

4

AVALIAÇÃO DA PRESSÃO DE RUPTURA DE MOSSAS SIMPLES

No capítulo 3 foi apresentada a análise experimental e numérica da criação de mossas simples transversais com 15% de profundidade máxima. A análise numérica permitiu acompanhar o processo de indentação e obter uma curva “força-deslocamento” similar às curvas experimentais. Entretanto, algumas diferenças foram encontradas no descarregamento do indentador, a profundidade da mossa numérica é sensivelmente maior da que as mossas criadas experimentalmente.

O capítulo 4 inicia onde o Capítulo 3 acabou, isto é, após a remoção do indentador, quando a mossa é caracterizada por uma profundidade remanescente. Os resultados da análise numérica do capítulo 3 são explorados complementarmente para se conhecer o histórico de tensões e deformações durante a indentação.

O objetivo deste capítulo é identificar a influência da mossa estudada na pressão de ruptura do espécime. Para este fim, foram desenvolvidos testes de ruptura e análise numérica por elementos finitos. A seguir são apresentados os resultados.

4.1.

Análise Experimental

Os espécimes tubulares dos grupos de teste TA, TB e TC, contendo mossas recuperadas elasticamente, foram testados hidrostáticamente até a ruptura. Os resultados dos testes foram apresentados em projetos de graduação da PUC-Rio

[41], [42]. Os testes TA1 e TA2, e os de um duto sem defeito, são apresentados e analisados neste capítulo, os outros, são detalhados no Apêndice E. O espécime TA1 foi instrumentado com extensômetros para o registro das deformações circunferenciais e longitudinais durante a pressurização.

4.1.1.

Descrição dos Testes

O corpo de prova TA1 contendo uma moosa transversal com profundidade remanescente de 8,68mm foi testado até ruptura no laboratório de Fotomecânica e Comportamento Mecânico de Materiais da PUC-Rio, cuja infra-estrutura permite ensaiar dutos sob pressão interna. Durante os testes hidrostáticos foram colados extensômetros elétricos de 120Ω (KFC-2-C1-11-KYOWA), nas posições indicadas na Figura 4.1, para o registro da variação na deformação circunferencial e longitudinal.

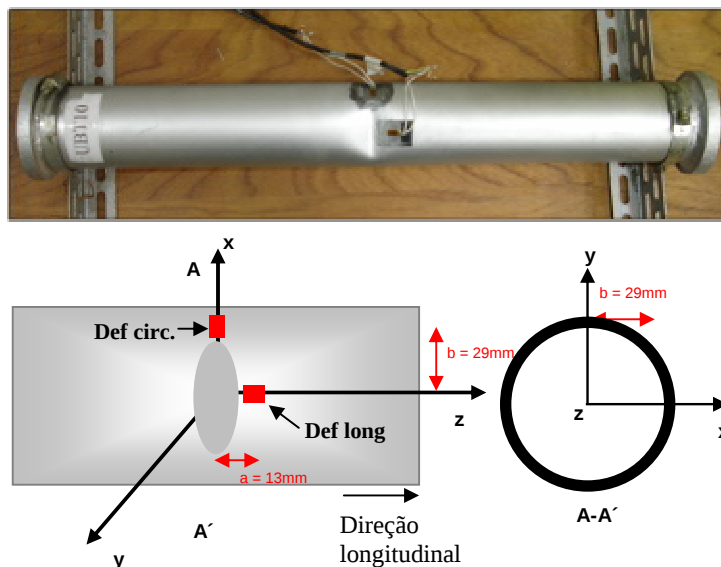


Figura 4.1 - Localização dos extensômetros para medição da deformação circunferencial e longitudinal durante os testes de ruptura.

A montagem dos equipamentos para a execução dos testes é ilustrada na Figura 4.2

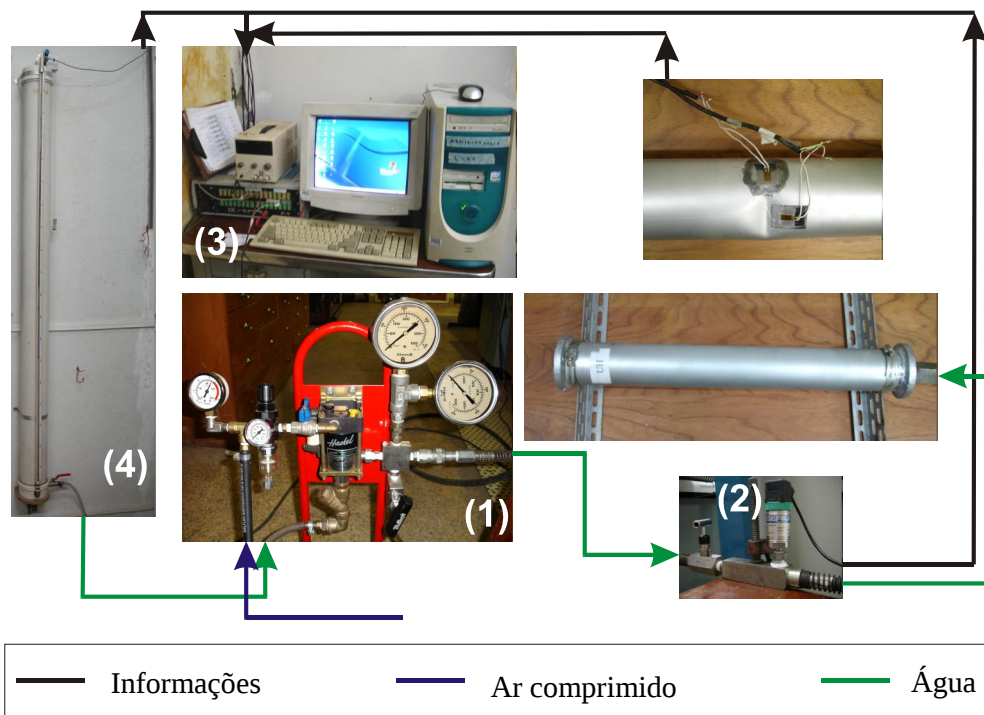


Figura 4.2 - Montagem de equipamentos para a execução dos testes hidrostáticos: Bomba pneumática de deslocamento positivo (1), transdutor de pressão marca Gefran, capacidade máxima 700bar (2); sistema de aquisição de sinais marca Lynx, modelo ADS2000 (3) e medidor de nível do volume de água (4)

4.1.2.

Resultados dos Testes Hidrostáticos

A seguir são apresentados os resultados dos testes hidrostáticos nos espécimes tubulares com e sem defeito, destacando as pressões de ruptura, a relação pressão hidrostática-volume de água e as deformações medidas.

a) Pressões de ruptura: As curvas que relacionam o volume de líquido injetado nos espécimes e a pressão hidrostática são apresentadas na Figura 4.3. Na execução dos testes foi possível verificar a recuperação gradativa da profundidade da mocha com o incremento da pressão, de modo que no final do teste, a mocha tinha desaparecido. A pressão de ruptura foi determinada no maior valor de pressão de cada curva. Tais pressões são apresentadas na Tabela 4.1.

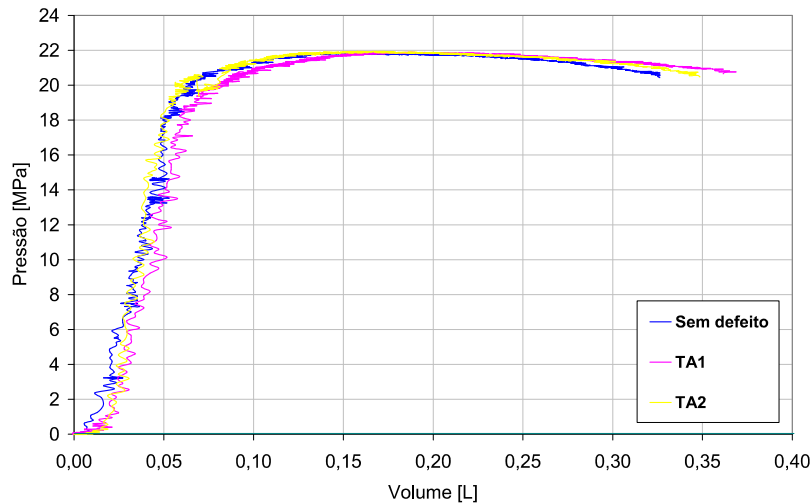


Figura 4.3 - Volume de água Vs. Pressão hidrostática nos espécimes TA1 e TA2

Tabela 4.1 - Pressões de ruptura dos espécimes ensaiados.

Corpo de prova	Direção da mossa	$d_{\max}$ (mm)	Pressão de ruptura (MPa)
Sem defeito	--	0	21,84
TA1	Transversal	11,26	21,88
TA2	Transversal	11,40	21,95

Conforme a Tabela 4.1, a pressão de ruptura do espécime tubular sem defeito e dos testes TA1 e TA2 são aproximadamente iguais a 22MPa. Isto indica que mossas transversais com profundidade máxima de até 15% não afetam a resistência à ruptura dos espécimes. Uma resposta similar foi encontrada nos espécimes TB1 e TB2, contendo mossas longitudinais com profundidade máxima de 15% e nas mossas transversais com profundidades máximas de 25%, TC1, TC2 e TC3. Detalhes dos testes TB e TC são apresentados no Apêndice E.

As fraturas, em todos os casos, foram longitudinais ao eixo do duto, ocorrendo fora da região indentada, tal como registrado na Figura 4.4.

Na Figura 4.5 são apresentadas a deformação longitudinal e circunferencial, medidas no teste TA1. Quando a pressão hidrostática atingiu 7MPa, os extensômetros registraram valores entre $10000\mu\epsilon$ e $12000\mu\epsilon$. Nesse intervalo de deformação os extensômetros alcançam sua capacidade máxima de registro e os valores de deformação começam a cair. Após 7MPa o extensômetro longitudinal descolou, deixando de receber sinal.

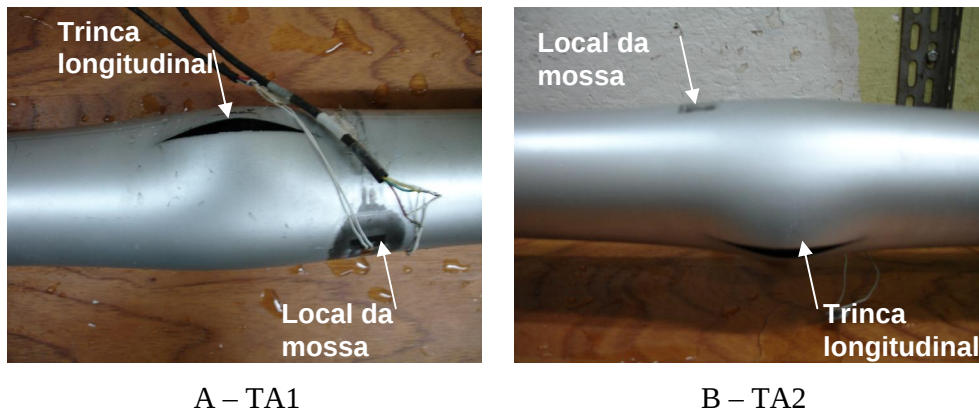


Figura 4.4 - Localização da fratura dos espécimes após o teste de ruptura

Nos locais dos extensômetros já havia ocorrido plastificação durante a indentação apresentando tensões permanentes de natureza tractiva e tensões residuais de natureza compressiva.

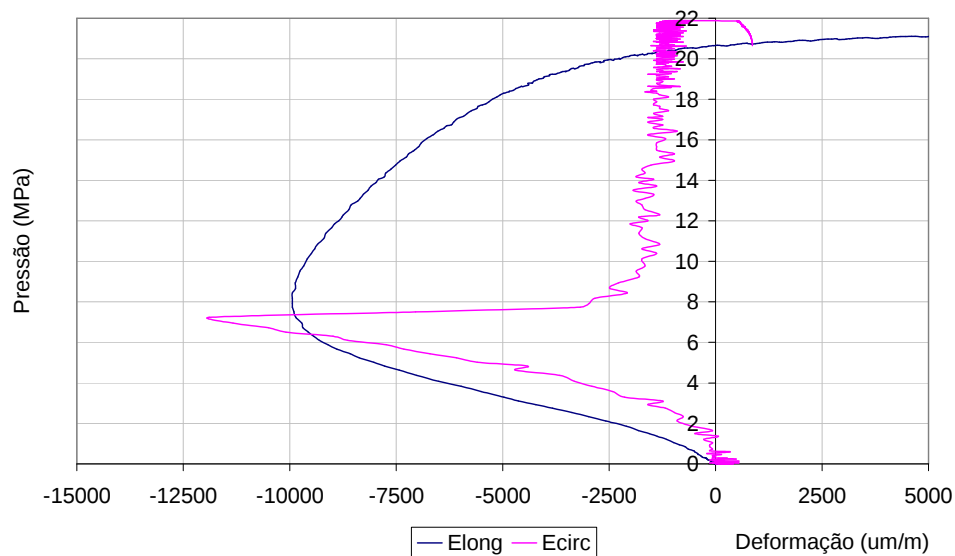


Figura 4.5 - Deformação longitudinal e circunferencial durante o teste hidrostático.

4.2.

Análise Numérica por Elementos Finitos

A análise numérica de ruptura estática baseou-se nos resultados da análise numérica de indentação do Modelo 1, detalhado no Capítulo 3 deste trabalho. Na modelagem de ruptura foram mantidas as condições de simetria desse modelo e sobre o extremo oposto ao plano de simetria xy foram implementadas duas condições de contorno para simular a condição de bordo sob restrição axial e a condição de bordo tamponado. A primeira condição de contorno simula a situação de uma tubulação de comprimento longo ($L=10.D$), com o deslocamento restringido na direção axial ($uz=0$). A segunda condição de contorno simula o efeito do tampo soldado ao extremo, implementada mediante a imposição de uma força axial atuante nos nós que conformam o perímetro do duto.

A pressão foi aplicada gradativamente sob a parede interna do duto de modo a garantir a convergência, principalmente quando a plastificação do material ocorre. Foram aplicados 7 passos de pressão com auto-seleção dos intervalos. O valor de pressão aplicada varia com cada passo, usando intervalos menores quando o material plastifica. A ruptura foi declarada quando, após vários pequenos incrementos de pressão ($\Delta P = 5,70E-2 * P_{max}$), a solução deixou de convergir.

A Figura 4.6 compara as deformações circunferenciais obtidas da análise de elementos finitos e os resultados experimentais. As deformações numéricas foram lidas nos nós cuja posição fosse a mais próxima da localização dos extensômetros nos testes hidrostáticos.

A plastificação reversa começa a ocorrer a pressões menores do que 2MPa. As deformações longitudinais numéricas na condição de restrição axial e de bordo tamponado são similares até níveis de 2000 $\mu\epsilon$, após este valor, a condição de bordo tamponado apresenta um comportamento menos estável do que o tubo com restrição axial. A condição de contorno que mais se aproxima da realidade é a de restrição axial.

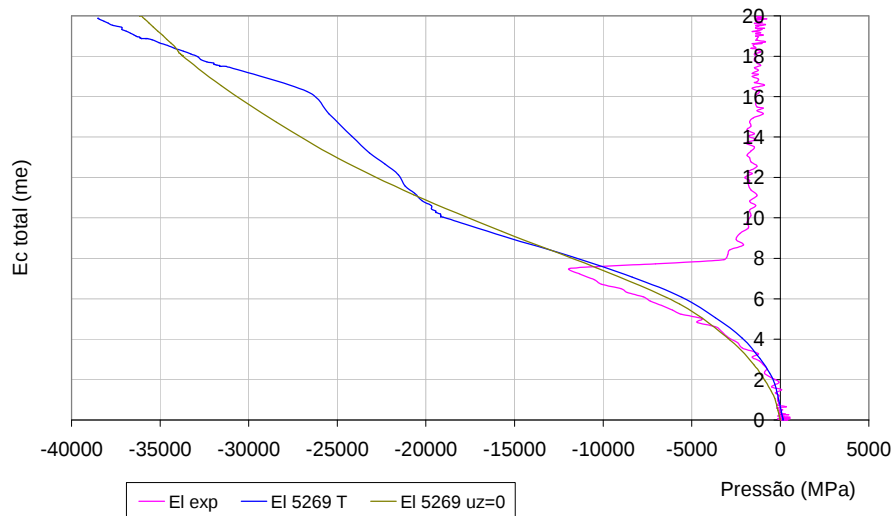


Figura 4.6 - Deformação longitudinal obtida da análise numérica para o nó 5266 e comparação com valores experimentais

A Figura 4.7 apresenta a variação da deformação circunferencial com a pressão. Comparando os resultados numéricos com os valores experimentais, tem-se que o modelo de restrição axial apresenta maior aproximação dos resultados experimentais.

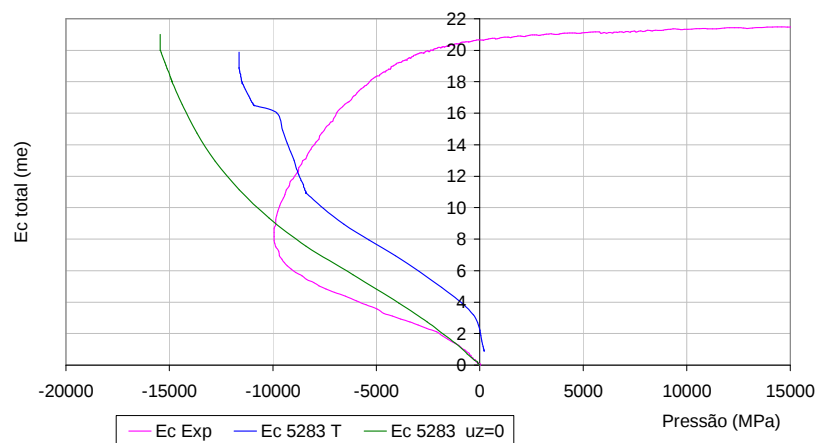


Figura 4.7 - Deformação circunferencial obtida da análise numérica e comparação com valores experimentais

A variação da deformação longitudinal e circunferencial com a pressão obedece às alterações na profundidade da mocha. A Figura 4.8 relaciona profundidade e pressão em diferentes nós localizados na geratriz superior do plano de simetria xy da seção transversal do duto. A variação da profundidade não segue uma linha reta com inclinação constante devido ao efeito da plasticidade do material. No ultimo sub-passo, antes da ruptura numérica, o ponto de maior profundidade (nó 5266) permanece com 76% da profundidade da mocha recuperada elasticamente. Este resultado difere da análise experimental onde no final do testes a mocha recuperou-se totalmente.

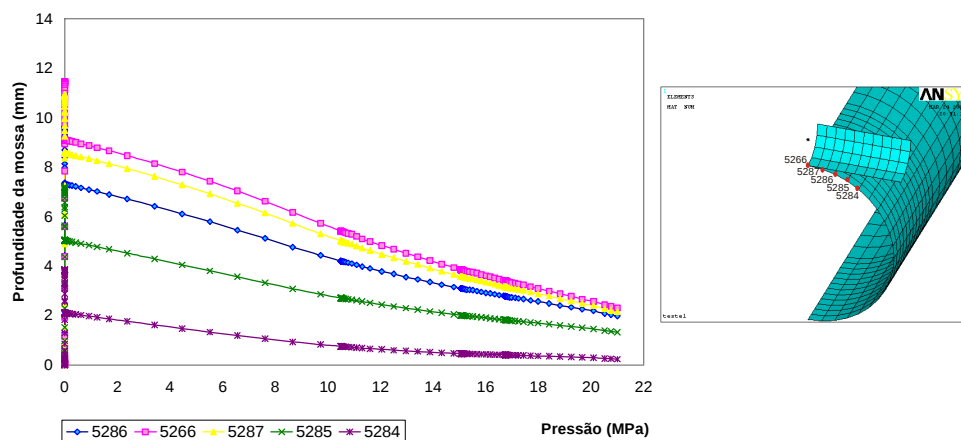


Figura - 4.8 Variação da profundidade da mocha com a pressão

As Figuras 4.9 e 4.10 registram as tensões de Von Mises correspondente ao sub-passo anterior à ruptura numérica dos tubos, para a condição de contorno de restrição axial e de bordo tamponado, respectivamente. As maiores tensões localizam-se na região mais profunda da mocha, sendo este o local onde a ruptura se produziria. Experimentalmente, a ruptura ocorre fora da região da mocha.

A distribuição das tensões de Von Mises no instante anterior à ruptura é similar nos dois casos, mas a escala de valores é sensivelmente diferente. Na condição de restrição axial, as tensões são maiores ao longo da extensão do duto e especificamente na região danificada. A condição de bordo tamponado reduz generalizadamente as tensões de Von Mises. Por exemplo, na área deformada, a diferença é de 10MPa, no entanto, a extensão longitudinal das tensões máximas é maior.

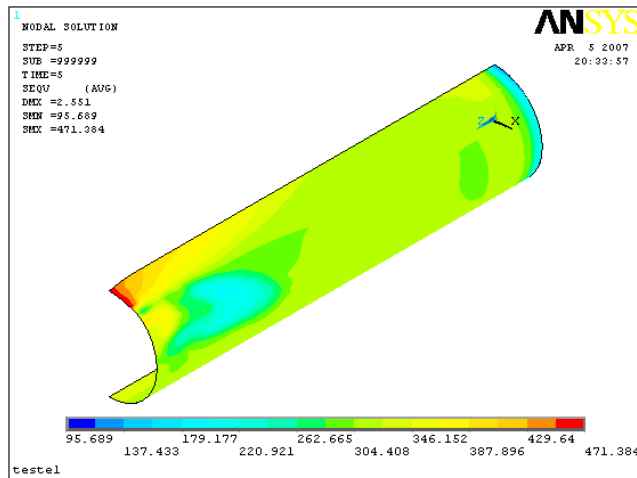


Figura 4.9 - Distribuição da tensão de Von Mises no instante anterior à ruptura para a condição de restrição axial

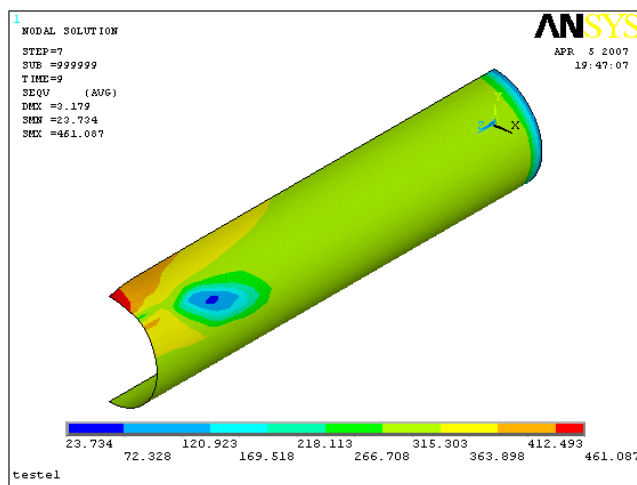


Figura 4.10 - Distribuição da tensão de Von Mises no instante anterior à ruptura para a condição de bordo tamponado.

As pressões de ruptura dos modelos numéricos e a experimental para o teste TA1 com 15% de profundidade máxima são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Comparação das pressões de ruptura numérica e experimental.

Profundidade máxima da mossa (%)	Corpo de prova	Pressão de ruptura (MPa)
15%	Sem defeito	21,84
	TA1	21,88
	Restrição axial	21,01
	Bordo tamponado	19,00

Considerando a boa aproximação dos resultados numéricos de ruptura e das deformações com os resultados experimentais, as duas alternativas de modelagem propostas: bordo tamponado e restrição axial, poderiam ser usadas, mas os resultados foram mais próximos da realidade quando aplicada a condição de restrição axial, válida para dutos enterrados. Esta condição é apropriada para dutos longos, isto é, para dutos com comprimento maior ou igual a 10 vezes o diâmetro. Embora, os espécimes avaliados possuam comprimentos menores que esse valor, os resultados demonstram que ainda pode ser aplicada tal condição com bons resultados.