

**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica**



Nota: 9.0 (nota)
Ronaldinho de Breyne Salvagni
15/12/2000

PMC 581 – Projeto Mecânico II

**Anéis de Vedação Metal – Metal para
Equipamentos de Produção de Petróleo Offshore**

Aluno: Tiago Di Pierro Celestino N° USP 2234381

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo de Breyne Salvagni

Coordenador: Prof. Dr. Edson Gomes

Dezembro de 2000

ÍNDICE

Agradecimentos	4
1. Introdução e Contexto	5
2. Características Gerais dos Anéis de Vedação Metal-Metal	9
2.1. Características Positivas	9
2.2. Requisitos	12
2.3. Critérios de Seleção	13
3. Características do Anel Analisado	15
3.1. Características Gerais	15
3.2. Material	17
3.3. Fabricação	18
3.4. Custos	19
4. Simulação por Elementos Finitos	21
4.1. Análise com Material Elástico	21
4.1.1. Tipo de Análise e Dados de Entrada	21

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600005947

4.1.2. Resultados	24
4.2. Análise com Material Bilinear no Selo	28
4.2.1. Tipo de Análise e Dados de Entrada	29
4.2.2. Resultados	31
5. Análise de Desempenho	37
6. Conclusão	42
7. Bibliografia	48

Agradecimentos

Ao Prof. Ronaldo de Breyne Salvagni, pela orientação e valiosa ajuda no direcionamento do trabalho.

Aos colegas da ABB, em especial os Eng^{os}. Carlos Yoshio Kajihara e Fabio Penny, pelas explicações e ajuda na busca de informações.

Aos meus pais, por tudo.

1. Introdução e Contexto

Este trabalho trata de um tipo de componente largamente utilizado em equipamentos *subsea* para perfuração, completação e produção de óleo e gás *offshore*, tais como sistemas de cabeça de poço, árvores de natal molhadas, manifolds submarinos, risers, etc.

Em grande parte desses equipamentos, há componentes que precisam ser conectados entre si no fundo do mar, ou porque seria inviável a descida do conjunto já conectado, ou porque um ou mais componentes precisam ser recuperados para a superfície periodicamente, para manutenção ou substituição. Como as profundidades atingidas hoje em dia¹ não permitem mais o acesso de mergulhadores para apertar parafusos e realizar soldas, são utilizados conectores acionados hidráulicamente a partir da plataforma ou navio.

Esses componentes geralmente possuem *bore*s para passagem de fluidos, e na conexão entre os componentes tais *bore*s precisam ser bem vedados. É necessário que ocorra vedação adequada tanto da pressão interna (para que o fluido do *bore* não vaze para o mar) quanto da pressão externa (para evitar que a água do mar vaze para dentro do *bore*, quando este estiver despressurizado).

¹ O recorde mundial de profundidade de produção foi batido em julho de 2000 pela Petrobras, com uma árvore de natal a 1877 metros de lâmina d'água no campo de Roncador, na Bacia de Campos. O recorde de lâmina d'água em perfuração, batido no final de 1999 também pela Petrobras na Bacia de Campos é de 2777 metros.

Para efetuar este tipo de vedação, geralmente são utilizados selos de vedação metal-metal que, devido às grandes profundidades atingidas atualmente, precisam vedar grandes pressões internas (há poços cujo fluido atinge pressões da ordem de 10000 psi, ou 680 atm) e externas (está em fase final de projeto uma árvore de natal horizontal para 2500 metros de lâmina d'água, o que equivale a uma pressão hidrostática de 3600 psi, ou 250 atm).

Esses selos são normalmente feitos em aço inox e possuem superfícies cônicas que são comprimidas contra sedes usinadas nos componentes a serem conectados.

Por vedação metal-metal entende-se que a vedação ocorre através do contato direto entre o anel de vedação e a superfície metálica da sede, não sendo então necessário o emprego de componentes auxiliares como *o-rings* e gaxetas.

O ajuste dos selos nas sedes é bastante forçado, de modo que os esforços de montagem são deveras elevados, e geralmente o selo atinge o regime plástico.

No entanto, apesar da importância e da freqüência de utilização desse tipo de componente, seu funcionamento detalhado e critérios de projeto e análise são pouco conhecidos. Consequentemente o projeto desses selos é geralmente feito basicamente por tentativa e erro, e como desenvolver um selo de bom desempenho deste modo é difícil, caro e demorado, o resultado é que na grande maioria das aplicações o mercado emprega selos "antigos" (freqüentemente com

mais de 20 anos de projeto) cuja funcionalidade já tenha sido verificada em várias aplicações no campo. Tal fato infelizmente deixa pouco espaço para o desenvolvimento de anéis novos e otimização dos já existentes.

Existe ainda hoje, na operação em campo, um procedimento padrão seguido mundialmente: sempre que um equipamento é desconectado e recuperado para a superfície, todos os anéis de vedação são descartados e substituídos antes de uma nova descida. Este procedimento é bastante conservador e um dos motivos de seu emprego é o fato de não se conhecer em detalhes o funcionamento desses selos. Com um conhecimento melhor das características do comportamento desses componentes poderia ser possível a reutilização de alguns tipos de anéis, resultando em uma economia não desprezível nas despesas com material e, principalmente, tempo de sonda².

Este trabalho se propõe a analisar um selo de vedação utilizando o Método dos Elementos Finitos, de modo a estudar seu comportamento e fornecer subsídios ao estabelecimento de relações entre os resultados da análise e o sucesso ou fracasso na vedação, de modo a se entender melhor o funcionamento desses selos e o que os faz ter desempenho satisfatório ou não.

De modo a possibilitar maior profundidade de detalhes na análise dos componentes referidos, será dada ênfase à análise do anel do tipo AX 2 3/16" da

² Para se ilustrar a importância da economia de tempo, é importante comentar que atualmente os navios de operação mais bem equipados do mercado apresentam custos de alocação da ordem de US\$ 600.000/dia. Deste modo, uma redução de 1 minuto em um processo ocasiona uma economia da ordem de US\$ 400.

ABB. Os fundamentos apresentados, no entanto, se aplicam a qualquer anel de vedação metal-metal.

2. Características Gerais dos Anéis de Vedação Metal-Metal

Não é por acaso que a vedação metal-metal é tão extensivamente utilizada na conexão entre equipamentos *subsea* para produção de petróleo em águas profundas. Os selos de vedação metal-metal possuem características de desempenho e confiabilidade totalmente distintas dos dispositivos comuns de vedação. No entanto, para que apresentem a melhor vedação possível, alguns requisitos de projeto, fabricação e instalação devem ser seguidos à risca, sob pena de se obter uma vedação absolutamente inútil até mesmo em baixas pressões. Este conjunto de vantagens e requisitos fazem da vedação metal-metal a mais adequada para as aplicações acima referidas.

Nos itens a seguir são apresentadas as principais vantagens da utilização de anéis de vedação metal-metal, os principais requisitos para a obtenção de uma vedação adequada e os critérios práticos para seleção de um selo metal-metal.

2.1. Características Positivas

Os selos de vedação metal-metal possuem diversas características favoráveis, que os tornam uma boa alternativa na especificação de uma vedação. A seguir são enumeradas algumas destas características:

- Os anéis de vedação metal-metal, por serem metálicos e robustos, apresentam elevada resistência mecânica. Assim, resistem bem a esforços externos, e geralmente são capazes de suportar pressões bastante elevadas.
- Utilizando-se os materiais, tratamentos e eventuais revestimentos adequados para cada aplicação, os anéis de vedação metal-metal são bastante resistentes à corrosão e proporcionam uma vedação com elevada durabilidade.
- Novamente por serem exclusivamente metálicos, os selos metal-metal possibilitam a operação em faixas de temperatura bastante amplas, ao contrário de outros dispositivos comuns de vedação, que normalmente possuem materiais poliméricos. Do mesmo modo, são menos afetados por variações cíclicas de temperatura.
- Os anéis metal-metal são resistentes a ataques químicos que poderiam comprometer seriamente a durabilidade de outros tipos de dispositivos de vedação. Um dos contaminantes de ocorrência mais freqüente (e causadores de preocupação) em reservas de hidrocarbonetos é o ácido sulfídrico (H_2S) que, associado à água, pode causar fragilização por hidrogênio e corrosão que, na ocorrência de tensões de tração, ocasiona um trincamento conhecido como *sulfide stress cracking*. A norma MR0175 da NACE, entretanto, especifica os materiais metálicos resistentes ao *sulfide stress cracking*, o que consequentemente possibilita evitar o problema.

- Os selos de vedação metal-metal são resistentes ao fogo. Esta é uma característica essencial neste tipo de aplicação, em que o perigo de explosões e incêndios é um risco sempre presente, e por outro lado é imprescindível que as vedações mantenham sua integridade em qualquer tipo de intempérie, sob pena de se causar inclusive um vazamento catastrófico.
- Muitos anéis de vedação metal-metal são *pressure enhanced*, o que significa que a vedação melhora com o aumento da pressão no interior do *bore*. Deste modo, estes selos podem vedar a conexão com mais segurança, mesmo na ocorrência de pressões muito elevadas.
- Os anéis de vedação metal-metal, por possuírem superfícies de vedação geralmente cônicas, assim como as respectivas sedes, freqüentemente auxiliam na centralização da conexão, contribuindo para o alinhamento correto dos equipamentos a serem acoplados. Obviamente, tanto o *offset* inicial entre as duas sedes quanto os esforços externos de desalinhamento não podem ser muito elevados, pois com isto o selo pode ser danificado, comprometendo a futura vedação.

2.2. Requisitos

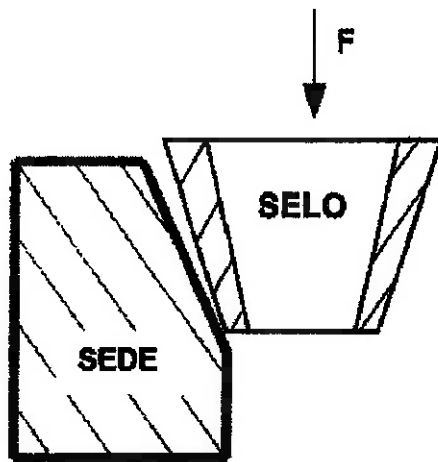


fig. 1: Esquema de um selo comprimido contra uma sede

Nas conexões onde são utilizados selos metal-metal, a vedação, assim como o amassamento e comportamento geral do selo, é função de diversas variáveis, dentre as quais pode-se destacar:

- Geometria das superfícies de contato entre selo e sede;
- Força atuante no conjunto (pré-carga agindo sobre o selo);
- Características dos materiais tanto do selo quanto das sedes:
 - Dureza;
 - Módulo de elasticidade;
 - Tensão de escoamento;
 - Tensão de ruptura;
- Temperatura a que a vedação será submetida;
- Coeficiente de atrito nas superfícies de vedação. É também influenciado por fatores como rugosidade superficial das peças e lubrificação.

O desempenho satisfatório de um anel de vedação metal-metal requer que sejam satisfeitas diversas condições, algumas das quais são enumeradas a seguir:

- A usinagem das superfícies de vedação deve ser bastante fina, de modo a se obter um bom acabamento nessas regiões;
- A pré-carga de conexão dos equipamentos deve ser capaz de resistir às forças de separação nas superfícies de vedação, causadas pela pressão e por cargas externas. Esta pré-carga é importante para que ocorra sucesso na vedação, pois será responsável pela compressão no contato entre as superfícies de vedação do selo e da sede;
- Os ajustes e tolerâncias de fabricação tanto do selo quanto das sedes devem ser bastante precisos, de modo a impedir a migração de moléculas entre as superfícies de vedação em contato, o que caracterizaria um vazamento.

2.3. Critérios de Seleção

Em parte devido ao conhecimento insuficiente das características, comportamento e projeto de anéis de vedação metal-metal, a seleção de um anel no processo de especificação de uma conexão é um processo excessivamente simples: A partir das especificações do cliente para o diâmetro do *bore* e tipo de

conexão, seleciona-se um entre os poucos anéis *field proven* existentes que sejam adequados para este diâmetro de *bore* e tipo de conexão.

3. Características do Anel Analisado

3.1. Características Gerais

O selo a cuja análise será dado enfoque neste trabalho é o anel AX 2 3/16", que foi desenvolvido pela ABB Vetco Gray em Houston e que, quando especificado para equipamentos a serem produzidos no Brasil, é fabricado pela ABB no Brasil, que terceiriza sua usinagem para a Metalúrgica Caram, no Rio de Janeiro³.

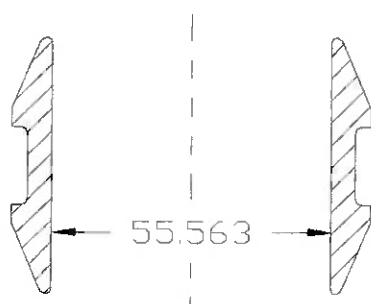


fig. 2: Anel AX 2 3/16"

Como o próprio nome sugere, o anel AX 2 3/16" é um selo relativamente pequeno e possui diâmetro interno de 2 3/16" (55,56 mm), sendo portanto adequado para a vedação entre *bores* de diâmetro próximo a este⁴.

³ Praticamente toda a usinagem de peças leves da Divisão de Óleo, Gás & Petroquímica da ABB no Brasil é terceirizada. O principal prestador de serviço nesse caso é a Metalúrgica Caram, que tem a ABB como cliente em aproximadamente 98% de suas horas de usinagem.

⁴ Para efeito de padronização e intercambiabilidade, os diâmetros mais utilizados em *bores* de equipamentos de produção de óleo e gás são 2 1/16" (52,39 mm) e 4 1/16" (103,19 mm).

Como o desenho acima nos permite suspeitar, o selo AX é um sólido de revolução, e é também simétrico em relação a um plano perpendicular ao seu eixo e localizado a metade de seu comprimento (plano este que deste ponto em diante trataremos por plano α)

O anel possui duas superfícies de vedação inclinadas de $22^{\circ}45'$ em relação à vertical, e é montado em sedes padronizadas (de acordo com norma interna da ABB), cada uma possuindo uma superfície de vedação inclinada de 23° em relação à vertical. Isto nos permite concluir que, durante a montagem, o contato inicial entre selo e sede se dá nas extremidades do selo (longe do plano α).



fig. 3: Anel AX 2 3/16"

Durante uma montagem entre dois equipamentos, em que esteja presente um anel AX 2 3/16" e duas sedes usinadas conforme o padrão para este tipo de conexão, o contato inicial entre o anel e as duas sedes se estabelecerá quando os dois equipamentos ainda estiverem afastados de uma distância aproximada de 0,07" (1,78 mm). A partir deste ponto até o final montagem (instante em que os dois equipamentos se tocam) o anel será comprimido, gerando uma força crescente de repulsão entre os dois equipamentos, que deste ponto em diante trataremos por força de montagem.

A força de montagem é responsável pelo estabelecimento de pressões de contato nas superfícies de vedação, e conseqüentemente pelo sucesso da vedação. Apesar das pequenas proporções do anel considerado, mesmo em selos de pequeno porte as forças de montagem costumam assumir valores bastante elevados.

De modo a tornar possível a conexão, a força de montagem deve ser vencida pelo conector, que normalmente gera uma pré-carga consideravelmente maior que a força de montagem dos anéis de vedação envolvidos na conexão.

3.2. Material

O anel AX 2 3/16" é fabricado a partir de barras de aço 17-4PH, que é um aço inox martensítico endurecido por precipitação.

O aço utilizado possui as seguintes propriedades mecânicas:

- Módulo de elasticidade: $30 \cdot 10^6$ psi (210 GPa)
- Tensão de escoamento: 75.000 psi (517 MPa)
- Tensão de ruptura: 115.000 psi (793 MPa)
- Dureza mínima (HB): 255 (25 HRC)
- Dureza máxima (HB): 311 (33 HRC)
- Deformação na ruptura: 18%

Os anéis AX não são submetidos à aplicação de revestimentos.

O aço utilizado está conforme a norma NACE MR0175 (vide seção 2.1.) e é, portanto, compatível com meios que apresentem alta concentração de ácido sulfídrico (H_2S).

3.3. Fabricação

Os anéis AX são usinados a partir de barras cilíndricas laminadas ou forjadas. O diâmetro interno é obtido através de mandrilamento, e o restante do anel é torneado. É importante que a usinagem tenha bom acabamento nas superfícies de vedação, cuja rugosidade especificada é de $32 \mu\text{in}$ ($0,8 \mu\text{m}$). Tal rugosidade, apesar de baixa, pode ser atingida sem a necessidade de retificação.

É importante que a parte externa do anel, em especial as superfícies de vedação, sejam usinados por torneamento, e não por outros processos, como por exemplo o fresamento. Deste modo, assegura-se que as marcas de usinagem terão a direção circunferencial, o que é importante para a obtenção de uma boa vedação.

3.4. Custos

O custo de produção de um anel AX 2 3/16" é quase que essencialmente composto pelo custo da matéria prima e pelo custo de usinagem. Os valores aqui apresentados são relativos a cotações datando de maio de 2000.

- Matéria prima: A barra de aço 17-4PH a partir da qual o anel é fabricado custa R\$ 1530 por metro. O comprimento do anel é ligeiramente superior a 5 cm. Como o departamento de Planejamento e Controle da Produção costuma estimar uma perda da ordem de 1 cm de barra para cada anel, basearemos o orçamento em um comprimento utilizado de barra de 6 cm. Deste modo, o custo da matéria prima é de cerca de R\$ 91,80.
- Fabricação: O contrato firmado entre a ABB e a Metalúrgica Caram especifica que todo serviço será orçado exclusivamente em função do tempo de usinagem, independente de sua complexidade. O valor cobrado pela usinagem, nessas condições, é de R\$ 25/hora. Como o orçamento para o anel AX 2 3/16" é baseado em 5 horas de usinagem, o custo de fabricação é de cerca de R\$ 125,00.

Deste modo, o custo total de produção de um anel AX 2 3/16" é de aproximadamente R\$ 217.

4. Simulação por Elementos Finitos

4.1. Análise com Material Elástico

De modo a analisar parte do comportamento do anel AX 2 3/16", foi realizada uma análise pelo Método dos Elementos Finitos, em que foi simulada uma montagem do conjunto selo x sedes, desde a iminência do contato entre as superfícies de vedação até o final da montagem, quando os equipamentos conectados se tocam e o selo atinge sua máxima compressão (e máxima força de montagem).

O programa utilizado para executar a análise foi o Ansys versão 5.5.1 que, pelo menos para as análises executadas até o atual estágio de desenvolvimento do trabalho, possui todos os recursos necessários para esta simulação, e apresentou desempenho satisfatório.

4.1.1. Tipo de Análise e Dados de Entrada

Foi realizada uma análise axissimétrica, devido ao fato de o anel AX 2 3/16 ser um sólido de revolução e também pela axissimetria dos esforços envolvidos. No caso considerado, a realização de uma análise axissimétrica em nada contribui para degradação da confiabilidade e precisão dos resultados obtidos; pelo contrário, apresenta resultados mais precisos e facilita a convergência da solução, além de tornar mais prático o pós-processamento e diminuir

drasticamente a demanda de recursos computacionais, em termos de tempo e memória.

Devido à simetria no plano α , definido na seção 3.1., foi modelada somente a metade “superior” do selo e a sede correspondente a essa metade do selo.

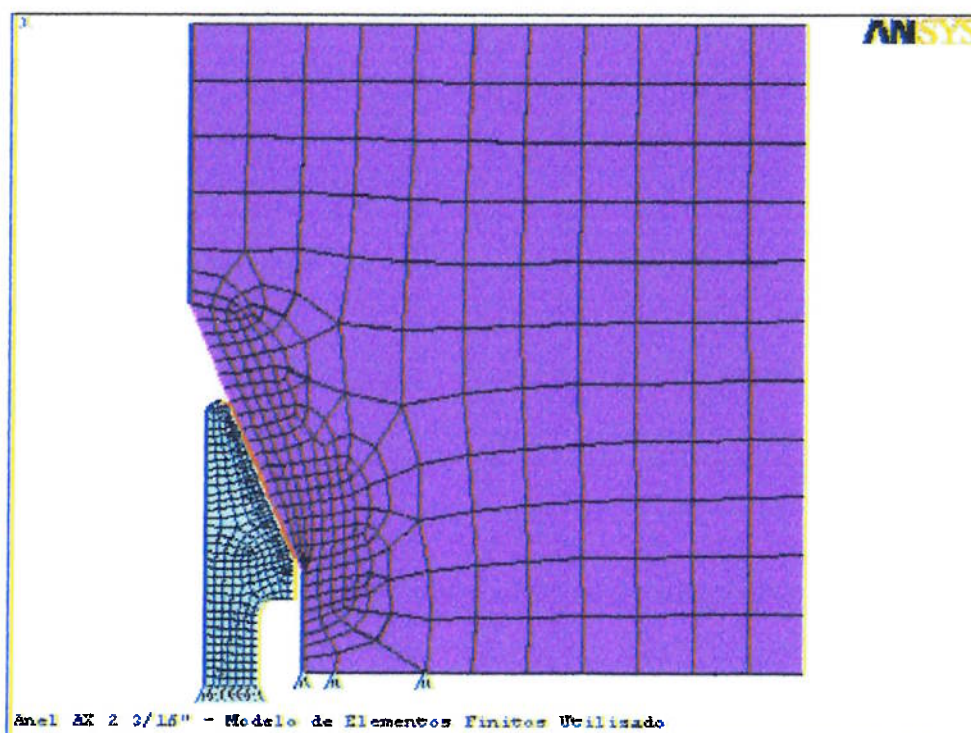


fig. 4: Modelo utilizado

Inicialmente, tanto para o selo quanto para a sede, foi considerado material isotrópico e elástico linear, com módulo de elasticidade $30 \cdot 10^6$ psi (210 GPa) e módulo de Poisson igual a 0,3.

O selo e a sede foram modelados com elementos sólidos quadrilaterais de 4 nós. Nas superfícies de vedação do selo e da sede foram criados elementos de

contato nó x superfície, com rigidez normal (*normal penalty stiffness*) de $1 \cdot 10^9$ lbf/in ($1,75 \cdot 10^{11}$ N/m). O modelo utilizado continha 734 elementos, sendo 670 sólidos e 64 de contato.

As cargas aplicadas foram as seguintes:

- Condição de simetria do anel (deslocamento vertical nulo nos nós do plano α)
- Deslocamento vertical nos nós localizados na superfície de contato entre os dois equipamentos a serem acoplados, de modo a “descer” a sede até a configuração final da montagem

As cargas foram aplicadas em modo *ramped*, ou seja, o deslocamento vertical da sede aumenta linearmente com o tempo fictício.

Devido aos fatores citados a seguir, que introduzem não-linearidades no modelo, a análise realizada foi não-linear:

- Grandes deslocamentos
- Grandes deformações
- *Stress stiffening*
- Contato (não-linearidade geométrica)

A solução foi realizada em 10 *substeps* com passo fixo, o que se mostrou suficiente e adequado para o caso considerado.

4.1.2. Resultados

Após a solução da análise, foi efetuado o pós-processamento, em que foram analisados resultados tais como tensões, deformações, força de montagem (através das reações) e pressões de contato.

Os resultados encontrados são reproduzidos nas figuras a seguir:

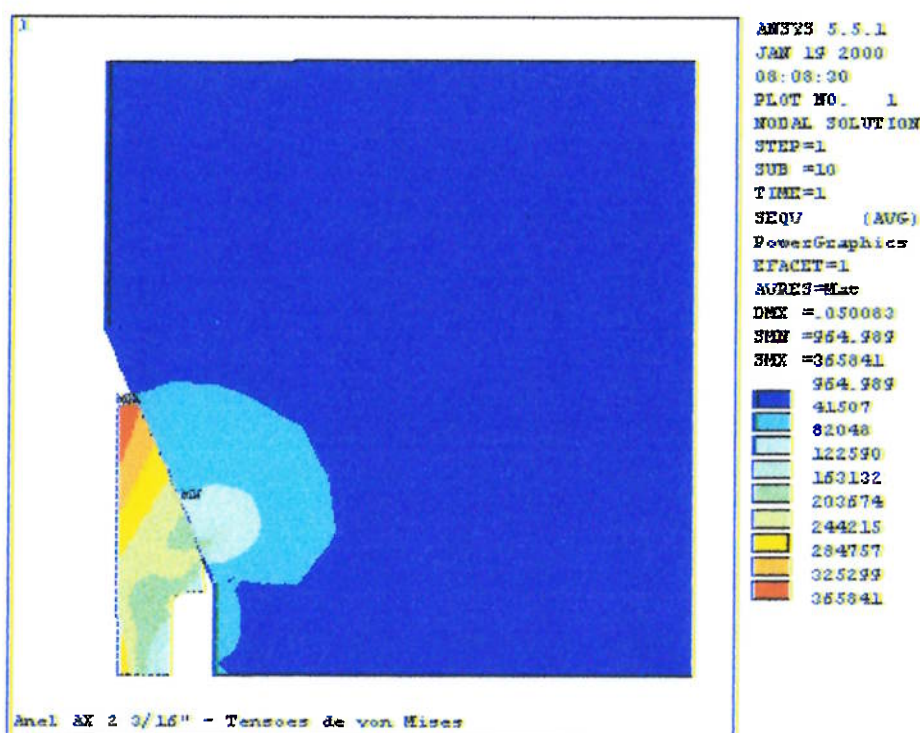


fig. 5: Tensões de von Mises

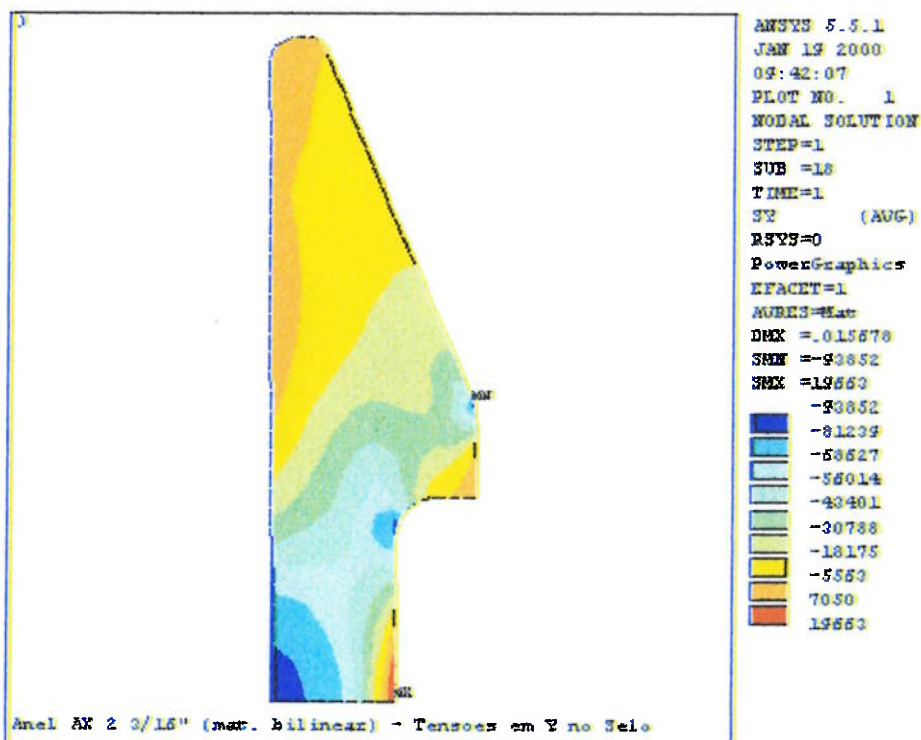


fig. 6: Tensões na direção vertical no selo

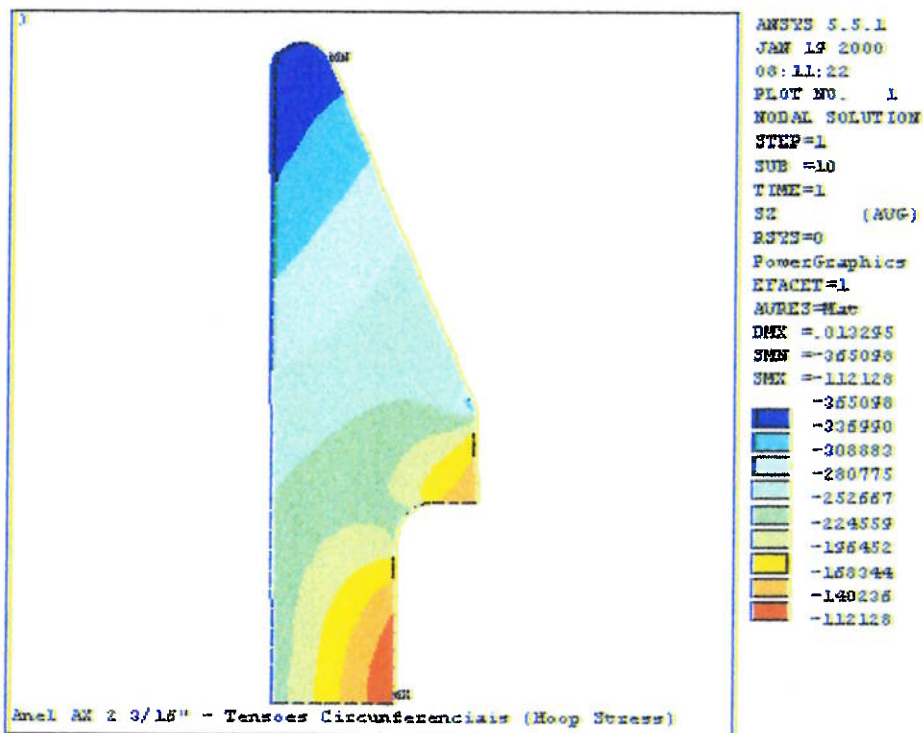


fig. 7: Tensões circunferenciais no selo (hoop stress)

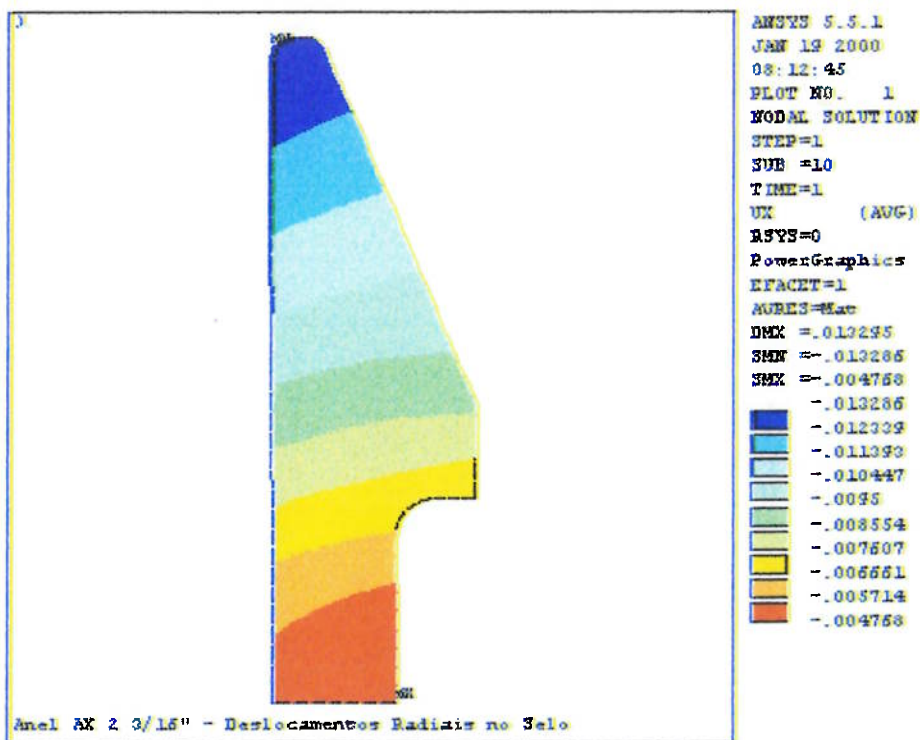


fig. 8: Deslocamentos radiais no selo

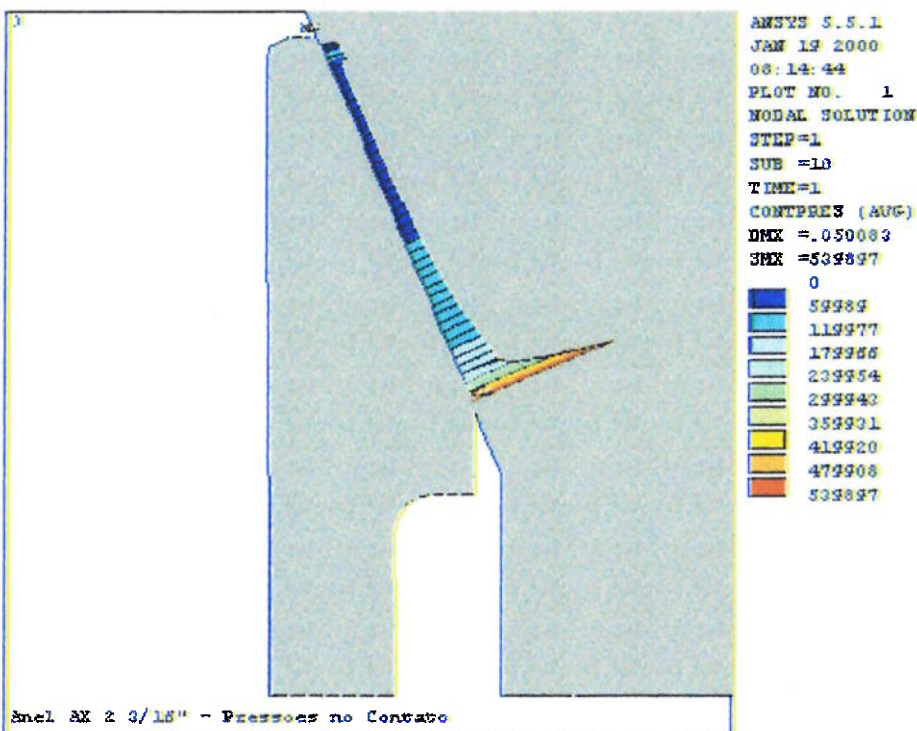


fig. 9: Pressões de contato na superfícies de vedação

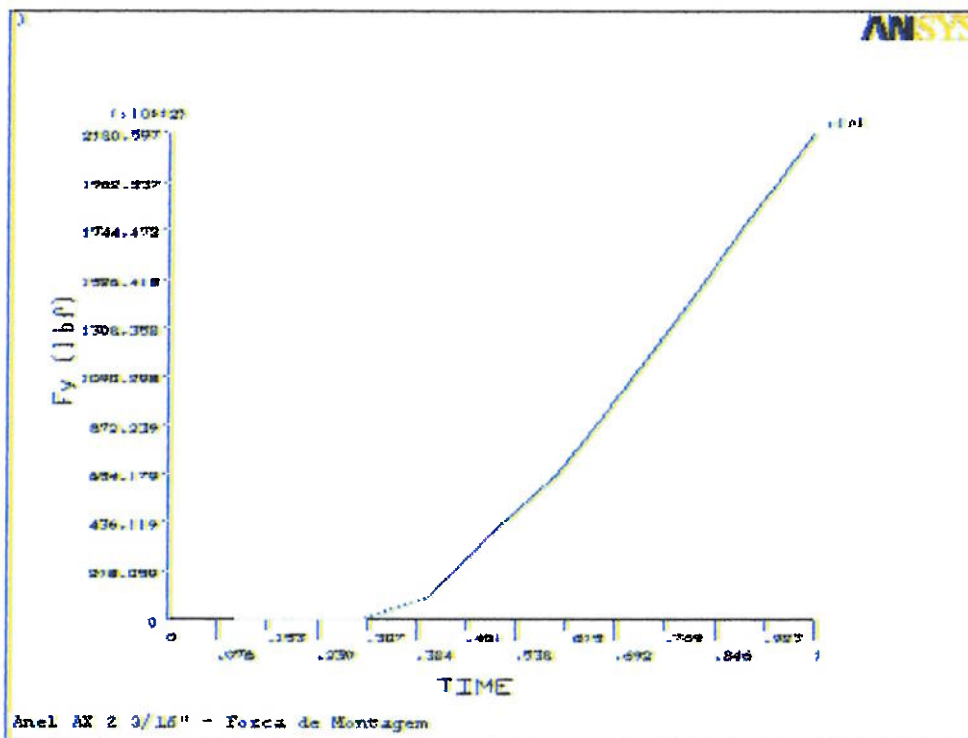


fig. 10: Reações verticais na sede (força de montagem)

Anel AX 2 3/16" - Força Vertical x Distância entre Hubs (material elástico)

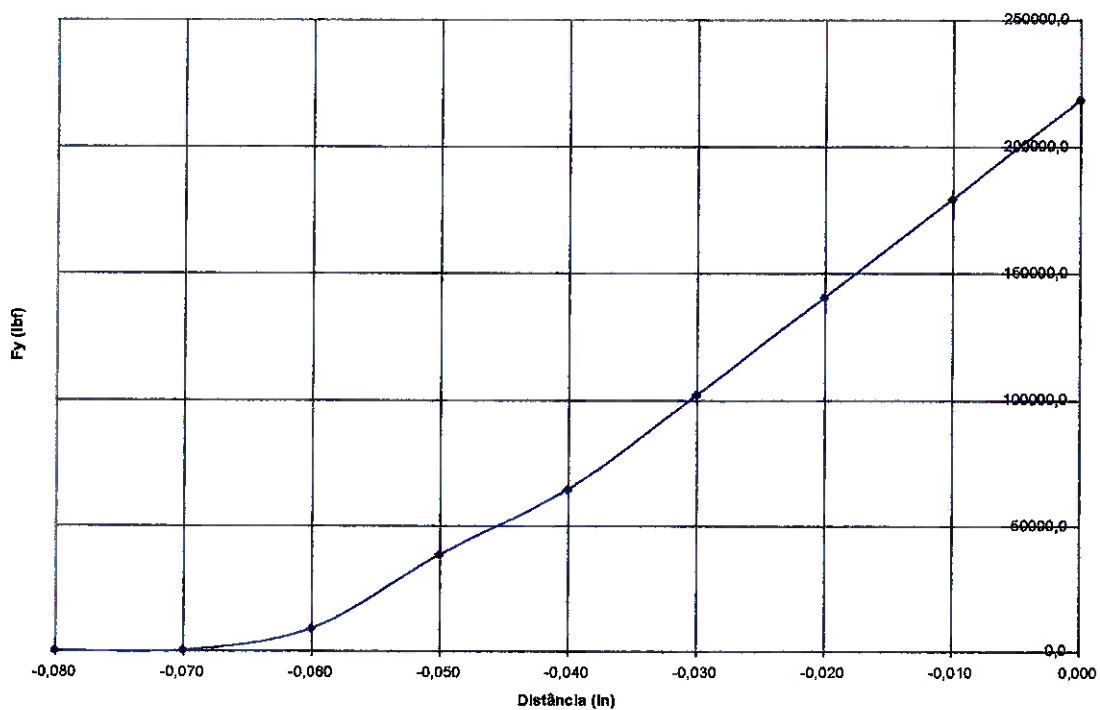


fig. 11: Força de montagem em função da distância entre os Hubs a serem conectados

4.2. Análise com Material Bilinear no Selo

Através dos resultados da análise com materiais lineares, é possível verificar que as tensões resultantes no selo são muito superiores à sua tensão de escoamento, tendo também a sede apresentado tensões muito elevadas. Daí podemos suspeitar que, considerando todos os materiais como lineares elásticos, os resultados obtidos podem não estar representando uma boa expressão da realidade.

Assim, foi realizada uma nova análise considerando, para o selo, um material com comportamento bilinear. Os materiais bilineares são aqueles cujo comportamento tensão x deformação é representado por duas retas. No caso considerado, o comportamento do material do selo ficaria do seguinte tipo:

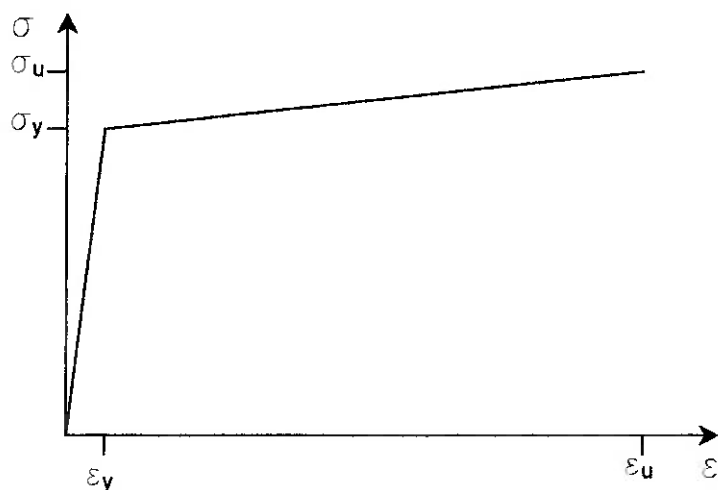


fig. 12: Aspecto do comportamento tensão x deformação de materiais bilineares

4.2.1. Tipo de Análise e Dados de Entrada

A nova análise é semelhante à realizada anteriormente, com exceção da mudança comportamento do material, o que introduz mais uma não linearidade no modelo (não-linearidade de material) a partir do instante em que a tensão máxima no selo atinge a sua tensão de escoamento.

No Ansys, para se definir o comportamento de um material bilinear, deve-se fornecer os seguintes parâmetros:

- E – Módulo de elasticidade (em regime elástico)
- σ_y – Tensão de escoamento
- E_T – Módulo tangente. É o novo valor que $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ assume quando a tensão é maior que σ_y .

Considerando o gráfico da fig.11, é fácil perceber que $E_T = \frac{\sigma_u - \sigma_y}{\varepsilon_u - \varepsilon_y}$ (I)

Utilizando os dados do material (vide seção 3.2.) e a equação (I), obtemos os parâmetros a serem fornecidos para caracterização do material bilinear considerado:

- $E = 30 \cdot 10^6 \text{ psi}$ (210 GPa)

- $\sigma_y = 75000 \text{ psi (517 MPa)}$
- $E_T = 225.350 \text{ psi (1,55 GPa)}$

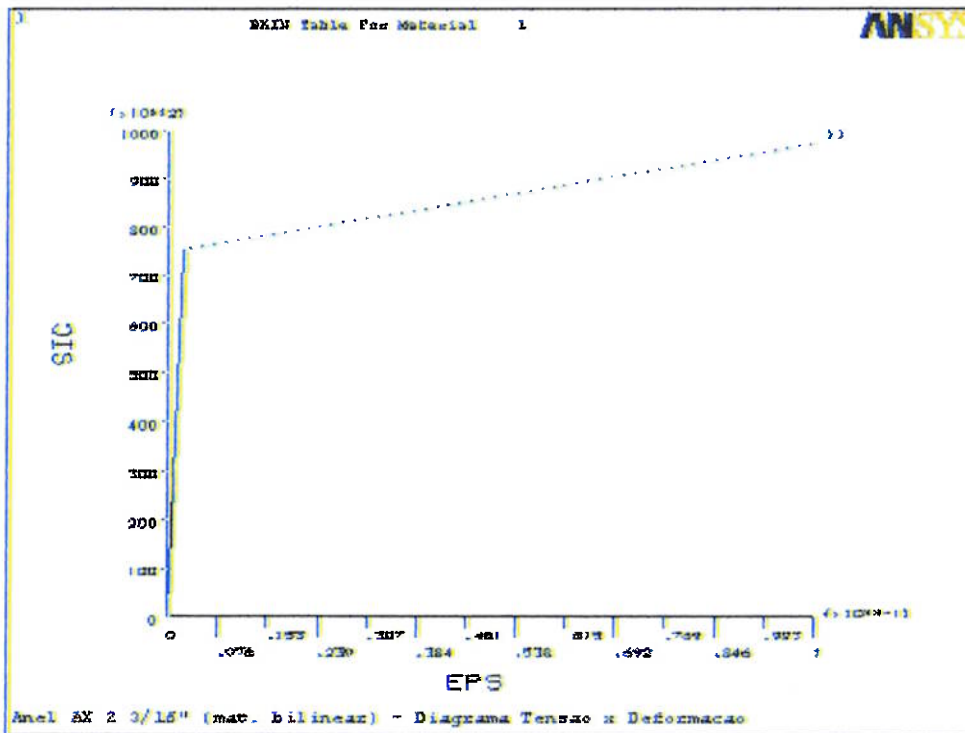


fig. 13: Diagrama tensão x deformação do material utilizado para o selo

Além disso, na solução desta nova análise foi utilizado ajuste automático de passo, de modo a utilizar passos menores em *substeps* com não-linearidades mais acentuadas, e passos maiores em *substeps* nos quais a configuração se aproxima mais da de uma análise linear. Deste modo, otimiza-se o tempo de resolução, sem perda de precisão e confiabilidade em "instantes" críticos.

4.2.2. Resultados

Após a solução da análise, que se realizou em 18 *substeps*, foi efetuado o pós-processamento, em que foram analisados resultados tais como tensões, deformações, força de montagem (através das reações) e pressões de contato.

Os resultados encontrados são reproduzidos nas figuras a seguir:

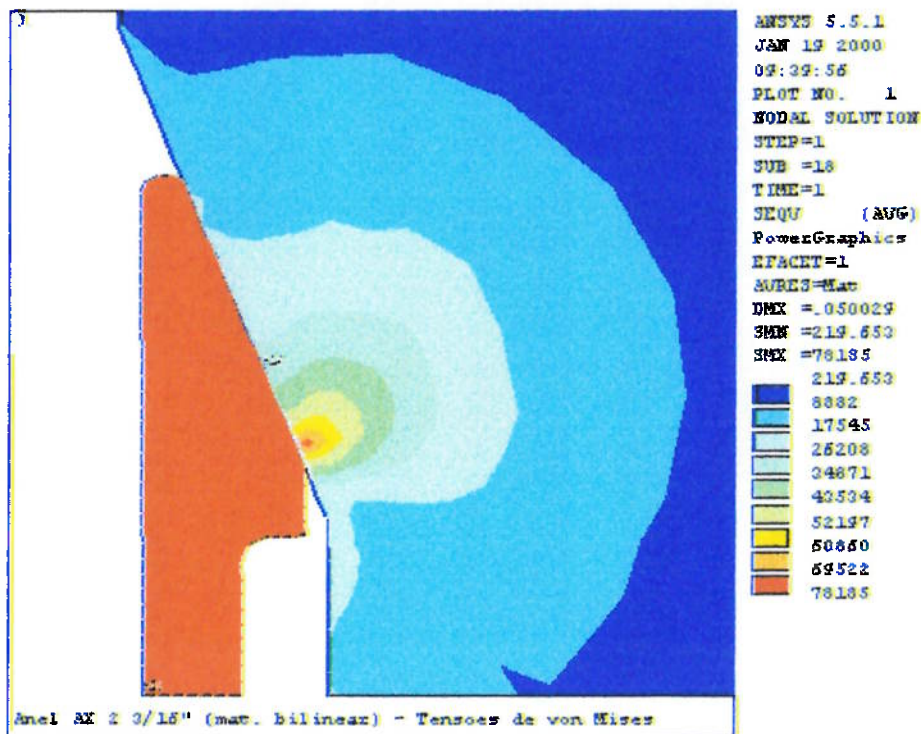


fig. 14: Tensões e von Mises no conjunto selo x sede. A sede não atinge a tensão de escoamento (80.000 psi, ou 552 MPa)

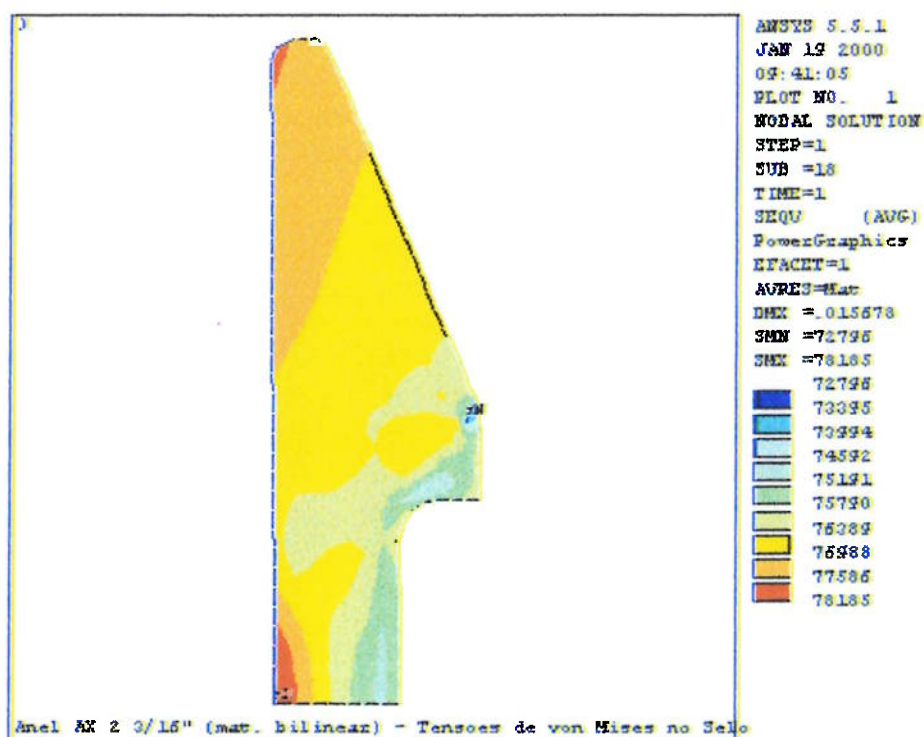


fig. 15: Tensões de von Mises no selo

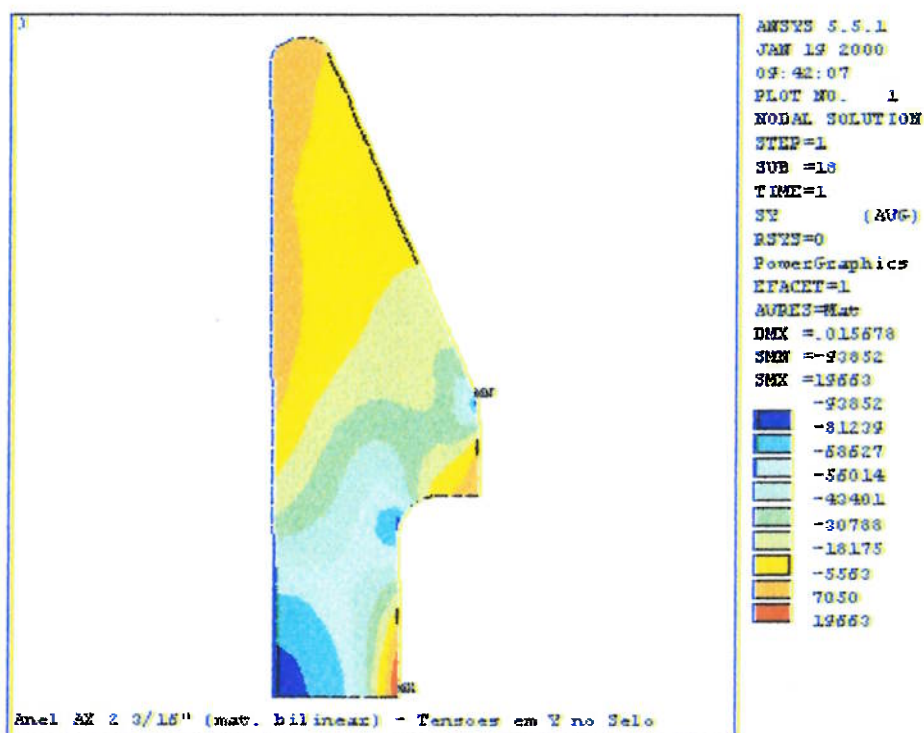


fig. 16: Tensões na direção axial no selo

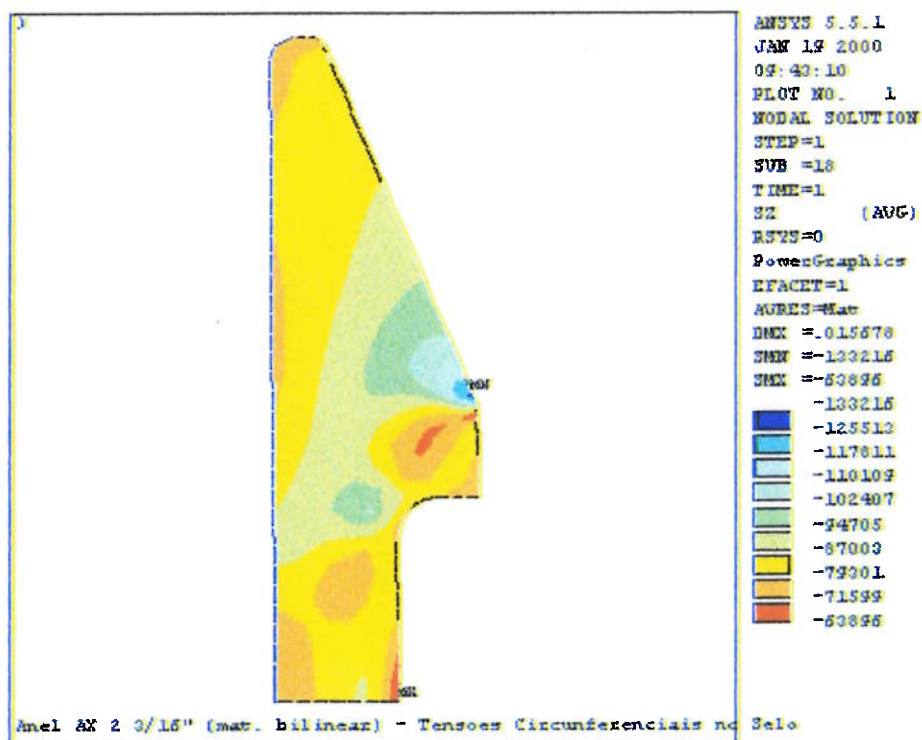


fig. 17: Tensões na direção circunferencial no selo (*hoop stress*)

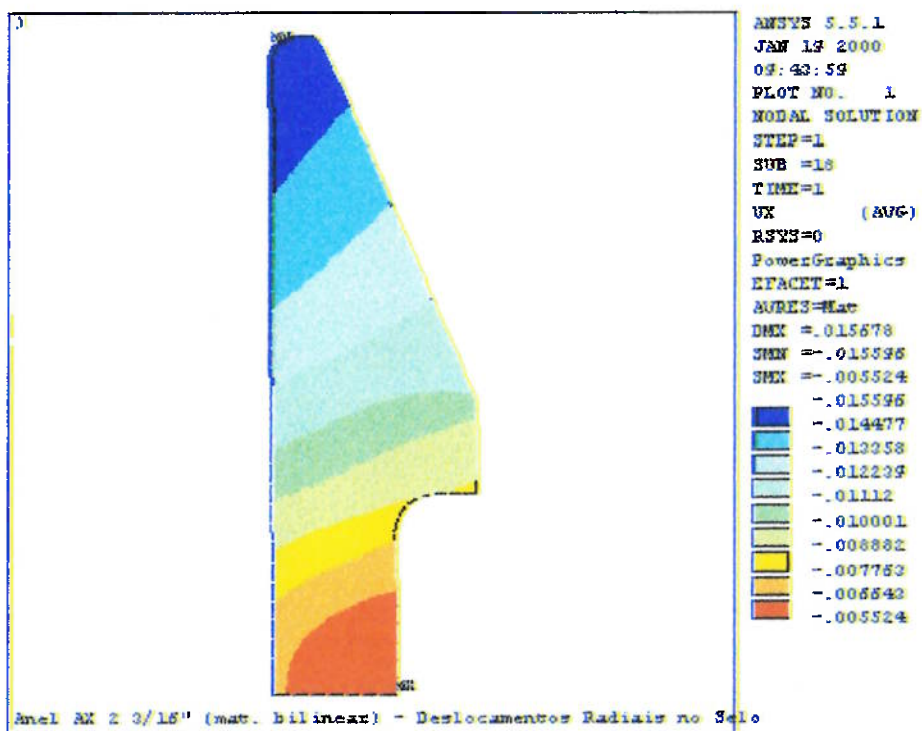


fig. 18: Deslocamentos radiais no selo

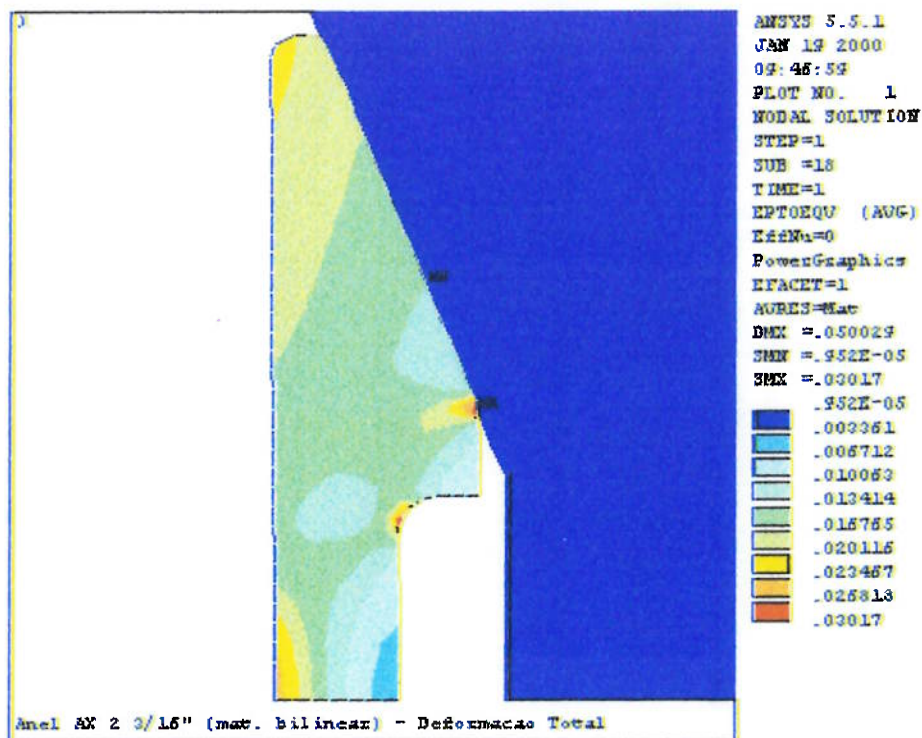


fig. 19: Deformação total no conjunto. A sede não sofre deformações plásticas

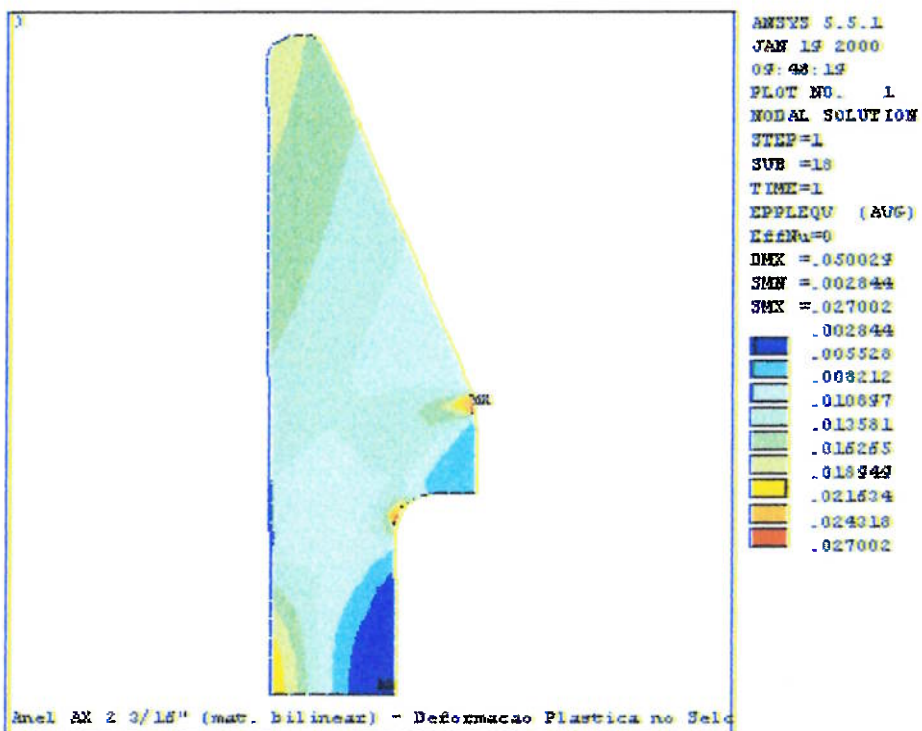


fig. 20: Deformações plásticas no selo

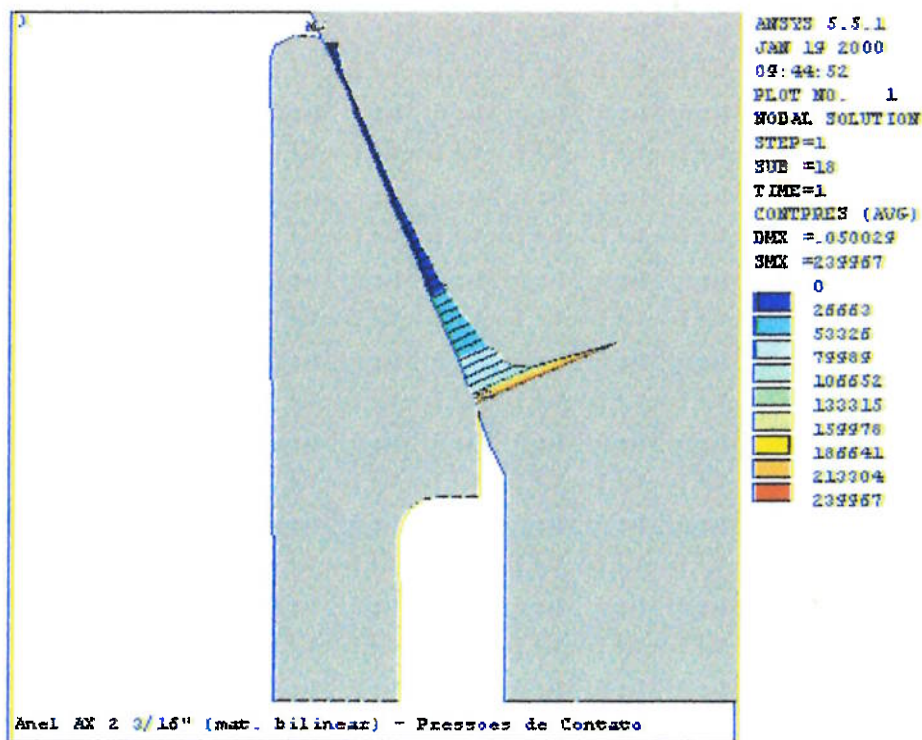


fig. 21: Pressões de contato na superfície de vedação

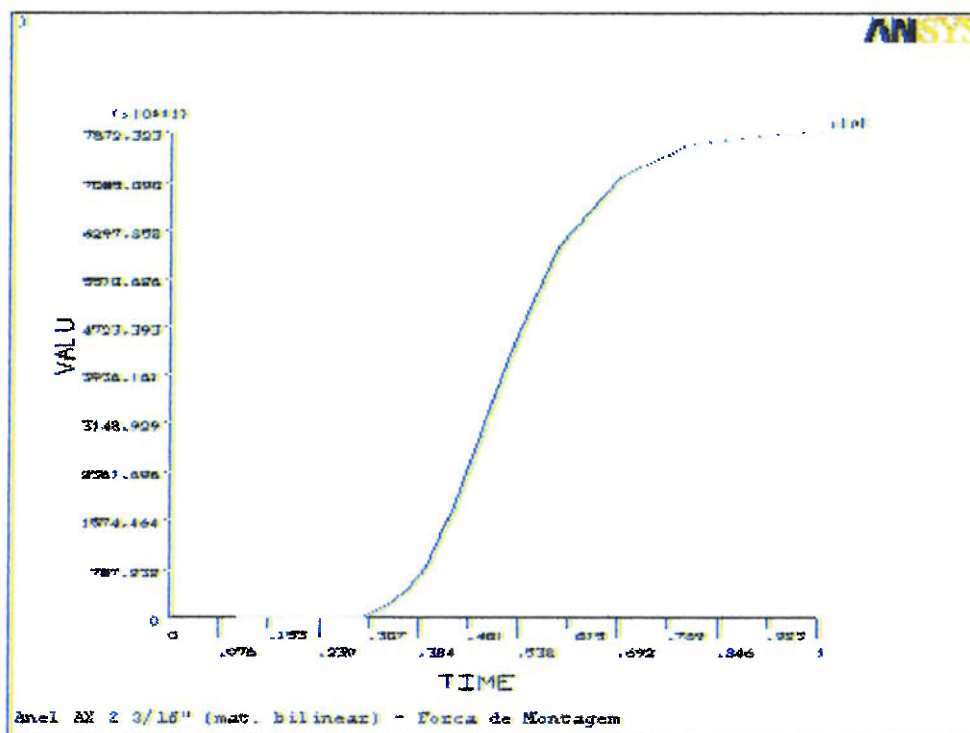


fig. 22: Reações verticais na sede (força de montagem)

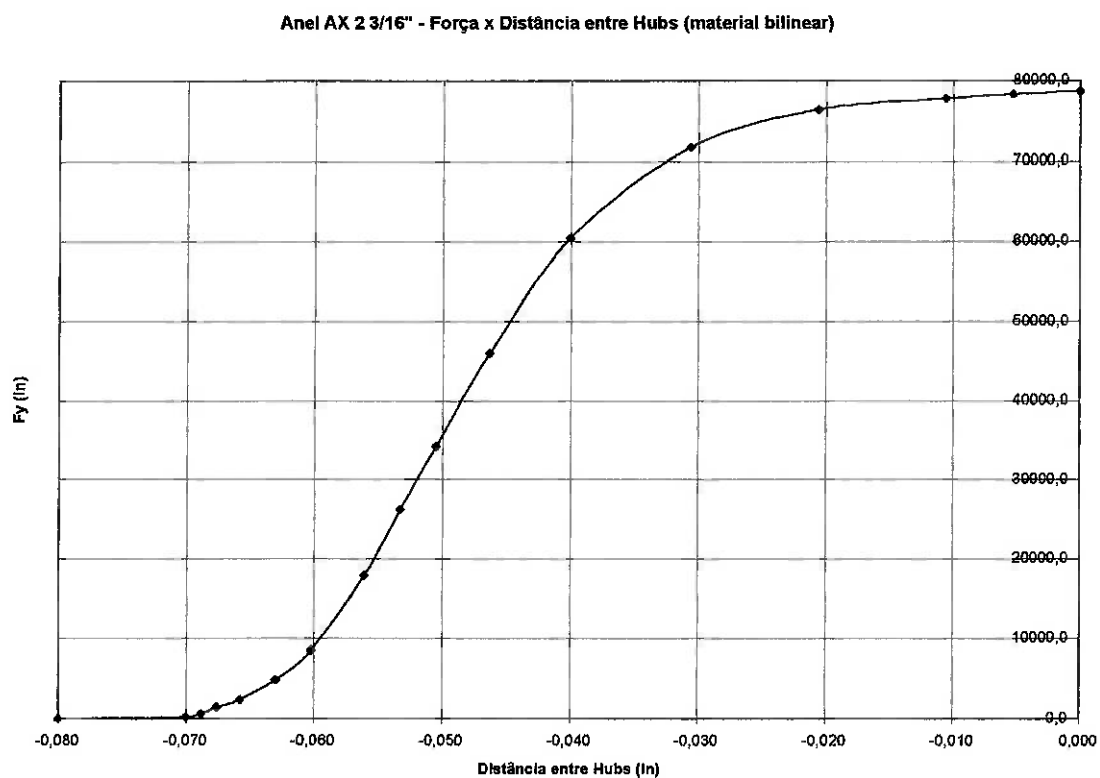


fig. 23: Força de montagem em função da distância entre os Hubs a serem conectados

5. Análise de Desempenho

A análise realizada pelo Método dos Elementos Finitos é capaz de fornecer uma vasta gama de informações acerca das cargas envolvidas no processo de montagem do selo nas sedes, das tensões e deformações a que são submetidos os materiais e da configuração das peças durante o processo. No entanto, de nada adianta simplesmente realizar Análises de Elementos Finitos de um selo se não obtivermos também uma informação de extrema importância na análise de qualquer anel de vedação metal-metal: se haverá ou não sucesso na vedação.

Apesar de a Análise de Elementos Finitos não ser capaz de fornecer uma resposta explícita quanto ao sucesso da vedação, ela é capaz de fornecer alguns resultados que podem dar bons indicativos de se a vedação realmente ocorrerá. A partir desses resultados é que será realizada a análise do desempenho do selo. Entre os resultados da Análise de Elementos Finitos que são importantes nesta análise de desempenho, merece especial destaque a pressão de contato entre as superfícies de vedação do selo e das sedes.

A fim de se estabelecer relações entre os resultados da Análise de Elementos Finitos e a capacidade de vedação da montagem, inicialmente é de extrema importância definir critérios de avaliação e/ou aceitação dos resultados obtidos. A eventual conformidade dos resultados com os critérios utilizados indica que haverá sucesso na vedação. Por outro lado, a não-conformidade não nos

permite, na maioria dos casos, uma conclusão de boa qualidade, embora tenda a acusar uma conexão pouco confiável no que diz respeito à vedação.

É importante salientar que, na análise de vedação, é praticamente impossível o estabelecimento de um critério de aceitação infalível. É inclusive muito difícil definir um critério que ofereça respostas com um grau de confiabilidade elevado, uma vez que o desempenho de um anel na vedação é função de um conjunto muito grande de fatores, tais como pressão de contato, geometria das superfícies de vedação, rugosidade superficial das superfícies, viscosidade do fluido, existência de corrosão nas peças, etc.

Deste modo, como estamos na realidade lidando com incertezas e probabilidades em relação à adequação dos critérios utilizados, cabe a nós adotar um critério de aceitação que seja relativamente confiável (ou seja, um critério pelo qual um selo aprovado tenha grande probabilidade de realmente vedar), sem ser, por outro lado, excessivamente conservador.

Um critério razoavelmente adequado para a aplicação considerada seria a adoção na *ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII Division 2, Appendix 3*, da tabela 3-320.1. Esta tabela especifica, para anéis lisos de aço inoxidável, uma tensão de contato mínima de assentamento de 26000 psi (179 MPa), e uma *gasket factor* igual a 6,5. Isto significa que, para conseguir vedar uma pressão de 5000 psi (340 atm), que é a pressão para a qual o anel AX 2

3/16" foi especificado, a tensão de contato nas superfícies de vedação não deve ser inferior a $26000 \text{ psi} + 6.5 * 5000 \text{ psi} = 58500 \text{ psi}$ (403 MPa).

Verificando-se os resultados da Análise de Elementos Finitos, na figura 21, constatamos que o anel AX 2 3/16" foi aprovado no critério exposto acima (de fato, nos testes realizados o anel vedou com sucesso). No entanto, tal critério não leva em conta muitos fatores relevantes, tais como a extensão da área na qual a tensão de contato especificada é requerida, a rugosidade superficial das áreas de vedação e a viscosidade do fluido a ser vedado. Além disto, a própria norma ASME menciona que os valores citados são apenas sugestões, baseadas em experiência e não obrigatórias, de valores que geralmente têm se mostrado satisfatórios em aplicações práticas.

No entanto, na prática, muitos selos têm sido analisados (e inclusive aprovados em testes) utilizando critérios substancialmente menos rigorosos que o baseado na norma ASME. Um exemplo desses critérios é o que especifica que a tensão de contato entre as superfícies de vedação deve ser maior ou igual a duas vezes a pressão a ser vedada.

Sabe-se que, além da pressão de contato, um fator que geralmente favorece a vedação é a deformação plástica da face de vedação do selo. Isto ocorre porque, ao deformar plasticamente, a superfície do selo tende a se "moldar" ao acabamento da superfície da sede, e a acomodar as irregularidades desta. É importante, no entanto, que a deformação plástica não ultrapasse o limite

de 5% que a norma NACE MR0175 estabelece antes que o efeito do encruamento se torne importante em relação ao risco de trincamento por corrosão (*stress corrosion cracking*). Além disto, um ponto negativo da deformação plástica do selo reside no fato de que esta reduz a repetibilidade do selo, uma vez que marcas originadas em montagens anteriores podem ser potenciais pontos de vazamento⁵.

Uma característica interessante em um selo de vedação metal-metal, no que diz respeito à facilidade de vedação, é a capacidade de sofrer deformação plástica considerável (porém dentro dos limites toleráveis) nas superfícies de vedação, exigindo para isto uma força de montagem relativamente reduzida. Um anel com essas características apresenta as seguintes vantagens:

- A força necessária para se obter vedação é relativamente baixa. Assim, gasta-se pouca energia para efetuar a montagem, e é possível projetar um conector mais simples e menor do que o que seria necessário para realizar uma montagem envolvendo um selo que exigisse maior força de montagem;
- Como o material do selo atinge o regime plástico com relativa facilidade, a sua superfície de vedação se molda bem ao formato e acabamento da sede. Isto permite que sejam especificadas, para um selo com estas características, rugosidades e tolerâncias de fabricação mais grosseiras do que aquelas que aquelas que seriam necessárias para um selo com menor tendência a atingir o

⁵ Isto explica o motivo de ser totalmente indesejável a deformação plástica da superfície da sede. A

regime plástico. Desta forma, é possível obter um anel de vedação metal-metal com custos de fabricação bastante reduzidos

6. Conclusão

Comparando os resultados das duas análises de elementos finitos realizadas, considerando diferentes modelos de comportamento do material do selo, pode-se verificar que a com a adoção do material bilinear os resultados foram consideravelmente diferentes. Isto permite concluir que os resultados do modelo com material linear realmente não representavam uma boa expressão da realidade.

Por outro lado, na segunda análise o material da sede foi mantido como linear, e a sede não sofreu escoamento. Isto demonstra que não é necessária uma terceira análise considerando material bilinear tanto para o selo quanto para a sede. Podemos também daí afirmar que neste caso ocorre o que realmente é desejado e esperado em uma vedação metal x metal: o selo sofre pequenas deformações plásticas e a sede se conserva sempre no regime plástico, sem amassamentos.

A figura a seguir retrata um detalhe de um anel de vedação metal-metal VX 16 3/4" retirado do equipamento após efetuar vedação. O anel VX é um selo muito difundido para uso em *bores* de grandes diâmetros e, apesar de ser significativamente maior que o anel AX (seu diâmetro interno é de 425.45 mm), possui princípio de funcionamento similar.

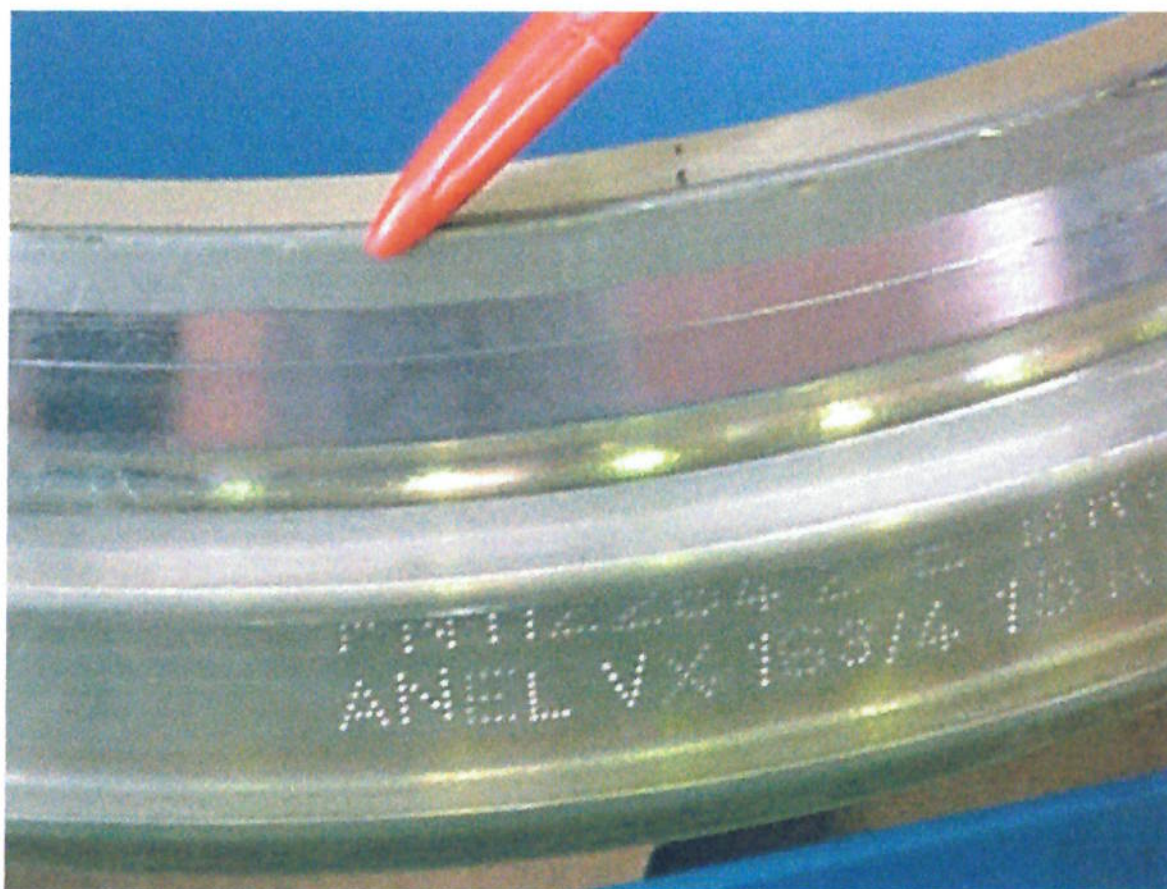


fig. 24: Detalhe de um anel VX 16 3/4" após desmontagem

Outra diferença substancial entre os resultados das duas análises ocorreu na força de montagem, como pode ser visto na figura a seguir:

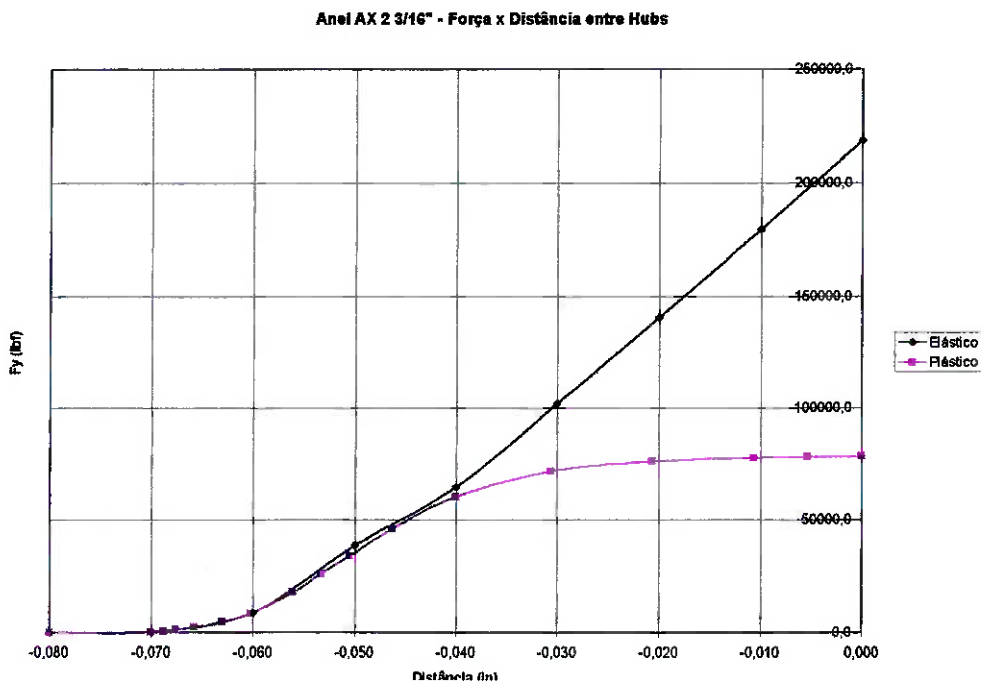


fig. 25: Força de montagem – comparação entre as duas análises realizadas

Verifica-se que, quando a distância entre os Hubs é de aproximadamente 0,040" (1,02 mm), o material do selo começa a escoar, e a partir deste ponto o valor da força de montagem na análise com material elástico-linear deixa de ser confiável.

As análises nos permitem concluir que a força de montagem para um anel AX 2 3/16" é de aproximadamente 79.000 lbf (~ 35,9 tf), um valor realmente elevado para um componente de dimensões tão reduzidas.

Os resultados da análise demonstram que durante a montagem o selo sofre deformações plásticas de no máximo 2,7%, aproximadamente. Este é um número aceitável, e se encontra abaixo do limite de 5% que a norma NACE

MR0175 estabelece antes que o efeito do encruamento se torne importante em relação ao risco de trincamento por corrosão (*stress corrosion cracking*).

As figuras a seguir retratam uma comparação entre um anel AX 2 3/16" novo e um anel que já foi submetido a testes de montagem e vedação:



fig. 26: Anel AX sem uso



fig. 27: Anel AX retirado de equipamento

Na figura 27 é possível observar, na extremidade da superfície de vedação do anel próxima ao plano α , um leve riscamento/amassamento, causado pela compressão contra a sede. Esta região coincide com o local em que, na Análise de Elementos Finitos, ocorreu a maior tensão de contato (vide figura 21), apesar de o contato inicial entre selo e sede se dar na extremidade oposta da superfície de vedação.

Na seção 5 foram abordados os critérios de verificação da vedação nos anéis de vedação metal-metal, e sua variabilidade e até subjetividade. É possível constatar que não existe um “critério certo” e um “critério errado” para analisar o

sucesso ou fracasso na vedação entre selo e sede. Uma alternativa interessante seria, ao analisar um novo selo que esteja sendo desenvolvido, comparar o seu comportamento obtido na Análise de Elementos Finitos (força de montagem, tensões resultantes, deformação plástica, tensão de contato, etc.) com o comportamento obtido na análise de um anel mais antigo e *field-proven* com dimensões similares, a fim de verificar se o novo anel possui características mais ou menos favoráveis do que as do anel antigo. Tal prática pode ser justificada pelo fato de que de nada adianta alterar um selo se o selo resultante não apresentar desempenho superior ao do selo já existente.

7. Bibliografia

Livros:

BAKER, Ron, **A Primer of Offshore Operations**, 2nd edition, University of Texas at Austin, 1994.

BOUQUET, Frank, L., **Introduction to Seals and Gaskets Engineering**, Systems Co., 1987.

COOK, Robert, **Finite Element Modeling for Stress Analysis**, John Wiley & Sons, 1995.

CZERNIK, Daniel E., **Gasket Design, Selection, and Testing**, McGraw-Hill, 1996.

DAHLHEIMER, John C., **Mechanical Face Seal Handbook**, Philadelphia, Chilton Book Co, 1972.

EHRHARD, Mayer, **Selos Mecânicos Axiais**, São Paulo, Euro-America, 1979.

Gaskets and Gasketed Joints, John H. Bickford, editor; Marcel Dekker.

LEBECK, Alan O., **Principles and Design of Mechanical Face Seals**, John Wiley & Sons, 1991.

MARTINI, Leonard J., **Practical Seal Design**, New York : M. Dekker, 1984.

SEVERINO, Antônio J., **Metodologia do Trabalho Científico**, 21^a ed., Cortez Editora, 1996.

VEIGA, José Carlos, **Juntas Industriais**, Rio de Janeiro : J. Olympio, 1989.

Apostilas e Normas:

ASME Boiler and Pressure Vessel Code, New York : ASME, 1998.

Diretrizes para a Apresentação de Dissertações e Teses, EPUSP, 1993.

NACE Standard MR0175-2000, **Standard Material Requirements - Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials for Oilfield Equipment**, National Association of Corrosion Engineers.

SAE Fluid Sealing Handbook Radial Lip Seals, Society of Automotive Engineers, 1996.

Subsea Production Equipment, ABB Vetco Gray Technical Training, Houston, 1995.

Sites na Internet:

www.abb.com

www.petrobras.com.br

www.usp.br/sibi

www.amazon.com

Empresa Exaustivamente Visitada:

Asea Brown Boveri (ABB) – Av. dos Autonomistas, 1496 – Osasco, SP.