

5

Abordagem experimental

Neste capítulo são descritos as características dos espécimes tubulares testados e os procedimentos utilizados nos testes. Todos os testes foram instrumentados e realizados no Centro de Tecnologia em Dutos (CTDUT) pelo professor Ronaldo D. Vieira. Este capítulo foi escrito com base no relatório "Testes em espécimes tubulares de trechos não retos de dutos reparados por meio de materiais compostos" [22] e incluído na dissertação para que os resultados numéricos e analíticos possam ser comparados com os resultados experimentais.

5.1. Material

O relatório referenciado [22] relata a confecção de 28 espécimes tubulares a partir de tubos novos API 5L Gr. B sem costura, com diâmetros de 12,75 in e 10,75 in e com espessuras nominais de 0,375 in (9,5 mm).

5.2. Fechamentos dos tampos

Os espécimes foram fechados com tampos planos lisos de aço ASTM A-36, com espessuras de 63 mm.

5.3. Características gerais, denominações e quantidades

A Figura 5.1, apresenta os quatro tipos de dutos testados e respectivas dimensões nominais:

- Curvados a quente a 90 graus (CQ) com diâmetro de 12,75 in.
- Curvados a frio a 20 graus (CF) com diâmetro de 12,75 in.
- Redução concêntrica (Re) de 12,75 in a 10,75 in.
- Tipo Tê com diâmetro inferior de 12,75 in e superior de 10,75 in.

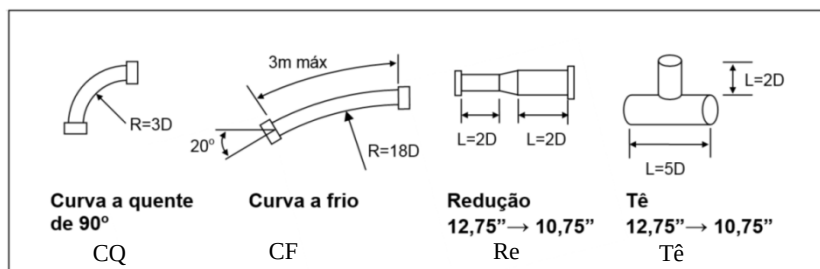


Figura 5.1 - Dimensão nominal dos dutos testados.

Foram testados sete espécimes para cada tipo de geometria de componente de duto, dos quais 3 foram reparados com mantas de resina epóxi reforçada por fibra de vidro (ERFV), 3 com mantas de resina epóxi reforçada por fibra de carbono (ERFC) e um último espécime foi testado sem reparo.

Um duto de cada tipo de reparo foi testado até a ruptura e dois foram testados até uma pressão que gerava uma tensão circunferencial igual à tensão de escoamento nominal especificada (SMYS) dos aços que os constituíam. Os dutos sem reparo foram testados até a ruptura. A Tabela 5.1 apresenta os espécimes testados e os testes analisados.

Espécimes		Tipo de reparo	TPH
Re	1	ERFC	Ruptura
	2, 6	ERFC	SMYS
	3	ERFV	Ruptura
	4, 5	ERFV	SMYS
	7	Sem reparo	Ruptura
CQ	1, 4	ERFC	SMYS
	2	ERFC	Ruptura
	3	ERFV	Ruptura
	5, 6	ERFV	SMYS
	7	Sem reparo	Ruptura
CF	1, 2	ERFC	SMYS
	3, 6	ERFV	SMYS
	4	ERFC	Ruptura
	5	Sem reparo	Ruptura
	7	ERFV	Ruptura
Tê	1, 3	ERFV	SMYS
	2	ERFC	Ruptura
	4	Sem reparo	Ruptura
	5, 6	ERFC	SMYS
	7	ERFV	Ruptura

Tabela 5.1 - Tipos de reparos e testes de pressão hidrostático (TPH) feitos para cada espécime.

5.4. Rebaixos

Foram realizados rebaixos para simular perdas de espessura por corrosão externa nos 28 espécimes testados. Os rebaixos foram fabricados por eletro-erosão. O fundo dos rebaixos foi desenhado para acompanhar a curvatura do defeito. As Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 apresentam as dimensões nominais para cada tipo de espécime.

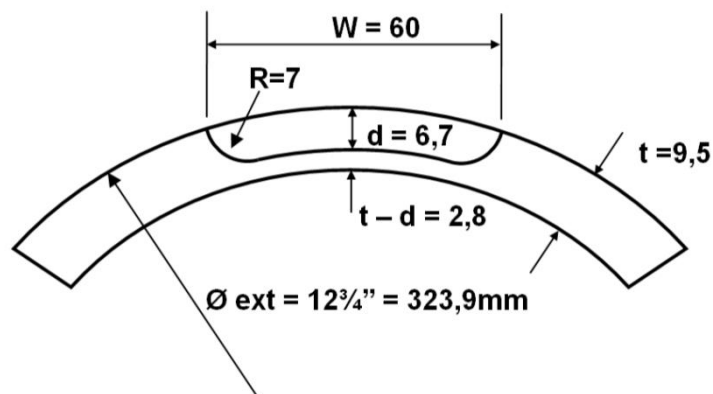


Figura 5.2 - Curvas a quente e a frio $\varnothing 12\frac{3}{4}''$, corte transversal do tubo na região do rebaixo.

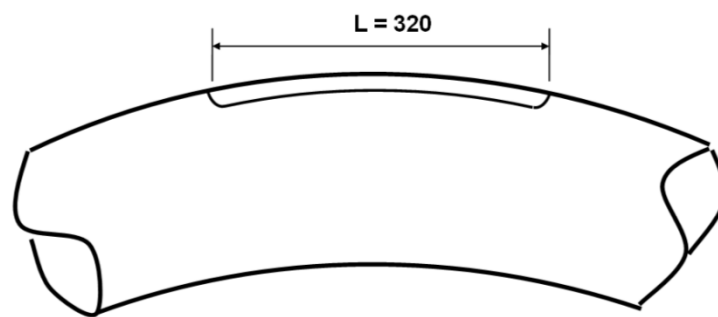


Figura 5.3 - Curvas a quente e a frio $\varnothing 12\frac{3}{4}''$, vista longitudinal, rebaixo localizado no extradorso equidistante das extremidades.

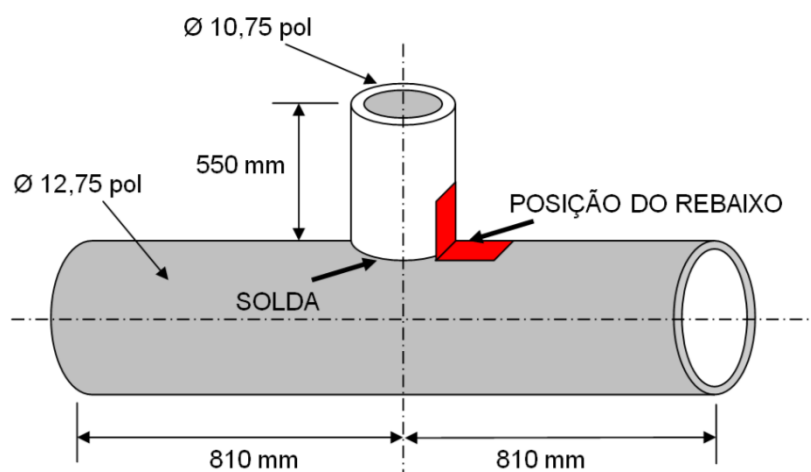


Figura 5.4 - Conexões Tê $\varnothing 12\frac{3}{4}''$ com ramal $\varnothing 10\frac{3}{4}''$.

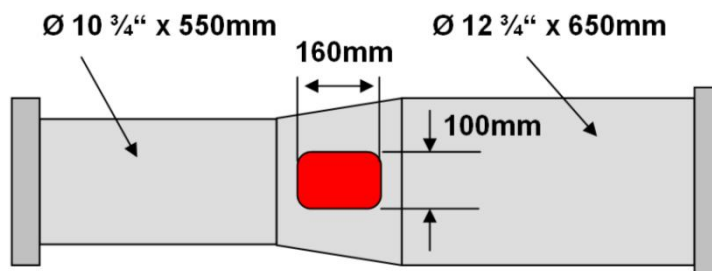


Figura 5.5 - Redução concêntrica Ø12 3/4\" para Ø10 3/4\".

A Figura 5.6 mostra como foram realizados os rebaixos por eletro-erosão para cada espécime. A Figura 5.7 apresenta o defeito final depois da eletro-erosão.



Figura 5.6 - Confecção dos rebaixos para cada tipo de espécime, CF, CQ, Re e Tê respectivamente.



Figura 5.7 - Espécimes depois de serem feitos os rebaixos por eletro-erosão.

5.5. Instrumentação nos testes de pressão hidrostáticos

A seguir apresentam-se os detalhes de instrumentação e equipamentos usados na realização dos testes de pressão hidrostáticos, suas incertezas e a localização dos extensômetros em cada espécime testado.

5.5.1. Medição de pressão

As medições de pressão foram feitas com o transdutor de pressão Gefran, modelo TK, capacidade para 500 bar, saída 0-10Vcc, calibrado contra a máquina de peso morto do Laboratório de Pressão e Temperatura do DEM-PUC-Rio.

5.5.2. Medição do volume de água injetado nos espécimes

A variação de volume foi registrada por meio da medição, na pressão atmosférica, do volume de água introduzida 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 de nível do tipo resistivo.

5.5.3. Pressurização dos espécimes tubulares

A pressurização foi executada com água por um sistema especialmente montado para estes testes. A pressão interna foi incrementada gradativamente por uma bomba com acionamento pneumático Haskel BSS-100, com capacidade para aplicar pressões de até 1000 bar. O conjunto conta com um regulador da pressão do ar de acionamento da bomba, o qual permite o controle manual da taxa de pressurização dos espécimes. A partir de 40 bar de pressão, os espécimes foram pressurizados sob taxa aproximada de 4 bar por minuto. Após a ocorrência de grandes deformações elásticas no tubo, a taxa de pressurização foi diminuída e passou a ser controlada por uma taxa de injeção de água no tubo de aproximadamente $3,3 \text{ cm}^3/\text{s}$.

5.5.4. Leitura e registro de sinais

Os sinais de pressão, variação de volume e de deformação por extensômetros elétricos foram condicionados e registrados pelo equipamento de

medição Lynx ADS2000, com placas condicionadoras AD2120 e microcomputador Vaio, VGN-FJ270.

5.5.5. Medição de deformações

A Figura 5.8 apresenta a instrumentação aplicada aos espécimes para a medição de deformações em todos os dutos curvados a frio e com reparos (ERFV, ERFC). Uma roseta dupla R1 foi posicionada no tubo a 40 cm do tampo, e uma roseta tripla R2 na superfície da camada externa do reparo na região que se situa sobre o centro do rebaixo.

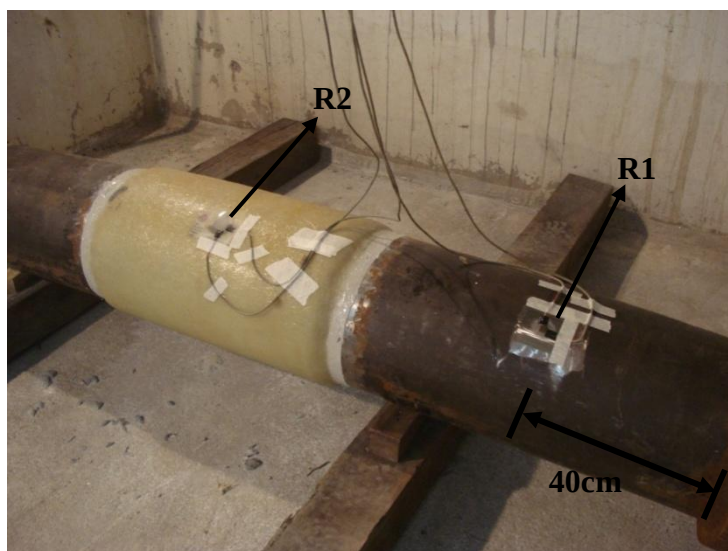


Figura 5.8 - Localização dos extensômetros nos dutos curvados a frio (ERFV).

A Figura 5.9 apresenta a instrumentação aplicada aos espécimes para a medição de deformações em todos os dutos curvados a quente e com reparos (ERFV, ERFC). Uma roseta dupla R1 foi posicionada no tubo a 28 cm do tampo, e uma roseta tripla R2 na superfície da camada externa do reparo na região que se situa sobre o centro do rebaixo.

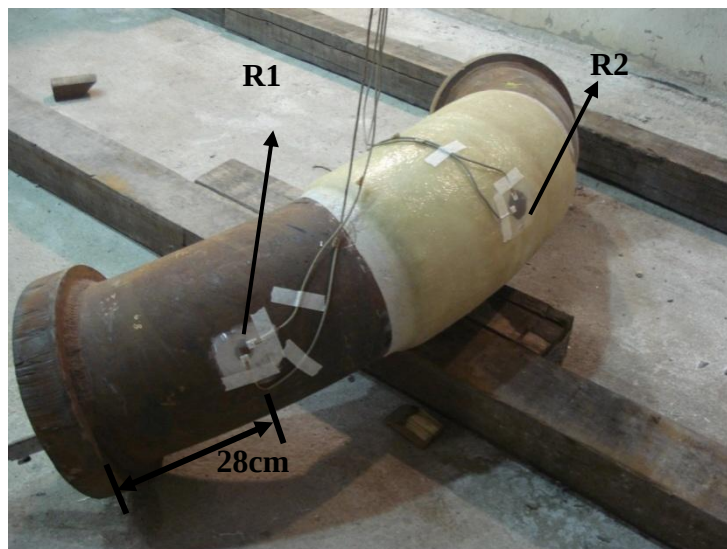


Figura 5.9 - Localização dos extensômetros nos dutos curvados a quente (ERFV).

A Figura 5.10 apresenta a instrumentação aplicada aos espécimes para a medição de deformações em todos os dutos com redução concêntrica e com reparos (ERFV, ERFC). Uma roseta dupla R1 foi posicionada no tubo a 28 cm do tampo, e uma roseta tripla R2 na superfície da camada externa do reparo na região que se situa sobre o centro do rebaixo.

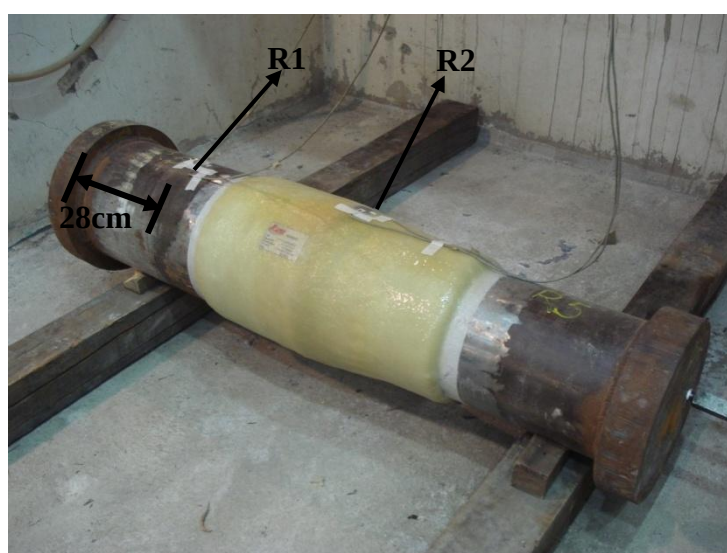


Figura 5.10 - Localização dos extensômetros nos dutos com redução concêntrica (ERFV).

A Figura 5.11 apresenta a instrumentação aplicada aos espécimes para a medição de deformações em todos os dutos tipo Tê e com reparos (ERFV, ERFC). Uma roseta dupla R1 foi posicionada no tubo de $\varnothing 12 \frac{3}{4}''$ a 28 cm do tampo, uma roseta tripla R2 na superfície de camada externa do reparo na região que se situa sobre o centro do rebaixo, a 59 cm do tampo no tubo de $\varnothing 12 \frac{3}{4}''$, e uma roseta tripla R3 na superfície da camada externa do reparo na região que se situa sobre o centro do rebaixo a 48 cm do tampo no tubo $\varnothing 10 \frac{3}{4}''$.

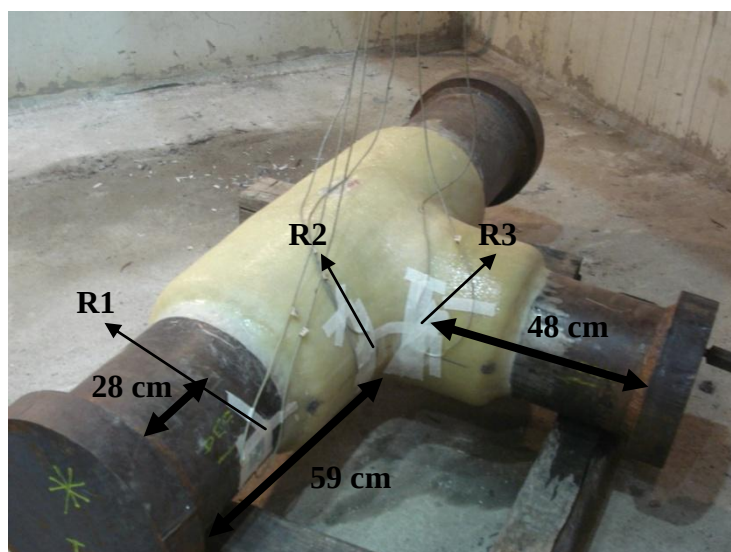


Figura 5.11 - Localização dos extensômetros nos dutos tipo Tê (ERFV).

A Figura 5.12 apresenta a instrumentação aplicada ao duto curvado a frio sem reparo. Uma roseta dupla R1 foi posicionada no tubo a 40 cm do tampo, uma roseta dupla R2 no centro da superfície externa do rebaixo e um extensômetro uniaxial circunferencial U1 a 90 graus de R1. A instalação do extensômetro U1 se deve à necessidade de investigar experimentalmente o efeito causado pela ovalização final do tubo sobre a distribuição de tensões na região nominal. Esta ovalização se deve em parte ao processo de curvamento do tubo.

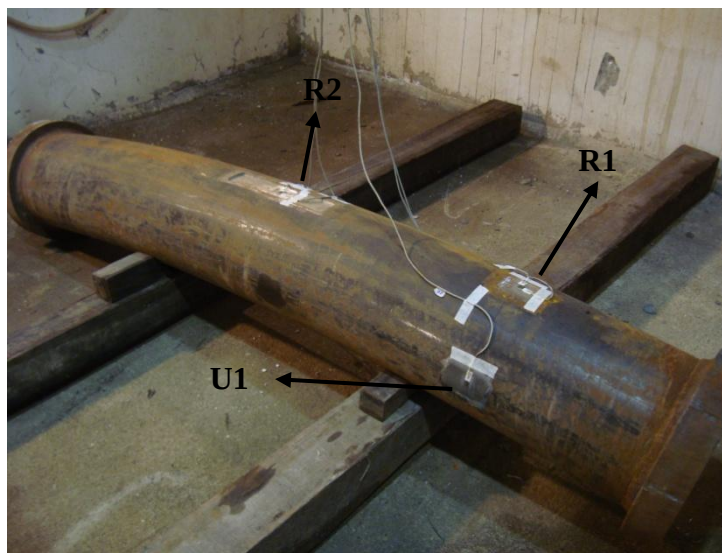


Figura 5.12 - Localização dos extensômetros no duto curvado a frio sem reparo.

A Figura 5.13 apresenta a instrumentação aplicada ao duto curvado a quente sem reparo. Uma roseta dupla R1 foi posicionada no tubo a 28 cm do tampo e uma roseta dupla R2 foi posicionada no centro da superfície externa do rebaixo.

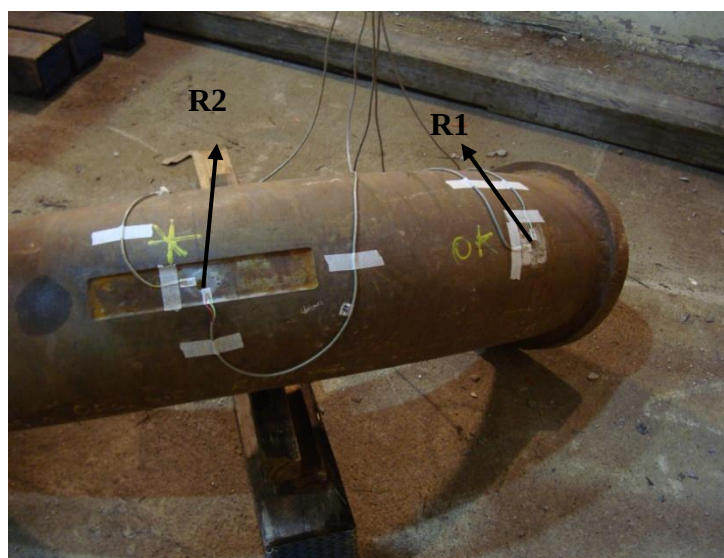


Figura 5.13 - Localização dos extensômetros no duto curvado a quente sem reparo.

A Figura 5.14 apresenta a instrumentação aplicada ao duto com redução concêntrica sem reparo. Uma roseta dupla R1 foi posicionada no tubo a 28 cm do

tampo e uma roseta dupla R2 foi posicionada no centro da superfície externa do rebaixo.

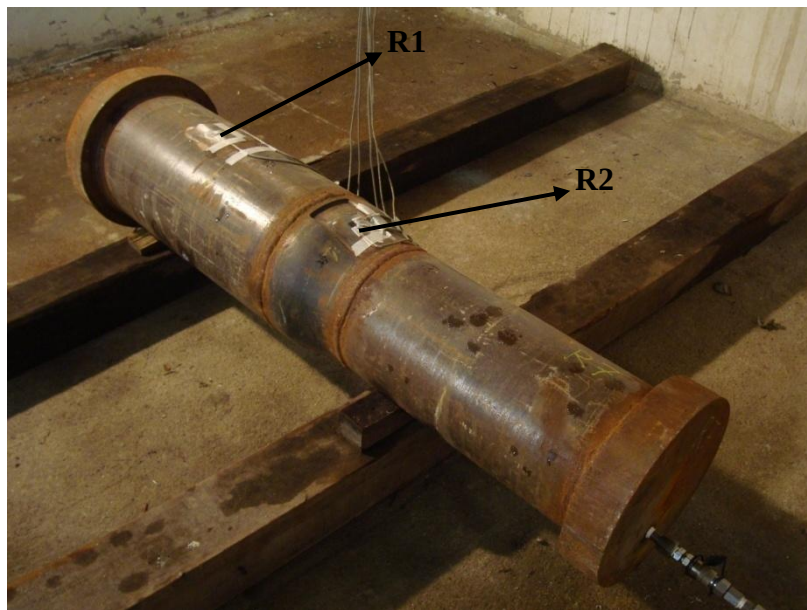


Figura 5.14 - Localização dos extensômetros no duto com redução concêntrica sem reparo.

A Figura 5.15 apresenta a instrumentação aplicada ao duto tipo Tê sem reparo. Uma roseta dupla R1 foi posicionada no tubo de $\text{Ø}12 \frac{3}{4}''$ a 28 cm do tampo, uma roseta tripla R2 foi posicionada no centro do rebaixo, a 59 cm do tampo no tubo de $\text{Ø}12 \frac{3}{4}''$, e uma roseta tripla R3 foi posicionada no centro do rebaixo, a 48 cm do tampo no tubo $\text{Ø}10 \frac{3}{4}''$.

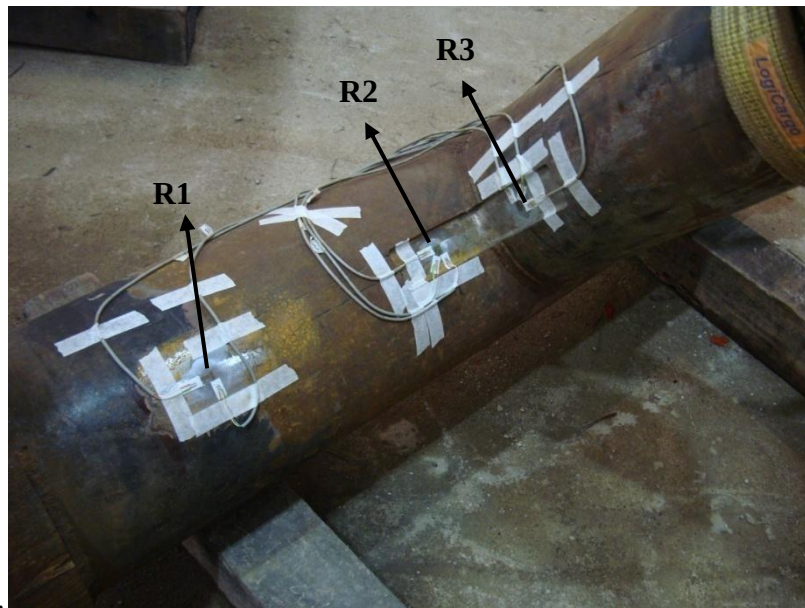


Figura 5.15 - Localização dos extensômetros no duto tipo Tê sem reparo.

Foram utilizados os seguintes extensômetros:

- Extensômetro uniaxial TML – YEFLA – 5 – 120 – 11, para grandes deformações, com gage factor $GF=2,14 \pm 1\%$ (usados nas rosetas R1 das reduções e Tês).
- Roseta dupla retangular TML - YEFLA - 5 - 120 - 11, para grandes deformações, com gage factor $GF=2,14 \pm 1\%$, usadas nas rosetas R1 dos espécimes curvados a frio e a quente).
- Roseta tripla retangular TML - YEFRA - 5 - 120 - 11, para grandes deformações, $GF=2,14 \pm 1\%$, usada nas rosetas R2 e R3).

Foram usados dois tipos de adesivos; epóxi AV138 sobre reparos e epóxi Araldite, sobre aço para grandes deformações. Foi instalado um extensômetro testemunha em uma barra de aço, e que deve medir uma deformação nula. Este testemunha foi monitorada durante todas as medições. Para o canal onde estava instalado o extensômetro no espécime testemunha foram capturadas variações de sinal menores do que $\pm 20 \mu\text{m/m}$ em todos os testes.

5.5.6. Incertezas das medidas e taxas de aquisição

Deformação:

$\pm 10 \mu\text{m/m}$ em escalas de até 20.000 $\mu\text{m/m}$;

$\pm 30 \mu\text{m/m}$ em escalas de até 200.000 $\mu\text{m/m}$.

Pressão: $\pm 0,2$ bar

Volume: $\pm 20 \text{ cm}^3$

Taxa de aquisição dos sinais : 4Hz em todos os testes.

5.6. Procedimento de teste

A seguir são apresentados os procedimentos utilizados na determinação da pressão de teste, a velocidade de pressurização e o tempo de permanência a que os espécimes foram mantidos sob pressão.

5.6.1. Determinação da pressão de teste hidrostático

Determinada a partir da equação:

$$P = \frac{2 * t * \sigma_c}{D} \quad (5.6.1.1)$$

onde a σ_c é o SMYS do tubo = 241 MPa (aço API 5L Gr.B), $D = 12 \frac{3}{4}'' = 323,85$ mm (tubo de maior diâmetro na redução e no Tê), $t = 9,5$ mm (espessura nominal das curvas a frio, reduções e Tês) e $t = 8,3$ mm (espessura média no extradorso das curvas a quente). Obtém-se um valor de $P = 142$ bar para os espécimes curvados a frio, reduções e Tês e de $P = 124$ bar para os espécimes curvados a quente.

5.6.2. Teste de pressão hidrostático

Todos os espécimes sofreram testes hidrostáticos. O procedimento de teste segue as etapas abaixo:

- Pressurização lenta (≈ 4 a 6 bar / min após ultrapassar a pressão de 40 bar) até alcançar uma pressão que provocasse a tensão circunferencial com o valor da resistência ao escoamento nominal do material do tubo.
- Permanência sob esta pressão por 20 minutos.
- Espécimes levados até a ruptura: espécimes pressurizados até a ruptura.
- Espécimes que não foram levados até a ruptura: estes espécimes foram lentamente despressurizados após o tempo de permanência e pressão de teste máxima.

Nos apêndices A e B encontram-se o resultado das medições de todos os espécimes testados, bem como o resultado de deformações e pressões de ruptura.