

ANÁLISE NUMÉRICA ELASTOPLÁSTICA DA PERDA DE RESISTÊNCIA AO COLAPSO EM UM TUBO DE REVESTIMENTO SUBMETIDO A DESGASTE

Gustavo Teixeira Silva (UFAL) E-mail: gustavo.silva@lccv.ufal.br
Eduardo Toledo Lima Junior (UFAL) E-mail: limajunior@lccv.ufal.br
Lucas Pereira Gouveia (UFAL) E-mail: lucasgouveia@lccv.ufal.br

Resumo: O desgaste mecânico interno de revestimentos em poços do petróleo é pertinente aos processos de perfuração, acontecendo devido ao atrito da coluna de perfuração rotativa com o tubo de revestimento. Esse tipo de evento pode levar a diminuição considerável da resistência, aumentando o risco de falha por colapso dos tubulares. O problema é mais acentuado em poços profundos e direcionais, pois o peso da coluna sobre a broca é maior, levando a grandes desvios do poço e acentuadas flexões, provocando cargas laterais elevadas. Modelos de previsão da resistência ao colapso de tubos não desgastados podem ser encontrados na norma API/TR 5C3 (2008), já para ensaios com tubos desgastados utiliza-se a norma API 7CW (2015). Para resolução de problemas de engenharia é comum o uso do Método dos Elementos Finitos (MEF), que é capaz de fornecer respostas com boa precisão em problemas de mecânica estrutural, a um custo computacional adequado, especialmente em problemas bidimensionais. Propõe-se uma análise paramétrica da resistência ao colapso de um tubo de grau de aço T-95, variando-se os níveis de desgaste entre 3% e 18%. O modelo numérico é validado para o tubo perfeito, e aplicado ao estudo de redução das resistências em função dos níveis de desgaste. Admite-se um modelo elastoplástico bilinear para o aço. Os níveis de tensão no tubo são verificados no início do escoamento e na iminência de ruptura por tração. Observa-se um decaimento não linear da resistência ao colapso em função dos níveis crescentes de desgaste, nas duas condições analisadas.

Palavras-chave: Poços de petróleo, desgaste de revestimentos, MEF, modelo elastoplástico, colapso.

ELASTOPLASTIC NUMERICAL EVALUATION ON THE COLLAPSE PRESSURE OF A WORN CASING TUBE

Abstract: The phenomenon of casing wear in oil wells is pertinent to the drilling processes and happens due the friction of the rotary drilling column with the casing tube. This type of event can lead to a considerable decrease in casing resistance, including the risk of failure collapse of the tubular. The problem is more pronounced in deep and directional wells, as the weight of the column on the drill bit is larger, leading to large deviations from the well and severe bending, causing high lateral forces. Collapse strength models of non-worn pipes can be found in API / TR 5C3 (2008), while the test procedure addressing worn tubes is established by API 7CW (2015) standard. The Finite Element Method (FEM) is widely applied to the solution of engineering problems, being able to provide accurate responses on structural mechanics, at a proper computational cost, specially in plane problems. It is proposed a parametric analysis of the collapse strength for a tube of grade T-95, varying the levels of wear between 3% and 18%. The numerical model, developed in plane stress condition, is validated for the perfect tube and applied to evaluate the loss of collapse strength due to wear. A plane stress model bilinear elastoplastic is assumed for steel. Tension levels in the tube are checked for conditions of onset of yielding and tensile rupture. A nonlinear decay of the collapse resistance is observed as a function of the increasing wear levels, in the two analyzed conditions.

Keywords: Oil wells, casing wear, FEM, elastoplastic model, collapse.

1. INTRODUÇÃO

Os revestimentos de poços de petróleo desempenham um papel estrutural de grande importância em atividades como a perfuração e completação. Também possuem a função de mitigar eventos indesejados como colapso das paredes do poço, proporcionando o isolamento hidráulico, para que não haja a invasão de fluidos da formação para seu interior, ou a migração dos fluidos de completação em direção à formação (BOURGOYNE *et al.*, 1991). Um problema pertinente aos processos de perfuração de poços de petróleo é o desgaste mecânico dos revestimentos, ocasionado pelo ganho excessivo de ângulo com a profundidade na trajetória do poço (*dogleg*), e pela rotação e deslizamento da coluna de perfuração, causando atrito com o revestimento.

O desgaste interno de tubos de revestimento é um problema originado especificamente pela fricção entre o revestimento e as juntas que conectam os tubos de perfuração, as chamadas *tool joints*. Essa perda de espessura dos tubulares acarreta em uma diminuição considerável da resistência mecânica do revestimento, podendo proporcionar o colapso do tubo, causado pela ação de pressão externa.

Para Timoshenko e Gere (1936), o fenômeno de colapso é caracterizado pela transição entre um comportamento de estabilidade para uma condição repentina de instabilidade do material sujeito a esforços que os levam a essa condição. Em tubos não desgastados, modelos de resistência analíticos são normatizados pela API/TR 5C3 (2008). Outros modelos na literatura estimam a resistência ao colapso em tubulares considerando o desgaste da parede interna, a exemplo do modelo analítico e numérico de Kuriyama *et al.* (1999), que avalia a perda de resistência com o aumento gradativo dos níveis excêntricos de desgaste, o modelo experimental e numérico de Sakakibara *et al.* (2008), que estuda 2 tubos de esbeltezes distintas e espessuras para cada nível de desgaste constante. Além dos supracitados, tem-se o modelo tridimensional, numérico e experimental de Moreira Junior (2012), cujo formato de desgaste é adotado neste trabalho.

O presente trabalho busca uma avaliação paramétrica da resistência ao colapso de um tubo de revestimento de parede espessa internamente desgastado, aplicando-se uma modelagem numérica via Método dos Elementos Finitos, reproduzindo-se, em estado plano de tensões, uma situação de ensaio em câmara em câmara hiperbárica, no qual o tubo é engastado em apenas uma das extremidades. A modelagem numérica se apresenta como uma ferramenta de grande potencial para a verificação do comportamento mecânico desses elementos, considerando-se as dificuldades e os altos custos envolvidos em rotinas experimentais.

2. RESISTÊNCIA AO COLAPSO DE TUBULARES

Verifica-se experimentalmente que existem três tipos de mecanismos de colapso (CLINEDINST, 1985): colapso elástico, colapso plástico e colapso por escoamento, os quais são regidos pela esbeltez do tubo, a qual é definida pela relação entre seu diâmetro externo e sua espessura de parede (D/t). Tubos espessos, com baixo valor de D/t , estão sujeitos a colapso por escoamento, o qual ocorre quando a tensão crítica na parede interna do tubo atinge o limite de escoamento do material. Para valores intermediários de esbeltez, o tubo tende a sofrer colapso plástico, que ocorre para níveis de tensão inferiores ao limite de escoamento, mas superiores ao limite de proporcionalidade do material. Já no caso de tubos de parede fina, verifica-se a ocorrência do chamado

colapso elástico, que ocorre para baixos níveis de tensão crítica no material, em um fenômeno essencialmente geométrico de perda de estabilidade.

2.1 Resistência ao Colapso de Tubos não Desgastados Segundo a Norma API/TR 5C3 (2008)

Segundo a formulação da API/TR 5C3 (2008), o tubo objeto deste estudo encontra-se em um regime de falha de colapso por escoamento, cuja resistência ao colapso pode ser estimada através da Equação 1, derivada da equação de Lamé para tubos espessos.

$$R_{col} = 2Y_p \frac{\left(\frac{D}{t}\right) - 1}{\left(\frac{D}{t}\right)^2} \quad (1)$$

em que R_{col} é a pressão resistente de colapso e Y_p é a tensão limite de escoamento do aço. A norma API/TR 5C3 (2008) define quatro regimes de colapso, acrescentando aos regimes supracitados um estado de transição entre os regimes plástico e elástico, de forma a ajustar uma transição suave entre estes. A formulação completa encontra-se descrita na referida norma.

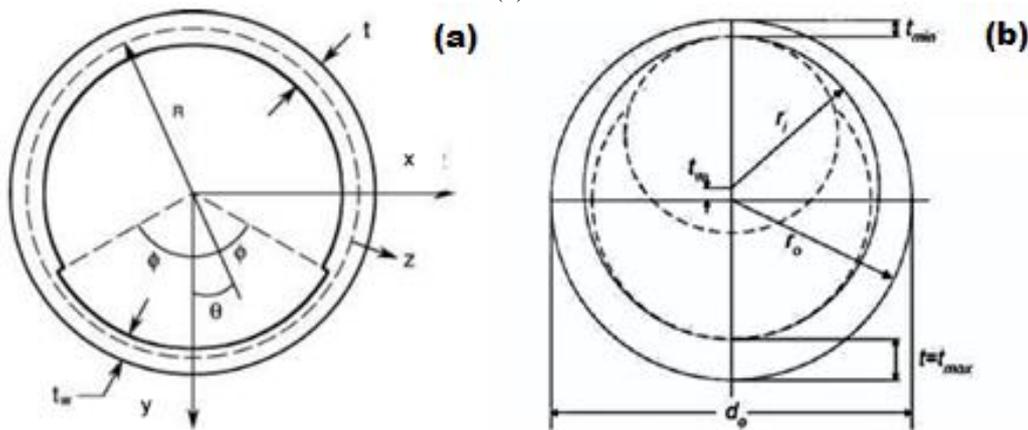
2.2 Modelos de Resistência ao Colapso em Tubos Desgastados

Na literatura pode-se destacar trabalhos sobre desgaste interno de tubos, dentre eles Sakakibara *et al.* (2008), Kuriyama *et al.* (1992) e Moreira Junior (2012). Sakakibara *et al.* (2008) propõem em seu trabalho uma abordagem experimental associada a um modelo numérico com o propósito de entender melhor o efeito do desgaste sobre a resistência à pressão externa.

O trabalho tem como principal objetivo a avaliação da resistência ao colapso a partir da variação do grau de desgaste, para diversas razões D/t e variando-se o ângulo de abertura do desgaste, sendo que para cada experimento o nível do desgaste permanece constante, enquanto o seu ângulo de abertura é modificado, conforme indicado na Figura 1 (a). Neste modelo o desgaste é produzido ao longo de todo o comprimento do tubo.

Outro estudo com a mesma finalidade de avaliação do colapso de elementos tubulares desgastados foi proposto por Kuriyama *et al.* (1992). Os autores avaliam a resistência ao colapso variando-se a profundidade do desgaste dos tubos, sem a preocupação com o ângulo de desgaste, como considerado por Sakakibara *et al.* (2008). O modelo de desgaste proposto Kuriyama *et al.* (1992) aproxima a geometria do tubo desgastado a partir de uma seção transversal excêntrica, como indicado na Figura 1 (b). Trata-se de uma aproximação mais fiel que a anterior da geometria do desgaste observado em campo, já que este é causado por tubos de perfuração, de seção circular. A norma que trata de ensaios com tubulares internamente desgastados é a API 7CW (2015).

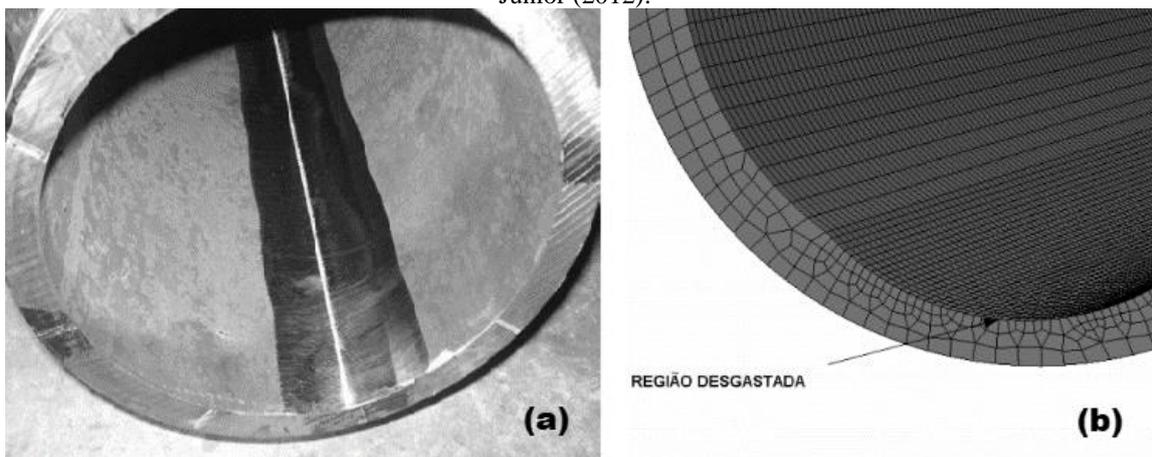
Figura 1 – Formatos de desgaste propostos por Sakakibara *et al.* (2008) (a) e Kuriyama *et al.* (1992) (b).



Fonte: Sakakibara *et al.*(2008) (a) e Kuriyama *et al.* (1992) (b).

A forma de desgaste adotada neste trabalho segue a proposta pelo trabalho experimental e numérico de Moreira Junior (2012) apresentados nas Figuras 2 (a) e 2 (b), respectivamente.

Figura 2 – Modelo experimental usinado (a) e modelo numérico em MEF (b) propostos por Moreira Junior (2012).



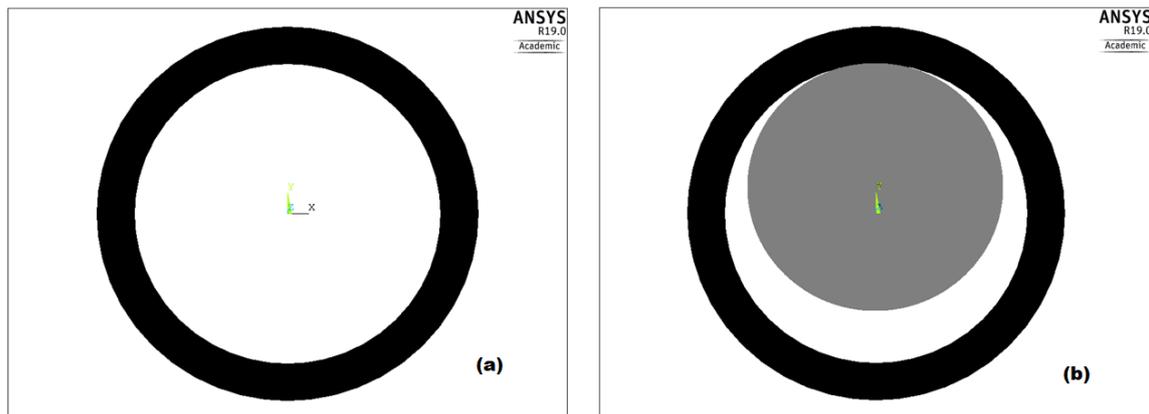
Fonte: Moreira Junior (2012).

3. MODELAGEM NUMÉRICA PROPOSTA

A modelagem proposta no presente trabalho é bidimensional, em estado plano de tensões (EPT). Sendo assim, o modelo é representado pela seção transversal do tubo sem desgaste, como indicado na Figura 3. As simulações foram executadas pelo software ANSYS Mechanical APDL, versão acadêmica 19.0.

Por uma questão de simetria, visando-se um menor custo computacional, modela-se apenas metade da seção transversal do tubo, a princípio sem desgaste, como mostrado na Figura 4 (a), e logo após, com diferentes níveis de desgaste, até que se chegue ao desgaste máximo na porção superior, destacado em vermelho, vide Figura 4 (b).

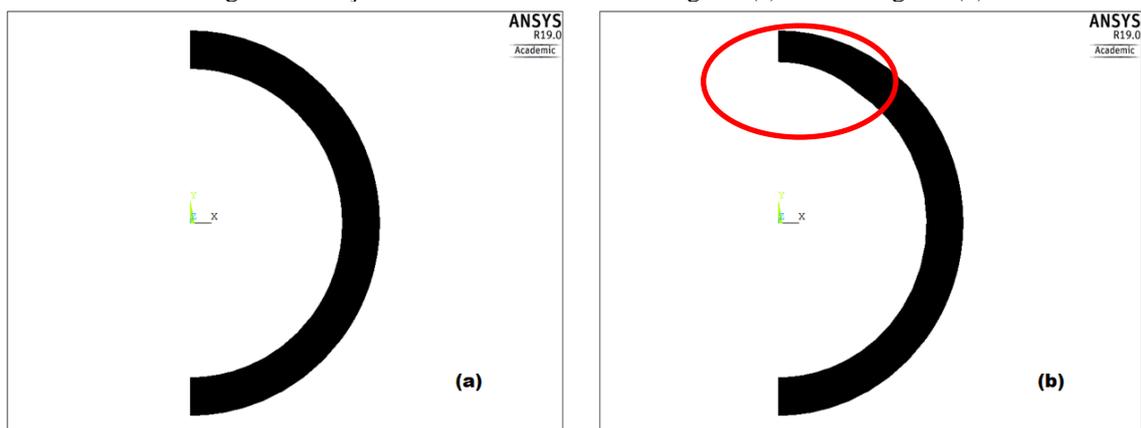
Figura 3 – Geometria da seção transversal do tubo sem desgaste (a) e com modelo de desgaste proposto (b).



Fonte: Autores (2019).

O formato do desgaste é modelado com base na geometria da *tool joint* (em cinza) adotada no estudo, como ilustrado na Figura 3(b).

Figura 4 – Seção transversal do tubo sem desgaste (a) e com desgaste (b).



Fonte: Autores (2019).

Faz-se a validação do modelo não desgastado, com base na norma API/TR 5C3 (2008), a qual define que a pressão admissível de colapso é aquela que provoca uma tensão igual ao limite de escoamento, na parede interna do tubo. Deve-se destacar que, em se tratando de um tubo perfeitamente circular sob carregamento hidrostático, a teoria de Lamé fornece uma única componente de tensão não nula, atuante na direção tangencial. Faz-se um estudo de convergência em busca do tipo de elemento, discretização, e condições de contorno que sejam mais adequados à simulação do problema físico.

As informações acerca do tubo analisado estão contidas na Tabela 1, na qual R_{col} é a resistência ao colapso prevista pela API/TR 5C3 (2008), a partir da Equação 1, segundo o regime de colapso por escoamento. Adota-se um aço de grau API T-95, que possui limite de escoamento mínimo de 95000 psi e tensão última à tração de 105000 psi. O valor máximo de tensão admissível na parede interna do tubo, de acordo com o regime de colapso API supracitado, corresponde ao início do escoamento, ou seja, 95000 psi.

Tabela 1 – Informações acerca do tubo T-95.

Grau de Aço	D (pol)	t (pol)	D/t	R _{col} (psi)
T95	7 5/8	3/4	10,17	16850

Fonte: API/TR 5C3 (2008).

A escolha do tubo de revestimento para este estudo é pautada na discussão acerca do parâmetro D/t, que mede a esbeltez do tubo. Procura-se garantir que o tubo, mesmo para o nível de desgaste máximo, ainda se encontre no regime de falha por escoamento, o qual é limitado pelo valor de $D/t = 12,44$, para o grau de aço em questão. Neste caso, a espessura máxima possível do tubo desgastado é de 0,613 pol, implicando em um desgaste percentual máximo da parede 18,26%, condizente com os valores médios de desgaste para projetos de poços indicados na literatura, podendo chegar até 26%, segundo Samuel *et al.* (2016). O estudo paramétrico deve avaliar as resistências ao colapso do tubo para diferentes níveis de desgaste δ , considerado o modelo constitutivo adotado, em duas situações, antes do escoamento, e entre o escoamento e a ruptura, ao passo que o desgaste percentual máximo é de 18%, variando-se a cada 3%, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Percentuais e valores da profundidade do desgaste da parede interna do tubo modelado.

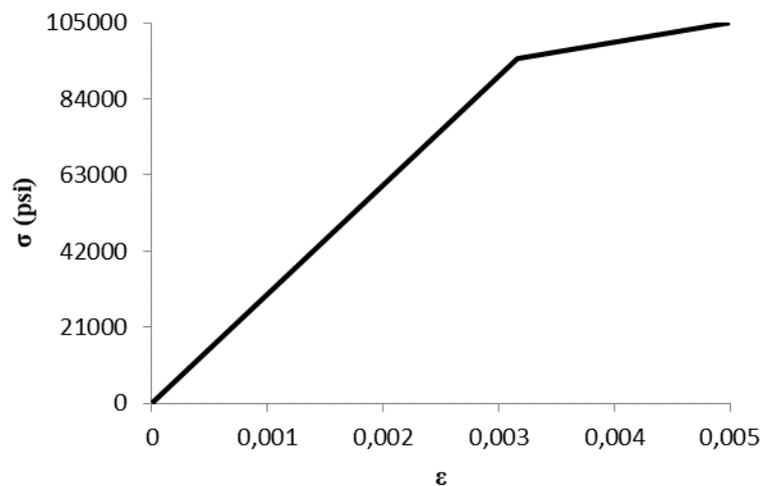
δ (%)	3	6	9	12	15	18
δ (pol)	0,0225	0,0450	0,0675	0,0900	0,1125	0,1350

Fonte: Autores (2019).

3.1 Modelo Constitutivo

Considera-se um modelo constitutivo elastoplástico bilinear para o aço conforme indicado pela Figura 5, cujo módulo de elasticidade inicial e coeficiente de Poisson são respectivamente 3×10^7 psi e 0,3. A curva é construída a partir dos valores de tensão de escoamento e de tensão limite de ruptura do aço em estudo. No diagrama bilinear considerado, ocorre uma diminuição do módulo de elasticidade do material após o escoamento, de forma que este passa a assimilar menores níveis de tensão ao longo do processo de deformação, quando comparadas com a resposta do modelo elástico linear.

Figura 5 – Diagrama tensão-deformação para o modelo constitutivo adotado.



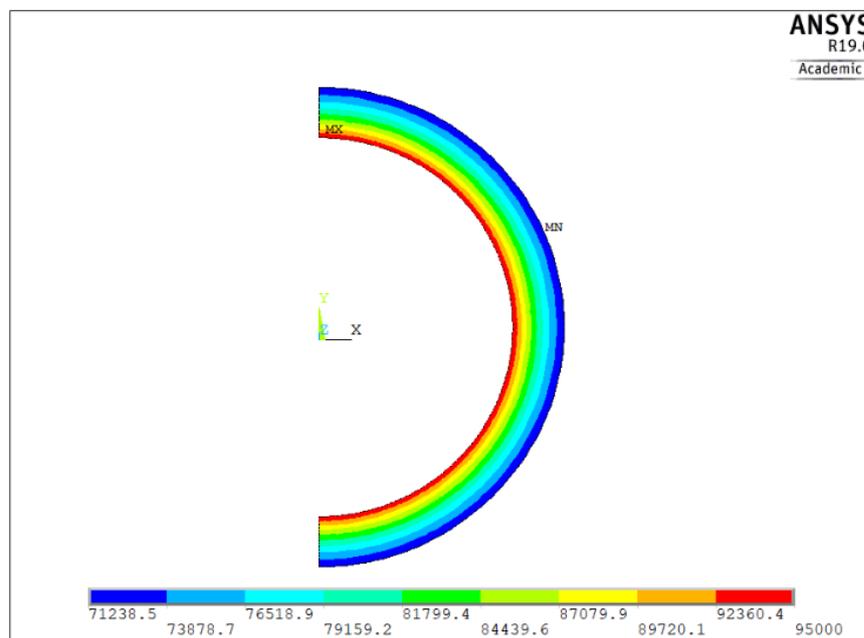
Fonte: AUTORES (2019).

3.2 Aspectos Numéricos

Para este problema a abordagem em Estado Plano de Tensões (EPT) é razoável, pois o tubo, estando em condições de ensaio, é submetido a altas pressões em uma câmara hiperbárica, engastado em uma de suas pontas, enquanto a outra extremidade permanece livre, não produzindo esforços axiais. Assim a carga hidrostática se distribui uniformemente ao longo da circunferência externa que representa a seção transversal, produzindo apenas tensões ao longo desta seção. O elemento escolhido para as simulações foi o *Solid183* (PLANE183 2-D 8 node *Structural Solid*). Este elemento possui forma quadrilateral e aproximação quadrática em deslocamentos. Os nós do elemento possuem 2 graus de liberdade no plano, nos quais são mapeadas as translações horizontais e verticais.

A malha é discretizada nas direções axial e circunferencial, com maior refinamento na vizinhança da parede interna e na região do desgaste. Em todas as simulações, as condições de restrição de deslocamento são as mesmas. Estas condições correspondem à restrição do movimento horizontal nas faces do corte simétrico e no vértice superior atribui-se um *keypoint*, com movimento restrito na direção vertical, retirando-se a singularidade da matriz de rigidez do problema. Ao longo da superfície externa, aplica-se um carregamento hidrostático. Para estudo de malha do modelo sem desgaste, uma pressão externa de 16850 psi é aplicada, para produzir uma tensão na parede interna do tubo de revestimento igual a 95000 psi, assim como ilustrado na Figura 6. Na análise de convergência, a malha estável, para o problema sem desgaste, possui 4935 elementos e 15420 nós.

Figura 6 – Níveis de tensão de von Mises para o tubo sem desgaste.



Fonte: Autores (2019).

O mesmo é feito para as demais malhas, com todos os níveis de desgaste considerados. Porém, para os modelos desgastados, por não se ter informações de sua resistência ao colapso em função do nível de desgaste, deve-se produzir esse estudo de convergência observando os níveis de resposta das tensões na região desgastada obtidas pelo *software*, até que seja observada a sua estabilização.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, propõe-se um estudo paramétrico da redução da resistência ao colapso do tubo definido na Tabela 1, para diferentes níveis de desgaste, considerando o modelo bilinear. Nas análises que seguem, o parâmetro de referência é a tensão máxima atuante na seção transversal do tubo, para diferentes níveis de desgaste simulados. De forma a comparar esta tensão, avaliada num modelo bidimensional, com os limites uniaxiais de escoamento e ruptura (Figura 5), a informação é extraída do modelo numérico em termos de tensão equivalente de von Mises, a qual pode ser confrontada com valores uniaxiais. No estudo definem-se duas situações: a primeira diz respeito ao critério onde a tensão equivalente máxima não deve ultrapassar o limite de escoamento, guardando a relação linear entre tensão e deformação, conforme apresentado na Seção 4.1. Na segunda análise (Seção 4.2), admite-se que o colapso do tubo ocorre quando o limite de ruptura à tração é atingido.

4.1 Análise no Início do Escoamento

Nesta primeira análise, verifica-se que ao aplicar à pressão de colapso API, as tensões equivalentes máximas aumentam com o nível de desgaste. Desta forma, determina-se a pressão capaz de produzir uma tensão equivalente crítica igual ao limite de escoamento, a partir da proporcionalidade entre as tensões encontradas e o valor de 95000 psi esperado. Após as simulações, gera-se a Tabela 3, na qual se verificam os valores alcançados das resistências estimadas $R_{col,w}$, bem como as reduções de resistência em relação ao valor de referência de 16850 psi.

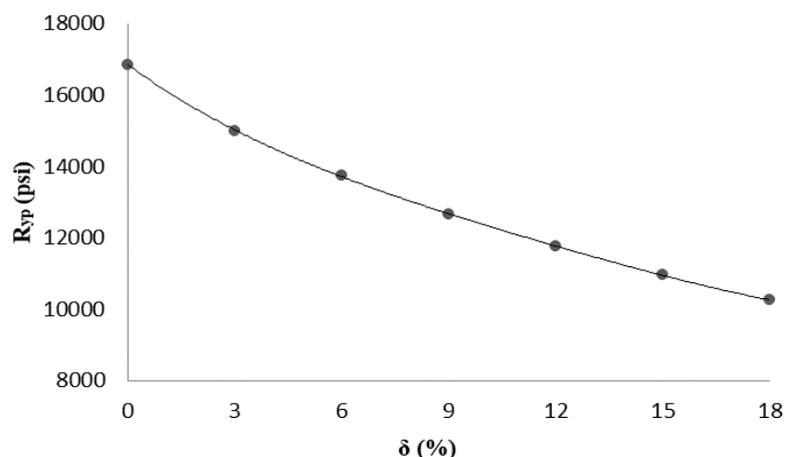
Tabela 3 - Resultados das análises para cada nível de desgaste, no limite de escoamento.

δ (%)	0	3	6	9	12	15	18
R_{yp} (psi)	16850	14997,56	13721,62	12656,75	11746,30	10952,86	10250,64
redução (%)	-	11,00	18,56	24,88	30,30	35,00	39,16

Fonte: Autores (2019).

A Figura 7 mostra a correlação da resistência ao colapso do tubo definido na Tabela 3, com o aumento gradativo dos níveis de desgaste interno do tubo.

Figura 7 – Gráfico de nível de desgaste interno *versus* resistência ao colapso até o escoamento.



Fonte: Autores (2019).

Pela Figura 7, nota-se que há uma queda mais acentuada da pressão de colapso para valores de desgaste até 6%, acima deste valor a redução de resistência se mostra aproximadamente linear.

4.2 Análise no Limite de Ruptura

Em uma segunda análise, equivalente ao Estado Limite Último, admite-se que o material pode desenvolver um nível máximo de tensão igual ao limite de ruptura, que vale 105000 psi, para o grau de aço em estudo. Desta forma, a correção do nível de pressão resistente é feita de acordo com a inclinação do segundo trecho, menos rígido. De posse dos dados simulados, compilam-se na Tabela 4 as resistências através do uso da relação de proporcionalidade supracitada. De posse dos valores simulados, apresentam-se na Tabela 4 os valores estimados de pressão de ruptura R_r , assim como as reduções de resistência, com respeito ao valor de referência de 20870 psi.

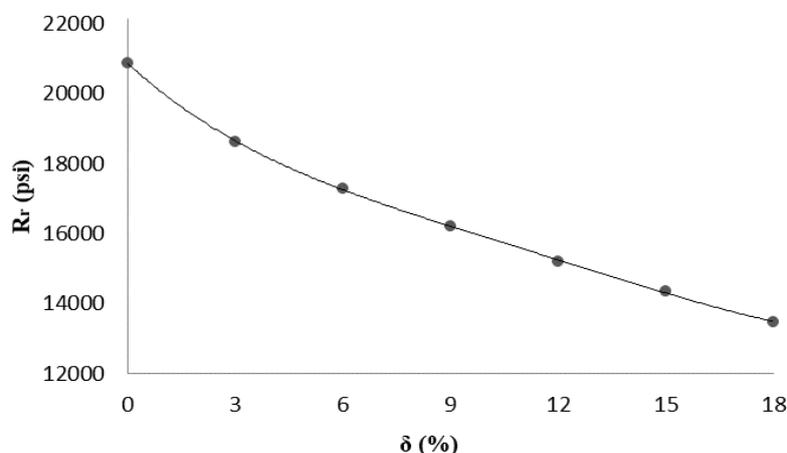
Tabela 4 – Resultados das análises para cada nível de desgaste, no limite de ruptura.

δ (%)	0	3	6	9	12	15	18
R_r (psi)	20870	18615,40	17285,80	16203,30	15206	14328,50	13477,60
redução (%)	-	10,80	17,17	22,36	27,13	31,34	35,42

Fonte: Autores (2019).

A Figura 8 mostra que, assim como mostrado na Seção 4.1, as reduções de resistência ao colapso também são maiores no intervalo que compreende os desgastes crescentes até 6%, mostrando-se quase linear a partir deste valor.

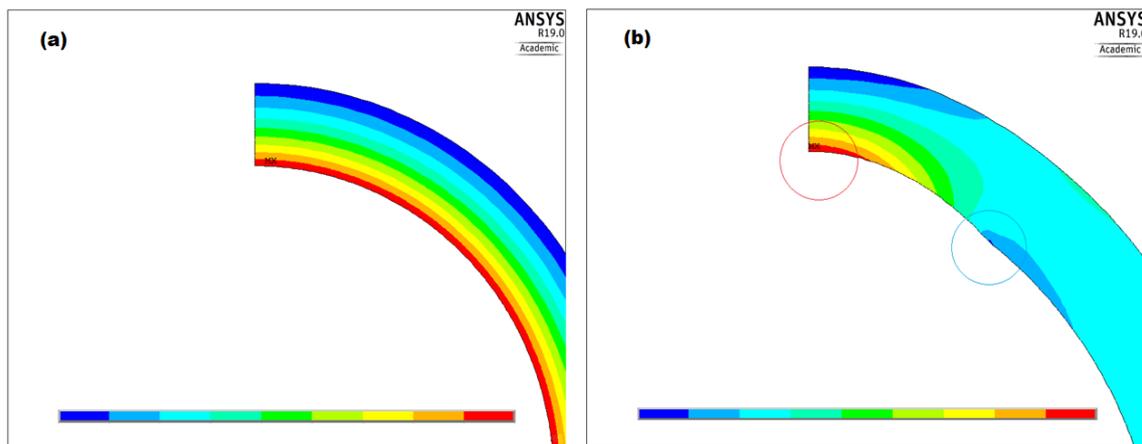
Figura 8 – Gráfico de nível de desgaste interno *versus* resistência ao colapso até o limite de ruptura.



Fonte: Autores (2019).

As tensões para o tubo perfeito distribuem-se de maneira axissimétrica ao longo da parede do tubo, conforme indicado na Figura 9 (a). Já para o tubo com desgaste as maiores tensões são verificadas no ponto mais profundo da região desgastada. Isso se dá devido ao surgimento de esforços de flexão acentuados nesta região, associados à concentração de tensões na região do desgaste, assim como ilustrado pela Figura 9 (b), sendo a região circulada em vermelho, na porção superior, o local de máxima tensão. Por outro lado, as tensões mínimas aparecem no vértice associado ao último ponto de contato da *tool joint*, na região circulada em azul.

Figura 9 – Detalhe das distribuições de tensão na região sem (a) e com desgaste (b).



Fonte: AUTORES (2019).

5. CONCLUSÕES

Os modelos de MEF desenvolvidos se mostraram adequados à análise de colapso em tubos espessos, considerando-se a validação do resultado para o tubo sem desgaste. Deve-se destacar aqui a limitação de aplicabilidade deste trabalho, no qual não considerou não linearidade geométrica, a qual é necessária à análise de tubos de paredes delgadas. A análise dos modelos desgastados possibilita uma visualização dos níveis de tensão equivalente de von Mises no local do desgaste, surgindo concentrações de tensões nos pontos mais profundos da região desgastada. São observadas as perdas mais acentuadas da resistência ao colapso dos tubos quando os desgastes se encontram na faixa de 0% e 6%, apresentando linearidade acima deste valor. Este estudo pode ser complementado, em trabalhos futuros, com a inclusão de análises de tubos de variadas esbeltezes de seção transversal, formas de desgaste, considerando outros graus de aço, com a inserção de imperfeições da seção transversal, como ovalização e excentricidade, bem como a consideração de modelos geometricamente não lineares para o estudo de pressão última em tubos esbeltos desgastados.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *API 7CW. Casing wear tests*. 1 ed. Washington D.C., 2015.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *API/TR 5C3. Technical report on equations and calculations for casing, tubing, and line pipe used as casing or tubing*. 1 ed. Washington, D.C., 2008.
- BOURGOYNE, A. T.; MILLHEIM, K. K.; CHENEVERT, M. E.; YOUNG, F.S. *Applied drilling engineering*. Richardson: Society of Petroleum. 1991.
- MOREIRA JUNIOR, N. *Análise experimental e numérica da resistência ao colapso dos tubos de revestimentos sob desgaste interno*. 2012. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reservatório e de Exploração) – LENEP/CCT/UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Macaé. 2012.
- TIMOSHENKO, S.; GERE, J. M. *Theory of elastic stability*. 2. ed. New York: McGraw Hill, p. 222-224, 1936.
- KURIYAMA, Y. et al. *Effect of wear and bending on casing collapse strength*. Society of Petroleum Engineers, 1992.

SAKAKIBARA, N.; KYRIAKIDES, S.; CORONA, E. *Collapse of partially corroded or worn pipe under external pressure.* International Journal of Mechanical Sciences, v. 50, n. 12, p. 1586-1597, 2008.

SAMUEL, R. et al. *Solving the Casing Wear Puzzle Using Stiff String Model.* Society of Petroleum Engineers, 2016.