

5

Discussão dos Resultados dos Testes de Ruptura

No Capítulo anterior (item 4.9) foi verificado que as pressões previstas de ruptura pelos diversos métodos subestimaram as pressões reais de falha para os ETs retangulares (15 e 16). Nos ETs esféricos (11, 13 e 14) apenas as previsões dos métodos de nível 2 subestimaram as pressões reais de falha.

Neste capítulo é apresentada uma investigação na busca das causas destas previsões acima das pressões reais de ruptura.

5.1.

Análise do Perfil de Corrosão Interna dos ETs

Após a execução dos testes de pressão os ETs foram seccionados no local dos defeitos (vide Figura 5-1).



Figura 5-1 – ET 14 após o teste de pressão com as marcações para o corte.

Verificou-se a presença de alvéolos internos de corrosão (Figura 5-2) de forma generalizada, cobrindo inclusive a área onde os defeitos externos haviam

sido usinados. Estes pequenos alvéolos^{xxix} internos de corrosão não puderam ser detectados na inspeção por ultra-som realizada antes do teste de ruptura.



Figura 5-2 – Superfície interna do ET 11 após o corte.

O APÊNDICE C mostra os aspectos das superfícies internas após os testes de ruptura. Também mostra as medições (comprimento longitudinal e profundidade) dos alvéolos e os croquis com as medições dos alvéolos mais significativos.

Foi realizada uma inspeção da superfície interna nos ETs 11, 13, 15 e 16 que falharam por vazamento (*“leak before break”*) sem propagação do defeito. O ET 14 foi o único que apresentou falha por ruptura (com propagação da fratura por uma extensão de aproximadamente 300 mm) dificultando a medição e o levantamento da posição relativa dos alvéolos.

Para se estimar a contribuição dos alvéolos no cálculo das pressões previstas pelos métodos, estes foram considerados como se fossem externos, rebaixando os defeitos iniciais, o que resultou na diminuição do ligamento de fora para dentro. Ou seja, os alvéolos foram rebatidos de dentro para fora e

^{xxix} Os alvéolos foram mapeados após a falha dos ETs. As dimensões encontradas refletem a condição deformada. Encontraram-se valores variando de 3 a 16 mm de comprimento longitudinal.

rebaixaram localmente o perfil dos defeitos originais. Desta forma, foi possível testar os métodos com esta nova configuração.

5.1.1.

Resultados das pressões previstas de ruptura pelos métodos de nível 1 considerando a contribuição dos alvéolos

A sistemática utilizada para a consideração dos alvéolos para a avaliação pelos métodos de nível 1 foi a seguinte:

- A superfície interna atacada pela corrosão foi inspecionada visualmente com auxílio de lupa.
- Os alvéolos foram mapeados e delineados sobrepondo-se papel transparente sobre a superfície interna.
- O comprimento e a profundidade dos alvéolos foram medidos com paquímetro.
- Foram considerados todos os alvéolos com profundidade superior a 0,5 mm.
- O alvéolo mais profundo definiu a profundidade máxima dos ETs com defeitos retangulares (15 e 16).
- A redução da espessura remanescente pela consideração da profundidade dos alvéolos gerou um rebaixamento nos perfis dos defeitos nos ETs com defeitos esféricos (11, 13). No ET 11 o rebaixamento não resultou em alteração da profundidade máxima.
- Os alvéolos foram agrupados quando tinham interseção nas projeções longitudinais.
- Foram desconsiderados os alvéolos coincidentes com os locais de vazamento.

A Tabela 5-1 resume a redução de espessura imposta pela consideração^{xxx} dos alvéolos e os limites de aplicação dos métodos antigos e modernos de avaliação da resistência remanescente.

^{xxx} No ET 14 não foi feito o levantamento da contribuição dos alvéolos. A ruptura com propagação tornou impossível o acoplamento de papel transparente sobre a superfície interna. Também ficou praticamente impossível a definição da posição longitudinal dos alvéolos de forma se traçar o novo perfil do defeito.

ET	t	t*	d _{max} [alv]	t**	t _{min} pelos Métodos		Possibilidade Cálculo	
					antigos	modernos	antigos	modernos
11	6,4	2,2	0,6 ^{xxx}	2,2	1,3	1,0	OK	OK
13	6,5	2,0	0,9	1,1	1,3	1,0	Não	OK
15	6,4	2,0	0,8	1,2	1,3	1,0	Não	OK
16	6,5	1,9	0,9	1,0	1,3	1,0	Não	Não

Tabela 5-1 – Resumo da contribuição dos alvéolos e da limitação dos métodos^{xxxii}

Obs.: ET – Espécime Tubular, t – espessura média fora do defeito [em mm], t* - espessura remanescente original [em mm], d_{max} [alv] – profundidade máxima do alvéolo mais profundo encontrado [em mm], t** – espessura remanescente mínima considerando os alvéolos internos [em mm].

A Tabela 5-2 mostra a contabilização da contribuição dos alvéolos de corrosão caracterizada pelo aumento da relação d/t.

ET	Relação d/t	
	Sem os alvéolos	Com os alvéolos
11	0,66	0,66
13	0,69	0,83
15	0,69	0,81
16	0,71	0,85

Tabela 5-2 – Alteração das relações d/t devido a consideração da contribuição dos alvéolos internos

Não foram observadas as limitações de profundidade máxima do defeito igual a 80% da espessura para a aplicação dos métodos da ASME B31G [3], 085dL [26], RPA [29].

^{xxx} No ET 11 os alvéolos mais profundos estavam fora da região de menor espessura remanescente (centro do defeito).

^{xxxii} Os métodos classificados como antigos (ASME B31G, 085dL, RPA) limitam a espessura remanescente em 20% da espessura nominal; nos novos (DNV e PCORRC) esta limitação é de 85%.

Os resultados dos cálculos das pressões previstas pelos métodos de nível 1 estão apresentados na Tabela 5-3.

ET	Método					
	B31G	085dL	RPA	PCORRC	DNV single	P_{rup}
11	73,4	69,4	69,4	74,7	74,0	92,8
13	74,5	57,1	57,1	51,5	50,6	89,4
15	64,6	52,0	52,0	44,9	46,7	40,3
16	50,7	39,4	39,4	30,7	39,0	32,0

Tabela 5-3 – Resultados de pressões calculadas pelos métodos e das pressões obtidas nos testes de ruptura (kgf/cm²) considerando a influência dos alvéolos.

O erros dos métodos em relação a pressão real de ruptura estão apresentados na Tabela 5-4.

ET	Método					
	B31G	085dL	RPA	PCORRC	DNV single	P_{rup}
11	-26%	-34%	-34%	-24%	-25%	92,8
13	-20%	-57%	-57%	-74%	-77%	89,4
15	+38%	+22%	+22%	+10%	+14%	40,3
16	+37%	+19%	+19%	-4%	+18%	32,0

Tabela 5-4 - Erros Percentuais dos Métodos de Nível 1 considerando a influência dos alvéolos na Previsão das Pressões de Ruptura

$$Erro(\%) = \left[\frac{(P_{\text{método}} - P_{rup})}{P_{\text{método}}} \right] \cdot 100$$

O gráfico da Figura 5-3 mostra a sensibilidade dos métodos de nível 1 à presença dos alvéolos internos na região dos defeitos. As setas verdes mostram o maior decréscimo observado pela aplicação do método da DNV RP-F-101 [4] e PCORRC[28]. No eixo das abscissas estão os ETs nas condições sem os alvéolos e após a sua consideração (ex: 11 e 11 com alv).

Para a obtenção dos valores foram usados as equações dos métodos da ASME B31G [3], 085dL [26], RPA [29] e DNV RP-F-101 [4]. Desta forma, os ETs 11, 13, 15 e 16 foram avaliados nas duas condições: defeito inicial produzido por eletro-erosão e defeito agravado pela presença dos alvéolos.

O método da API 579 [27] (aplicado no cálculo dos defeitos iniciais – item 4.9) não pode ser aplicado para espessuras inferiores a 2,5 mm. A norma estabelece que em espessuras inferiores a este valor mínimo, qualquer instabilidade pode conduzir a um vazamento localizado. Apesar de ter sido aplicado para os defeitos iniciais este não foi considerado^{xxxiii} para avaliar a contribuição da projeção dos alvéolos.

Os métodos da DNV RP-F-101 [4] e PCORRC [28] foram o que se mostraram mais sensíveis à presença dos alvéolos.

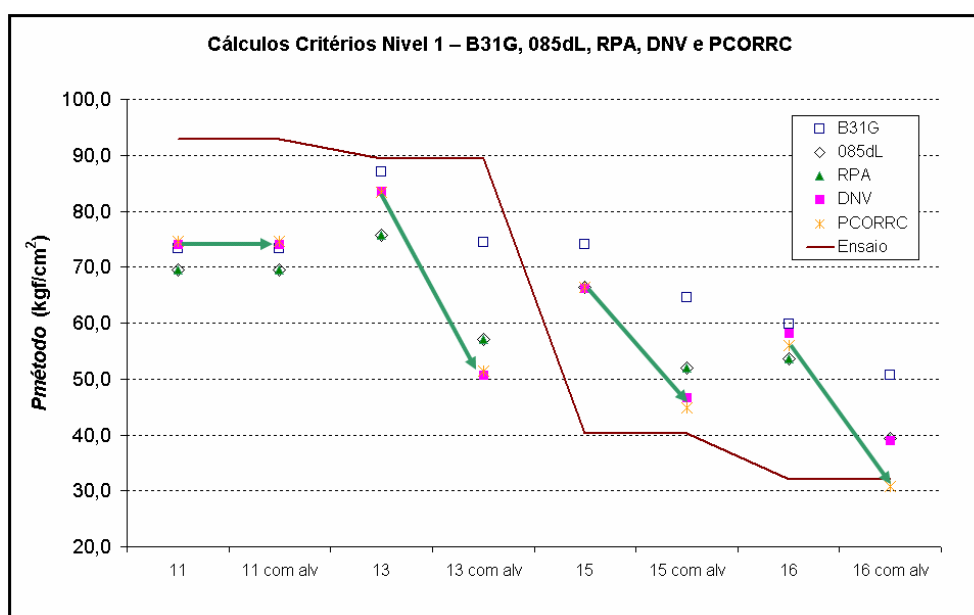


Figura 5-3 – Cálculos da Pressão de Ruptura considerando a perda de espessura relativa aos alvéolos de corrosão interna (Métodos de Nível 1)

^{xxxiii} Caso fosse aplicado o método da API 579 resultaria em pressões previstas de 55,1; 33,2; 31,9 e 21, 6 kgf/cm², respectivamente para os ETs 11, 13 14 e 15.

Apesar da redução da espessura remanescente, apenas através do método PCORRC foi possível prever pressão de ruptura inferior a real para o ET 16. Cabe ressaltar que foi considerada para o ET 16 uma espessura remanescente de 1,0 mm. Observando-se o APÊNDICE C pode-se verificar que as perdas de espessura ocorreram em pontos isolados, de comprimento inferior a 10 mm para o ET 16.

No trabalho de Souza [42] que avaliou todos os métodos de resistência para tubos do mesmo duto com defeitos de corrosão reais, as pressões de ruptura estimadas ficaram abaixo do valor real, chegando ao máximo de 95% desta. Neste mesmo trabalho, os métodos de nível 1 apresentaram as pressões de ruptura estimadas variando de 50 a 71% da pressão real de ruptura.

5.1.2.

Resultados das pressões previstas de ruptura pelos métodos de nível 2 considerando a contribuição dos alvéolos

Para o cálculos com os métodos de nível 2 foi utilizada a mesma metodologia descrita no item [5.1.1](#). A diferença foi o rebaixamento localizado no perfil do defeito.

Nos ET 13, 15 e 16 o novo perfil do defeito original resultou em um novo defeito com profundidade superior a 80% da espessura nominal.

Assim como nas avaliações do nível 1, não foram observadas as limitações de 80% e 85% para os métodos da *Effective Area* [26] e da DNV RP-F-101 [4] respectivamente.

Os resultados dos cálculos das pressões previstas pelos métodos de nível 2 estão apresentados na Tabela 5-5.

ET	Método		P_{rup}
	DNV GC	<i>Effective Area</i>	
11	92,8	85,9	92,8
13	107,9	92,8	89,4
15	44,6	45,6	40,3
16	45,0	41,1	32,0

Tabela 5-5 – Resultados de pressões calculadas pelos métodos e das pressões obtidas nos testes de ruptura (kgf/cm^2) considerando a influência dos alvéolos.

Os erros dos métodos em relação à pressão real de ruptura estão apresentados na Tabela 5-6.

ET	Método		P_{rup}
	DNV GC	<i>Effective Area</i>	
11	0%	-8%	92,8
13	+17%	+4%	89,4
15	+19%	+15%	40,3
16	+29%	+22%	32,0

Tabela 5-6 – Erros Percentuais dos Métodos de Nível 2 considerando a influência dos alvéolos na Previsão das Pressões de Ruptura

$$Erro(\%) = \left[\frac{(P_{\text{método}} - P_{rup})}{P_{\text{método}}} \right] \cdot 100$$

O gráfico da Figura 5-4 mostra a sensibilidade dos métodos de nível 2 à presença dos alvéolos internos na região dos defeitos. Para a obtenção dos valores foram usados o software RSTRENG versão 3.0 e a planilha da DNV RP-F-101 [4]. O APÊNDICE D mostra as telas dos programas.

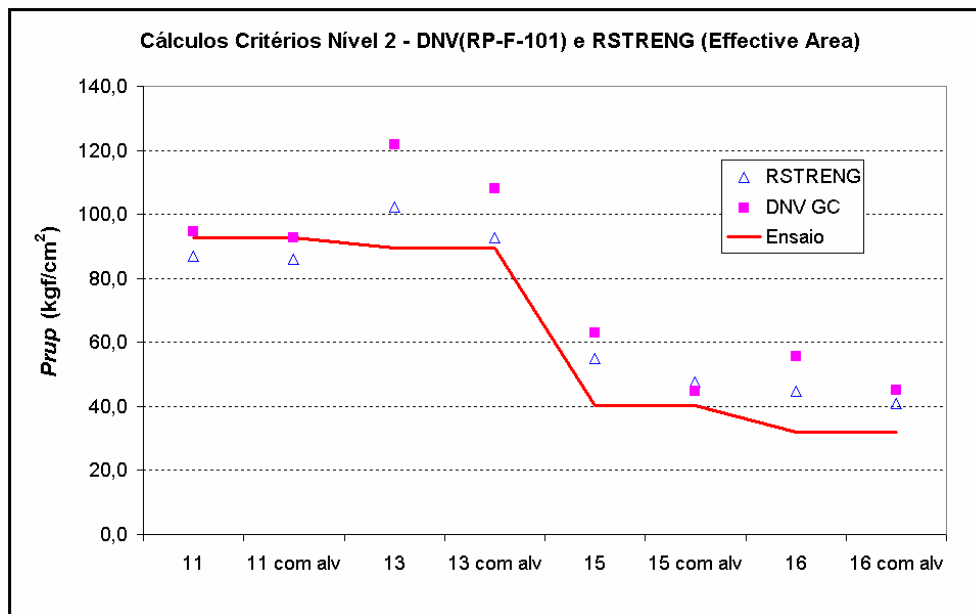


Figura 5-4— Sensibilidade dos Métodos de Nível 2 à presença dos alvéolos internos de corrosão.

A aplicação dos métodos de nível 2, com a contabilização da influência dos alvéolos, não resultou em pressões previstas inferiores às de ruptura, exceção feita ao ET 11. A superfície interna do ET 11 se destacava por ser a menos atacada pela corrosão interna.

No trabalho de Souza [42] as pressões de ruptura estimadas considerando o mapeamento de alvéolos internos reais foram em média de 72% para o método da *Effective Area* [26] e de 88% para o método da DNV Geometria Complexa [4] da pressão real de teste. Ou seja, os erros percentuais foram em média de -28% e -12% respectivamente para os métodos *Effective Area* [26] da DNV Geometria Complexa [4].

5.2. Comparação com experimento da literatura

Leis [50] avaliou a resistência remanescente de um tubo antigo, retirado de operação. Os dados do tubo estão apresentados na Tabela 5-7.

Dado Técnico	Característica
Tipo de Solda Longitudinal	SSAW (apenas passe externo)
Década de Fabricação do Tubo	1930
Diâmetro	14,25" (362 mm)
Espessura de Parede	0,254" (6,45 mm)
Média do Limite de Escoamento	274 MPa
Média do Limite de Resistência à Tração	389 MPa
Relação σ_y/σ_u	0,71

Tabela 5-7 – Dados Técnicos de Tubos antigos testados com defeitos usinados englobando a solda longitudinal

Os ensaios de tração dos CPs cilíndricos retirados unicamente da solda apresentaram média do Limite de Escoamento de 407 MPa e uma média da Limite de Resistência à Tração de 516 MPa, com uma relação σ_y/σ_u de 0,79. Estes valores indicaram que a solda era considerada *overmatched* em relação ao tubo.

Os ensaios Charpy (com entalhe em "V") dos CPs retirados na direção transversal (com entalhe alinhado com a direção longitudinal) do metal base apresentaram valores de 57 J (corrigidos para o CP padrão) para o patamar superior dútil (*upper shelf*), com a temperatura de transição estimada em -15°C. O trabalho não mediu a tenacidade com entalhes posicionados na ZTA ou no cordão de solda.

A qualidade desta solda foi muito inferior à observada nos ETs 11, 13, 14, 15 e 16. As soldas da referência [50] foram executadas em um passe único (externo) gerando imperfeições internas tais como trincas, porosidades e falta de fusão. Estas imperfeições são potenciais iniciadores de fraturas.

A Figura 5-5 mostra uma comparação entre as soldas dos ETs e a solda do tubo de teste da referência.

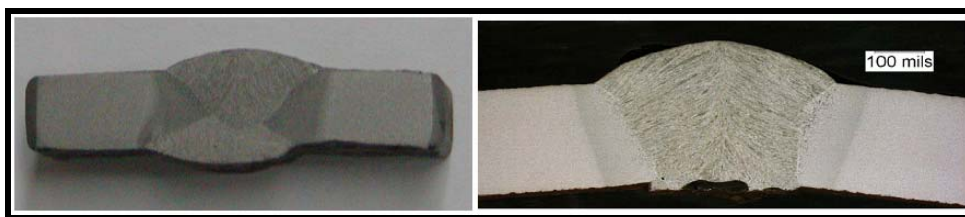


Figura 5-5 – Comparação das características das soldas da referencia (SSAW–direita) e dos ETs (DSAW–esquerda)

Fonte: LEIS, B.N. et al., “Guidelines for Assessing Corrosion associated with Girth and Long-Seam Welds”, Report GRI-04/0119, October, 2004.

Após a realização de inspeções (visual e radiografia) vários trechos de tubos foram descartados. Foi selecionado um segmento de tubo onde foram usinados externamente 3 defeitos de seção retangular. Os defeitos tiveram os cantos arredondados com raio de adoçamento aproximadamente igual à espessura, à semelhança do que foi praticado nos ETs 11, 13, 14, 15 e 16.

Os defeitos foram dimensionados para falharem simultaneamente à uma mesma pressão prevista de $94,6 \text{ kgf/cm}^2$ pelo método B31G Modificado (085dL). Esta pressão geraria tensões pouco inferiores ao limite de escoamento mínimo do material. As dimensões dos defeitos projetados estão apresentadas na Tabela 5-8.

Defeito	d [mm]	L [mm]	d/t [%]	Largura [mm]
1	4,52	40,6	70	102
2	3,30	66,0	50	
3	1,93	254	30	

Tabela 5-8 – Dimensões dos defeitos projetados para serem usinados

Legendas: d – profundidade, L – comprimento, t – espessura nominal

Estes defeitos foram todos usinados no mesmo segmento de tubo provavelmente por falta de material suficiente. Este segmento foi posteriormente soldado a um segmento maior para a composição do espécime tubular a ser testado. Na Figura 5-6 pode-se visualizar o espécime tubular com os três defeitos (região pontilhada em amarelo).



Figura 5-6 – Espécime Tubular para Teste de Pressão mostrando o segmento contendo os defeitos soldados em tubo íntegro.

Fonte: LEIS, B.N. et al., “Guidelines for Assessing Corrosion associated with Girth and Long-Seam Welds” , Report GRI-04/0119, October, 2004.

As fotos detalhadas dos três defeitos usinados estão apresentadas na Figura 5-7.

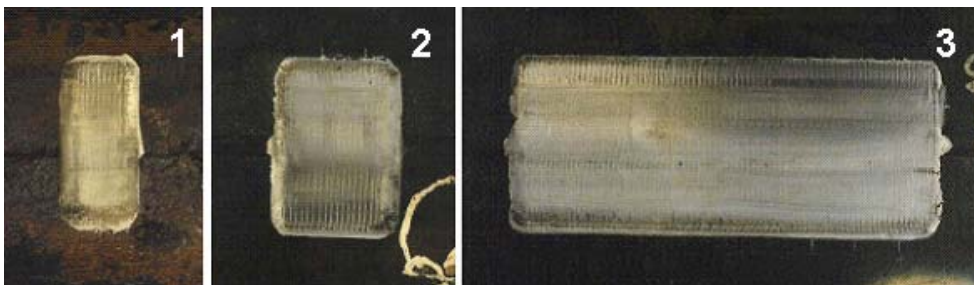


Figura 5-7 – Detalhe dos três defeitos simulados de corrosão produzidos por usinagem

Fonte: LEIS, B.N. et al., “Guidelines for Assessing Corrosion associated with Girth and Long-Seam Welds” , Report GRI-04/0119, October, 2004.

Os resultados dos testes de pressão estão apresentados na Tabela 5-9 em comparação com os resultados das previsões pelos métodos B31G Modificado (085dL) [26] e PCORRC [28]. Apesar de terem sido projetados para falhar a pressões iguais, os defeitos falharam seguindo o aumento do comprimento ou ao decréscimo da profundidade.

Defeito	Pressão de Ruptura (kgf/cm ²)	Modo de Falha	Local de Falha	$P_{\text{método}}/P_{\text{real}}$	
				085dL	PCORRC
1	71,6	Vazamento	Solda	1,37	1,59
2	99,0	Ruptura	Adjacente à Solda	0,75	1,18
3	116,5	Ruptura	Longe da Solda	0,69	0,96

Tabela 5-9– Resultados dos Testes de Pressão dos Defeitos Usinados

Não ficou claro como foi dado prosseguimento ao teste após a falha do primeiro e segundo defeitos.

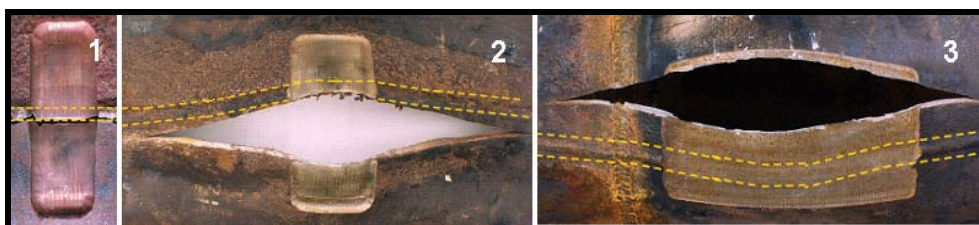


Figura 5-8 – Detalhe dos três defeitos simulados de corrosão produzidos por usinagem

Fonte: LEIS, B.N. et al., "Guidelines for Assessing Corrosion associated with Girth and Long-Seam Welds", Report GRI-04/0119, October, 2004.

Segundo o autor, as falhas dos defeitos 1 e 2 tiveram início em defeitos planares e porosidades respectivamente. Estes teriam atuado como concentradores de deformação. O comprometimento do ligamento do defeito 1 se deu antes que fosse atingido um tamanho crítico do defeito.

Já defeito 2 falhou por ruptura, com a fratura se desviando do contorno da solda para o metal base. Segundo o autor, isto comprovou uma maior tenacidade da solda em relação ao corpo do tubo. O mesmo comportamento foi observado no ET 14 (o único que falhou por ruptura) que apresentou maiores valores de energia absorvida nos CPs com entalhes no cordão de solda, com uma diferença superior a 30 J comparados com os CPs com entalhes no metal base. Neste defeito 2 o autor afirma que a porosidade serviu como um concentrador local de deformações que, associada com a alta restrição imposta pelo contorno do defeito e pelo estado de tensões, promoveu a nucleação da

trinca.

Já o defeito 3 falhou longe da solda apesar desta apresentar trincas que não vieram a romper no teste. Neste caso o autor associa a falha a problemas inerentes ao metal base ao invés de problemas potenciais de tenacidade reduzida ou restrição associada à solda. Este foi o único defeito que teria falhado por colapso plástico.

O autor afirma ainda que os resultados indicaram que as falhas não foram controladas por tenacidade, ao invés disso foram decorrentes da presença de defeitos localizados cujos formatos e carregamentos promoveram restrições que promoveram a nucleação de trincas e o crescimento do defeito. Em aços de alta tenacidade, afirma o autor, a nucleação das trincas deve ocorrer em pressões cada vez mais altas e no limite tendem a gerar uma falha por colapso plástico.

Defeitos causados por corrosão (pites) podem atuar igualmente como concentradores de deformação. Uma avaliação sugerida pelo autor seria a verificação de quais níveis de tenacidade seriam adequados a partir do mapeamento prévio de defeitos em uma campanha de inspeção.

As pressões previstas pelo método baseado no σ_{flow} foram inferiores às pressões reais de ruptura, apesar da pré-existência de defeitos volumétricos. Somente quando se teve o comprometimento de 70% da espessura e defeitos planares associados à solda é que se obteve uma pressão superior à pressão real de ruptura com um erro de +37%.

Os resultados deste trabalho indicam que os defeitos localizados em solda se tornam críticos a partir do momento que apresentam concentradores de tensão na forma de defeitos volumétricos. Mesmo nesta condição o método da 085dL conseguiu prever com segurança as pressões em profundidade de 50% da espessura.

5.3.

Análise Fratográfica dos locais do vazamento dos ETs retangulares (15 e 16)

Na tentativa de identificar os mecanismos de falha foi feita uma análise fratográfica nos ETs 15 e 16 nos locais dos vazamentos. A Figura 5-9 mostra um corte do local do ET 16 onde foi fabricado o defeito externo. Para a avaliação metalográfica do local do vazamento (circunferência pontilhada na interseção da coluna “5” com a linha “A” mostrada na figura) foram realizados vários cortes na amostra que possibilitaram a medição de espessuras.

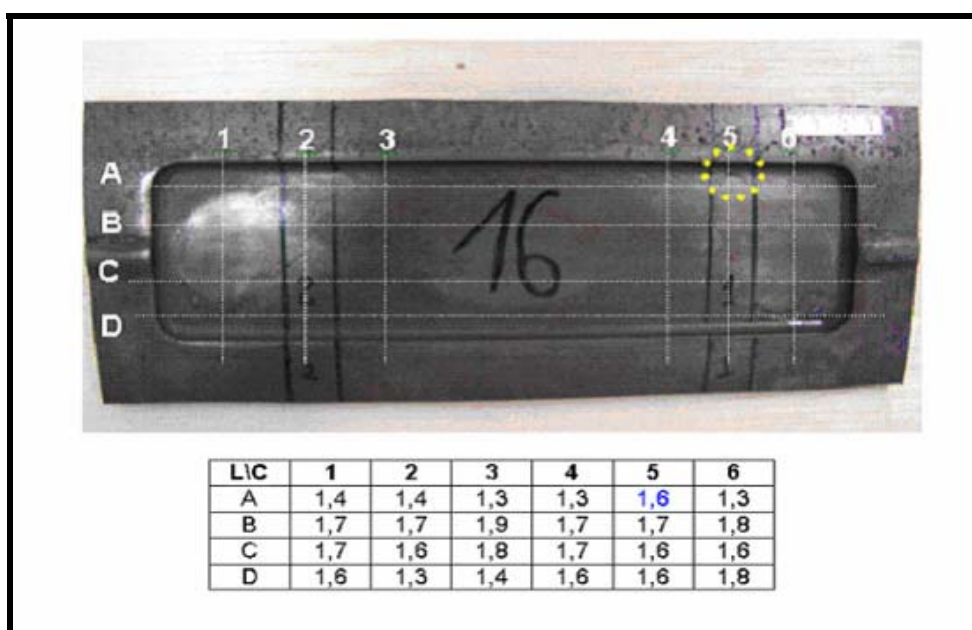


Figura 5-9 – Medições de espessura (em mm) realizadas com paquímetro após o teste de ruptura.

Legenda: L – Linhas (A, B, C, D); C – Colunas (1 a 6)

A Figura 5-10 mostra, para efeito de comparação, as medições de espessura realizadas antes do teste de ruptura. Comparando-se com as medidas realizadas por ultra-som antes do rompimento observam-se leituras ligeiramente inferiores (de 0,1 a 0,7 mm) após o teste de ruptura do ET.

6,6	6,5	6,6	6,5	6,6
2,0	2,0	2,0	2,0	2,1
3,5	3,3	3,7	3,3	3,7
1,9	2,0	2,1	2,1	2,2
6,6	6,5	6,5	6,6	6,5

Figura 5-10 – Medições de espessura (em mm) realizadas com ultra-som antes do teste de ruptura.

A Figura 5-11 mostra o aspecto do local da falha do ET 15 mostrando o caráter localizado da falha, típico de vazamento.

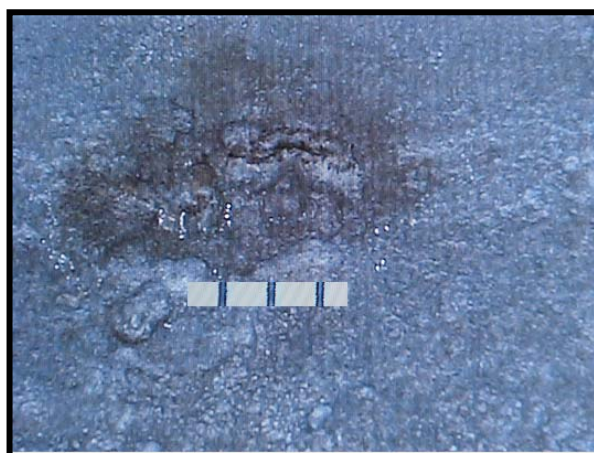


Figura 5-11 – Detalhe do local do vazamento do ET 15 (comprimento: 4 mm, profundidade: 0,8 mm)

As análises das fraturas, com auxílio de microscópio ótico mostraram o aspecto dútil da fratura que teve início a partir de alvéolos pré-existentes. Medições no ligamento final (local da falha) resultaram em espessuras variando de 0,3 a 0,6 mm. Houve, portanto acentuada estrição confirmada por estas medições. A microestrutura no local da falha (grãos deformados) confirmou o caráter extremamente localizado das deformações.

As Figuras 5-12 e 5-13 abaixo mostram os detalhes da seção transversal do local onde ocorreu o vazamento mostrando o plano preferencial de cisalhamento máximo e o caráter dútil da fratura.

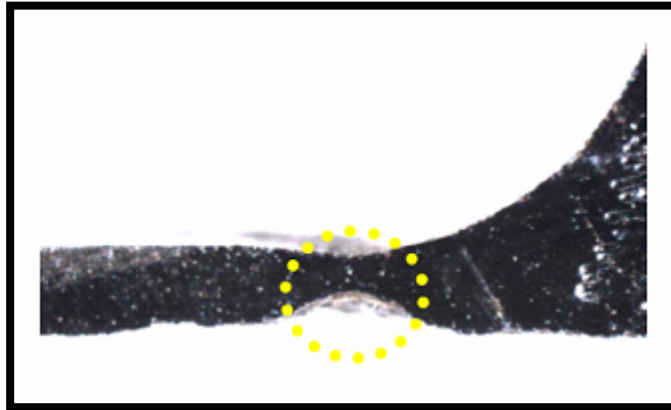


Figura 5-12 – Detalhe do local do vazamento do ET 16 mostrando o alvéolo interno na parte de baixo e a pequena estricção na parte de cima.

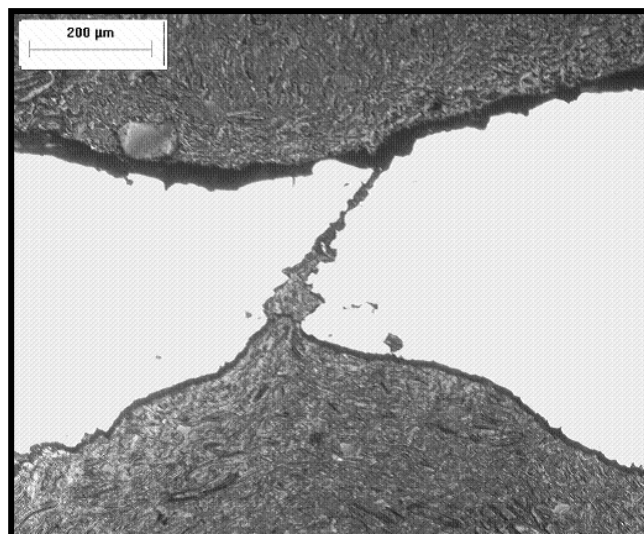


Figura 5-13 – Detalhe mostrando o local do vazamento visto ao microscópio ótico (aumento 200X)

Pode-se concluir que a pré-existência dos alvéolos associados às restrições impostas pela geometria do defeito (intensificação de tensões na borda do defeito, mesmo com raio de adoçamento) e pela modificação localizada da geometria decorrente da solda longitudinal intensificaram as tensões neste

local fazendo com que a pressão de falha dos tubos ficasse bem abaixo do previsto. Estas causas teriam atuado em consórcio e reunidas conduziram a falha prematura.

Da mesma forma que os testes do estudo de Leis [50] os resultados indicaram que as falhas não foram controladas por tenacidade.

5.4.

Análise Fratográfica dos locais do vazamento dos ETs esféricos (11, 13 e 14)

Os ETs 11 e 13 apresentaram falhas do tipo vazamento semelhante às aquelas apresentadas pelos ETs 15 e 16, evidenciando sua capacidade em conter a propagação da fratura na região da junta soldada.



Figura 5-14 – Foto do local de vazamento do ET 15 na borda do defeito



Figura 5-15 – Foto do ET 11 mostrando o local do vazamento entre a solda e o metal base

O ET 14 foi único que apresentou falha com propagação parcial do defeito (conjunto de pites que potencialmente interagiram), tendo a trinca ultrapassado os limites do defeito. A análise macroscópica (Figura 5-16) do defeito evidencia o rompimento por rasgamento dútil (seta 2) tendo início no ponto de menor espessura que se localiza na borda da solda longitudinal e no centro do defeito (seta 1).



Figura 5-16 – Análise macroscópica da falha do ET 14 mostrando detalhe do início da fratura e do rasgamento dútil

Observa-se ainda que a nucleação da trinca se deu a partir de um alvéolo de corrosão e não se propagou apenas pela ZTA – após ultrapassar a borda do defeito o rasgamento se deu na direção do metal base. A Figura 5-17 mostra a superfície interna do ET 14.

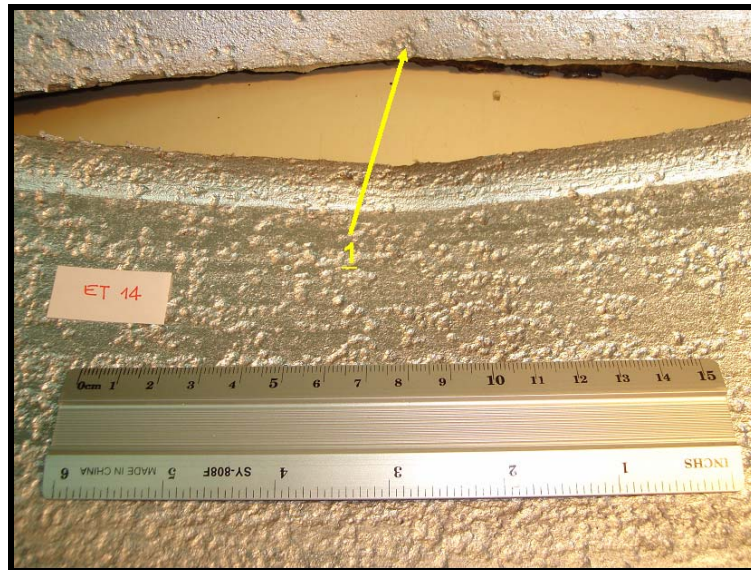


Figura 5-17 – Análise macroscópica da falha do ET 14 mostrando detalhe do início da fratura na superfície interna

Foi realizada uma análise fratógráfica do ET 14 com auxílio do MEV. Os resultados comprovam o caráter dútil da fratura. A íntegra da análise se encontra no APÊNDICE F.

5.5. Análise pelo Método dos Elementos Finitos da Intensificação de Tensões nos ETs retangulares.

Na tentativa de avaliar as tensões reais atuantes na região dos defeitos retangulares dos ETs 15 e 16 foi realizada uma simulação pelo Método dos Elementos Finitos. Uma descrição completa e detalhada desta avaliação encontra-se^{xxxiv} na referência [52].

Nesta simulação foi utilizado o programa ANSYS versão 10.0. O elemento utilizado foi o PLANE 82, usado em modelagem bi-dimensional de estruturas sólidas. Segundo o programa ANSYS, o elemento pode ser usado tanto como um elemento plano (tensão ou deformação planas) ou como um elemento

^{xxxiv} Este trabalho encontrava-se com sinopse aprovada e em vias de ser submetido na íntegra à Comissão da 9ª COTEQ-2007 (Congresso Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos) no momento da conclusão desta dissertação.

axissimétrico. Neste trabalho foi adotada a hipótese de estado plano de deformação ($\varepsilon_l = 0$). O elemento é definido por 8 nós com dois graus de liberdade em cada um (translação nas direções x e y). O elemento tem capacidade de trabalhar com estado de deformação elasto-plástico, grandes deslocamentos e grandes deformações.

Foi modelada a seção transversal do defeito visando determinar os efeitos das bordas e dos alvéolos de corrosão na concentração de tensões. A hipótese de estado plano de deformações implica em dizer que o defeito é suficientemente longo; tanto o defeito produzido por eletro-erosão quanto o alvéolo.

Na modelagem foram usados os valores de Limite de Escoamento e Limite de Resistência à Tração do tubo 16 considerando a curva tensão-deformação real apresentada na Figura 5-18. Os Limites de Escoamento e de Resistência à Tração são 314 e 553 MPa respectivamente^{xxxv}; ligeiramente superiores aos limites obtidos na curva de engenharia.

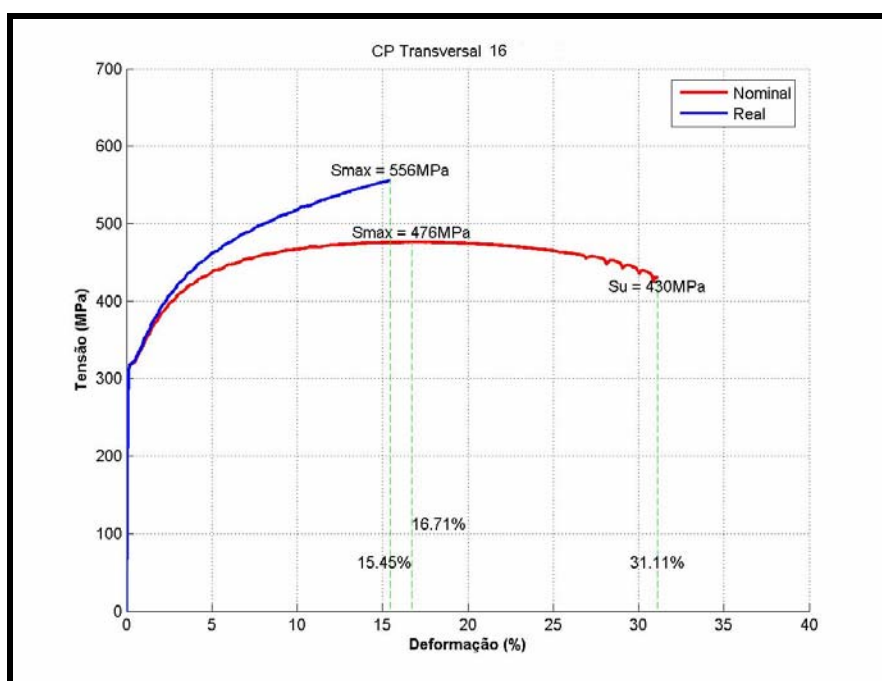


Figura 5-18 – Curva Tensão-deformação em um CP da direção transversal do tubo 16.

A simulação não mostrou respostas diferentes quando foram introduzidos

^{xxxv} Estes valores são as médias obtidas em 4 ensaios.

valores diferentes de Tensão de Escoamento para o metal de solda (CP cilíndrico retirado da direção longitudinal) e o metal base (direção transversal). A diferença entre as tensões de escoamento medidas na solda e na transversal do metal de base foi igual a 73 MPa.

Na tentativa de simular a condição real dos ETs com a influência dos alvéolos de corrosão interna foram feitas três análises:

- a) para o ET apenas com o defeito de eletro-erosão,
- b) para o ET com defeito de eletro-erosão e um alvéolo com dimensões de 0,5 x 0,5 mm (profundidade x largura)
- c) para o ET com defeito de eletro-erosão e três alvéolos com dimensões de 0,5 x 0,5 mm (profundidade x largura).

O Anexo H apresenta a avaliação das tensões através do Método dos Elementos Finitos.