



Teste de Movimentação de Juntas de Expansão de Grande Porte

Trabalho Técnico premiado no X ENCAT*



Resumo

O presente trabalho tem por objetivo apresentar os resultados obtidos nos ensaios de movimentação realizados em juntas de expansão metálicas corrugadas de grande porte utilizadas em dutos de sistemas de Turboexpansor. Um mecanismo de teste foi desenvolvido para realizar os ensaios. Para aquisição dos dados foi utilizado um dinamômetro e os ensaios foram realizados em juntas tipo cardânica. As juntas foram pressurizadas com água para a realização do teste. Foram compilados dados sob pressão de projeto, operação e com pressão atmosférica. As juntas foram movimentadas do ângulo para o qual foram projetadas, 3° e 6°. As reações correspondentes a cada passo de movimentação foram registradas durante o processo de carregamento e posteriormente durante o descarregamento. Os testes permitiram confirmar que as juntas testadas não apresentaram interferência oriunda do processo de fabricação, constituindo um procedimento adequado de aceitação. Foi possível constatar a relevância da influência da pressão interna no cálculo das reações durante a movimentação das juntas, fato não considerado nos cálculos teóricos apresentados na EJMA. A influência do atrito nas rótulas das juntas mostrou-se significativo indicando que esse efeito deve ser considerado no projeto de tubulações e deve ser mitigado utilizando dispositivos de redução de atrito.

1. Introdução

Juntas de expansão (JE) são elementos de tubulação responsáveis por absorver dilatações térmicas diferenciais no sistema de tubulação, reduzindo os esforços no sistema e nos bocais de equipamentos a ele conectados. São especialmente utilizadas em:

- Sistemas cujo espaço disponível for insuficiente para se ter um traçado da tubulação com flexibilidade adequada;
- Serviços de baixa responsabilidade (condensado, vapor de baixa pressão, água quente, entre outros), quando a junta representar uma alternativa mais econômica em relação ao traçado não retilíneo da tubulação;
- Tubulações de diâmetro grande (acima de 20") ou de material caro, onde haja interesse econômico de um traçado mais curto;
- Tubulações que por exigência do serviço precisam ter traçados retilíneos;
- Tubulações sujeitas a vibrações de grande amplitude, ou ligadas a equipamentos cujos esforços admissíveis sejam muito pequenos.

Na indústria do petróleo juntas de expansão são comumente utilizadas. Em plantas industriais há diversos equipamentos sensíveis que requerem da utilização de juntas de expansão. Um destes equipamentos é o Turboexpansor ("Turboexpander") responsável pela geração de energia

elétrica a partir dos gases quentes efluentes do regenerador da unidade de craqueamento catalítico fluido (FCC). Esses gases têm temperaturas de operação que variam de 650° C a 760° C e pressões internas em torno de 3,0 kgf/cm². Com o intuito de otimizar o consumo energético nas refinarias existem vários empreendimentos de implantação de Turboexpansores em andamento.

Devido à severidade de serviço, o sistema de tubulações do Turboexpansor é, normalmente, de aço inoxidável austenítico 304H, material que apresenta um alto custo em seu uso, e requer espessuras de parede de pelo menos 25 mm. Além disso, seu traçado deve atender a uma série de pré-requisitos para garantir máxima eficiência e confiabilidade do Turboexpansor. Para minimizar o traçado e atender a esses pré-requisitos, são utilizadas juntas de expansão.

Durante a fase de projeto do sistema do Turboexpansor é determinado o traçado idealmente esperado das linhas conectadas ao turbo. Verifica-se a flexibilidade do sistema e os esforços transmitidos ao turbo, que não podem ultrapassar valores estabelecidos pela norma de projeto da máquina (NEMA SM 23). Dados os baixos limites de esforços nos bocais do turbo são introduzidas no traçado da linha juntas de expansão metálicas preferencialmente do tipo dobradiça e/ou cardânica. Na fase de projeto são definidas as características requeridas para as juntas de expansão, tais como comprimento, material do fole, tipo de junta e coeficientes de rigidez. O cálculo destes coeficientes é realizado com base nos critérios do "Standards of the Expansion Joints Manufacturers Association" (EJMA), estimando-se para o projeto do fole a quantidade e espessura das lâminas bem como o número, altura e passo das suas corrugações. Essa estimativa será a referência inicial para a seleção e projeto de fabricação das juntas de expansão.

Devido aos limites muito apertados de esforços nos bocais do Turboexpansor há um compromisso muito forte entre o bom funcionamento das juntas de expansão e a confiabilidade do sistema, fez-se necessário desenvolver um teste de movimentação das juntas depois de completada sua fabricação. Dessa forma, seria possível antecipar possíveis problemas de fabricação das juntas de expansão, em tempo, para uma ação mitigadora. Esse tipo de teste não é, normalmente, realizado nesses componentes, tendo sido realizado, na forma atual, a partir do empreendimento para a Refinaria Henrique Laje – Petrobras (REVAP), em parceria com a Teadit®. O objeto de estudo foi verificar a existência de algum tipo de interferência interna, oriunda do processo de fabricação, a influência dos componentes do "hardware" e a consistência entre o comportamento real das juntas de expansão, sob deslocamento, e os valores teóricos calculados utilizando a norma EJMA.

* ENCAT - Encontro de Caldeira e Tubulação do Abastecimento da Petrobras. O teste apresentado tornou-se procedimento obrigatório para inspeção de todas as juntas de expansão fornecidas para as Unidades de Craqueamento Catalítico Fluido (FCC) da Petrobras.

2. Juntas de Expansão

Uma junta de expansão é um dispositivo flexível capaz de absorver mínimas liberações de esforços, os movimentos impostos a um sistema de tubulação submetido à pressão. Comumente, expansão térmica, movimentação de equipamentos, vibração e pulsação de pressão podem causar movimentos em uma tubulação. A restrição a estes movimentos gera tensões e reações no sistema de tubulações e suas conexões.

As juntas de expansão são geralmente classificadas pelo material do fole que pode ser metálico, não-metálico (compósito), elastomérico ou em PTFE. As juntas metálicas são utilizadas para trabalho em alta temperatura e pressão, as não-metálicas para baixas pressões e altas temperaturas e as elastoméricas ou PTFE para sistemas de água e alguns tipos de produtos químicos a alta pressão e temperaturas limitadas pelo material do fole. O enfoque neste trabalho serão as juntas metálicas.

O principal componente de uma junta de expansão metálica é o fole, fabricado a partir de uma ou mais lâminas por conformação mecânica ou hidráulica e composta de corrugações (convoluções) de parede muito delgada que se deforma, sob baixos esforços, comportando-se como uma mola. Por isso mesmo, é fabricado em material muito nobre, para não ser deteriorado pelo fluido. Além disso, para o adequado funcionamento do fole, a junta de expansão é composta de componentes estruturais (o "hardware"), cujas principais funções são suportar o peso próprio dos componentes, resistir aos esforços axiais devidos à pressão interna (empuxo axial), limitar movimentos indesejáveis e proteger o fole de sobrecargas.

Existem quatro tipos de movimentos básicos que podem ser aplicados ao fole. São eles (Figura 1): axial, lateral, angular e torção, este último deve ser evitado, pois o fole tem comportamento instável sob torção. Os foles se comportam de modo similar à molas, quando são comprimidos resistem ao movimento da mesma forma que uma mola. A constante de mola de um fole depende da sua geometria e das propriedades de material.

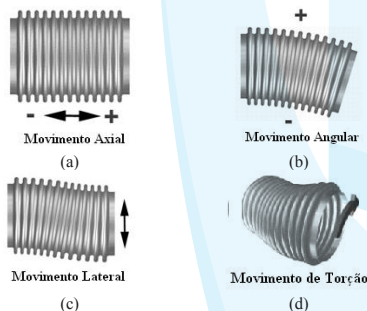


Figura 1. Ilustração de Tipos de Movimentos da Junta de Expansão. (a) Movimento Axial, (b) Movimento Angular, (c) Movimento Lateral e (d) Movimento de Torção

A junta de expansão mais simples é a do tipo axial, que consiste somente de um fole, utilizada para absorver movimentos de tração ou compressão. Por absorverem os movimentos axiais, acabam por transmitir os esforços de empuxo devido a pressão interna, que podem ser muito elevados. Numa junta de 20" com fole de diâmetro interno igual a 508 mm, construído com duas lâminas de 1.27 mm cada e 25 mm de altura de corrugação, submetida a uma pressão interna de 5 kgf/cm² (Pd), a equação 1 mostra a correspondência desta força.

$$F_{ax} = A_e P_d = 11\,260 \text{ kgf}$$

Onde :

$$P_d = \text{pressão de projeto} = 5 \text{ kgf/cm}^2$$

$$A_e = \text{área efetiva do fole} = \pi D_m^2 / 4 = 2\,252 \text{ cm}^2$$

$$D_m = \text{diâmetro médio das corrugações do fole} = D_b + w + n \times t = 535,54 \text{ mm}$$

$$D_b = \text{diâmetro interno das corrugações} = 508 \text{ mm}$$

$$w = \text{altura das corrugações} = 50 \text{ mm}$$

$$n = \text{número de lâminas do fole} = 2$$

$$t = \text{espessura de cada lâmina} = 1,27 \text{ mm}$$

Ou seja, um valor elevado de cargas que será transmitido aos bocais de equipamentos conectados ao sistema de tubulação. Por esse motivo, juntas axiais simples não são utilizadas em sistemas de tubulação conectadas a equipamentos críticos. Quando dois foles são utilizados temos uma junta universal, esta configuração permite absorver movimentos axiais, laterais e angulares maiores que na junta axial. Da mesma forma que na junta axial, o esforço de empuxo deve ser considerado. Para minimizar esse esforço são introduzidos tirantes rígidos que, no entanto, restringem os movimentos axiais. A junta rotulada simples, ou dobradiça, permite a movimento angulares em apenas um plano e, devido aos braços conectados aos pinos (de rotação) não transmitem empuxo ao sistema. Normalmente são utilizadas em conjuntos de duas ou três de forma a absorver melhor a movimentação do sistema. Por fim, a junta bi-rotulada ou cardânica é capaz de absorver movimento angulares em qualquer plano e, como no caso da junta rotulada, não transmitem empuxo nem torção ao sistema de tubulações. Por esse motivo, juntas rotuladas simples ou cardânicas são preferidas para uso em sistemas ligados aos Turboexpansores.

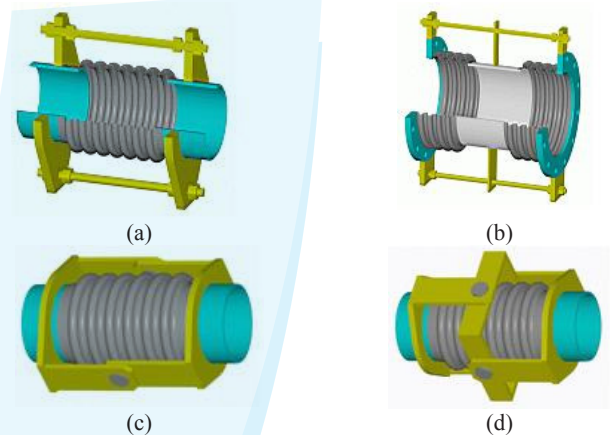


Figura 2. Tipos de Junta de Expansão. (a) Junta Atirantada Simples, (b) Junta Universal Atirantada, (c) Junta Rotulada Simples ou dobradiça, (d) Junta Bi-Rotulada ou Cardânica

3. Mecanismo de Teste

Um mecanismo de teste foi desenvolvido para realizar os ensaios nas juntas de expansão do tipo cardânica. O teste consiste na colocação da JE sobre um sistema de sustentação e posicionamento na vertical. As extremidades da JE são fechadas com um tampo soldado. O dispositivo consiste numa viga I soldada no tampo superior com um braço de alavanca de 2 m (Figura 3), correntes, talha e dinamômetro digital para aquisição da carga. A influência da angulação do braço de

carregamento no valor das reações da JE foi calculado porém não teve influência significativa nos resultados.

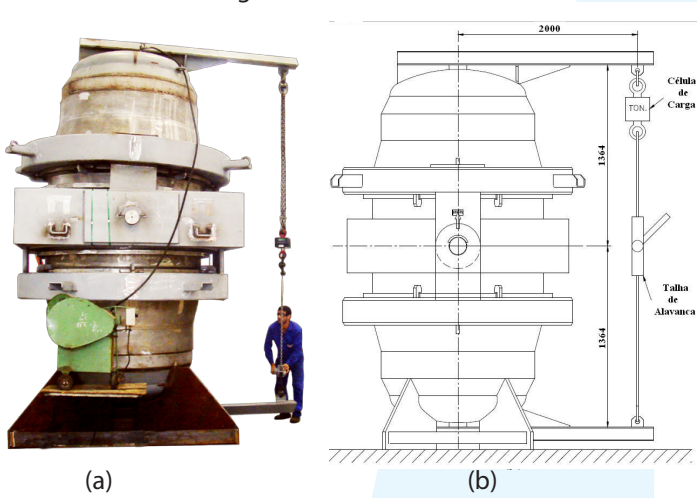


Figura 3. Junta de Expansão em Posição de Teste. (a) Dispositivo real, (b) Esquema do Dispositivo

O dinamômetro Figura 4 (a), tem capacidade para até 10 toneladas. A angulação dada foi verificada com um dispositivo fixado a junta mostrado na Figura 4 (b). A aplicação da carga foi dada por um operador Figura 4 (c).

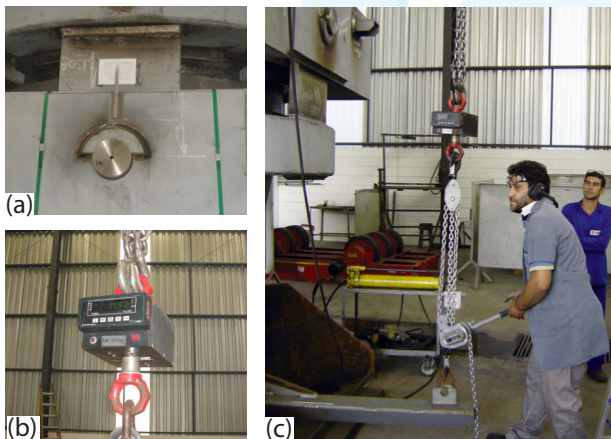


Figura 4. Mecanismo de Teste. (a) Dinamômetro Utilizado Durante o Teste, (b) Dispositivo de Medição de Grau, (c) Aplicação de Carga

Na condição de carregamento a talha foi acionada, gradativamente, para que a junta movimentasse angularmente a partir da posição neutra. Na condição de descarregamento a talha foi aliviada, gradativamente, para que a junta movimentasse angularmente retornando à posição neutra pela reação de mola da junta (Figura 5).

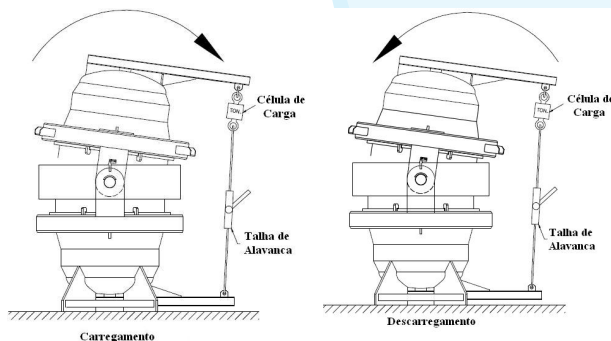


Figura 5. Esquema de Carregamento e Descarregamento do Ensaio

Os ensaios foram realizados em juntas de expansão do tipo cardânica com diâmetros apresentados na Tabela 1. As JE serão instaladas na linha de entrada do Turboexpansor de uma unidade da Petrobras. O ensaio foi realizado movimentando as JE do ângulo para o qual foram projetadas, uma JE com movimentação de 3° (n° 20) e duas JE com movimentação de 6° (n° 16 e 17). As reações correspondentes a cada passo de movimentação foram registradas durante o processo de carregamento (angulação crescente) e posteriormente durante o descarregamento (angulação decrescente).

Cada teste de carregamento e descarregamento foi realizado nas condições de pressão de projeto, de operação e na condição sem pressão interna (pressão atmosférica). Todos os testes foram realizados a temperatura ambiente. As juntas foram pressurizadas com água para a realização do teste. Os testes foram realizados para a JE de n° 20 uma única vez e para as JE n° 16 e 17 foram repetidos duas vezes, tanto no carregamento como no descarregamento.

Tabela 1. Juntas de Expansão e suas Características

Número (mm)	Diâmetro	Pressão de Projeto (kgf/cm ²)	Pressão de Operação (kgf/cm ²)	Ângulo de Projeto (°)	Ângulo de Teste (°)
16	1 670	3,6	2,3	6,2	6,0
17				6,2	6,0
20				3,3	3,0

A Figura 6 mostra a JE n° 20 durante o ensaio de carregamento. Pode-se observar a existência de certo ângulo de movimentação no topo da mesma.



Figura 6. Imagens da JE durante ensaio de movimento angular

4. Análise e Discussão dos Resultados

As Figura 7 a 9 apresentam os momentos aplicados de meio em meio grau para as juntas 20, 16 e 17 respectivamente. Nota-se que para os testes sob pressão a junta só inicia o movimento depois de aplicado um valor inicial de carga (ver Tabela 2). A inclinação das curvas representa o coeficiente de rigidez à flexão da junta, cujo valor médio característico para cada condição de teste é apresentado na Tabela 3. Observa-se que o coeficiente aumenta com o aumento da pressão do teste.

O comportamento citado anteriormente é compatível com as expectativas. A carga inicial é explicada pelo efeito de atrito nos componentes estruturais da junta de expansão, em especial nas suas rótulas. O aumento do coeficiente de rigidez à flexão pode ser justificado pelo aumento da rigidez do fole sob efeito da pressão interna atuante, fenômeno este comprovado em outros componentes de tubulação (curvas por exemplo).

Tabela 2 – Momento inicial para vencer a inércia (junta 20)

Pressão de teste (kgf/cm ²)	Momento inicial (kgf.m)
3,6	840
2,3	496
0,0	~0

Tabela 3 - Coeficiente de rigidez à flexão das juntas nas diversas condições de teste.

Pressão de teste (kgf/cm ²)	Coeficiente de rigidez à flexão (kgf.m/deg)			Teórico (kgf.m/deg)
	Médio			
	16	17	20	
3,6	1096	1036	1106	1116
2,3	1022	1005	1027	
0,0	802	793	813	

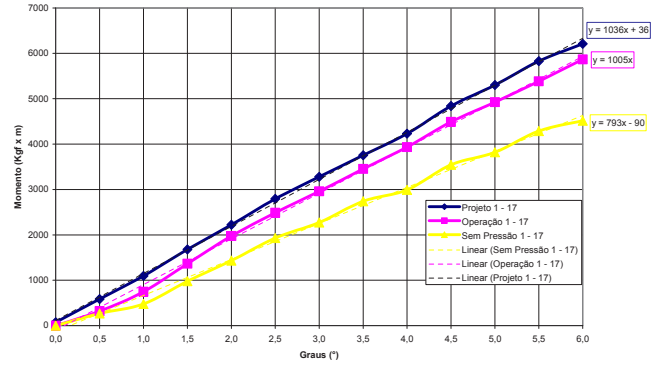


Figura 9 - Momentos aplicados na junta 17 a cada meio grau de movimento - Carregamento

5. Conclusões

Os testes permitiram confirmar que as juntas testadas não apresentam interferência oriunda do processo de fabricação, constituindo-se em um procedimento adequado de aceitação de fabricação das juntas de expansão.

Foi possível constatar a relevância da influência da pressão interna no cálculo das reações durante a movimentação das juntas, fato não considerado nos cálculos teóricos apresentados na EJMA. Comparando-se os esforços medidos nas condições de pressão de projeto, operação e sem pressão, verifica-se que a pressão interna está diretamente ligada ao aumento do momento de movimentação angular da junta.

A força de atrito nas articulações é bastante considerável e está diretamente ligada à força normal no pino, provocada pela pressão interna. A influência do atrito nas rótulas das juntas mostrou-se muito significativo indicando que esse efeito deve ser considerado no projeto de tubulações (normalmente desprezado) e que deve ser mitigado utilizando dispositivos de redução de atrito, normalmente não utilizados nesses componentes. Como as equações do EJMA não levam em consideração o atrito nas articulações, pode-se afirmar que o valor do esforço calculado é satisfatório e tende para a segurança do sistema, pois é ligeiramente maior que o valor real. Na realidade, os esforços provocados pelas deflexões angulares na junta de expansão são maiores do que os esforços calculados com as equações indicadas no EJMA, devido ao atrito provocado pelas articulações.

Com os resultados deste teste executado é possível efetuar os cálculos de flexibilidade com maior veracidade nas informações características de cada junta de expansão.

6. Referências

- NEMA SM 23. Steam turbines for mechanical drive service. 1991.
- EJMA. Standards of the expansion joint manufacturers association. Eighth edition, 2003

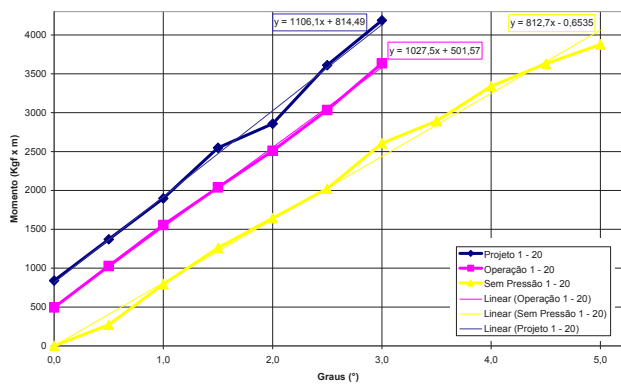


Figura 7. Momento aplicado na junta 20 a cada meio grau de movimento - Carregamento

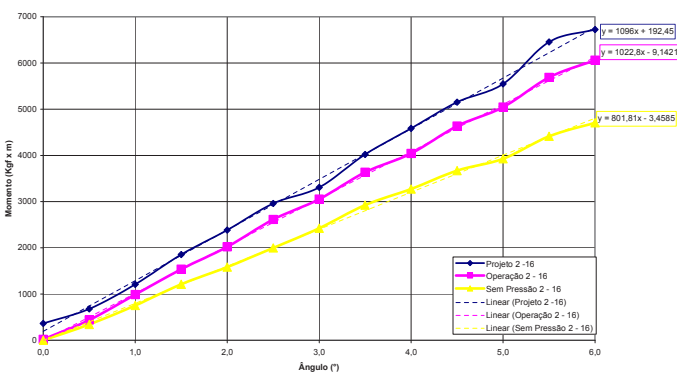


Figura 8 - Momentos aplicados na junta 16 a cada meio grau de movimento - Carregamento