

3 Procedimento experimental

O Procedimento Experimental que serviu de suporte para as conclusões desta Dissertação foi executado em tubos retirados do oleoduto ORBEL I (Oleoduto Rio-Belo Horizonte), de propriedade da PETROBRAS, durante uma campanha de substituição de trechos afetados pela corrosão. Estas campanhas de substituição foram decorrentes de Testes Hidrostáticos e de inspeções internas com “pig instrumentado”.

3.1. Origem dos Segmentos de Tubos

O Oleoduto ORBEL I interliga o Terminal de Campos Elíseos (CE) na cidade de Caxias no estado do Rio de Janeiro à Refinaria Gabriel Passos (REGAP) na cidade de Betim no estado de Minas Gerais. Existem duas estações intermediárias de bombeamento: ESMAN (Estação Mantiqueira) e ESTAP (Estação Tapinhoã). A Figura 3-1 ilustra a extensão e a localização geográfica do referido oleoduto.



Figura 3-1 – Diagrama simplificado do Oleoduto ORBEL

3.1.1. Histórico Operacional do Oleoduto que deu Origem aos Segmentos de Tubos

O oleoduto ORBEL I foi fabricado em parte pela CONFAB entre 1961 e 1964. O trecho REGAP-ESMAN foi a primeira encomenda de tubos para dutos da PETROBRAS totalmente fornecida pelo mercado nacional [41]. Sua operação foi iniciada em 1966 transferindo óleo do Terminal para a Refinaria, trabalhando nesta condição até 1982. A partir de 1984 passou a transferir produtos claros (nafta, GLP e diesel) no sentido inverso, ou seja, da refinaria para o terminal. Em 1980 foi construído o oleoduto ORBEL II de 24" que passou a transferir óleo do terminal à refinaria em substituição ao ORBEL I.

O oleoduto ORBEL I foi inspecionado internamente com pig de vazamento de fluxo magnético em abril de 1989 pela empresa VETCO. Seguiram-se mais duas campanhas de inspeção interna em 1996 e 2000.

Também foram realizados Testes Hidrostáticos nestes períodos em 4 segmentos do Oleoduto. A Tabela 3-1 mostra valores de pressão^{xx} aplicados nos TH de quatro segmentos do ORBEL I. Destas verificações de integridade foram planejadas substituições de trechos afetados pela corrosão interna.

Trecho	CE	ESTAP	ESMAN	km 261	REGAP
1	119	57			
2		109	74		
3			62	68	
4				56	65

Tabela 3-1 – Exemplo de pressões [kgf/cm²] aplicadas em teste hidrostático no ORBEL I.

3.1.2. Seleção e identificação dos segmentos de tubos

Com a troca de trechos do oleoduto foi possível ter acesso a segmentos de

^{xx} As diferenças de pressão se devem a diferença de cotas do duto decorrentes da subida da serra entre os estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais.

tubos com diâmetro nominal de 18” e espessura nominal de ¼” que estiveram em operação por aproximadamente 30 anos. Estes tubos foram considerados importantes para se representar materiais e tecnologias de fabricação antiga. Era esperado que os materiais destes tubos apresentassem valores de tenacidade bem abaixo daqueles exibidos pelos materiais atuais.

Os segmentos de tubos estavam armazenados na base de Campos Elíseos da TRANSPETRO. Estes foram enviados para o canteiro da empresa FLUKE Engenharia em Macaé/RJ onde foram inspecionados. A Tabela 3-2 mostra as principais avaliações no momento do recebimento dos tubos. O tubo 2 foi descartado por apresentar uma solda circunferencial em seu comprimento.

Tubo	Identificação Prévia Existente	Comprim. Tubo [m]	Solda Circunf?	Corrosão Aparente?	Descarte?
1	M-38/M-39 ESMAN	3,55	Não	Não	Não
2	PUC	3,50	Sim	Sim	Sim
3	PUC/TRECHO I – SEGMENTOS DE DUTOS – N° 006.166-C-1	5,70	Não	Não	Não
4	SEGMENTOS DE DUTOS N° 006.163- DP04 – 84.405,18	3,60	Não	Não	Não
5		3,6	Não	Não	Não
6	PONTO 410 – ORBEL I, km 20.481,09	4,00	Não	Não	Não

Tabela 3-2– Resumo da Inspeção realizada no canteiro após o recebimento dos tubos

Também foram inspecionados, pela técnica de partículas magnéticas, as soldas longitudinais dos tubos selecionados. Todos os tubos foram aprovados após a inspeção mostrando-se isentos de trincas superficiais.

Para efeito de diferenciação com a Dissertação de Souza [42] que utilizou tubos do mesmo oleoduto, os tubos foram renumerados passando de 1, 3, 4, 5 e 6 para 11, 13, 14, 15 e 16 respectivamente.

Foi possível rastrear a origem de 4 dos 5 tubos utilizados nos experimentos com base na identificação dos tubos mostradas na Tabela 3-2. A Tabela 3-3 apresenta os locais no oleoduto onde estes tubos foram retirados. Com base nestas informações, pode-se concluir que pelo menos os tubos 11, 14

e 16 foram fabricados no Brasil pela empresa CONFAB no início da década de 60.

Tubo	Trecho	km
11	REGAP-ESMAN	82
13	CE-ESTAP	NI
14	REGAP-ESMAN	84
15	NI	NI
16	REGAP-ESMAN	20

Tabela 3-3– Posição dos tubos retirados do Oleoduto

Legenda: NI – Não identificado.

3.2. Qualificação do material

Os ensaios mecânicos executados foram os seguintes: ensaio de tração, ensaio de dobramento, ensaio de impacto com entalhe em “V” em 5 posições da junta soldada e em corpo de prova com dimensões reduzidas e medição de tensões residuais pela técnica do “furo cego” na solda longitudinal. Também foram executadas análises químicas do metal de base e do metal de solda, análises metalográficas e medições de microdureza na junta soldada. Os ensaios foram realizados nos laboratórios da PUC-RIO e da FLUKE Engenharia com os resultados gerados através de dois Relatórios; [43] [44]. Ensaios complementares foram executados no CENPES.

3.2.1. Ensaio de Tração

As amostras para realizar os ensaios de tração foram retiradas dos 5 tubos. A confecção dos CPs e os ensaios de tração foram realizados em atendimento a API Specification 5L [18], a ASTM E8 [45] e a ASTM A370 [46].

Foram realizados ensaios em 80 CPs, 16 CPs por tubo. Os 4 CPs longitudinais do metal base (L) foram retirados de posições situadas a 90° do cordão de solda longitudinal. Os 4 CPs transversais (T) do metal de base foram retirados de posições diametralmente opostas ao cordão de solda longitudinal.

Outros 4 CPs transversais foram retirados contendo a solda longitudinal (S) e os 4 CPs cilíndricos foram usinados com material apenas do cordão de solda (M).

Os corpos de prova para os ensaios de tração foram identificados da seguinte forma:

- T = transversal do metal base, L = longitudinal do metal base, S = contendo a junta longitudinal soldada, M = metal de solda ou metal depositado;
- Números do tubo: 11, 13, 14, 15 ou 16;
- Números do CP: de 1 a 4;
- Exemplo: M 11-2: corpo de prova número 2, retirado do metal de solda na direção longitudinal do tubo 11.

Foram utilizados os seguintes equipamentos na execução dos ensaios:

- Máquina servo hidráulica para ensaios mecânicos, marca MTS, modelo 810.
- Célula de carga marca MTS, modelo 661.22D-01, N° 292, capacidade 250 kN.
- Célula de carga marca Kratos, modelo KM, N° 33J7592, capacidade 20 kN, calibrada contra a célula de carga Instron de 100 kN, N° UK836.
- *Clip-gage* marca Instron, N° 2620-603, base de medida 10mm ou 25mm, campo de medição ± 1 mm.
- *Clip-gage* marca Instron, N° 2630-107, base de medida 25mm ou 50mm, campo de medição +25mm, -2,5mm.
- Calibrador para *clip-gages* marca Instron, modelo T18-16, N° 12126.
- Sistema de aquisição e registro de sinais marca Lynx ADS 2000.

3.2.1.1.

Metodologia de Ensaio

Os CPs do tipo “chato” (T, L e S) que têm a espessura igual à espessura de parede do tubo não são completamente planos ou retos. Principalmente os transversais que, conforme a norma API 5L [18], são usinados de uma placa de material retirada do tubo e posteriormente planificada a frio com auxílio de uma prensa.

Um corpo de prova não completamente plano ou reto quando fixado e carregado axialmente pela máquina de ensaios, não apresentará uma distribuição uniforme de deformações ao longo de sua base de medida, principalmente no início do teste. Surgirão tensões (e deformações) provenientes

do momento fletor atuante no espécime devido a sua tendência de alinhar-se ao eixo de aplicação da força.

As medidas no início do teste são importantes para o cálculo do módulo de elasticidade e para a determinação da resistência ao escoamento. Para eliminar o efeito do momento fletor nas medidas de deformação foram utilizados dois *clip-gages* fixados de forma oposta nas faces laterais dos espécimes T e L no início do teste. Quando o alongamento da base de medida do *clip-gage* 2620-603 atingia 1mm, este era retirado do corpo de prova e o restante do alongamento do espécime continuava sendo medido até a ruptura pelo *clip-gage* 2630-107.

As deformações até 3%, plotadas nos diagramas chamados de “iniciais”, são os valores médios das duas deformações medidas, simultaneamente, nas duas faces laterais de cada corpo de prova T e L.

Esta metodologia permitiu (i) a eliminação do efeito do momento fletor nas medidas de deformação, e (ii) determinações consistentes do módulo de elasticidade e da resistência ao escoamento.

Esta mesma metodologia foi aplicada aos CPs M retirados do metal depositado, nos quais os dois *clip-gages* foram montados diametralmente opostos. Estes CPs foram retirados da direção longitudinal do cordão de solda com dimensões inferiores a espessura do tubo. Estes CPs seguiram as especificações dimensionais do espécime reduzido da Figura 4 da norma ASTM A-370; [46]. Estes apresentavam diâmetro nominal de 4 mm, comprimento da seção reduzida de 20 mm, e raio de adoçamento mínimo de 4 mm.

Nos corpos de prova S da junta soldada, apenas o *clip-gage* 2630-107 foi utilizado. Nestes espécimes as deformações medidas devem ser analisadas com cuidado, porque: (i) as deformações médias na base de medida serão menores, comparativamente aos espécimes T já que a região da solda deforma-se menos por ter maior espessura; (ii) como consequência, nestes corpos de prova o material aparenta maior rigidez e menor ductilidade.

Nos CPs T e L foram aplicadas taxas de deslocamento entre garras de 2 mm / minuto em bases de medida de 25mm no *clip-gage* no 2620-603 e 50 mm no *clip-gage* no 2630-107.

Nos CPs S foram aplicadas taxas de deslocamento entre garras de 2 mm / minuto em base de medida de 50 mm no *clip-gage* no 2630-107.

Nos CPs M foram aplicadas taxas de deslocamento entre garras de 0,5 mm / minuto em bases de medida de 10 mm no *clip-gage* no 2620-603 e 20 mm no *clip-gage* no 2630-107.

Em todos os ensaios a taxa de aquisição de sinais foi de 4 Hz.

Quando os corpos de prova iniciavam a queda da força (estricção localizada), procedeu-se em alguns corpos de prova uma seqüência de medições da largura na seção de estrição nos espécimes T e L e do diâmetro nos corpos de prova M. Estas medições foram realizadas até a ruptura dos corpos de prova, permitindo a estimativa das tensões verdadeiras após a tensão máxima.

As resistências ao escoamento foram determinadas através dos limites (i) 0,2% de deformação plástica e (ii) 0,5% de deformação total. Foi adotado o valor de 0,5% de deformação total em conformidade com a Norma API 5L [18].

O valor do alongamento percentual apresentado foi determinado conforme o item 13.4.1 da norma ASTM A 370; [46].



Figura 3-2 – Ilustração mostrando os tipos de CPs ensaiados à tração

Obs.: Da esquerda para a direita – CP longitudinal ou transversal do metal de base; CP transversal incluindo a solda longitudinal; CP cilíndrico longitudinal retirado apenas do cordão de solda (espécimes ensaiados).

Foram registradas, do início do ensaio até o instante em que a carga máxima foi atingida, a carga aplicada sobre o CP, a variação do comprimento útil ("*gage length*") do CP medida por "*clip gages*" e em alguns CPs a deformação

medida por um extensômetro uniaxial de resistência elétrica para grandes deformações. Foram obtidos também os diagramas força x deslocamento e tensão x deformação nominais e verdadeiras do material.

3.2.2. Ensaio de Dobramento

A confecção dos CPs e os ensaios de dobramento foram realizados de acordo com a Norma AWS B4.0 [47] na sua versão mais recente.

Os ensaios foram realizados em CPs contendo, transversalmente, as soldas longitudinais dos 5 tubos.

De cada tubo foram realizados 01 ensaio de dobramento com tracionamento de face externa da solda longitudinal e 01 ensaio de dobramento com tracionamento de face interna, perfazendo um total de 10 dobramentos. Foi utilizada a máquina universal Amsler com capacidade de 20t, nº 0268-5/05 na execução dos ensaios.

Atendendo à norma API 5L [18], (i) os reforços das faces da solda foram retirados; (ii) os dobramentos foram guiados até aproximadamente 180° e (iii) o cutelo e o suporte para os dobramentos seguiram as indicações da Figura 10 da norma API 5L [18], adotando-se os valores de A igual a 50,0mm e B igual a 66,0mm;

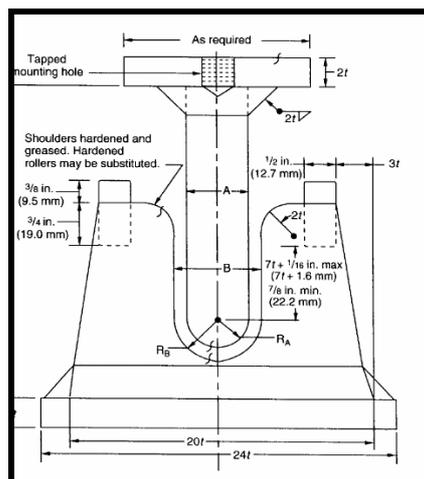


Figura 3-3 – Ilustração mostrando as dimensões A (cutelo) e B (suporte) do ensaio de dobramento

(Fonte: Figura 10 da Norma API Spec 5L – Specification for Line Pipe – 43rd edition – March, 2004; [18])

3.2.3.

Ensaio de Impacto com CPs de dimensões reduzidas

Foram realizados ensaios de impacto Charpy (EC) com entalhe em “V” em 225 CPs, retirados dos cinco tubos, sendo 45 CPs por tubo. Para cada tubo foram retirados 5 grupos com 9 CPs cada. Os EC dos dois primeiros grupos foram retirados do Metal Base (MB) e do Metal de Solda (MS) e os 3 grupos restantes da Zona Termicamente Afetada (ZTA), com a raiz do entalhe nas posições a 1, 3 e 5 mm do centro da linha de fusão (LF). Os ensaios foram realizados em três temperaturas 20° C, 0° C e -20° C.

Os CPs foram confeccionados com largura de 4 mm devido à limitação (imposta pela curvatura do tubo) de se obter CPs de 5 mm (um dos padrões de CP reduzido).

A confecção dos CPs e os EC foram realizados de acordo com as Normas API Specification 5L [18], ASTM E23 [48], ASTM A370 [46] e AWS B4.0 [54], nas suas versões mais recentes.

3.2.4.

Avaliação das Tensões Residuais pela Técnica do “Furo Cego”

Foi reservado 01 segmento de cada tubo para a medição de tensões residuais em dois pontos na solda longitudinal, através da “Técnica do Furo Cego”, seguindo-se as recomendações da norma ASTM E-837-01; [40].

Para que fosse possível instalar sobre as soldas as rosetas extensométricas especiais para tensões residuais marca MM, tipo TEA-06-062RK-120 Ø 1/16”, seus reforços externos foram cuidadosamente lixados até o nivelamento com a chapa. Apesar deste procedimento promover algum alívio das tensões residuais, esta operação foi executada igualmente para todos os espécimes, objetivando manter os resultados representativos e comparáveis.

No espécime do tubo 16 foram executadas mais 10 destas medições, em pontos distribuídos ao longo de uma seção transversal do tubo. Estas medições procuraram determinar a distribuição das tensões residuais presentes na superfície externa da chapa decorrentes do processo de fabricação do tubo.

3.2.5.

Análise Química do Metal Base e do Metal de Solda

Foram retiradas amostras do metal de base e do metal depositado de cada tubo para análise química. As análises químicas foram executadas empregando-se a técnica de espectrometria por emissão ótica. Foi realizado desbaste mecânico prévio para planificação e posterior análise.

3.2.6.

Análise Microestrutural e Medição de Microdureza

Foram realizadas análises na seção transversal das juntas soldadas dos 5 tubos. As amostras foram preparadas para as análises metalográficas em conformidade com a especificação ASTM E3 [49], atacadas quimicamente com o reagente Nital 2%, e por fim analisadas por microscopia ótica.

Foram avaliadas as faces, o centro e a raiz do cordão de solda e também foram avaliadas a ZTA e o metal base nos dois lados do cordão de solda. Foram realizadas medições de microdureza com carga de 500 gf nas regiões do cordão de solda, ZTA e metal base. Posteriormente foi levantado perfil de microdureza com carga de 100 gf com intuito de verificar a presença de microconstituintes frágeis. Foram também obtidas leituras de dureza com carga de 10 kgf para comparação com as normas.

3.3.

Testes de pressão interna ou de ruptura

Os testes de ruptura foram realizados em espécimes tubulares, de 3 metros de comprimento, retirados dos 5 segmentos de tubos disponibilizados.

A primeira etapa consistiu no fechamento dos tubos através da soldagem dos tampos. Após esta etapa foram fabricados os defeitos externos por eletroerosão. Antes da execução dos testes de ruptura foram realizadas novas medições dimensionais de diâmetros, comprimentos e espessuras dos espécimes tubulares.

3.3.1. Fechamento dos Espécimes Tubulares

O fechamento dos ETs foi realizado pela soldagem de tampos toro-esféricos nas extremidades. Foram reaproveitados os tampos já utilizados nos ensaios de ruptura da Dissertação de Mestrado de Souza; [42]. Originalmente estes tampos foram dimensionados para não apresentarem deformações plásticas sob uma pressão interna capaz de romper tubos de especificação API 5L X46, de diâmetro nominal de 18", espessura de parede de ¼", sem defeito. Por isto, os referidos tampos foram fabricados de material com resistência semelhante à do tubo e com espessura de parede de ½".

O detalhamento e a especificação das soldas foi realizado de acordo com as seguintes Normas: *ASME Boiler and Pressure Vessel Code (Section VIII Division 1)*, PETROBRAS N-253 "Projeto de Vaso de Pressão" e PETROBRAS N-133 "Soldagem".

A soldagem dos tampos foi realizada com soldas de penetração total de acordo com uma especificação de soldagem (EPS) qualificada e um plano de inspeção de fabricação. O plano de inspeção consistiu de ensaio de líquido penetrante (LP) após o 1º passe de raiz e partículas magnéticas (PM) na face das soldas.

3.3.2. Fabricação dos Defeitos

Foram fabricados defeitos externos por uma questão de facilidade e por não ter diferença em termos de resistência remanescente. Os defeitos foram fabricados nos cinco ETs usando apenas eletro-erosão. Os trabalhos de eletro-erosão consistiram na (i) elaboração dos programas para a usinagem dos eletrodos, (ii) usinagem propriamente dita dos eletrodos de grafite, (iii) trabalhos de eletro-erosão nos ETs.

Em cada ET foi gerado artificialmente um defeito de corrosão longitudinal englobando a solda longitudinal, a zona termicamente afetada e o metal base. O eixo longitudinal do defeito e o eixo da solda longitudinal foram coincidentes. Todos os defeitos foram gerados na parte externa dos espécimes numa posição equidistante dos tampos.

Os defeitos foram dimensionados para terem comprimento inferior a 20

vezes a raiz do produto do diâmetro externo pela espessura nominal ($L \leq 20 \cdot \sqrt{D \cdot t}$). Nesta faixa de valores os métodos apresentam maiores diferenças de resultados. A profundidade máxima dos defeitos foi selecionada para 70% ($d/t = 0,70$) pelo fato de defeitos mais profundos também acentuarem a diferença das pressões previstas pelos métodos.

3.3.2.1.

Considerações sobre a Usinagem dos Rebaixos Esféricos

Os quatro eletrodos de grafite, na forma de calotas esféricas, foram usinados em máquinas a comando numérico (CNC). Após a usinagem foi realizada uma inspeção com gabaritos de raio, a qual comprovou a conformidade dos raios dos eletrodos com o inicialmente estabelecido na Tabela 3-4 e com erros menores do que 1 mm nos valores de raio.

Devido ao reforço na face da solda, a referência de profundidade precisou ser tomada na chapa, próximo à solda. Para isto foi adotado o seguinte procedimento:

- (a) girava-se o tubo em torno de seu eixo;
- (b) tocava-se o eletrodo na chapa;
- (c) zerava-se o contador de profundidade;
- (d) erguia-se o eletrodo (“profundidade negativa”);

(e) girava-se o tubo para coincidir o centro da solda com o topo inferior do eletrodo;

(f) executava-se a erosão com a referência de profundidade obtida no passo (c).

Os três tubos e principalmente o ET 13 apresentaram ovalizações ou erros na forma circunferencial, mais acentuados próximo à solda longitudinal.

Devido aos grandes raios das calotas esféricas, pequenas (e possíveis) variações na referência de profundidade e variações na forma circunferencial do tubo, provocam grandes variações nas larguras e nos comprimentos finais dos rebaixos.

Estas considerações procuraram esclarecer as diferenças observadas entre as dimensões nominais e as dimensões medidas nos rebaixos.

No processo de eletro-erosão de cada um dos defeitos foram utilizados dois tipos de eletrodos. O eletrodo do tipo 1 tinha a forma de uma calota esférica com diâmetro máximo da base igual a $1,2 \times L_1$, raio R_1 e profundidade d_1 . Este eletrodo foi usado na geração das duas regiões mais rasas do defeito. O eletrodo do tipo 2, na forma de uma calota esférica com diâmetro máximo da base igual a 72,48 mm, raio R_2 e profundidade d_2 , foi usado na geração da região mais profunda dos defeitos dos três ETs (11, 13 e 14). A Tabela 3-4 e a Figura 3-4 apresentam as dimensões (em mm) projetadas e os formatos dos defeitos dos ETs 11, 13 e 14.

ET	d	L	d_1	d_2	d_{12}	L_1	L_2	R_1	R_2	a_1	a_2	b_1
11	4,45	140	2,54	4,45	3,03	40	60	114,7	149,8	24	16	46
13	4,45	180	2,54	4,45	3,03	60	60	256,4	149,8	36	24	54
14	4,45	240	2,54	4,45	3,03	90	60	575,3	149,8	54	36	66

Tabela 3-4 – Dimensões dos defeitos conforme projetado – ETs 11, 13 e 14

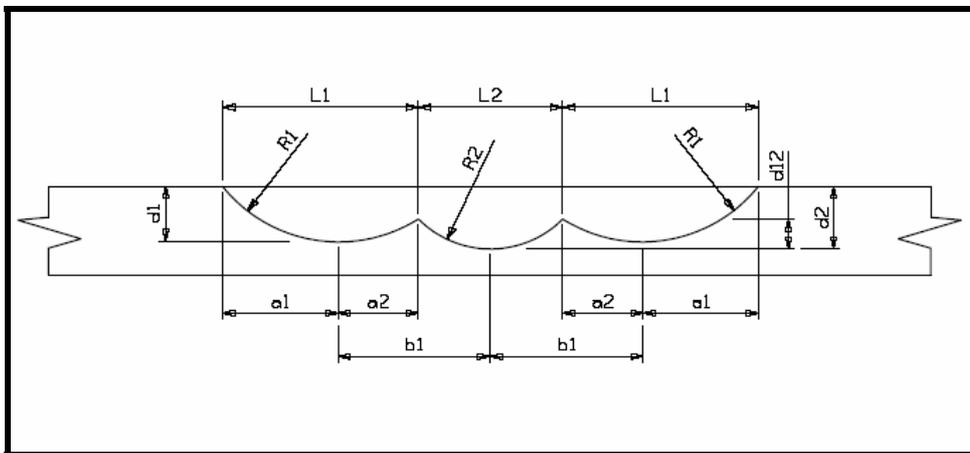


Figura 3-4 – Esquema de orientação para fabricação dos eletrodos para confecção dos defeitos dos ETs 11, 13 e 14.

A Figura 3-5 ilustra as seções longitudinais finais dos defeitos dos ETs 11, 13 e 14 em escala. Nota-se que os defeitos diferem no comprimento das áreas

rasas laterais. As dimensões (comprimento e profundidade) das áreas centrais e as profundidades das áreas laterais e centrais são idênticas para os 3 ETs (11, 13 e 14).

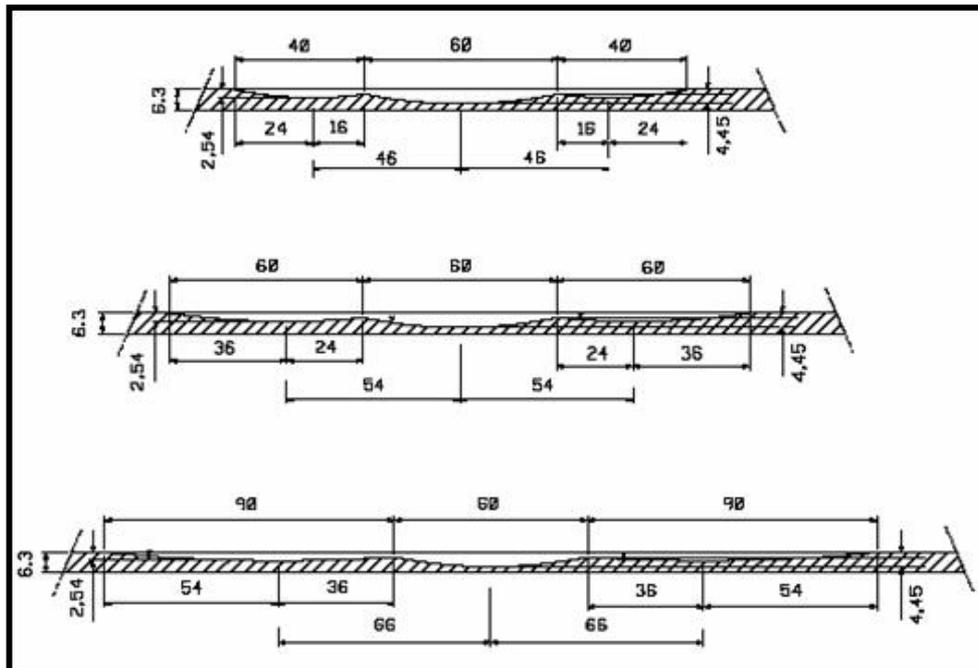


Figura 3-5 – Seções longitudinais dos defeitos produzidos por eletro-erosão nos ETs 11, 13 e 14 (dimensões em mm)

3.3.2.2. Considerações sobre a Usinagem dos Rebaixos Retangulares

Nos espécimes tubulares (ET) 15 e 16 foram projetados defeitos retangulares adoçados com perfil de profundidades no formato apresentado na Figura 3-6.

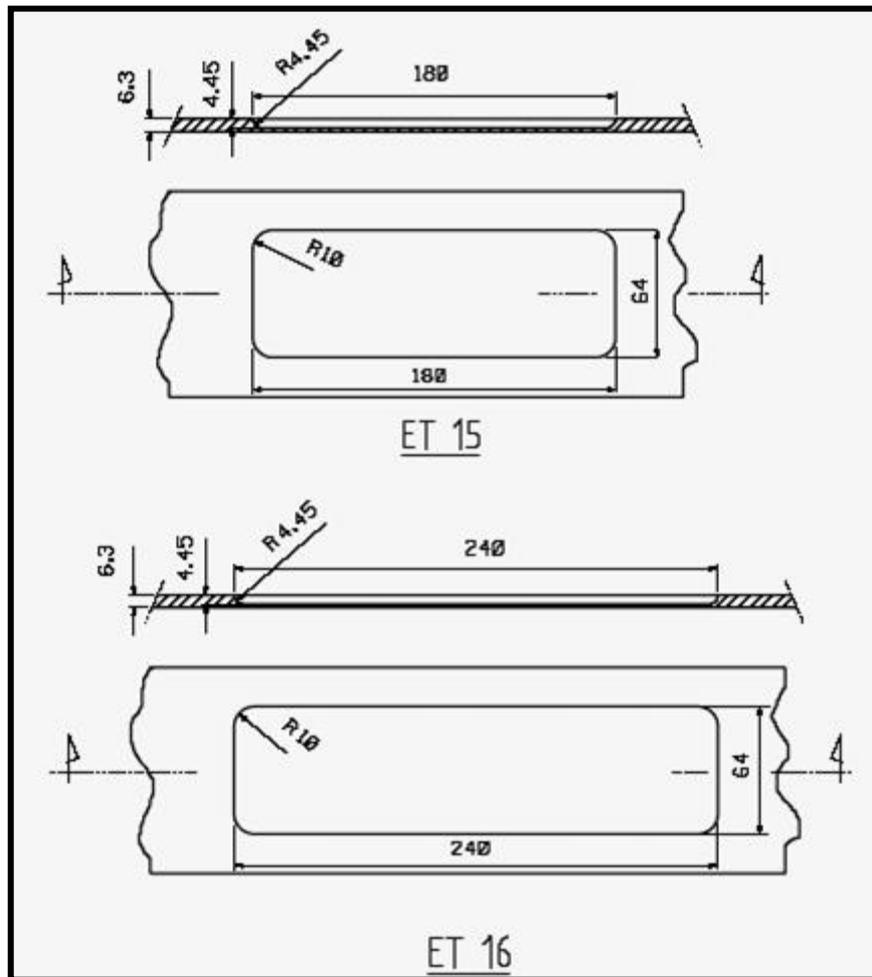


Figura 3-6 - Seções longitudinais e vista de topo dos defeitos usinados nos ETs 15 e 16 (dimensões em mm)

3.3.2.3. Levantamento Dimensional dos Espécimes Tubulares

A espessura de parede de cada ET foi medida em dez pontos fora do defeito. Foram realizadas medições do diâmetro ao longo do comprimento do ET de 20 em 20 cm. Os valores de diâmetro foram obtidos por medições de perímetro e apresentaram incerteza de $\pm 0,7$ mm.

Nos ETs com defeitos retangulares (15 e 16) foram feitas medições da espessura remanescente de parede dentro do defeito nos nós de uma malha com espaçamento de 20 mm.

Nos ETs com defeitos esféricos (11, 13 e 14), foram feitas também medições de espessura localizadas, no interior dos defeitos, buscando-se os

pontos de espessura remanescente mínima. As medições de espessura de parede foram feitas com equipamento de ultra-som marca Starmans, modelo DIO-570.

3.3.3. Testes de Pressão nos Espécimes Tubulares

Os Testes de Pressão foram realizados no Laboratório de Fotomecânica do DEM-PUC-RIO.

Foram medidas, por extensometria, as deformações em diversos pontos dos espécimes tubulares, a pressão interna, o deslocamento radial do centro dos defeitos e a variação de volume.

Foram usados extensômetros^{xxi} biaxiais (rosetas duplas) e triaxiais (rosetas triplas) especiais para grandes deformações, do fabricante Tokyo Sokki Kenkyujo e adesivo especial. Os extensômetros receberam proteção de respingos. O cabeamento até o sistema de leitura foi realizado utilizando-se a técnica de três fios e cabos blindados. Extensômetros testemunha (iguais aos utilizados nos ETs) foram instalados fora do tubo e serviram como referência às leituras.

A pressão interna foi lida através de um transdutor de pressão calibrado, código TKG-N-1-M-B05C-M e capacidade de 500 bar. A variação de volume foi registrada através da medição, sob pressão atmosférica, do volume de líquido introduzido nos ETs.

O condicionamento de sinais e as aquisições das leituras de deformação e de deslocamento, correlacionadas às leituras de pressão interna, foram realizadas por um sistema de tratamento e aquisição para extensometria marca Lynx ADS 2000 (até 64 canais).

Cada ET foi instrumentado por 9 rosetas duplas e 3 rosetas triplas de

^{xxi} Extensômetro, rosetas e *strain gages* são todos termos referentes aos medidores elétricos de deformação que devem ser perfeitamente fixados nos ETs para monitoramento durante os ensaios. Constituem-se de uma fina base sobre a qual encontra-se um finíssimo condutor elétrico metálico no formato *zig-zag*. Uma mudança no comprimento (deformação) deste condutor um dos fios gera uma variação da resistência elétrica do extensômetro.

extensômetros elétricos de resistência, perfazendo um total de 27 canais extensométricos. As posições de fixação destes extensômetros estão apresentadas nas Figuras 3-7 e 3-8.

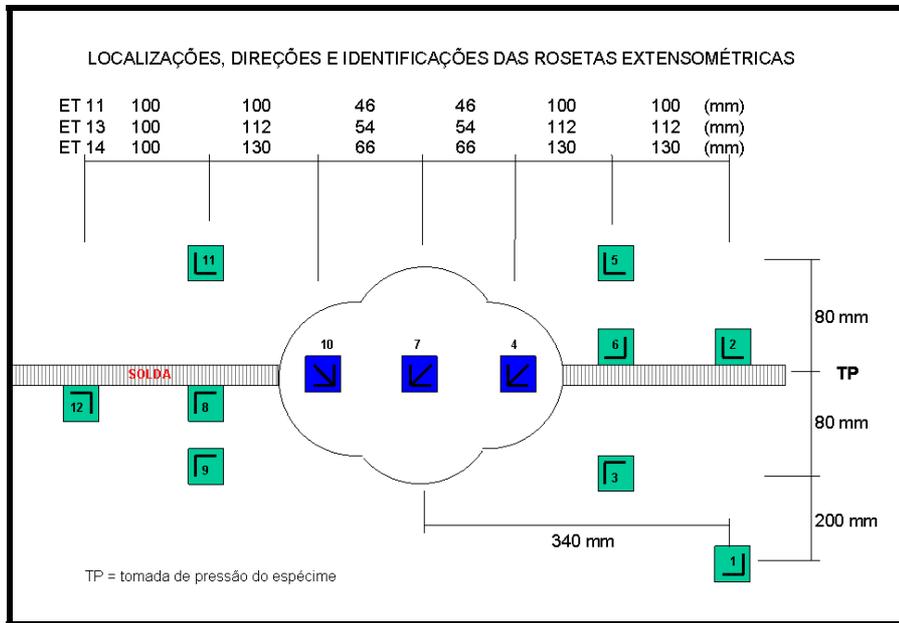


Figura 3-7 – Esquema mostrando as localizações, direções e identificações das rosetas extensométricas (ETs 11, 13 e 14)

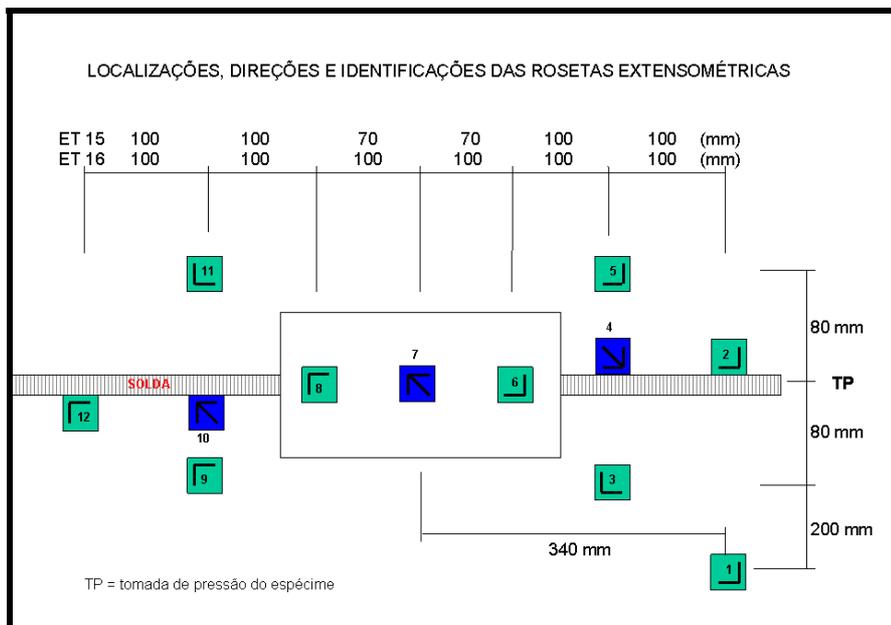


Figura 3-8 – Esquema mostrando as localizações, direções e identificações das rosetas extensométricas (ETs 15 e 16)

3.3.3.1. Medições de Deformação, Pressão e Volume Injetado

Na instrumentação foram usadas rosetas extensométricas duplas (YEFCA-5), e triplas (YRFLA-5) especiais para grandes deformações. Os extensômetros posicionados fora dos defeitos foram colados com adesivo cianoacrilático, e dentro dos defeitos com adesivo epóxi. Após a colagem estes receberam proteção à prova de respingos de água e o cabeamento até o sistema de leitura foi realizado utilizando-se a técnica de três fios com cabos blindados AWG 26.

Foi instalado fora dos espécimes tubulares, em uma barra de aço, um extensômetro testemunha. Este extensômetro deveria medir deformação constante nula durante todo o teste. Este canal testemunha acusou variações de sinal menores do que $\pm 10 \mu\text{m/m}$.

A pressão interna foi lida através de um transdutor de pressão marca GEFTRAN, calibrado contra a máquina de peso morto do Laboratório de Pressão e Temperatura do DEM-PUC-Rio. Foi utilizada uma taxa de pressurização variando de 1,6 a 2,0 bar/minuto.

A variação de volume foi registrada através da medição, na pressão atmosférica, do volume de líquido introduzido nos espécimes durante a pressurização. O sistema para a medição da variação de volume foi especialmente projetado para estes testes e utiliza um vaso vertical graduado e um sensor resistivo de nível de água.

3.3.3.2. Medições de Deslocamento Radial no Centro dos Defeitos

O deslocamento radial do centro dos defeitos foi monitorado utilizando-se um transdutor de deslocamento fixado sobre o tubo através de uma base magnética especialmente construído e calibrado para estes testes.

Nestas medições, o ponto de referência sobre o tubo em todos os espécimes distou 220 mm, contados longitudinalmente da linha de centro do

apalpador. O centro do apalpador foi localizado a 8 mm na direção longitudinal do centro dos defeitos (o apalpador não pode tocar o centro dos defeitos porque ali encontrava-se instalado o extensômetro circunferencial das rosetas n° 7).

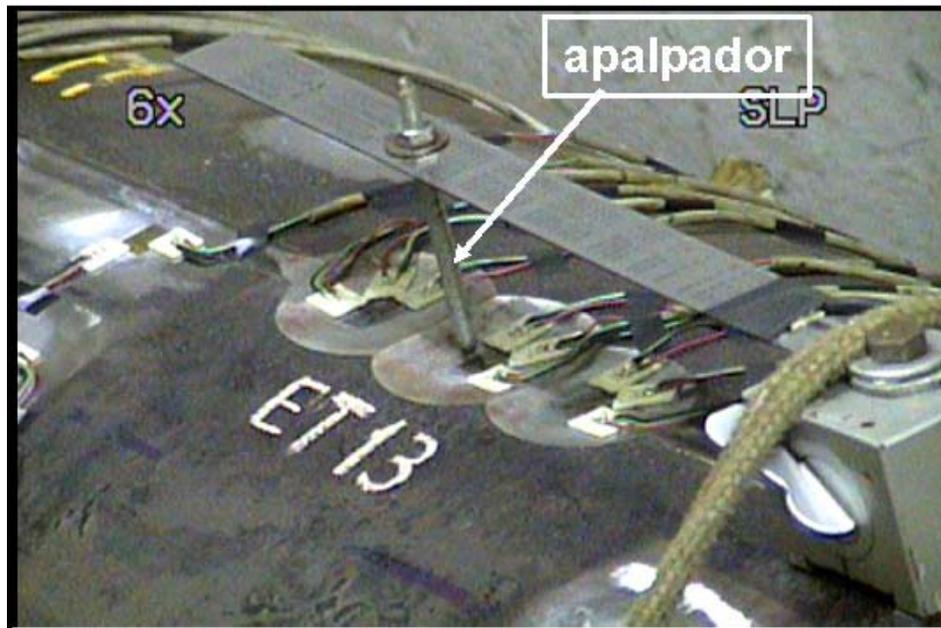


Figura 3-9 – Ilustração do apalpador utilizado para medir o deslocamento radial da superfície do defeito

3.3.3.3. Condicionamento dos Sinais

O condicionamento e a aquisição dos sinais de deformação, de variação de volume e de deslocamento, correlacionados às leituras de pressão interna, foram realizados por um sistema de tratamento e aquisição para extensometria da marca Lynx, modelo ADS 2000, com placas AC 2160. A taxa de aquisição em todos os 31 canais monitorados (28 de deformação, incluindo a roseta dupla nominal n° 1 e a barra testemunha, 01 de pressão, 01 de volume e 01 de deslocamento), foi de 4 Hz.

3.3.3.4. Registro em Vídeo dos Testes

Durante a pressurização e até a ruptura, os espécimes foram filmados

utilizando-se uma câmera Panasonic que fornecia o sinal de vídeo (33 quadros por segundo) a uma placa marca Pinnacle, instalada em um microcomputador. O “zoom” da câmera foi ajustado de tal forma que a região dos defeitos fosse vista em detalhe.

3.3.3.5. Incertezas das Medidas

Todos os instrumentos de medição foram calibrados contra padrões confiáveis procurando-se garantir exatidões melhores que $\pm 1\%$. As exatidões de leitura foram as seguintes:

- Nas deformações: $\pm 10 \mu\text{m/m}$ em escalas de até 20.000 $\mu\text{m/m}$ e $\pm 20 \mu\text{m/m}$ em escalas de até 200.000 $\mu\text{m/m}$.
- Nas pressões: $\pm 0,1$ bar.
- No Volume: $\pm 15 \text{ cm}^3$.
- No deslocamento: $\pm 0,2$ mm.