

8. APLICAÇÃO DE MODELOS PARA PREVISÃO DA FORÇA DE CONTATO PIG / PARAFINA E COMPARAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No Capítulo 3 foi apresentado um modelo desenvolvido por pesquisadores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio para a previsão da força de remoção de parafina com pigs, conforme proposto por Souza Mendes et al (1999). Esse modelo sugere que a interação entre o pig e o depósito pode ocorrer de duas maneiras diferentes:

- pelo modo de carga 1 – o pig exerce uma força na face do depósito;
- pelo modo de carga 2 – o pig exerce uma força tangencial sobre o depósito.

O modelo proposto por Souza Mendes et al (1999) admite que o depósito de parafina é removido quando os esforços mecânicos transferidos pelo pig induzem um nível de tensão no depósito que supera a sua resistência ao cisalhamento.

Para determinação da resistência ao cisalhamento da parafina foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos da PUC-Rio um ensaio de compressão de um corpo de prova cilíndrico feito com a mesma parafina utilizada nos testes. O ensaio foi realizado com uma velocidade de compressão de 1,0 mm/min. Ao final do ensaio obteve-se o gráfico “Tensão x Deformação” para a parafina, conforme mostrado na Figura 57.

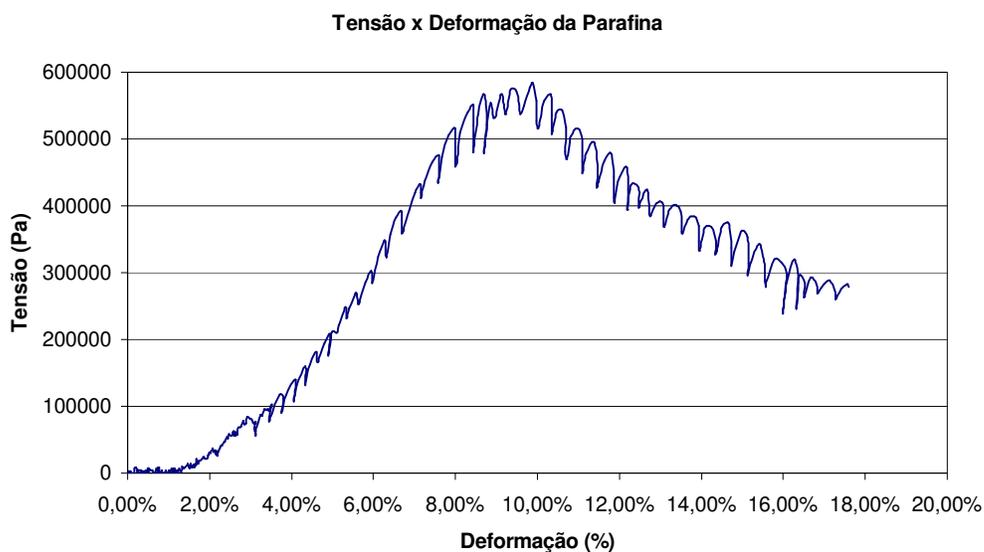


Figura 57 – Gráfico Tensão x Deformação da parafina

A força de ruptura medida no ensaio foi de 1500 N e o diâmetro do cilindro de parafina era de 57,45 mm. Como resultado do ensaio de compressão obteve-se o valor de 0,58 MPa para a resistência à compressão da parafina (S_y). Adotando-se o critério de Tresca pode-se obter a resistência ao cisalhamento da parafina (S_{sy}) por:

$$S_{sy} = S_y / 2$$

Logo:

$$S_{sy} = 0,29 \text{ MPa}$$

O valor acima foi utilizado na aplicação do modelo de Souza Mendes et al (1999), considerando ainda características dos pigs, do depósito e do tubo 6 polegadas.

8.1. Modelo para força de remoção de parafina – modo de carga 1

De acordo como modelo de Souza Mendes et al (1999), a interação do pig com o depósito pelo modo de carga 1 depende apenas da espessura do depósito adimensionalizada pelo diâmetro do tubo. Assim, a força para remoção da parafina, supondo que este modo de carga prevaleça, será a mesma para todos os pigs ensaiados. Essa força será avaliada a seguir.

Parâmetros de entrada:

- $D = 152,4$ mm (diâmetro do tubo)
- $t = 3,0$ mm (espessura do depósito)
- $A_{tubo} = 0,01824$ m² (área da seção transversal do tubo)

Considera-se a relação proposta por Souza Mendes et al (1999), mencionada anteriormente no item 3.3:

$$\frac{\tau_{\max}}{\Delta P} = 3,11 \left(\frac{t}{D} \right)^{-0,50} \quad \text{Eq. (11)}$$

Entrando com os valores de t e D obtém-se:

$$\frac{\tau_{\max}}{\Delta P} = 22,17$$

O diferencial de pressão mínimo necessário para remover o depósito é então obtido fazendo:

$$\tau_{\max} = S_{sy}$$

Então:

$$\frac{S_{sy}}{\Delta P_{\min}} = 22,17$$

Entrando com o valor medido para a resistência ao cisalhamento da parafina tem-se:

$$\Delta P_{\min} = 13083 \text{ Pa}$$

A força associada a esse diferencial de pressão mínimo é dada por:

$$F_{\min} = \Delta P_{\min} \cdot A_{tubo}$$

A força necessária para haver a remoção da parafina prevista pelo modelo para o modo de carga 1 será de:

$$F_{\min, \text{modo}1} = 24,0 \text{ kgf}$$

8.2. Modelo para força de remoção de parafina – modo de carga 2 – Pig de disco

Para o Pig de disco utilizou-se os seguintes parâmetros de entrada para avaliar a força de remoção de parafina segundo o modo de carga 2:

- $L = 8,93$ mm (espessura do disco)
- $D = 152,4$ mm (diâmetro do tubo)
- $t = 3,0$ mm (espessura do depósito)
- $A_{tubo} = 0,01824$ m² (área da seção transversal do tubo)
- $\eta = 0,4$ (coeficiente de atrito)

Tomando-se os valores de t/D e L/D , e entrando com esses valores na Tabela 3 para $\eta = 0.4$ (Souza Mendes et al, 1999) apresentada no item 3.4, obtem-se o valor de:

$$\frac{\tau_{\max}}{\Delta P} = 7,4537$$

O diferencial de pressão mínimo necessário para remover o depósito é então obtido fazendo:

$$\tau_{\max} = S_{sy}$$

Então:

$$\frac{S_{sy}}{\Delta P_{\min}} = 7,4537$$

Entrando com o valor medido para a resistência ao cisalhamento da parafina tem-se:

$$\Delta P_{\min} = 38907 \text{ Pa}$$

A força associada a esse diferencial de pressão mínimo é dada por:

$$F_{\min} = \Delta P_{\min} \cdot A_{tubo}$$

A previsão do modelo pelo modo de carga 2 da força que o pig de disco precisaria exercer sobre o depósito para promover sua remoção é de:

$$F_{\text{mim disco, modo2}} = 72,0 \text{ kgf}$$

8.3. Modelo para força de remoção de parafina – modo de carga 2 – Pig de espuma

Para o Pig de espuma foram utilizados os seguintes parâmetros de entrada para avaliar a força de remoção de parafina segundo o modo de carga 2:

- $L = 220$ mm (comprimento do pig)
- $D = 152,4$ mm (diâmetro do tubo)
- $t = 3,0$ mm (espessura do depósito)
- $A_{tubo} = 0,01824$ m² (área da seção transversal do tubo)
- $\eta = 0,4$ (coeficiente de atrito)

Tomando-se os valores de t/D e L/D , e entrando com esses valores na Tabela 3 para $\eta = 0.4$ (Souza Mendes et al, 1999) apresentada no item 3.4, obtém-se o valor de:

$$\frac{\tau_{\max}}{\Delta P} = 0,317$$

O diferencial de pressão mínimo necessário para remover o depósito é então obtido fazendo:

$$\tau_{\max} = S_{sy}$$

Então:

$$\frac{S_{sy}}{\Delta P_{\min}} = 0,317$$

Entrando com o valor da resistência ao cisalhamento da parafina tem-se:

$$\Delta P_{\min} = 914826 \text{ Pa}$$

A força associada a esse diferencial de pressão mínimo é dada por:

$$F_{\min} = \Delta P_{\min} \cdot A_{tubo}$$

A previsão do modelo pelo modo de carga 2 da força que o pig de disco precisaria exercer sobre o depósito para promover sua remoção é de:

$$F_{\text{mim RS-7,modo2}} = 1701,0 \text{ kgf}$$

Esse elevado valor obtido deve-se à grande área de contato entre o pig de espuma e a parafina no modo de carga 2.

8.4. Modelo força de remoção de parafina – modo de carga 2 – Pig de espuma com raspadores

O modelo desenvolvido por Souza Mendes et al (1999) não considera a presença de raspadores na superfície do pig. Assim, no presente trabalho as forças foram calculadas como no caso anterior sem raspadores, obtendo-se o mesmo valor para a força necessária para a remoção da parafina, qual seja:

$$F_{\text{mim RRR-7, modo2}} = 1701,0 \text{ kgf}$$

8.5. Modelo para f de remoção de parafina – modo de carga 2 – Pig de copo

Para o Pig de copo Vantage a força necessária para a remoção do depósito de parafina, supondo-se a existência da situação representada pelo modo de carga 2, foi avaliada utilizando-se os seguintes parâmetros de entrada:

- $L = 27$ mm (largura do copo)
- $D = 152,4$ mm (diâmetro do tubo)
- $t = 3,0$ mm (espessura do depósito)
- $A_{tubo} = 0,01824$ m² (área da seção transversal do tubo)
- $\eta = 0,4$ (coeficiente de atrito)

Tomando-se os valores de t/D e L/D , e entrando com esses valores na Tabela 3 para $\eta = 0.4$ (Souza Mendes et al, 1999) apresentada no item 3.4, obtém-se o valor de:

$$\frac{\tau_{\max}}{\Delta P} = 2,5048$$

O diferencial de pressão mínimo necessário para remover o depósito é então obtido fazendo:

$$\tau_{\max} = S_{sy}$$

Então:

$$\frac{S_{sy}}{\Delta P_{\min}} = 2,5048$$

Entrando com o valor da resistência ao cisalhamento da parafina tem-se:

$$\Delta P_{\min} = 115778 \text{ Pa}$$

A força associada a esse diferencial de pressão mínimo é dada por:

$$F_{\min} = \Delta P_{\min} \cdot A_{tubo}$$

A previsão do modelo pelo modo de carga 2 da força que o pig de disco precisaria exercer sobre o depósito para promover sua remoção é de:

$$F_{\min \text{ copo, modo2}} = 215,0 \text{ kgf}$$

8.6. Comparação entre as previsões dos modelos e os resultados experimentais

Esta seção foi preparada com o intuito de facilitar a realização de uma análise crítica da capacidade dos modelos disponíveis na literatura para prever tanto a força de contato entre o pig e a parede de um tubo, quanto os modelos para previsão da força necessária para a remoção de depósitos de parafina.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados obtidos no presente trabalho e as previsões apresentadas pelo Simulador PIGSIM, que utiliza os modelos para forças de contato pig/tubo, conforme descrito no Capítulo 7. A Tabela apresenta para cada tipo de pig ensaiado o valor medido da força de contato pig/tubo, o chamado caso base, e as previsões dos modelos. Com o objetivo de melhor avaliar os modelos, estão incluídos também na Tabela dados do trabalho de Barroso (2003) realizado com pigs de 3 polegadas de diâmetro, com depósitos de 4 mm de espessura.

Tabela 5 – Comparação entre Experimentos e Modelos – Caso Base

Tipo de Pig	Força Experimental (kgf)	Força Modelo (kgf)
Disco 6"	37	39
Espuma Liso 6"	53	56
Espuma c/ Raspador 6"	62	58
Copo Vantage 6"	150	-
Disco 3"	80	86
Espuma 3"	55	54
Copo 3"	100	-

Uma observação dos resultados apresentados na Tabela 5 mostra claramente que os modelos desenvolvidos produzem excelentes previsões das forças de contato entre diferentes tipos de pigs e tubos. Para pigs de copo não estão disponíveis na literatura modelos simples para a previsão da força de contato.

A Tabela 6 resume os resultados do presente trabalho e aqueles obtidos por Barroso (2003) para pigs de 3 polegadas, no que diz respeito à previsão das forças necessárias para a remoção de depósitos de parafina. Na Tabela são apresentados os tipos de pigs ensaiados, o valor do *oversize* para referência, a eficiência de remoção alcançada com uma passagem do pig, assim como as previsões do modelo de Souza Mendes et al (1999) assumindo modos de carga 1 e 2. Para facilitar a discussão, é apresentada também na Tabela uma coluna contendo os valores de força medidos para o caso base sem parafina.

Tabela 6 – Comparação entre Experimentos e Modelos – Força de Remoção

Tipo de Pig	Oversize (%)	Eficiência Remoção (%)	Força Caso Base Exp.(kgf)	Força c/ Parafina Exp. (kgf)	Força sobre o depósito (kgf)	Força Modo Carga 1 (kgf)	Força Modo Carga 2 (kgf)
Disco 6"	3,8	1	37	58	58 (2)	24	72
Espuma Liso 6"	5,6	30	53	86	86 (2)	24	1700
Espuma 6" com Raspador	6,0	67	62	92	92 (2)	24	1700
Copo Vantage	7,3	100	150	175	25 (1)	24	215
Disco 3"	6,0	100	80	134	54 (1)	8,8	23
Espuma 3"	6,0	30	55	190	190 (2)	8,8	450
Copo 3"	6,0	100	100	135	35 (1)	8,8	31

A análise dos resultados apresentados na Tabela 6 não é tão direta como a que foi feita no caso dos resultados das previsões para as forças de interação pig/tubo. Em seu trabalho, Barroso (2003) propôs subtrair da força medida com a presença da parafina a força do caso base pertinente, de modo a isolar a força necessária para quebrar o depósito. Essa força seria então comparada com as previsões do modelo, seja ele baseado na interação do tipo modo de carga 1 ou 2.

Uma análise mais detalhada nos levou a concluir que, esse procedimento deve ser seguido apenas no caso de interações que

consideram o modo de carga 1. Por hipótese, neste modo de carga o pig está mantendo contato com a parede do tubo e apenas sua face interage com o depósito de parafina. Assim, a força realizada sobre o depósito para removê-lo seria realmente a diferença entre a força total medida e a força de interação com a parede. Já para o caso do modo de carga 2, a hipótese básica é que o pig está posicionado por sobre o depósito. Desse modo, a força total realizada pelo guincho quando traciona o pig é transmitida integralmente ao depósito. Não vemos, portanto, razão para, nesse caso, subtrair a força referente ao caso base.

Baseado nos argumentos do parágrafo anterior, foi incluída na Tabela 6 uma coluna intitulada *Força sobre o Depósito* onde, dependendo do tipo de interação esperado para o pig com a parafina, a força sobre o depósito foi calculada ora subtraindo-se o valor da força do caso base (modo de carga 1), ora sem subtrair a força do caso base (modo de carga 2). O tipo de interação adotado está indicado entre parêntesis na coluna ao lado do valor calculado, pelos algarismos 1 ou 2.

A comparação que pode ser realizada com os dados da Tabela 6 deve ser limitada a uma comparação entre o valor relativo entre as previsões do modelo para as forças necessárias para remover o depósito e as forças experimentais exercidas sobre o depósito. Dependendo de qual valor seja maior, deve-se verificar a eficiência de remoção obtida no experimento.

Para o caso do pig de disco de 6 polegadas, supôs-se uma interação do tipo 2 pois os discos utilizados eram bastante flexíveis. Nesse caso, a força exercida experimental era de 58 kgf, enquanto o modelo previa uma força mínima de 72 kgf para remoção. A eficiência de remoção de apenas 1% corrobora a previsão do modelo.

Para os pigs de espuma (liso de 6 polegadas, com raspador de 6 polegadas e liso de 3 polegadas) foi também admitida uma interação do tipo modo de carga 2. Em todos esses casos as forças experimentais medidas estão abaixo do valor mínimo previsto pelo modelo. As eficiências de remoção obtidas experimentalmente são baixas, corroborando as previsões.

O modo de carga do tipo 1 foi admitido para os pigs de copo Vantage de 6 polegadas e o de 3 polegadas, assim como para o pig de disco de 3 polegadas que apresentava alta rigidez. Como pode ser observado na Tabela, as forças experimentais exercidas sobre os depósitos por cada um destes pigs foram sempre superiores aos valores mínimos previstos pelo modelo para o modo de carga 1. Uma observação das eficiências atingidas para cada um destes casos mostra valores de 100%, o que valida o modelo.