

## 4 Modelo Numérico

### 4.1

#### Descrição do modelo

O tubo apresentado na Fig. (4.1) é o modelo de um tubo de paredes finas com tampo semi-esférico que foi desenvolvido com o pacote computacional Abaqus 6.10 com o propósito de estudar as tensões e deformações que ocorrem na região de indentação durante a introdução da mocha, retirada do indentedor e início do carregamento de pressão em termos de ciclos repetitivos. Este tubo sofreu deformações elastoplásticas devido: ao deslocamento radial do punção; ao retorno elástico durante a retirada do mesmo; à aplicação de cinco ciclos de pressão interna (suficientes à estabilização do ciclo), o primeiro com 80% ou 100% de SMYS e os demais com uma variação de 70% de SMYS, de acordo com a Tab. (3.1), os 6 modelos de Elementos Finitos reproduzem as 12 condições dos ensaios apresentados nessa tabela. O punção foi modelado como uma superfície semi-esférica rígida com diâmetros que reproduzem as condições experimentais. A profundidade de indentação é de 91.44 mm (15% D).

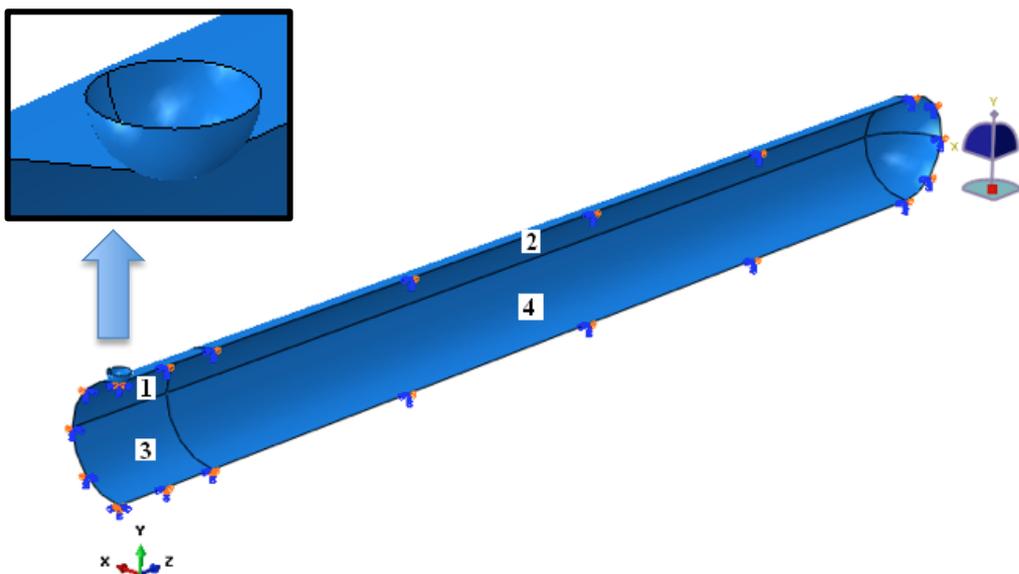


Fig. (4.1) – Modelo do tubo, e punção com regiões de divisão de malha e detalhe do punção

A região modelada foi dividida em quatro partes com o objetivo de estabelecer refinamentos adequados da malha. Os tamanhos das arestas dos elementos foram impostos tal como apresentados na Tab. (4.1) e isto determinou o refinamento da malha, feita de acordo com as divisões da geometria do modelo de tubo indicadas na Fig. (4.1).

Tabela (4.1) - Tamanho das arestas dos elementos da malha de elementos finitos

Região	1	2	3	4
Tamanho da aresta circunferencial do elemento (mm)	25.4	25.4	50.8	50.8
Tamanho da aresta do elemento longitudinal (mm)	25.4	101.6	25.4	101.6

O comprimento do tubo ( $L$ ) é de 10 vezes o diâmetro do tubo para evitar a interferência dos resultados entre a região da mossa e a extremidade tamponada, extremidade essa que foi modelada como uma casca semi-esférica da mesma espessura do restante do tubo. A malha é mostrada na Fig. (4.2).

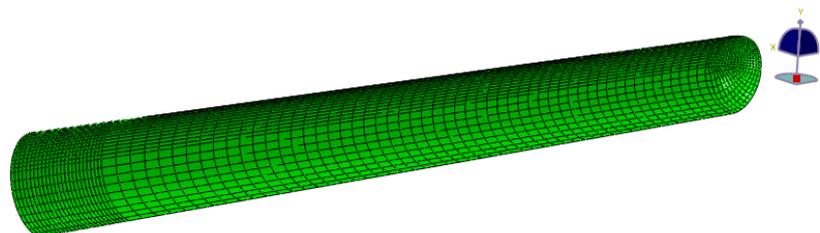


Figura (4.2) – Malha de elementos Finitos

O material utilizado foi o API 5L X70. As propriedades elásticas são apresentadas da Tab. (4.2).

Tabela (4.2) – Propriedades elásticas do API 5L X70 [31]

E (GPa)	200
$\nu$	0.3

No regime plástico, a curva multilinear de tensão de engenharia versus deformação plástica é mostrada na Fig. (4.3). A tensão de escoamento utilizada no tubo de material X70 é de 460 MPa, e o limite de resistência a tração utilizado foi de 746 MPa, enquanto no X52 a tensão de escoamento é de 360 MPa e o limite de resistência à tração é de 559 MPa, sendo estes dados fornecidos em [31].

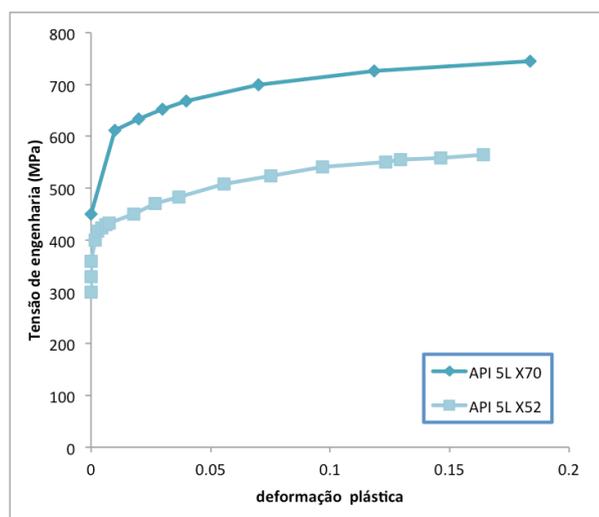


Figura (4.3) – Curva tensão verdadeira x deformação plástica do API 5L X70

A regra de endurecimento cinemático é a combinada isotrópica-cinemática, utilizando os pontos da curva tensão-deformação, com três *backstresses* [32]. O software de elementos finitos utiliza uma variação do modelo de Chaboche que permite a aproximação do modelo de escoamento por um ou mais *backstresses*, em testes preliminares foi realizada uma análise de sensibilidade e variando-se o parâmetro entre um e oito, observou-se que valores superiores a três apresentaram o mesmo comportamento durante os ciclos de tensão, não influenciando mais no comportamento à tensão.

O elemento utilizado pelo software Abaqus 6.10 é o S5R8. Esse é um elemento de casca com 5 graus de liberdade [33]. Ele possui oito nós (segunda ordem), possui três graus de liberdade de translação e dois de rotação. Este

elemento não considera mudança de espessura e permite grandes deslocamentos e pequenas deformações. Tensões na direção radial são iguais a zero.

Os passos de carga têm um incremento mínimo de  $10^{-8}$  em um total de 1 ou 100%, este percentual sendo correspondente ao primeiro passo de carga que está relacionado com o valor total do deslocamento máximo desejado para o punção, e um número máximo de interações de 400, este incremento é necessário para facilitar a convergência na fase de indentação. Os passos seguintes possuem um incremento inicial de  $10^{-7}$ , também em um total de 1 em cada passo de carga, e um limite de 200 interações.

As condições de contorno adotadas são a duas simetrias (planos XY e YZ conforme Fig. (4.1)), apoio vertical na base desde o plano de simetria XY até uma distância de um Diâmetro (1D), e restrições à translação do punção nos eixos X e Z, assim como à rotação no três eixos. Em estudos preliminares testou-se modelar o solo como uma superfície plana rígida estabelecendo-se o contato entre esta superfície e a parte inferior do tubo sem diferenças significativas nos resultados de tensão.

O dano por moessa é imposto pelo deslocamento vertical do punção H de 91.44 mm ( $H/D = 15\%$ ), e o contato com o tubo é feito através da escolha de uma superfície *master* e outra *slave*, sendo a primeira a superfície do indentedor, e a última a região do tubo que entra em contato com o punção.

Após a criação da moessa, são aplicados cinco ciclos de pressão interna, o primeiro com 100% SMYS (9.3 MPa nos tubos de aço X52, e 14.1 MPa para os tubos de material X70), a pressão decresce até zero. Nos 4 ciclos seguintes a pressão aumenta até 80% SMYS e (7.4 MPa para X52 e 11.3 MPa para X70) e decrescem até 10% SMYS, o que corresponde a 0.93 MPa para X52 e 1.41 MPa para X70. Essas condições que reproduzem os ensaios experimentais publicados em [28 e 31].

## 4.2

### Resultados de Elementos Finitos

A Fig. (4.4) mostra o resultado das tensões na direção circunferencial no diâmetro externo no fim da segunda aplicação de pressão interna da condição 7-8 como um resultado típico de saída do *software*. O maior valor de tensão está localizado no nó 71, localizado a 50.8 mm da simetria do tubo na direção axial, e seu valor é de 474 MPa.

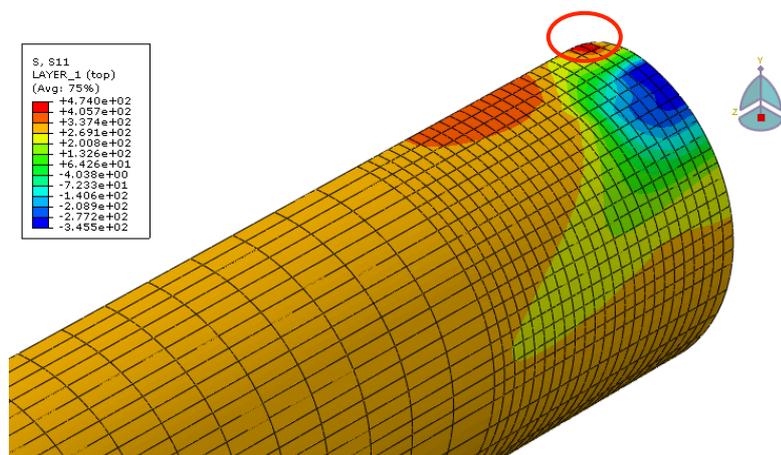


Figura (4.4) – Resultado de tensões circunferenciais no segundo ciclo de pressão interna

O histórico das diferentes componentes de tensão no nó 71 ao longo dos ciclos é apresentado na Fig. (4.5). Pode-se observar que a tensão de von Mises não reflete o histórico das componentes circunferencial e longitudinal nas partes compressivas. A correção de sinal para a tensão de von Mises proposta por [7,9], e explicada na seção 2.2.8, também é apresentada, porém é necessário destacar que este procedimento não pode ser utilizado em todos os estados de tensão [32]. Uma nova forma de cálculo das tensões médias e alternadas é apresentada em [32], e utiliza tensões alternadas e médias equivalentes.

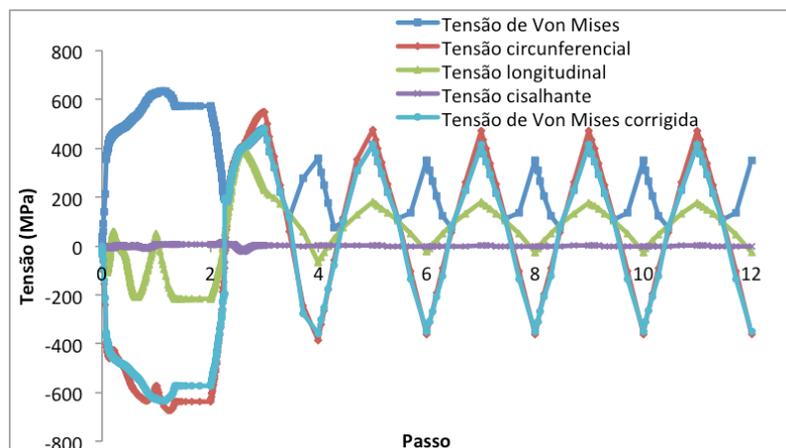


Figura (4.5) – Histórico de tensões em função dos passos de carga

Os laços de histerese gerados durante o histórico tensão-deformação que ocorre no nó 71 é mostrado na Fig. (4.6). No primeiro passo de carga observa-se uma expressiva deformação elastoplástica no sentido compressivo. Na retirada do punção acontece uma recuperação elástica. Já na aplicação da primeira pressão interna ocorre uma deformação elastoplástica no sentido inverso ao do primeiro ciclo, o que provoca a redução da profundidade da moosa. Na retirada da primeira pressão ainda ocorre uma deformação elastoplástica porém agora no sentido de aumentar a profundidade da moosa. A partir do segundo ciclo de pressão interna, as tensões se estabilizam, adquirindo um comportamento essencialmente linear elástico.

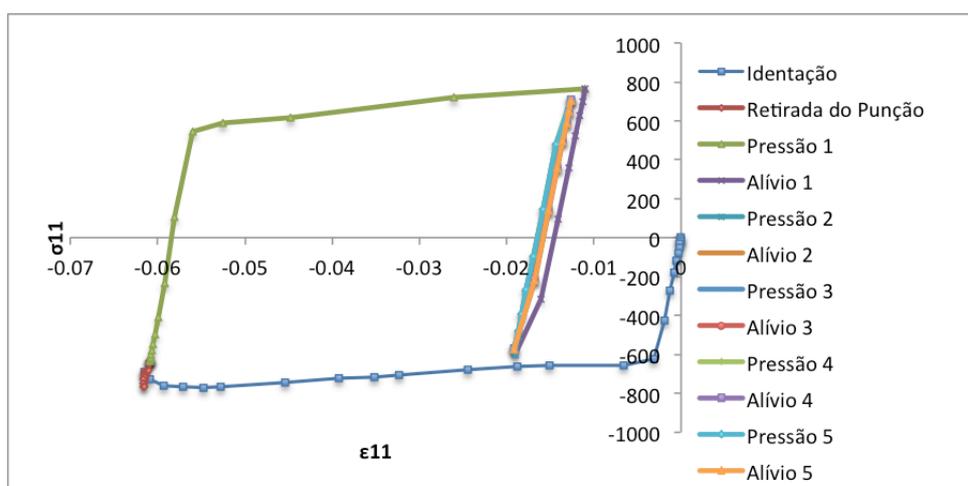


Figura (4.6) – Curva tensão versus deformação circunferencial no nó 71

A referência [31] mostra gráficos comparativos entre a força de indentação medidas experimentalmente e as calculadas na análise de Elementos Finitos. A Fig. (4.7) mostra o resultado do tubo 8 que reflete o comportamento dos tubos 7 a 12, Observa-se que os resultados do modelo numérico proposto prevê uma força de indentação máxima maior que a observada experimentalmente em torno de 10%. Diferença menor que a encontrada entre o experimental e o numérico da referência.

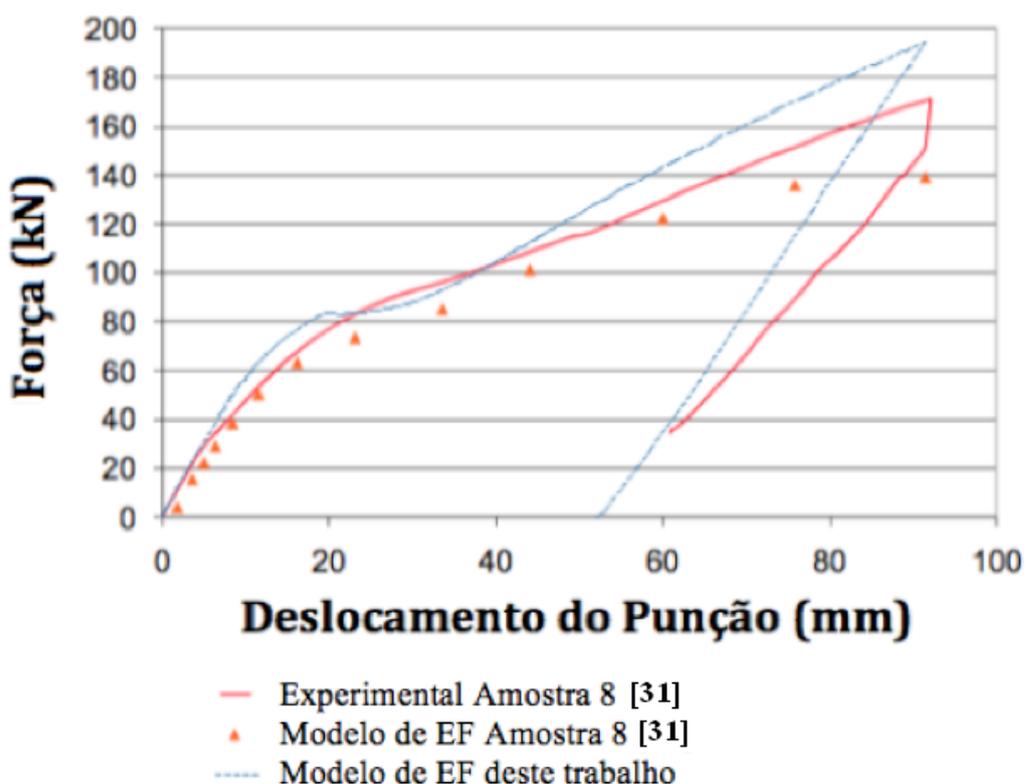


Figura (4.7) – Gráfico da força de indentação em função do deslocamento do punção

A Figura (4.8) mostra o resultado de força de indentação do tubo 17 que representa o comportamento das condições 13 a 18. Os valores do modelo proposto são próximos ao resultado de Elementos Finitos da referência [31], e ambos são mais rígidos que o resultado experimental, gerando uma previsão de força de indentação maior que este em aproximadamente 17%. Comentários adicionais sobre simulação da força de indentação versus deslocamento encontram-se no apêndice A.

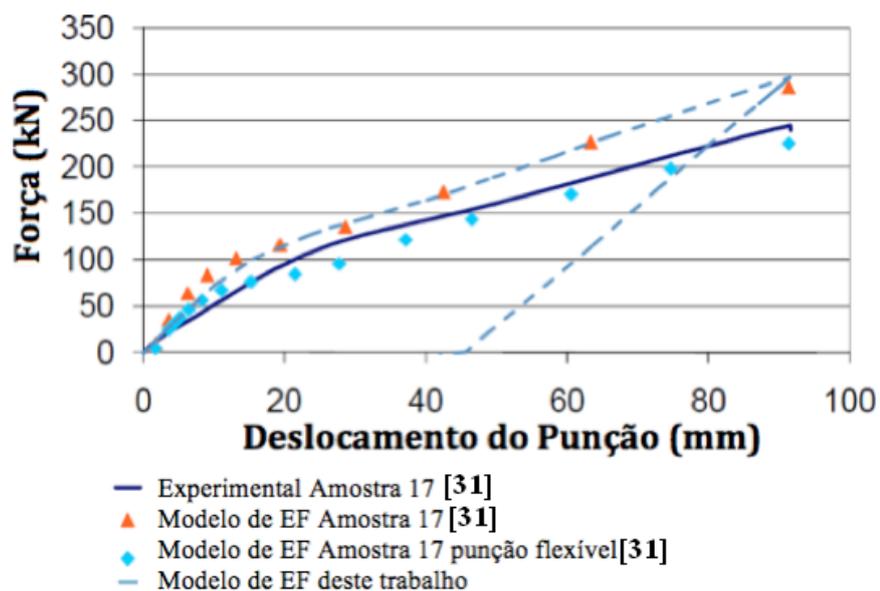


Figura (4.8) – Gráfico da força de indentação em função do deslocamento do punção

A comparação das amplitude de deformação na direção circunferencial dos tubos 14, 17 e 18 é mostrada na Fig. (4.9). A medição foi realizada a 50.8 mm da distância, da simetria, no sentido longitudinal a faixa de deformação do modelo proposto é maior que os resultados encontrados na literatura [31]. O objetivo dessa comparação é avaliar quanto o modelo de elementos finitos se aproxima dos valores experimentais encontrados nos testes de fadiga mostrados na referência [31].

Em termos adimensionais, o parâmetro PR calculado em função da distância, do diâmetro do tubo e da espessura pode ser calculado de acordo com a Eq. (4.1)

$$PR = \frac{Dist}{\sqrt{Dt}} \quad [4.1]$$

O valor de PR para a distância de 50.8 mm corresponde a 0.69 nos tubos tipo A e 0.73 nos do tipo B X70.

Na distância de 101.6 mm, os valores de PR são de 1.38 e 1.46 para os tubos X52 e X70 respectivamente.

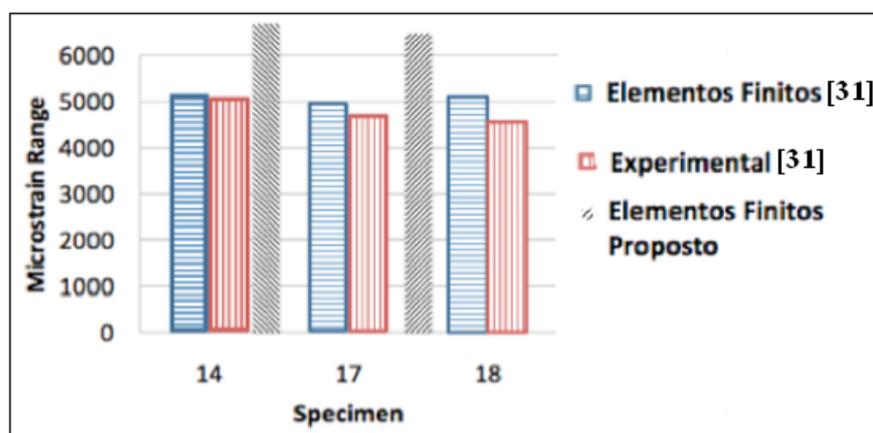


Figura (4.9) – Variação da deformação circunferencial a 50.8 mm (2'')

A deformação circunferencial medida a uma distância de 101.6 mm numericamente é apresentada na Fig. (4.10) mostra valores acima dos divulgados pela referência nas condições 13 e 14. Nos tubos 15 e 16 o resultado do modelo proposto encontra-se acima dos valores experimentais e abaixo do modelo de Elementos Finitos publicados. O modelo numérico proposto relativo aos tubos 17 e 18 apresenta valor próximo a um dos valores experimentais (e acima do outro), e menores que o valor numérico publicado.

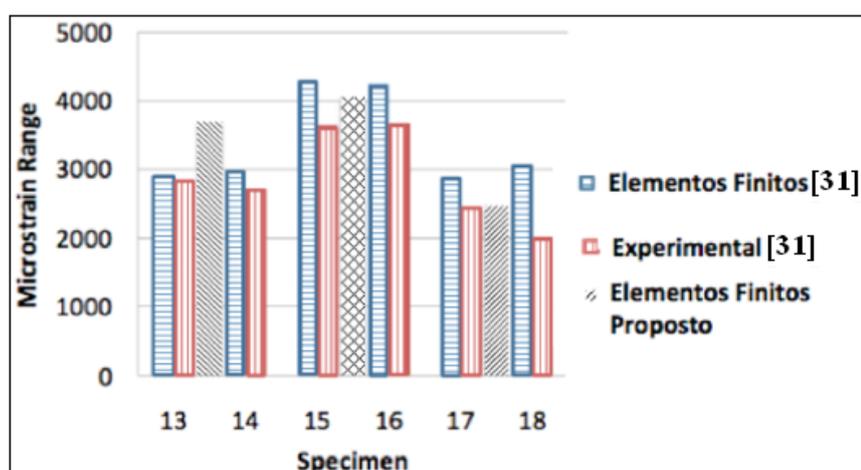


Figura (4.10) – Variação da deformação circunferencial a 101.4 mm (4'') da linha de centro transversal