

5

Abordagem Experimental e seus Resultados

Neste capítulo descreve-se o procedimento para o teste de oito espécimes tubulares e se faz a análise dos resultados.

5.1

Introdução

Foram testados oito espécimes tubulares, cinco dos quais foram reparados utilizando multicamadas metálicas coladas. Nestes foram usinados defeitos para simular perda de espessura. Vale dizer que em todos os espécimes reparados o defeito tem a mesma geometria, mas muda-se o número de camadas e o material usado nos reparos.

Mediante os resultados obtidos experimentalmente pode-se avaliar o estudo feito nos capítulos 3 e 4, e ao mesmo tempo corroborar a eficácia do método de reparo proposto.

Com a instrumentação dos espécimes ensaiados e a determinação experimental de variáveis tais como deformações, pressões e variações volumétricas, pode-se comparar resultados e tentar otimizar o método de reparo. Para isto, foi indispensável a caracterização dos materiais utilizados. Esta caracterização é feita mediante ensaios de tração de corpos de prova retirados dos tubos e das chapas de reforço. Também foram analisados os tipos de falhas acontecidas nos espécimes reparados.

No Apêndice D propôs-se uma metodologia para o cálculo das tensões equivalentes na região do defeito, para um duto reparado, a partir das deformações circunferências medidas experimentalmente.

5.2

Preparação e Instrumentação dos Espécimes Tubulares

As etapas para a preparação dos espécimes tubulares reparados são descritas a seguir:

a. Fabricação dos Espécimes Tubulares:

Os tubos dos espécimes tubulares foram cortados em comprimentos iguais a 600mm de uma única vara com comprimento total de 6m e 3" de diâmetro. A caracterização do material da vara é mostrada no Apêndice B. A usinagem dos defeitos foi feita mediante a operação de fresagem com uma profundidade máxima nominal igual a 1.4mm, deixando nos defeitos espessuras de parede remanescentes iguais a 0.6mm. A fresagem foi feita a 180° da solda longitudinal de fechamento do tubo. Na figura são apresentadas as dimensões dos espécimes, bem como as dimensões dos tampos planos que foram soldados aos tubos.

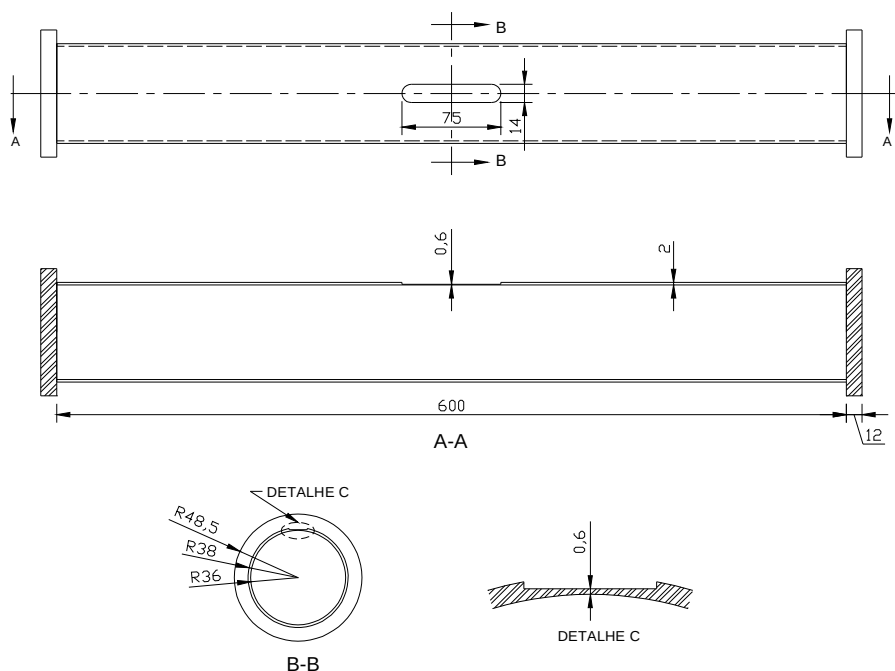


Figura 5.1 - Dimensões dos espécimes tubulares

Na tabela a seguir se indicam os espécimes que foram testados neste trabalho:

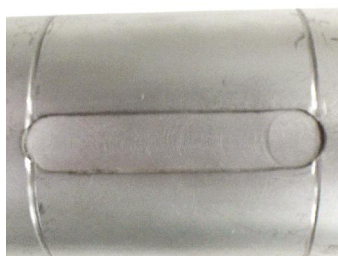
Tabela 5.1 Espécimes testados

Espécime	Descrição
DRC 001	Duto sem defeito nem reparo
DRC 002	Duto sem defeito nem reparo
DRC 003	Duto com defeito e uma camada de reparo
DRC 004	Duto com defeito e duas camadas de reparo
DRC 005	Duto com defeito e três camadas de reparo
DRC 006	Duto com defeito e quatro camadas de reparo
DRC 007	Duto com defeito e sem reparo
DRC 008	Duto com defeito e duas camadas de aço inox 304 de reparo

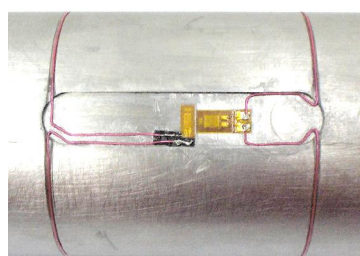
*O espécime DRC 008 foi projetado segundo os resultados da modelagem matemática.

b. Instrumentação dos Espécimes no Defeito

Para medir as deformações presentes nas regiões dos defeitos foram colados extensômetros elétricos de 120Ω e 350Ω (tipo KFC-2-C1-11 marca Kyowa de 2mm e tipo EA-06-125AC-350 marca MM), com adesivo Loctite 496. No cabeamento foram usados fios especiais com recobrimento de teflon com 0.5mm de diâmetro (como se mostra na figura 5.2.a), os quais passam por canais de 0.5mm de profundidade feitos nos tubos para evitar que os fios fossem cortados pelas camadas metálicas quando estas fossem aplicadas e quando o tubo e o sistema de reparo fossem testados. Na figura 5.2.b, se mostra a instrumentação do defeito com dois extensômetros elétricos posicionados nas direções circunferencial e longitudinal.



a)



b)

Figura 5.2 – Instrumentação no defeito

c. Distribuição e Preparação das Camadas Metálicas

Para determinar a melhor distribuição que podem ter as camadas metálicas, estas foram coladas com uma extremidade escalonada e outra com finalização abrupta.

Os comprimentos médios das camadas foram feitos iguais a $4L$, conforme mostrado na figura 5.3.

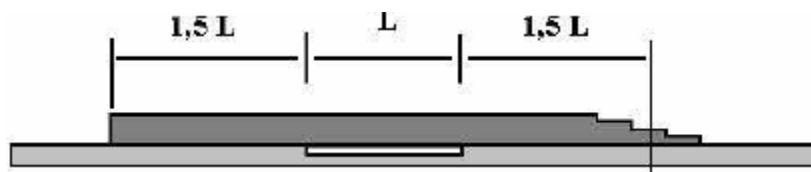


Figura 5.3 - Distribuição das camadas metálicas

A largura da chapa para camada, é igual a: $2.\pi$. (raio do tubo + espessura das camadas anteriores + espessura do adesivo – 5% da circunferência do duto), considerando uma espessura de 0.1mm para cada camada de adesivo. Com um comprimento de defeito de 75mm tem-se as seguintes dimensões dos reparos todos feitos de chapa de aço de baixo carbono (SAE 1008):

- Primeira camada: 320mm de comprimento, 238mm de largura.
- Segunda camada: 300mm de comprimento, 242mm de largura.
- Terceira camada: 280mm de comprimento, 246mm de largura.
- Quarta camada: 260mm de comprimento, 250mm de largura.

O corte da chapa para obtenção das lâminas de reparo é feito tendo em consideração seu sentido de laminação, para que este coincida com o sentido circunferencial do duto. As lâminas foram lixadas para garantir a eliminação de óxidos ou outras impurezas, e então calandradas, como se pode ver na figura 5.4.

d. Processo de Colagem

Utilizou-se o adesivo formado pela mistura de Araldite® AV 138 com o Endurecedor HV 998, com uma relação de 100/40 partes por peso como

recomenda o fabricante [21]. A quantidade de adesivo foi calculada segundo a recomendação feita no capítulo 1 seção 3 de usar 1280 gramas por metro quadrado. Por exemplo, a primeira camada tem uma área sobreposta de 0.0076 m² o que precisa de 98 gramas de adesivo, e segundo a relação de 100/40 pode-se escrever:

$$\text{peso de Araldite} = \frac{5}{7} \text{ peso total requerido}$$

$$\text{peso de Endurecedor} = \frac{2}{7} \text{ peso total requerido}$$

Então, para cada camada se tem:

- Primeira camada: 70g de Araldite AV 138 e 28g de Endurecedor HV 998
- Segunda camada: 60g de Araldite AV 138 e 24g de Endurecedor HV 998
- Terceira camada: 60g de Araldite AV 138 e 24g de Endurecedor HV 998
- Quarta camada: 50g de Araldite AV 138 e 20g de Endurecedor HV 998

O tempo de manuseio do adesivo é de 30 minutos a 24°C, tempo no qual foi depositado o adesivo em ambas superfícies das partes a serem coladas. Estas foram pressionadas entre si por meio de braçadeiras, como se pode observar na figura 5.4, por um tempo de 5 horas por camada. Este serve para a cura parcial do adesivo e só então se podem retirar as braçadeiras, e procede-se a colagem da camada seguinte. O tempo de cura para que o adesivo alcance sua maior resistência é de 24 horas a 24°C, sendo que este tempo decresce na medida na medida que aumenta a temperatura [21].

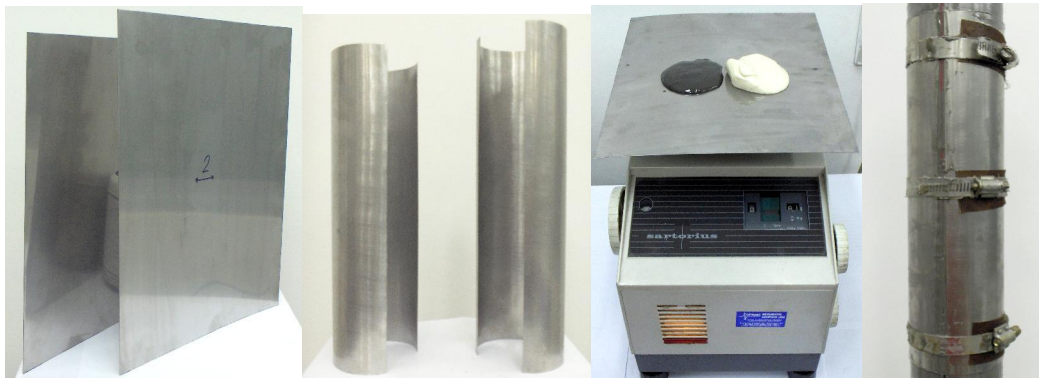


Figura 5.4 - Etapas na colagem.

e. Instrumentação Final dos Espécimes

Os espécimes foram instrumentados novamente com extensômetros elétricos tipo EA-06-125AC-350 marca MM de 350Ω , nas regiões longe dos reparos e sobre os reparos. A posição final dos extensômetros elétricos é mostrada na figura 5.5 e descrita na tabela 5.2, para cada espécime ensaiado:

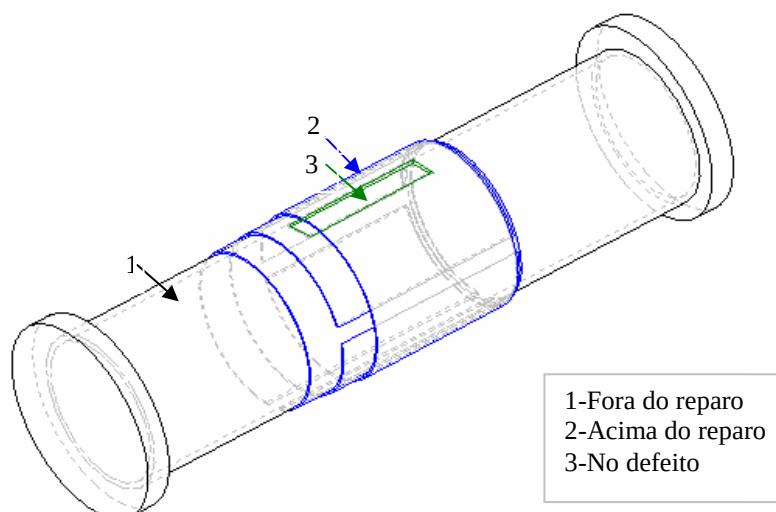


Figura 5.5 Posição dos extensômetros elétricos.

Tabela 5.2 Posição e orientação dos extensômetros elétricos

Espécime	Posição e orientação dos extensômetros elétricos		
	Fora do reparo	Acima do reparo	No defeito
DCR 001	circunferencial e longitudinal (no centro do duto)	(sem reparo)	(sem defeito)
DCR 002	circunferencial e longitudinal (no centro do duto)	(sem reparo)	(sem defeito)
DCR 003	circunferencial	circunferencial e longitudinal	circunferencial
DCR 004	circunferencial	circunferencial e longitudinal	circunferencial
DCR 005	circunferencial	circunferencial e longitudinal	circunferencial
DCR 006	circunferencial	circunferencial	circunferencial
DCR 007	circunferencial	(sem reparo)	circunferencial e longitudinal
DCR 008	-----	circunferencial e longitudinal	circunferencial e longitudinal

5.3

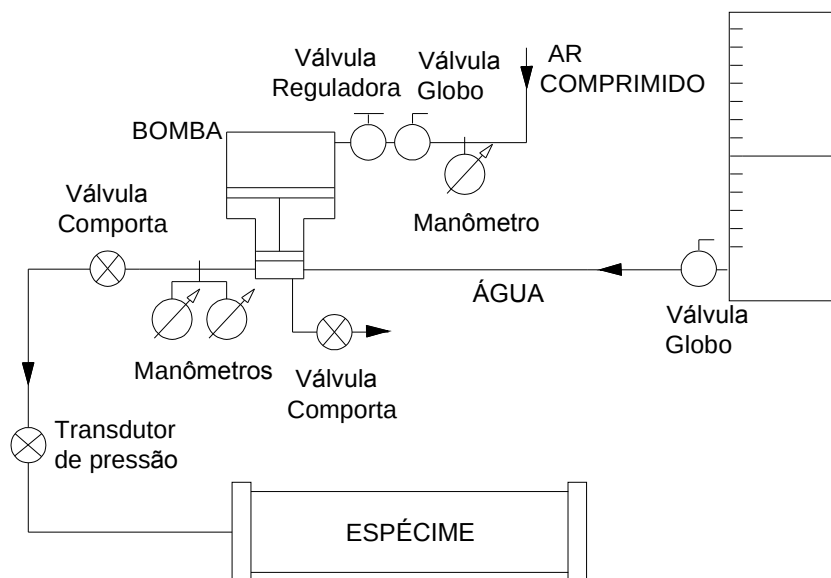
Dispositivo Experimental

Os testes experimentais foram feitos no laboratório de Fotomecânica e Comportamento Mecânico dos Materiais da PUC-Rio, que possui uma instalação para testar dutos sob pressão interna.

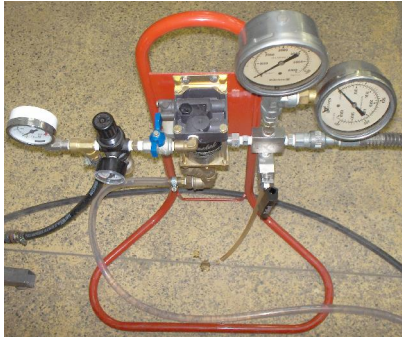
5.3.1

Sistema de Pressão

A pressão é proporcionada por uma bomba de embolo Haskel NS-110 acionada por ar comprimido. A vazão do líquido da bomba é controlada por uma válvula manual que regula a entrada de ar. As pressões da entrada de ar e saída de água são medidas por manômetros tipo Bourdon. Esta última é também medida por um transdutor de pressão. A figura 5.6 mostra o sistema de pressão.



a) Esquema do sistema de pressão.



b) Bomba de embolo.



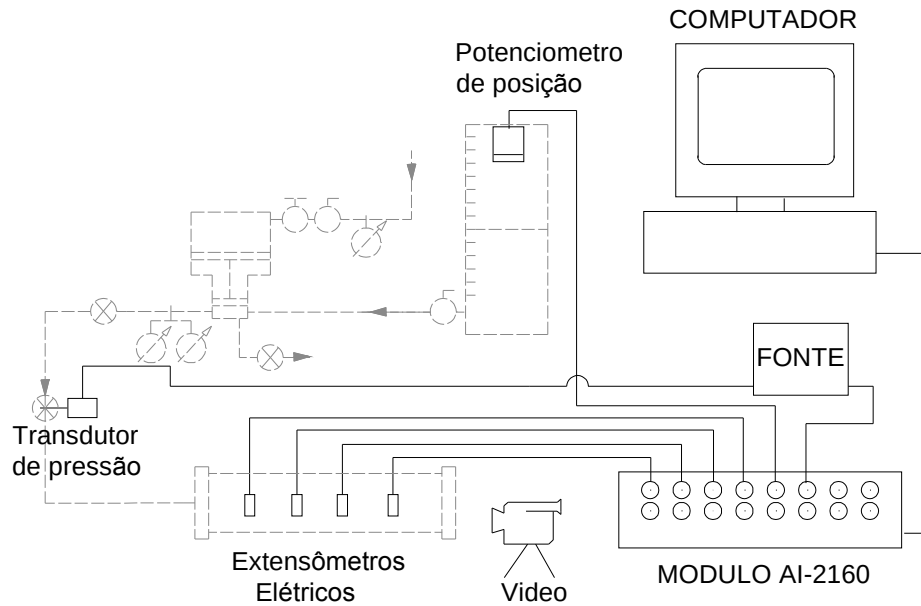
c) Espécime pressurizado.

Figura 5.6 - Sistema de pressão.

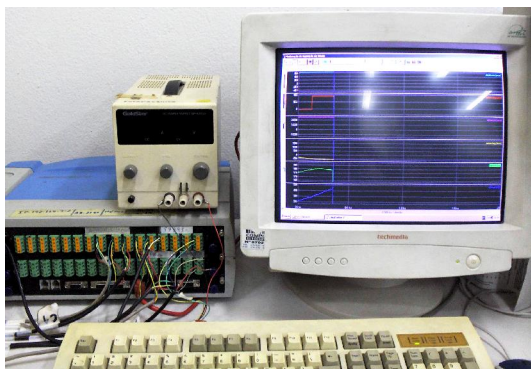
5.3.2

Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados permite ler pressões, variações de volume e deformações em função do tempo. O sistema é formado por um módulo condicionador de 16 entradas analógicas, marca Lynx Tecnologia Eletrônica AI-2160. Os sinais digitais são salvos em um computador com plataforma Windows XP. O módulo permite a conexão de sinais provenientes de sensores de ponte para as leituras dos extensômetros elétricos e do transdutor de pressão e sinais de sensores de posição para a leitura do volume. O transdutor trabalha com uma fonte de tensão própria, marca Goldstar DC Power Supply GP-430 3D. Adiciona-se uma câmara de vídeo para reconhecer o tipo de falha que se apresenta no espécime, como se mostra na figura 5.7.



a) Esquema do sistema de aquisição de dados.



b) Modulo condicionador.



c) Câmera de vídeo.

Figura 5.7 - Sistema de aquisição de dados.

A montagem dos extensômetros é de $\frac{1}{4}$ de ponte com três fios e usa-se uma tensão de excitação de 5 volts. A frequência de aquisição de dados foi fixada em 1Hz para cada sinal aquisitado. A taxa de pressurização inicial foi em torno de 10 bar/minuto, de forma que o tempo de duração dos ensaios ficou em torno de 20 minutos por espécime. Assim, podem-se ter curvas de sinais de mais de mil pontos.

5.4

Análise dos Resultados Experimentais

Os espécimes testados são mostrados na figura 5.8.



Figura 5.8 - Espécimes testados.

A seguir, são mostrados e discutidos os resultados obtidos para cada um dos espécimes testados e se faz a interpretação de seu comportamento. Deve-se notar que as deformações captadas pelos extensômetros elétricos não alcançam valores muito grandes de deformação (20000 a 40000 $\mu\text{m/m}$), já que os extensômetros usados não são próprios para grandes deformações.

- DRC 001 e 002 - Dutos sem defeito

Na figura 5.9 se mostram as deformações apresentadas nos dois espécimes testados sem defeito.

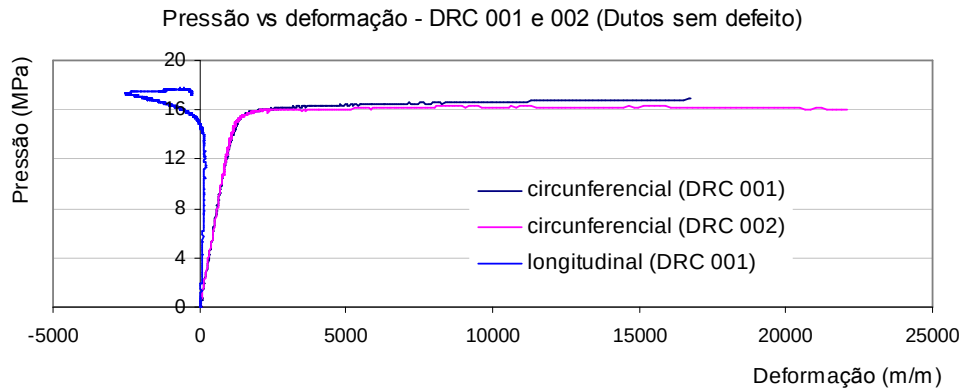


Figura 5.9 - Deformações nos dutos sem defeito.

As pressões de ruptura foram de 17,7 e 16,2 MPa nos espécimes DRC 001 e 002 respectivamente. A pressão de plastificação foi de 16 MPa, nos dois espécimes. Podem-se ver as inflexões na curva das deformações longitudinais devido ao seu comportamento elasto-plástico.

- DRC 007-Duto com defeito e sem reparo

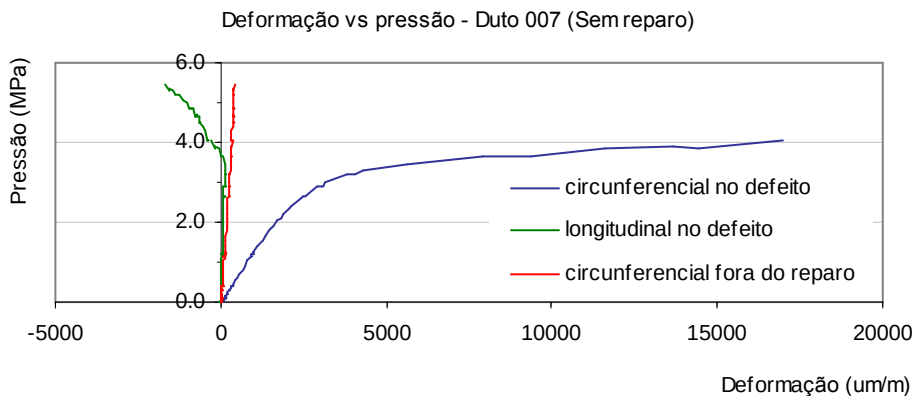


Figura 5.10 - Deformações no duto com defeito não reparado

O espécime rompeu com 5.45 MPa de pressão interna. O defeito plastifica na pressão igual a 3,3 MPa, sendo esta definida quando ocorre uma deformação circunferencial total igual a 0,5% ou 5000 $\mu\text{m/m}$. As partes sem defeito impedem que a deformação longitudinal na região do defeito assuma valores grandes. Quando as deformações circunferenciais tornam-se grandes, as deformações longitudinais tomam valores negativos.

- DRC 003-Duto com uma camada no reparo

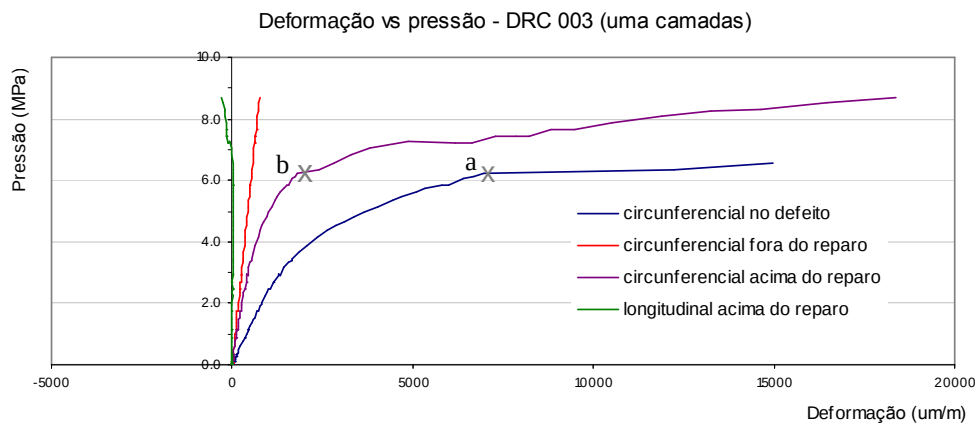


Figura 5.11 - Deformações no duto de uma camada no reparo

O espécime rompe na região do defeito com 8,7MPa de pressão interna. O defeito plastifica a 5,6MPa e a parede externa do reparo plastifica com 7,2 MPa. A parte sem defeito só se deforma 763 μ m/m quando o duto rompe. As deformações longitudinais acima do reparo permanecem próximas a zero. A partir do ponto “a” um pequeno incremento de pressão provoca um grande incremento de deformação plástica na parede do duto. O ponto “b” representa uma inflexão na curva do comportamento do reparo, e os pontos “a” e “b” estão em um mesmo nível de pressão.

Na figura 5.12 se pode ver o instante em que acontece o vazamento na forma de jato de água, o qual é muito fino, dificultando sua visualização.



Figura 5.12 - Vazamento no espécime de uma camada no reparo.

O vazamento acontece porque a parede do duto rompe na região do defeito. O líquido pressurizado sai pela fissura do duto (como se pode ver na figura 5.13)

provocando a falha na interface do adesivo e a chapa metálica (podendo ser também na interface duto-adesivo) até o extremo do reparo por onde se pode ver o vazamento. A falha na interface metal-adesivo é devido à tensão normal que a água pressurizada provoca em todas as direções originando uma tensão trativa na interface, tensão para a qual o adesivo não foi projetado. Então, este tipo de reparo não é bom para dutos que apresentem vazamentos.



Figura 5.13 - Ruptura do espécime de uma camada.

- DCR 004 - Duto com duas camadas de reparo

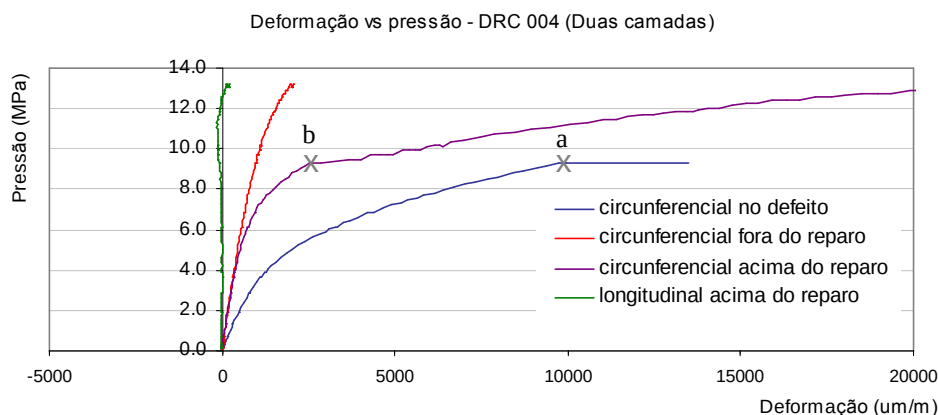


Figura 5.14 - Deformações nos espécimes de duas camadas no reparo.

O espécime rompe na região do defeito com 13,2 MPa de pressão interna. O defeito plastifica a 7,3 MPa e a parede externa do reparo plastifica com 9,8 MPa, com uma deformação da parte sem defeito igual a 2042 $\mu\text{m/m}$ quando o duto rompe. As deformações longitudinais na região do reparo permanecem próximas a zero. Os comportamentos das tensões circunferenciais indicados para o espécime anterior a través dos pontos “a” e “b” também são identificados neste espécime.

Na figura 5.15 se pode ver o instante no que acontece o vazamento na forma de jato de água, pelos dois extremos do reparo. O mecanismo de falha é o mesmo apresentado no espécime anterior.



Figura 5.15 - Vazamento no espécime de duas camadas no reparo.

- DCR 005 – Duto com três camadas de reparo

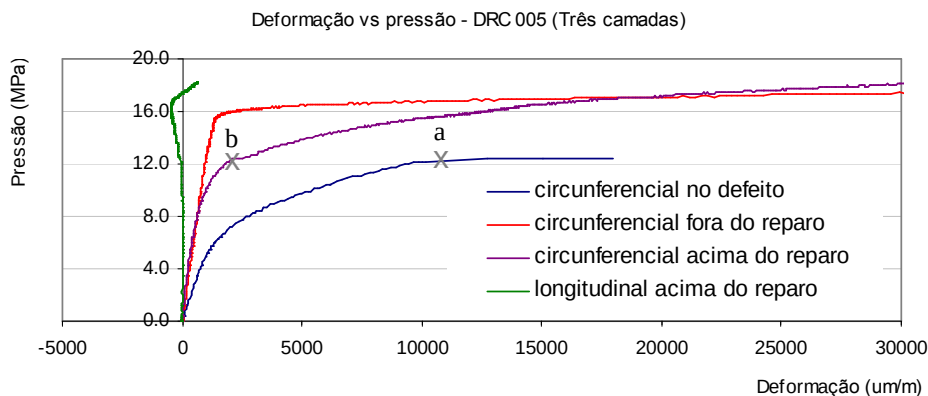


Figura 5.16 - Deformações nos espécimes de três camadas no reparo.

O espécime rompe na região do defeito com 18.3 MPa de pressão. O defeito, o reparo e a parte sem defeito plastificam com 9.9, 13.9 e 16.5 MPa de pressão, respectivamente. Os comportamentos das tensões circunferenciais indicados para os espécimes anteriores através dos pontos “a” e “b” também são identificados neste espécime.

Na figura 5.17 se pode ver o instante no que acontece o vazamento na forma de jato de água, pelos dois extremos do reparo. O mecanismo de falha é mesmo apresentado no espécime anterior.



Figura 5.17 - Vazamento no espécime de três camadas no reparo.

- DCR 006 – Duto com quatro camadas de reparo

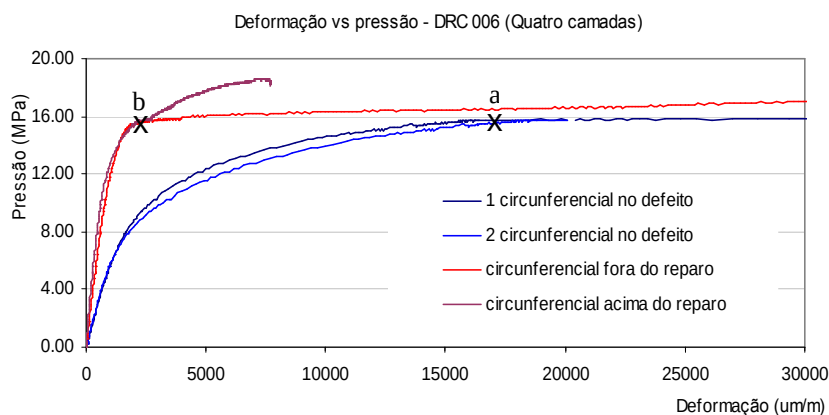


Figura 5.18 - Deformações nos espécimes de quatro camadas no reparo.

O espécime rompe na região fora do reparo com 18.6 MPa de pressão interna. As pressões de plastificação do defeito, reparo e região sem defeito são de 12.4, 17.8, 16.5 MPa respectivamente.

Os pontos “a” e “b” mostram que, quando a região do duto com defeito plastifica, o maior aporte de carga vai para o reparo, apresentando então, uma mudança na tendência na curva de tensão circunferencial indicada pelo ponto “b”. O material do duto no defeito continua escoando e encruando a pressões menores que a região sem defeito, mas não rompe. A ruptura acontece fora do reparo, devido a que a estricção do material é impedida pela rigidez do reparo.



Figura 5.19 - Ruptura no espécime de quatro camadas no reparo.

Na figura 5.20 se faz uma comparação das deformações circunferenciais presentes no defeito para os espécimes reparados.

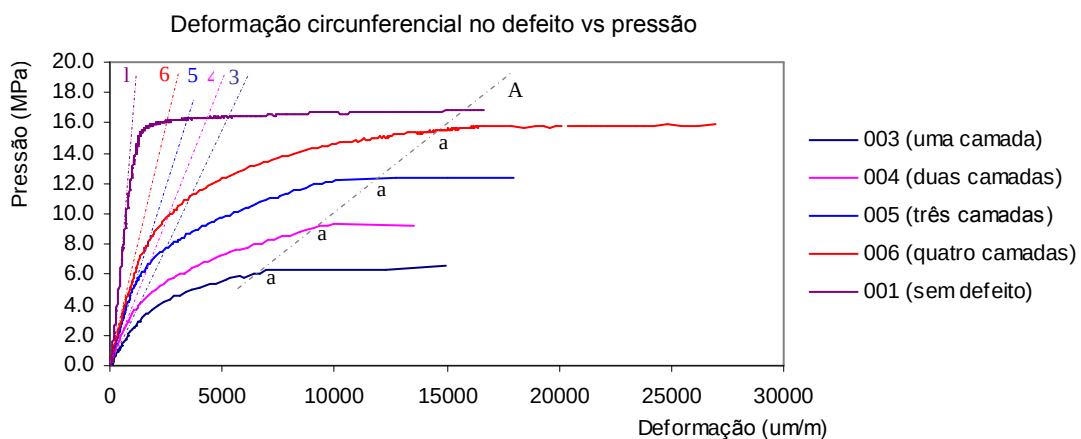


Figura 5.20 - Análise das deformações circunferências na região do defeito.

Pode-se ver que quando se aumenta o número de camadas as inclinações das linhas 3, 4, 5 e 6 vão aumentando e se aproximam da inclinação da reta 1 pertencente a um duto sem defeito. Os pontos “a” (definidos anteriormente como aqueles onde a parede do duto perde quase toda sua resistência) se deslocam para maiores deformações na medida que se aumenta o número de camadas metálicas. Este comportamento é desfavorável em comparação a um duto novo, pois um duto reparado só vai ter os mesmos valores de deformações de um duto novo sob pressões próximas à ruptura. Por exemplo, para se devolver a total integridade a um duto danificado, na região elástica e na região plástica comparado com um duto novo, este tem que ter a quantidade de camadas necessárias para que a sua inclinação na parte elástica seja igual ou maior que a inclinação da reta 1 (duto novo). Então tem-se o reparo de N camadas que devolve a total integridade a um duto danificado, como se mostra na figura 5.21.

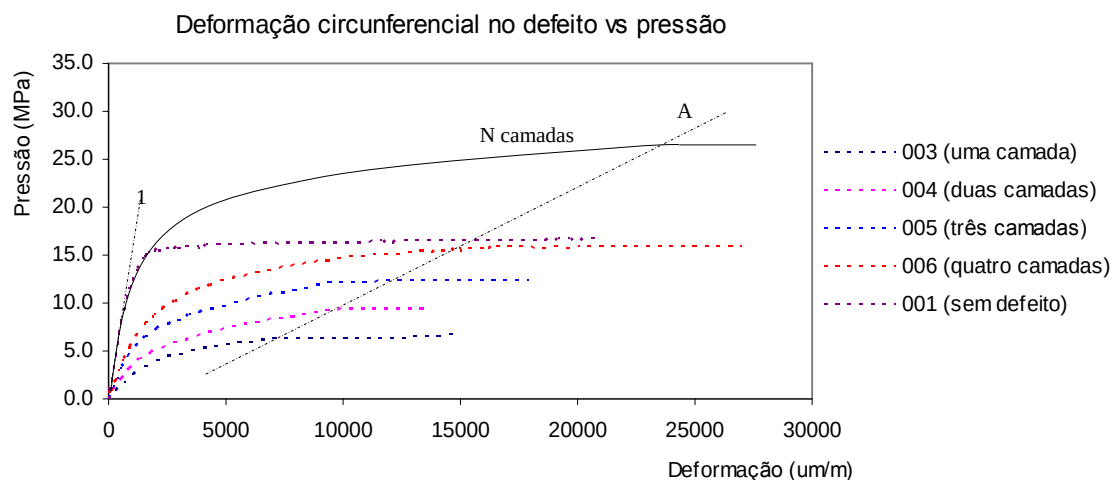


Figura 5.21 - Deformação circunferencial na região do defeito para um espécime de N camadas no reparo.

Este reparo de N camadas trabalharia super dimensionado para a ruptura, e com a quantidade de reparo, talvez, desnecessária para um trabalho comum no campo. Então se pode procurar o reparo de melhor performance variando o número de camadas metálicas.

Na figura 5.22 se mostra a comparação do comportamento das deformações circunferenciais que ocorrem nas superfícies externas dos reparos

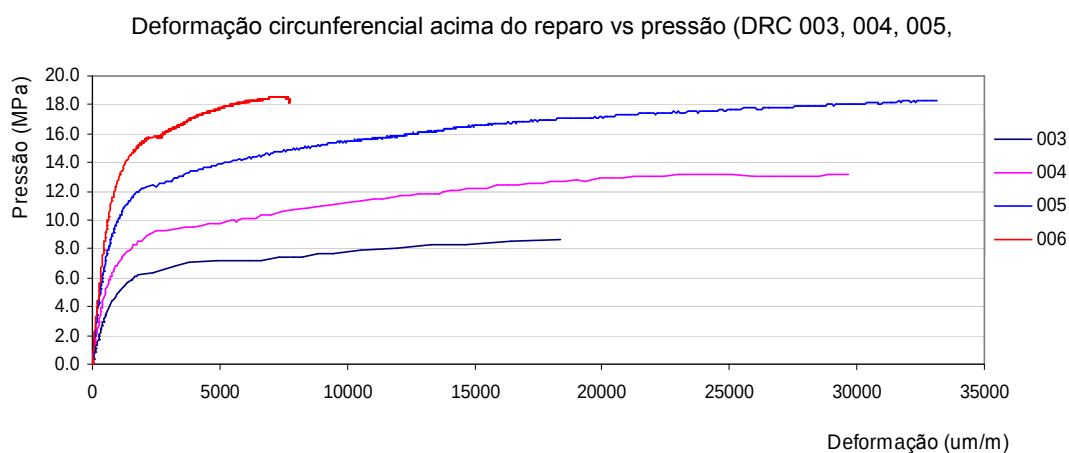


Figura 5.22 - Comparação das deformações circunferenciais na parede externa dos reparos.

As tendências das deformações no defeito e sobre o reparo são as mesmas, sendo sempre proporcionais. As relações entre as pressões que originam a

plastificação no defeito e a plastificação na parte externa do reparo, tem valor próximo a 0.7 para os quatro espécimes reparados.

Na figura 5.23 se mostra o gráfico volume de água injetada vs pressão para os dutos DRC 003 a DCR 007.

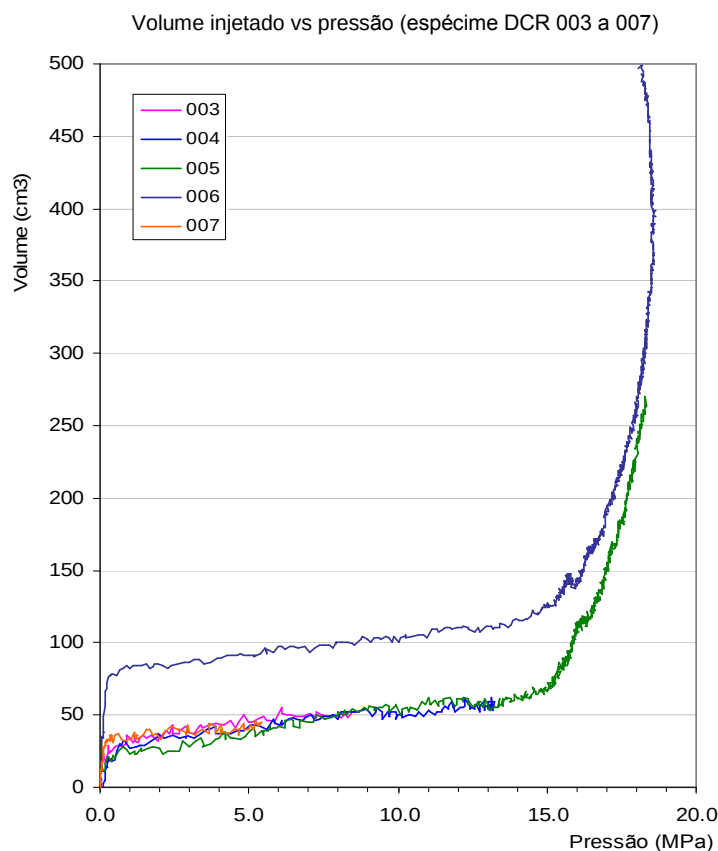


Figura 5.23 - Gráfico volume injetado de água no espécime vs pressão.

No início as curvas experimentam um rápido aumento no volume para um pequeno incremento de pressão. Isto acontece pela quase inevitável pequena quantidade de ar no sistema de pressão. O gráfico volume injetado vs pressão corrigida que é mostrado a seguir, onde é tirado o volume de ar no sistema de pressão. Pode-se ver que no duto 006 (quatro camadas no reparo) tinha maior volume de ar.

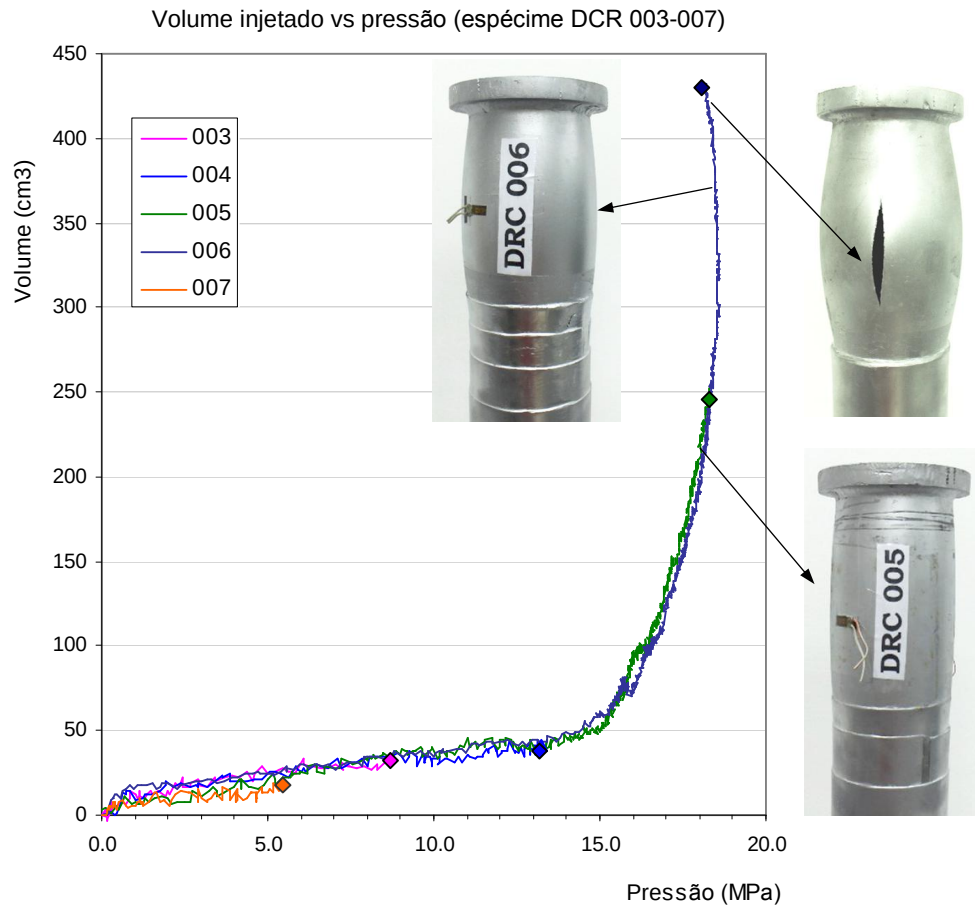


Figura 5.24 - Gráfico corrigido volume injetado de água no espécime vs pressão.

Antes de acontecer a ruptura do espécime, este experimenta a estricção do material, uma diminuição da espessura de sua parede e aumento do seu diâmetro. Nos espécimes DRC 006 e DRC 005 este comportamento se apresenta em toda a região fora do reparo como um embarrigamento do tubo, o que se pode ver na figura 5.24, incrementando assim a quantidade de volume de água injetada. Nos espécimes DRC 003 e DRC 004, a deformação acentuada ocorre unicamente na região do defeito em forma de um abaulamento localizado (figura 5.25.a), que não representa um grande incremento no volume injetado. No espécime DRC 005 se apresenta o embarrigamento na região fora do reparo e do defeito. Na figura 5.25 pode-se ver que o abaulamento é limitado pelo reparo, a diferencia do tudo com defeito e sem reparo, onde o abaulamento acontece em quase toda a largura do defeito.

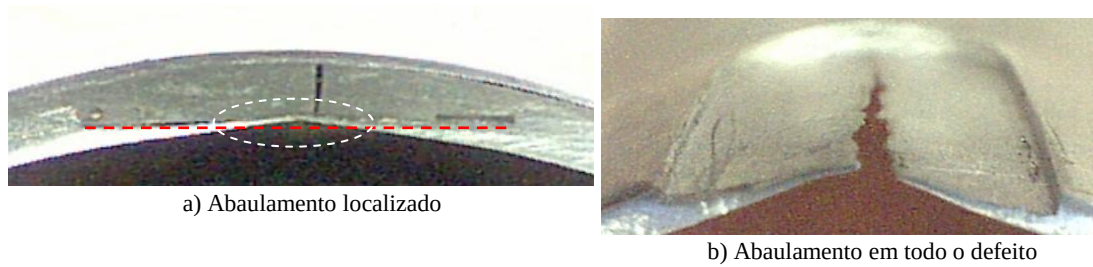


Figura 5.25 – Abaulamento nos defeitos.

A seguir, apresentam-se os resultados para o duto reparado com duas camadas de aço inox (espessura da chapa igual a 0.46mm). Na figura se observa que o comportamento é similar aos obtidos nos espécimes anteriores. Neste espécime incluiu-se um extensômetro elétrico em sentido longitudinal no defeito, mediante o qual se obtém valores de deformação pequenos em comparação com a deformação circunferencial, os quais, para casos práticos se consideram desprezíveis. As deformações são mostradas na figura 5.26.

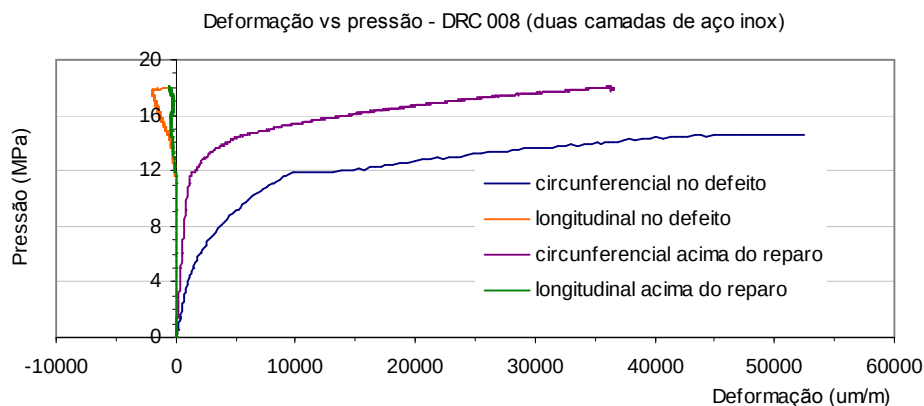


Figura 5.26 - Deformações no espécime duas camadas de aço inox no reparo.

O espécime rompe na região fora do reparo com 18 MPa de pressão interna. As pressões de plastificação do defeito e acima do reparo são de 9.1 e 14.4 MPa respectivamente.

Na figura se comparam os resultados das deformações circunferenciais dos espécimes DRC 006 e DRC 008, os quais não falham no defeito.

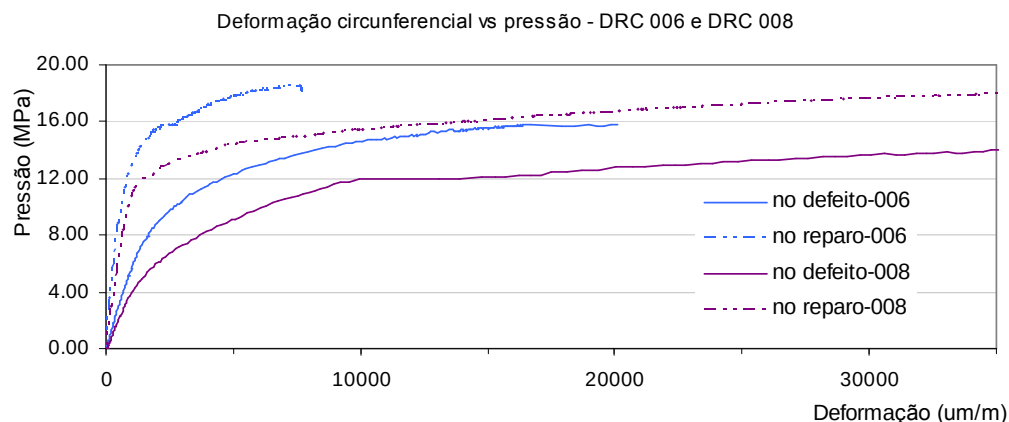


Figura 5.27 - Comparação das deformações circunferências para os espécimes de quatro camadas de aço de baixo carbono e duas camadas de aço inox no reparo.

Através da figura 5.27 pode-se estudar o efeito que tem a utilização de diferentes tipos de aços para os reparos. O espécime DRC 006 tem camadas de aço de baixo carbono com $S_y=167.7\text{MPa}$ e $S_u=295.1$, enquanto que, o espécime DRC 008 tem camadas de aço inox com $S_y=318,12$ e $S_u=814.2\text{MPa}$. Pode-se ver que o espécime DRC 008 entra no regime plástico a pressões menores ($9.1\text{MPa} < 12.4\text{MPa}$). Isto pode ser explicado através de uma das hipóteses feitas para o modelo analítico no capítulo 4, onde se tem um módulo de elasticidade ponderado para o adesivo (no defeito) e para as camadas metálicas. Esta ponderação depende da espessura de cada um e de seu módulo de elasticidade. Como os dois tipos de chapas utilizadas têm módulos de elasticidade semelhantes ($200\pm 7\text{GPa}$), o reparo que tenha maior espessura, vai ter um módulo de elasticidade ponderado maior, ou rigidez maior.

Recomenda-se trabalhar com o reparo de maior rigidez, e com resistência similar ou menor ao material do duto; fato que será corroborado no capítulo 6.

Na figura 5.28 se apresenta a comparação dos espécimes no gráfico volume de água injetada vs pressão, onde se têm comportamentos similares para ambos espécimes.

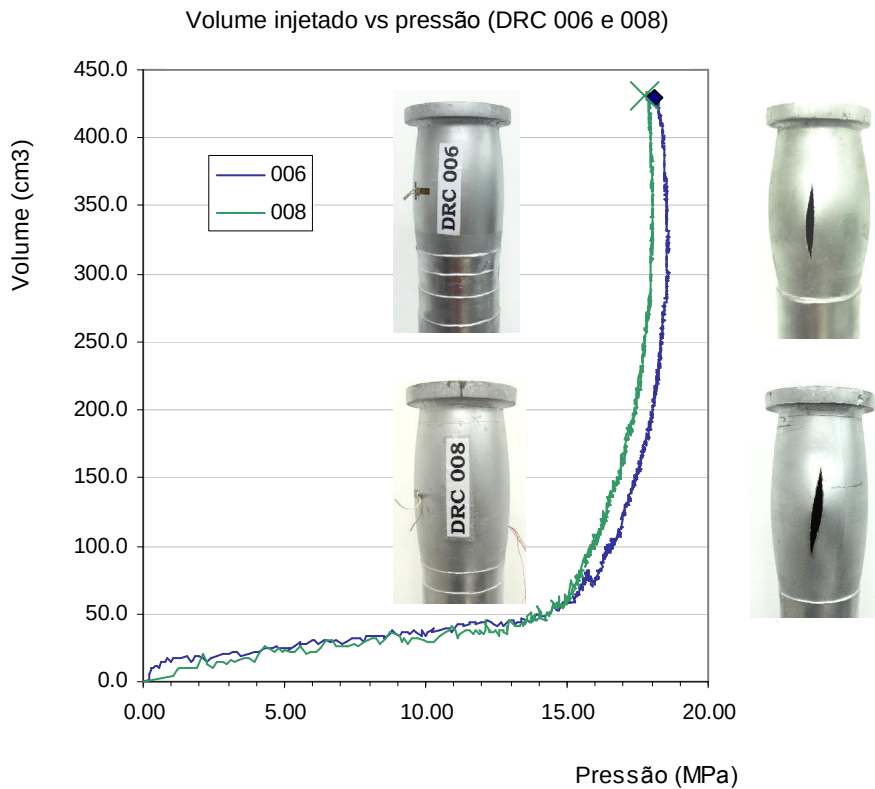


Figura 5.28 - Gráfico corrigido volume injetado de água no espécime vs pressão.

Cabe mencionar que não se apresentam falhas por desprendimento das camadas metálicas. No último espécime testado se apresentam as condições mais desfavoráveis para o adesivo, já que só existem duas camadas no reparo (na seção 3.4.8 mostra-se que as camadas interiores de adesivo apresentam maiores tensões cisalhantes nos seus extremos), sem acontecer desprendimento.

A falha por desprendimento das camadas metálicas causadas por uma possível falha no adesivo é pouco provável em adesivos estruturais, devido à grande área sobreposta. Antes do desprendimento acontecer, o defeito rompe, atingindo seu limite de deformação plástica, ou o duto rompe fora do reparo.

No Apêndice D propôs-se uma metodologia para o cálculo das tensões equivalentes na região do defeito, para um duto reparado, a partir das

deformações circunferenciais medidas experimentalmente. Na figura 2.9 se apresenta o resultado do uso desta metodologia aplicada ao espécime tubular de quatro camadas.

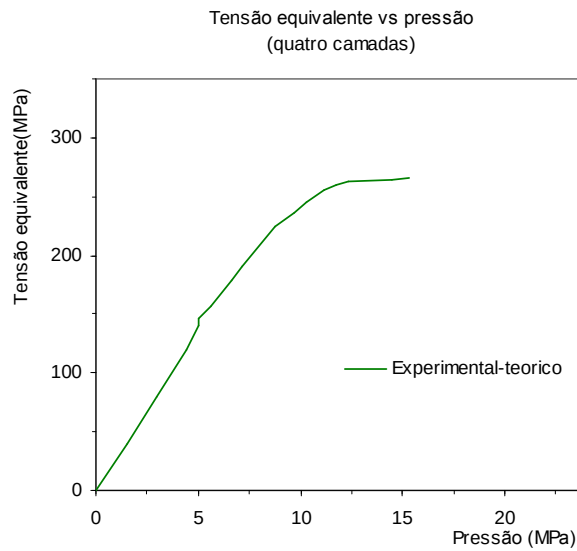


Figura 5.29 – Tensões equivalente no espécime DRC 006.