

5 Resultados de Fadiga

5.1

Método Proposto

A tensão alternada equivalente, calculada pela Eq. (3.1), se refere à tensão de von Mises cujos parâmetros de entrada são as componentes alternadas em cada ciclo.

$$\sigma_{aVM} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_{a11} - \sigma_{a22})^2 + (\sigma_{a11} - \sigma_{a33})^2 + (\sigma_{a22} - \sigma_{a33})^2 + 6(\tau_{a12}^2 + \tau_{a23}^2 + \tau_{a13}^2)]^{0,5} \quad [3.1]$$

As tensões equivalentes de von Mises alternadas em todos os 7930 nós para os tubos 7e 8 são apresentados na Fig. (5.1).

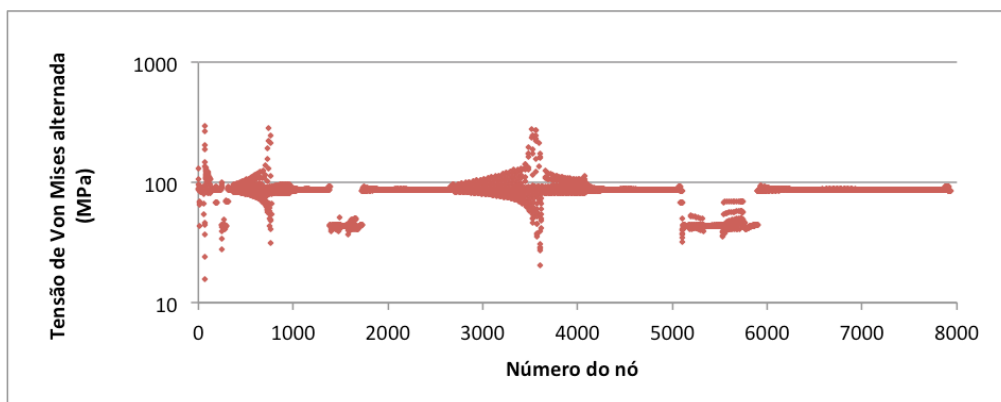


Fig. (5.1) – Tensão alternada de von Mises, casos 7 e 8

O nó 71 possui a maior tensão alternada (296 MPa), porém é necessário o cálculo da tensão média para que seja encontrado o ponto de menor resistência à fadiga com relação à tensão equivalente alternada segundo Gerber.

A tensão média equivalente de von Mises apresentada na Eq. (3.5), e o resultado seu resultado para todo o modelo é mostrado na Fig. (5.2).

$$\sigma_{mVM} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_{m11} - \sigma_{m22})^2 + (\sigma_{m11} - \sigma_{m33})^2 + (\sigma_{m22} - \sigma_{m33})^2 + 6(\tau_{m12}^2 + \tau_{m23}^2 + \tau_{m13}^2)]^{0,5} \quad [3.5]$$

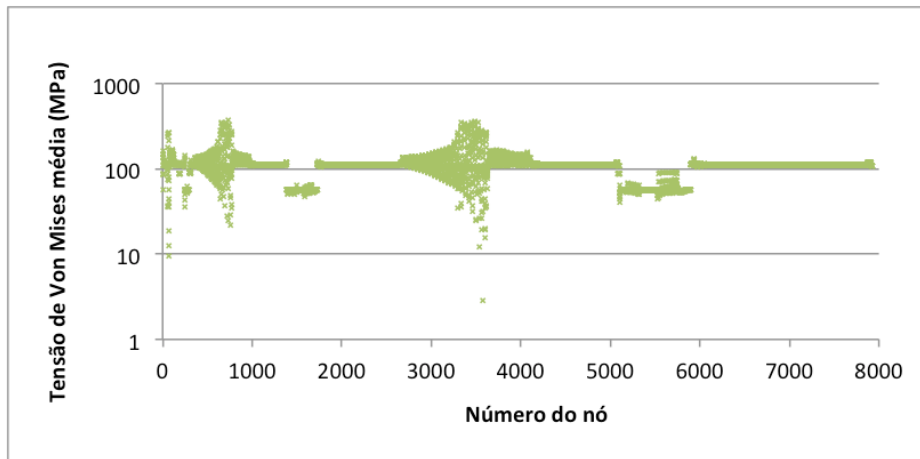


Fig. (5.2) – Tensão média de von Mises, tubos 7 e 8

O nó que apresenta maior valor de tensão média é o 728 no seu valor é de 374 MPa.

A curva de fadiga de Woller é apresentada na Eq. (3.9), com seus parâmetros definidos no capítulo 3. A influência da tensão média, levada em conta através da parábola de Gerber, indica uma vida:.

$$N_{Gerber} = C \left[\frac{\sigma_{aVM}}{1 - \left(\frac{\sigma_{mVM}}{\sigma_u} \right)^2} \right]^{-B} \quad [3.9]$$

A vida a fadiga de todos os nós do modelo de Elementos Finitos é mostrada na Fig. (5.3) nos tubos 7-8. O menor valor de vida ocorre no nó 71, com valor N igual a 20658 ciclos.

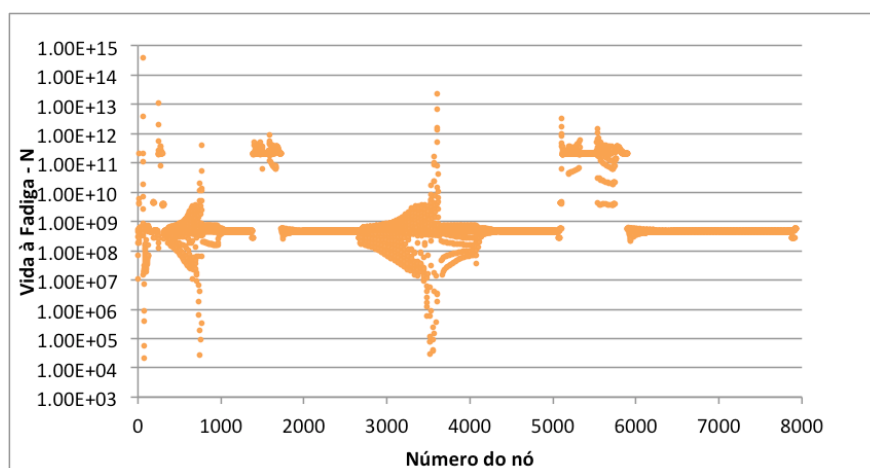


Fig. (5.3) – Previsão de vida, casos 7 e 8

Os parâmetros de cálculo e a vida à fadiga nos pontos críticos dos demais casos, para os pontos críticos de cada caso, são mostrados na Tab. (5.1). Deve-se ressaltar que o tubo 7 teve a iniciação de trinca fora da mocha, sendo marcado com asterisco.

Tab. (5.1) - Parâmetros de cálculo e a vida à fadiga segundo Silva, 2012

	σ_{aVM} (MPa)	σ_{mVM} (MPa)	N_{Gerber}	N1	N2
7-8	296	40	20658	21103*	28211
9-10	324,6	20,41	9730	6825	9116
11-12	292,09	42,33	22979	15063	27575
13-14	412,6	96,82	10342	13262	15065
15-16	473,36	31	4006	4035	4684
17-18	405,08	88,19	12206	11415	15949

Observa-se que em todos os casos a tensão alternada é significativamente maior que a tensão média e também a proximidade entre os valores calculados e a vida dos espécimes experimentais.

A forma de cálculo de fadiga é determinística enquanto os testes experimentais possuem uma incerteza inerente aos testes de fadiga. As distâncias entre as previsões do presente método e os respectivos resultados experimentais na maior parte dos casos é menor que a própria dispersão dos dados

experimentais, o que mostra um bom nível de acurácia do método para as condições avaliadas. Comentários sobre a dispersão experimental de testes de fadiga encontram-se no apêndice B.

Nos casos 9-10 e 15-16, as pressões iniciais correspondem a 80% SMYS, que conferem um menor arredondamento da mocha, e consequentemente um maior FCT. Esse fato explica um número de ciclos menor em comparação com os demais.

No tubo A, a diferença entre os casos 7-8, e 11-12 é o diâmetro do indentador, que não aparenta diferença significativa nos resultados, e isso se reflete nas previsões. O mesmo se reflete no tubo B entre os casos 13-14 e 17-18.

A Figura (5.4) apresenta a correlação entre os valores previstos (eixo vertical) e os resultados experimentais (eixo horizontal), para o método proposto nos 6 casos avaliados.

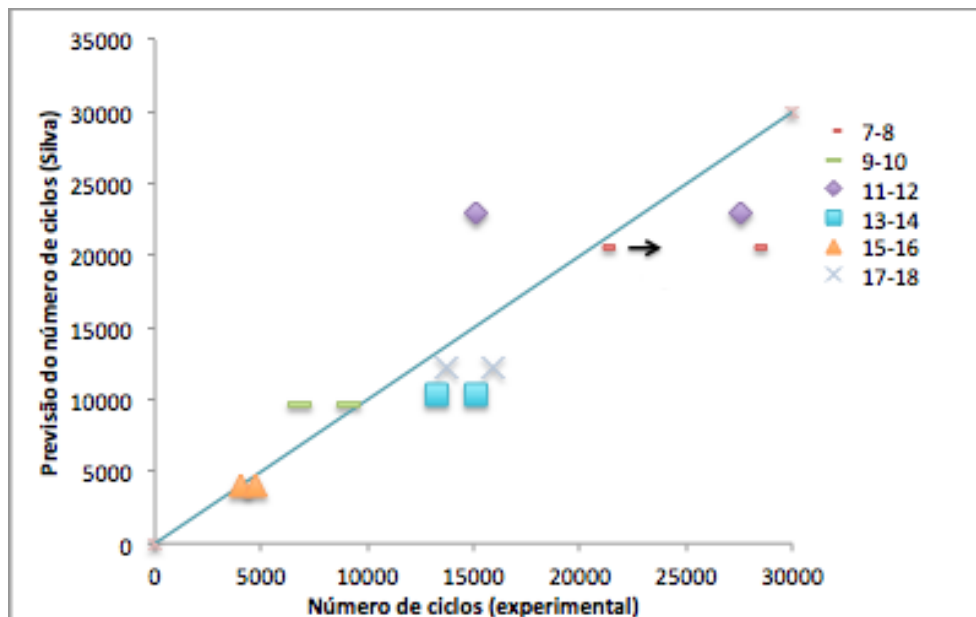


Fig. (5.4) – Comparação entre previsão pelo método Silva e resultados experimentais

Pode-se observar que, em termos de ordem de grandeza, a maioria dos pontos de previsão encontram-se muito próximas do resultado experimental. Pode-se observar que o espécime 8 é o que mais se afasta do resultado experimental, e o tubo 12 também apresenta uma previsão muito abaixo do valor de laboratório, mas deve-se observar a dispersão entre ambos os valores experimentais deste caso em torno do valor experimental.

5.2

Método de Cunha

O número de ciclos segundo esse método é dado pela Eq. (3.18), sendo seus parâmetros definidos no capítulo 3.

$$N = \left[\frac{\sigma_a}{F_f \cdot C \left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{F_s \sigma_u} \right)^2 \right)} \right]^{\frac{1}{b}} \quad [3.18]$$

As tensões média e alternada, assim como os demais parâmetros foram calculados conforme está descrito na seção 3.4. O fator de concentração de tensões, calculado a partir da profundidade da mocha, modifica o limite de vida à fadiga. O valor do FCT é mostrado na Eq. (2.13)

$$K_t = 2.40 + 0.737 \cdot B \quad [2.13]$$

onde

$$B = \left(\frac{d}{D} \right) \cdot \left(\frac{D}{t} \right)^{1.14} \quad [2.12]$$

O número de ciclos previsto para os tubos avaliados, as profundidades das mochas e os K_t 's são indicados na Tabela [5.2].

Tab. (5.2) - Parâmetros de cálculo e a vida à fadiga segundo Cunha et. al.

	H (mm)	K_t	N	N1	N2
7-8	15,4	5,04	5770	21103*	28211
9-10	21,7	6,12	3572	6825	9116
11-12	14,5	4,89	6264	15063	27575
13-14	15,9	4,78	3168	13262	15065
15-16	21,6	5,64	2177	4035	4684
17-18	15	4,65	3394	11415	15949

A comparação entre as previsões do método e os dados experimentais é mostrada na Fig. (5.5) e mostra todas as previsões na condição conservadora.

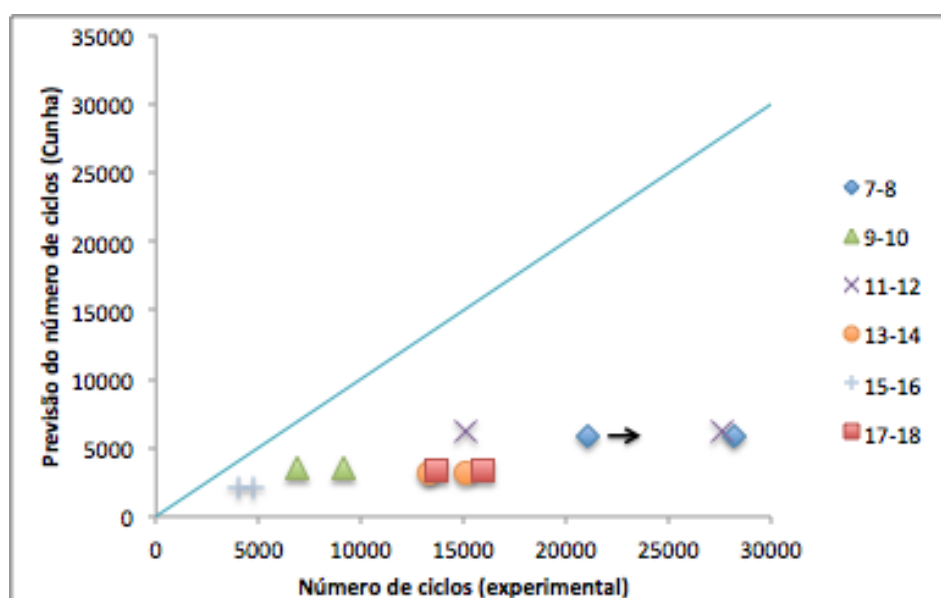


Fig. (5.5) – Comparação entre previsão pelo método Cunha e resultados experimentais

Observa-se que todas as previsões encontram-se no lado da segurança, e que alguns valores possuem uma grande diferença em relação aos experimentais. O cálculo do FCT em função da profundidade remanescente da moesa permite ao método acompanhar a tendência de aumento ou redução do número de ciclos entre os casos, o que mostra a possibilidade do uso para análises comparativas.

5.3

Método de Ávila

O número de ciclos calculado segundo o método é calculado segundo a Eq. (3.9).

$$N_{Gerber} = C \left[\frac{\sigma'_a}{1 - \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma_u} \right)^2} \right]^{-B} \quad [3.9]$$

As componentes alternada e média são calculadas respectivamente pelas Eqs. (3.17) e (3.18).

$$\sigma'_a = \frac{\sigma'_{max} - \sigma'_{min}}{2} \quad [3.17]$$

$$\sigma'_m = \frac{\sigma'_{max} + \sigma'_{min}}{2} \quad [3.18]$$

O número de ciclos encontrado neste método de cálculo para o problema apresentado e os respectivos resultados experimentais são mostrados na Tab. (5.3).

Tab. (5.3) - Parâmetros de cálculo e a vida à fadiga de acordo com a referência Ávila, 2007

	σ'_a (MPa)	σ'_m (MPa)	N_{Gerber}	N1	N2
7-8	383	31,9	2355	21103*	28211
9-10	407,2	21,2	1425	6825	9116
11-12	376,2	37,4	2730	15063	27575
13-14	527,3	99,3	1536	13262	15065
15-16	595,3	27,0	681	4035	4684
17-18	514,2	92,4	1900	11415	15949

A Figura (5.6) é a comparação gráfica entre as previsões do critério e os dados de laboratório.

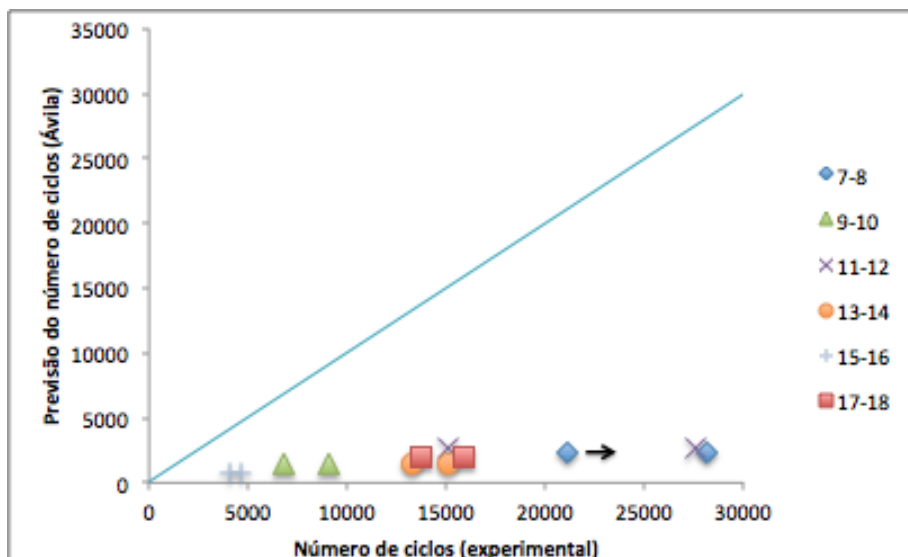


Fig. (5.6) – Comparação entre previsão pelo método Ávila e resultados experimentais

Os pontos encontrados indicam valores tendendo para o lado conservador, e embora a fórmula de cálculo se assemelhe à da seção 5.1, as tensões alternadas são sempre maiores que aquele critério, fato este que deriva da diferença conceitual do cálculo das tensões alternadas e médias equivalentes.

5.4

PDAM

O número de ciclos para fadiga segundo o PDAM [18] é mostrado na Eq. (3.25)

$$N = 1000 \left[\frac{(\sigma_U - 50)}{2\sigma_A K_S} \right] \quad [3.25]$$

Os valores das previsões de vida contra valores experimentais são apresentados na Tab. (5.4). Os fatores de concentração de tensão são dados em função das profundidades de mossa remanescentes, mossa mais profundas possuem maiores FCT's e isso se reflete nas vidas calculadas e observadas nas amostras 9-10 e 15-16.

Tab. (5.4) - Parâmetros de cálculo e a vida à fadiga segundo PDAM

	H _r (mm)	N	N1	N2
7-8	15,4	5782	21103*	28211
9-10	21,7	2770	6825	9116
11-12	14,5	6580	15063	27575
13-14	15,9	4072	13262	15065
15-16	21,6	2110	4035	4684
17-18	15	4614	11415	15949

A comparação gráfica entre as previsões segundo o PDAM e os resultados observados são apresentados na Fig. (5.7) e mostram valores na condição segura mesmo sem o uso do fator de confiabilidade recomendado na referência [19]. Para os casos apresentados, as previsões de vida encontram-se próximos aos calculados segundo o método da seção 5.2.

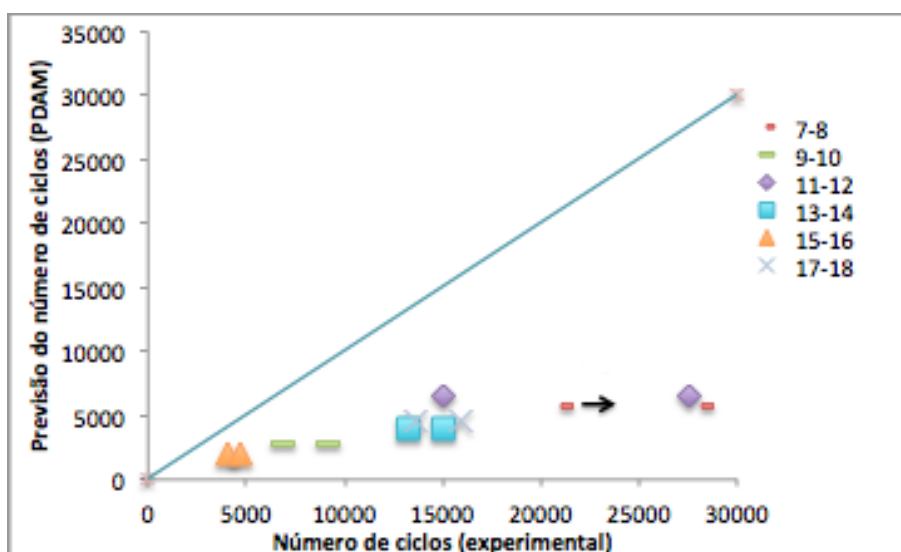


Fig. (5.7) – Comparação entre previsão pelo método PDAM e resultados experimentais

5.5

API 579 NÍVEL 2

O método adotado na norma API 579 nível 2 [22] para dutos com mochas. O número de ciclos estimados e seus parâmetros são apresentados na Eq. (3.30).

$$N = 5622 \left[\frac{\sigma_U}{2\sigma_A K_d} \right]^{5.26} \quad [3.30]$$

As previsões versus valores encontrados experimentalmente estão presentes na Tab. (5.5). As previsões do método que, assim como no PDAM, possuem seus FCT's em função das profundidades de mocha acompanham as tendências dos valores medidos, embora estimem vidas uma ordem de grandeza abaixo desses resultados.

Tab. (5.5) - Parâmetros de cálculo e a vida à fadiga de acordo com API 579

	H _r (mm)	N	N1	N2
7-8	15,4	1418	21103*	28211
9-10	21,7	567	6825	9116
11-12	14,5	1649	15063	27575
13-14	15,9	1098	13262	15065
15-16	21,6	481	4035	4684
17-18	15	1276	11415	15949

A Figura (5.8) mostra o gráfico de comparação que confirma a tendência ao conservadorismo das previsões mesmo sem o uso do fator de confiabilidade recomendado. O cálculo não inclui o fator de confiabilidade recomendado pela norma.

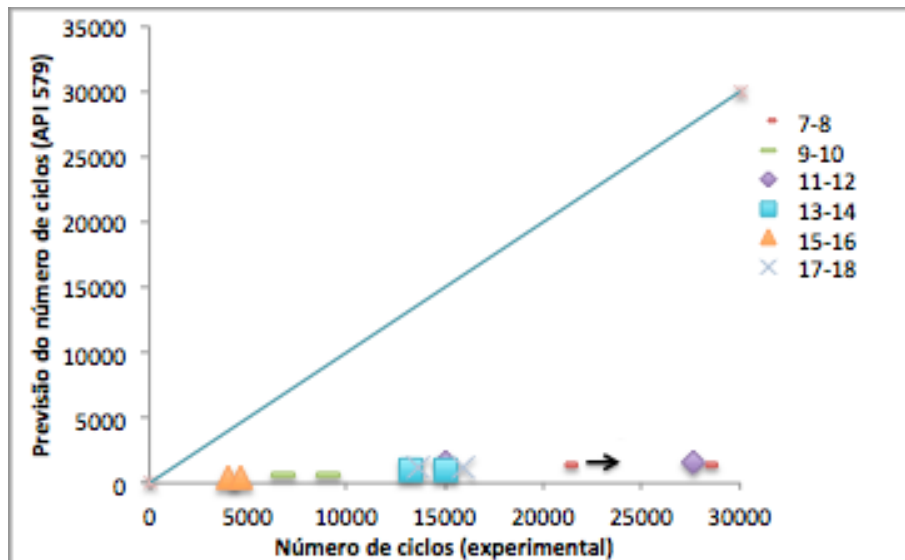


Fig. (5.8) – Comparação entre previsão pelo método API 579 [22] e resultados experimentais

5.6

API 579 N3 / ASME Sec VIII div. 2

A curva de fadiga é dada pela Eq.(3.38). Os demais parâmetros estão presentes nas Eqs. (3.39) a (3.42).

$$N = 10^x \quad [3.38]$$

$$x = \frac{C_1 + C_3 Y + C_5 Y^2 + C_7 Y^3 + C_9 Y^4 + C_{11} Y^5}{1 + C_2 Y + C_4 Y^2 + C_6 Y^3 + C_8 Y^4 + C_{10} Y^5} \quad [3.39]$$

O coeficiente Y é dado em função da tensão alternada, que por sua vez é uma tensão equivalente de von Mises calculada a partir da alternada de cada componente de tensão e de deformação.

$$Y = \left(\frac{S_a}{C_{us}} \right) \left(\frac{E}{E_T} \right) \quad [3.40]$$

$$S_a = \frac{E}{2} \varepsilon_{eff} \quad [3.41]$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\sigma_{aVM}}{E} \cdot \varepsilon_{EP} \quad [3.42]$$

A tensão alternada de cada nó do modelo numérico no segundo ciclo de pressão interna é mostrado na Fig.(5.9), e mostra o maior valor de tensão no nó 71 e tem valor de 383.8 MPa.

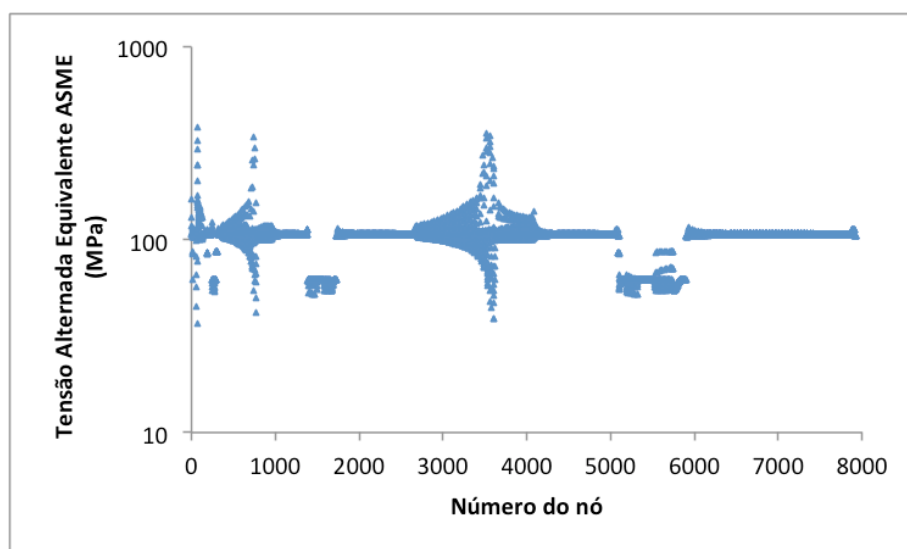


Fig. (5.9) – Tensão alternada de método ASME [18 e 21], casos 7 e 8

O número de ciclos calculado por meio deste método é de 3075 ciclos. A Tab. (5.6) mostra para todos os casos avaliados as tensões alternadas e os números de ciclos medidos e calculados pelo método.

Tab. (5.6) - Parâmetros de cálculo e a vida à fadiga segundo ASME, 2010

	S_a (MPa)	N	N1	N2
7-8	383,8	3075	21103*	28211
9-10	458,3	1831	6825	9116
11-12	376,1	3276	15063	27575
13-14	542,2	1138	13262	15065
15-16	633,3	745	4035	4684
17-18	526,3	1236	11415	15949

A tensão média neste método é levada em conta de forma conservadora, assim como o ajuste da curva de fadiga que foi feito no sentido de aumentar ao

máximo a confiabilidade. Tais motivos tornam as previsões muito abaixo de valores experimentais, o que condiz com o conservadorismo esperado de uma norma técnica.

A Figura (5.10) mostra a comparação entre valores numéricos e experimentais que apresentam de forma gráfica os resultados. Esses resultados confirmam a tendência observada. Os valores calculados são mais próximos dos experimentais que os calculados no método API 579 nível 2 [22] (primeira abordagem recomendada pela norma), o que se justifica uma vez que é realizada uma análise mais detalhada das tensões, geometria da mocha, e se utilizam tensões reais ao invés das nominais.

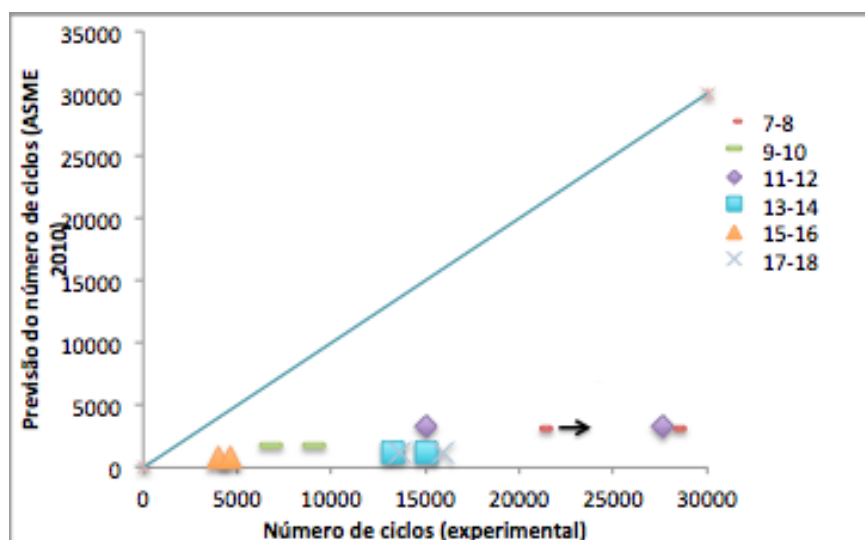


Fig. (5.10) – Comparação entre previsão pelo método ASME 2010 [19 e 22] e resultados experimentais

5.7

API 1156

A curva de fadiga indicada na Eq. (3.51), utiliza a pressão como dado de entrada em unidades inglesas (psi)

$$N_{API1156} = e^{43.944 - 2.97 \ln \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \sigma}{\Delta p} \right) \Delta p \right]} \quad [3.51]$$

O número de ciclos para iniciação de trincas nos métodos avaliados é apresentado na Tab. (5.7), assim como a previsão do método e o número de ciclos da referência [31]

Tab. (5.7) - Parâmetros de cálculo e a vida à fadiga segundo API 1156

	ΔP (%SMYS)	N	N1	N2
7-8	70	105400	21103*	28211
9-10	70	63400	6825	9116
11-12	70	114506	15063	27575
13-14	70	29157	13262	15065
15-16	70	18469	4035	4684
17-18	70	31612	11415	15949

O gráfico comparativo da Fig. (5.11) mostra que, para o método, as previsões são não conservadoras em todos os casos analisados. Os tubos 13 a 18 possuem uma relação D/t de 68, mesma característica dos tubos usados na validação do método [19], os resultados nesses casos apresentam um comportamento semelhante ao apresentado na Fig. (2.13). Os tubos 7 a 12 possuem uma relação D/t de 77, fora da faixa de calibração da equação, e por isso os resultados foram demasiadamente acima dos experimentais.

As vidas previstas pelo presente método são uma ordem de grandeza acima das previstas na seção 5.6. devido à ausência dos fatores de segurança adotados nesse método, e o fato de a equação que calcula o fator de concentração de tensões ter sido ajustada para diferentes valores da relação D/t.

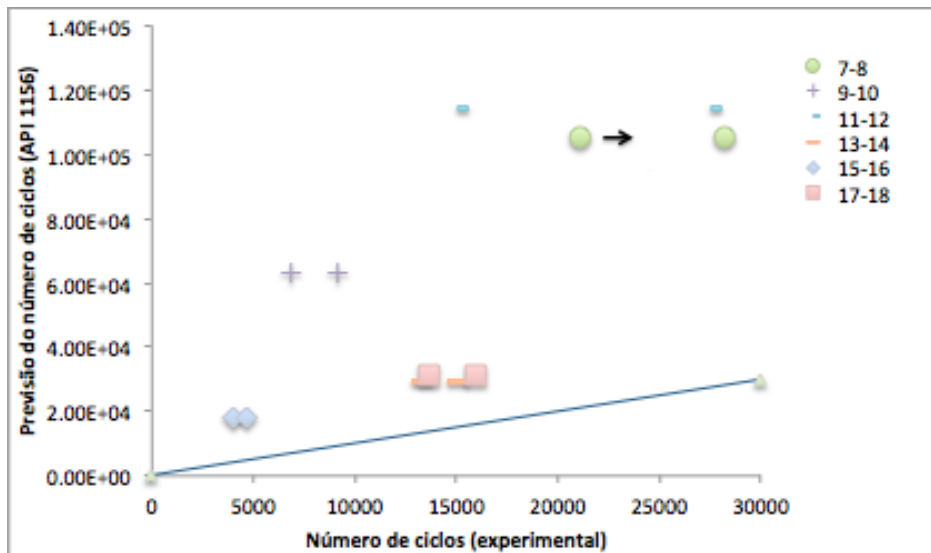


Fig. (5.11) – Comparação entre previsão pelo relatório API 1156 [11] e resultados experimentais

5.8

CENPES

A Eq. (3.56) apresenta o cálculo do número de ciclos para fadiga do método proposto em [2].

$$N = 10^{17.784} \left(\frac{\Delta S_T}{2} \right)^{-2.97} \quad [3.53]$$

As tensões alternadas segundo o critério de tresca dos casos 7-8, mostradas na Fig. (5.12), indicam o maior valor no nó 71, com valor de 418 MPa. Os demais modelos possuem resultados correspondentes ao apresentado.

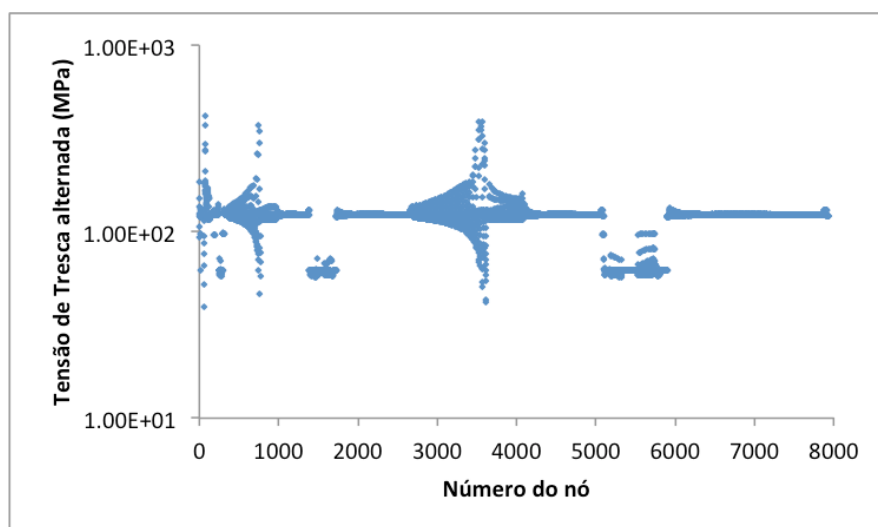


Fig. (5.12) – Tensão alternada de método Tresca, casos 7 e 8

As tensões alternadas do método, e as vida à fadiga numéricas e experimentais são compiladas na Tab. (5.8).

Tab. (5.8) - Parâmetros de cálculo e a vida à fadiga por CENPES, 2009

	$\frac{\Delta S_T}{2}$	N	N1	N2
7-8	418	3797	21103*	28211
9-10	459	2876	6825	9116
11-12	413	3936	15063	27575
13-14	583	1414	13262	15065
15-16	669	939	4035	4684
17-18	572	1496	11415	15949

Pode-se observar na Fig. (5.13) que os valores são compatíveis com os apresentados na seção 5.6. Pelo fato de as tensões alternadas serem calculadas segundo o critério de Tresca, as tensões são mais altas e as vidas mais baixas que aquele critério.

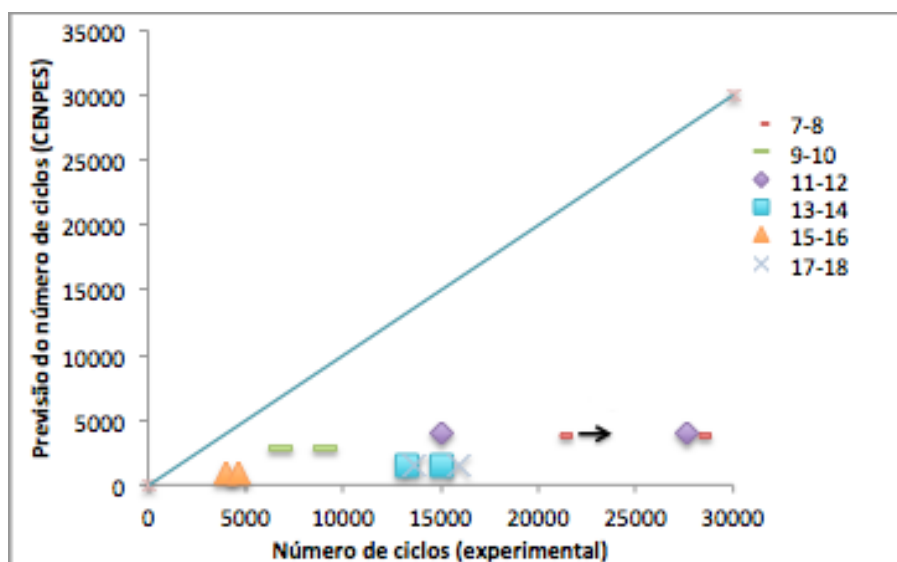


Fig. (5.13) – Comparação entre previsão pelo método CENPES e resultados experimentais