, 3, 4, e 5.

A disparidade entre os valores de tensões encontrados para os espécimes, que está muito além das variações normais que a técnica de furo cego pode acarretar. Tais discrepâncias, já que o processo de fabricação de todos os espécimes foi o mesmo, podem encontrar explicação nas diferenças entre suas composições químicas e propriedades mecânicas, que estão apresentadas no apêndice A. Com as informações apresentadas neste apêndice pode-se perceber que o duto realmente era constituído por tubos de materiais diferentes.

Tubo API 5L X60

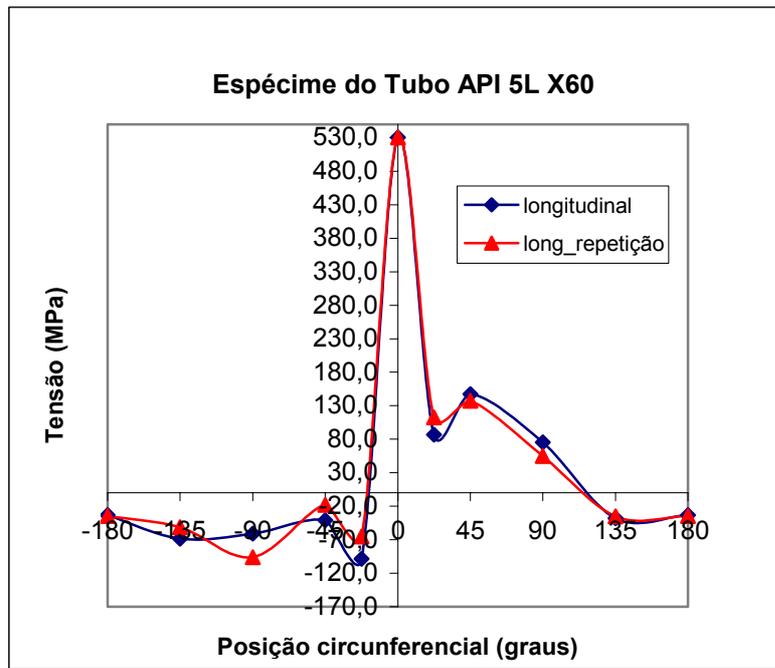
Foi realizado o mesmo procedimento de avaliação da uniformidade das tensões na profundidade de medição feito para o tubo API 5L X46, mos trado na (tabela 5.5).

Tabela 5.5. Avaliação da uniformidade das tensões na profundidade de medição para o tubo API 5L X60

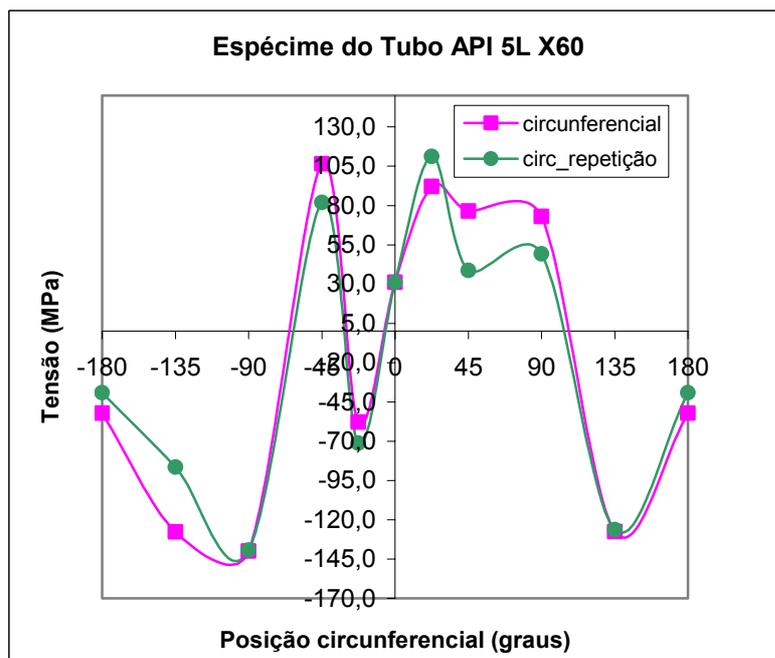
Na solda										
h/d	$\epsilon_1(\text{circ.})$	$\epsilon_2(45^\circ)$	$\epsilon_3(\text{long.})$	p	q	t	pn/pf (%)	qn/qf (%)	e(p)	e(q)
0,1	5	-62	-123	-132,5	171,5	-18,5	67,3	46	9,5%	3%
0,2	24	-111	-197	-194,5	295,5	-26,5	98,7	79,2	5,7%	1,8%
0,3	39	-122	-222	-204	349	-44	103,6	93,6	1,6%	0,4%
0,4	49	-125	-227	-197	373	-49	100	100	0%	0%
180 graus										
h/d	$\epsilon_1(\text{circ.})$	$\epsilon_2(45^\circ)$	$\epsilon_3(\text{long.})$	p	q	t	pn/pf	tn/tf	e(p)	e(t)
0,1	-112	-42	-54	16	-8	15	57,1	44,1	0,5%	1,1%
0,2	-172	-46	-79	24,5	-0,5	26,5	87,5	77,9	5,5%	0,1%
0,3	-184	-39	-82	27	5	31	96,4	91,2	5,6%	2,4%
0,4	-186	-36	-82	28	8	34	100	100	0%	0%

Os resultados encontrados também se mostraram satisfatórios, habilitando o espécime do tubo API 5L X60 a ter suas tensões residuais medidas segundo a Norma ASTM 837.

A figura 5.18 mostra um gráfico do comportamento das tensões residuais em uma seção de uma amostra do tubo API 5L X60, como foi feito para o outro espécime. O detalhe é que desta vez foram realizadas duas medições para cada ponto (com exceção da solda, como já foi dito), proporcionando uma comparação entre os resultados.



(a)



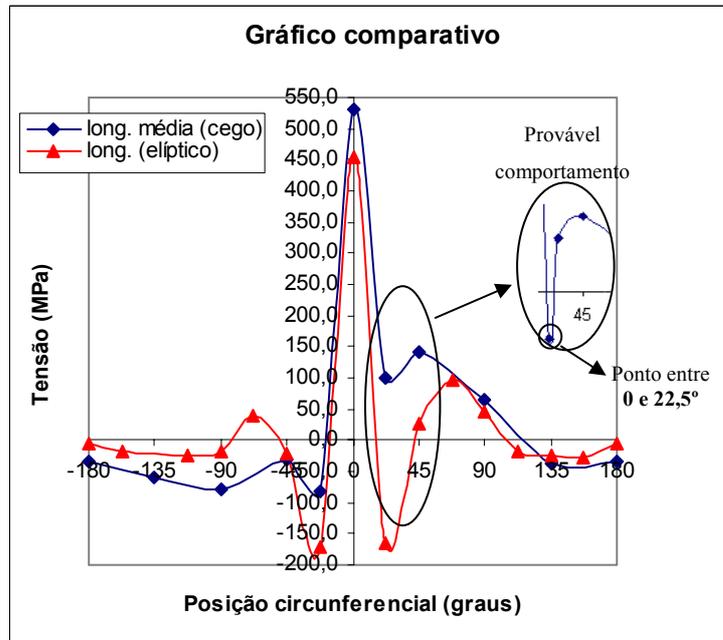
(b)

Figura 5.18. Comparação entre o comportamento das tensões residuais: (a) longitudinais e (b) circunferenciais para as duas seções medidas no tubo X60

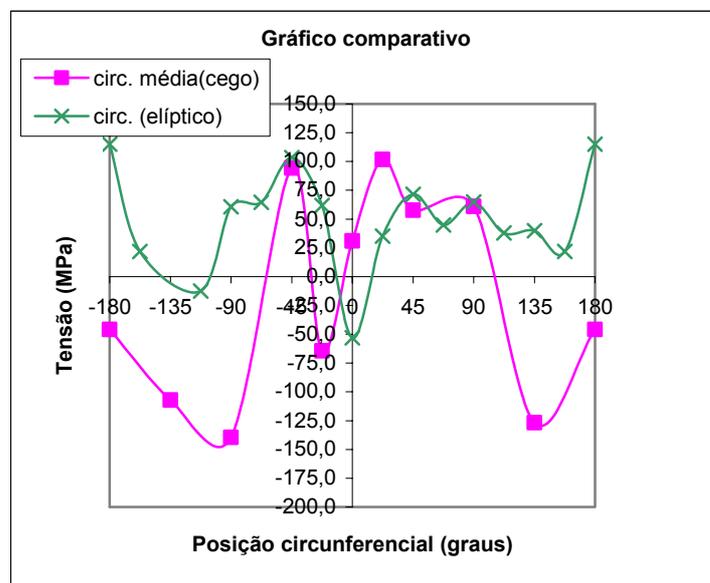
Na maior parte dos pontos dos gráficos da figura 5.18 as duas medições forneceram valores praticamente iguais. Lembrando que a margem de incerteza da técnica do furo cego é ± 20 MPa [7], valores com diferenças de até 40 MPa podem ser considerados coincidentes. Nos gráficos da figura 5.18, apenas o ponto -135°

apresentou uma diferença entre as medições superior a esse valor: a diferença entre as tensões circunferenciais medidas neste ponto foi de 41,3 MPa.

A figura 5.19 mostra um gráfico comparativo entre as curvas encontradas com a técnica do furo cego (representadas pelas médias dos valores do gráfico da figura 5.18) e as encontradas com a técnica do furo elíptico.



(a)



(b)

Figura 5.19. Comparação entre as curvas de medições com os furos cego e elíptico para o tubo X60: (a) Tensões longitudinais e (b) Tensões circunferenciais

Sabe-se que as medições com furo cego são realizadas com uma profundidade de 2 mm (para qual o gradiente de tensões não é tão alto). Já as

medições com furo elíptico precisaram ser feitas com cortes de profundidades maiores (para este caso, 7 mm no mínimo) para que o alívio de tensões alcançasse toda a grade de medição do extensômetro. Neste caso, o valor de tensão na superfície é determinado uma média das tensões ao longo da espessura. O processo de dobramento das chapas para a formação de tubos no processo UOE provoca grandes variações de tensões residuais na direção circunferencial ao longo da espessura do tubo. Tais variações são bem mais amenas na direção longitudinal. Isso pode explicar o porquê das curvas de tensões residuais longitudinais (figura 5.19a) medidas com as duas técnicas terem um comportamento similar e as curvas das circunferenciais não (figura 5.22a).

As figuras 5.18(a) e 5.19(a) mostram também que, para a posição 22,5° a tensão longitudinal encontrada com o furo cego é positiva para o espécime do tubo API 5L X60, ao contrário do encontrado com a técnica do furo elíptico e do encontrado para o espécime do tubo API 5L X46 com o furo cego. Isto pode ser creditado ao fato de a deformação medida com o corte ser uma média das deformações aliviadas em toda a extensão do corte. Assim, mesmo o extensômetro e a roseta tendo sido colados a uma mesma distância do cordão de solda, o extensômetro certamente sofreu maior influência das deformações aliviadas na região de maiores tensões compressivas, na vizinhança do cordão. Ocorre também que as curvas de ajuste tipo *splines* (curvas cheias dos gráficos) entre os pontos do gráfico não devem ser entendidas como o comportamento da curva. Então, a diferença aparente entre as duas curvas na região entre a solda e o ponto a 22,5° não é real.

Na figura 5.19 (b) nota-se também que, para as medições com furo cego, a tensão circunferencial é negativa a 180° da solda. Este é o ponto sob maior influência do fechamento final do tubo para a soldagem longitudinal das extremidades da chapa; este foi um dos fatos que motivou a repetição dos experimentos, para comprovar que não houve erro nas medições.

O apêndice C mostra uma análise, embasada na influência das etapas do processo de fabricação UOE, sobre as tensões residuais circunferenciais geradas no ponto simétrico à solda. Neste apêndice encontra-se, inclusive, um modelo de elementos finitos para simular a etapa de fechamento final do tubo para soldagem, após a passagem pela prensa “O”.