

EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE FADIGA EM VASOS DE PRESSÃO

Elias Inacio Jagiello ¹Kassim S. Al-Rubaie ²

Resumo: Este trabalho apresenta os elementos que constituem a construção de um equipamento para testes cíclicos em vasos de pressão, também chamado de bancada de fadiga. Com o intuito de pressurizar os corpos de prova estressando-os em um regime senoidal ou irregular. Com capacidade de pressurizar 180 kgf/cm² (18 MPa), deslocar fluido na vazão de 12 litros por minuto e frequência de leitura de até 4 Hz. A bancada apresenta aplicação abrangente em qualquer setor que confecciona vasos de pressão. São descritas as principais especificações técnicas dos elementos mecânicos, hidráulicos e eletrônicos. A captação dos dados e sua qualidade auxiliam os técnicos e engenheiros a desenvolverem novas teorias, confrontarem teorias existentes e ainda validarem equipamentos com construção duvidosa. Seu desenvolvimento foi principalmente, com foco na carência de equipamentos nacionais para testes de fadiga em corpos de prova reais. Após sua finalização foram realizados testes em 30 corpos de prova, obtendo dados confiáveis e de qualidade aceitáveis.

Palavras-chave: Fadiga, Vasos de pressão, Bancada, Equipamento.

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução contínua das indústrias brasileiras, o crescimento científico se obriga a acompanhar a cadeia industrial. E as indústrias buscam no conhecimento acadêmico a base que as tornam competitivas e diferenciais. Gerando assim um ciclo de dependência entre conhecimento, indústria e lucratividade.

Neste enfoque o presente trabalho abrange as indústrias, os profissionais e o meio acadêmico que de algum modo estão ligados a vasos de pressão e necessitam de maiores conhecimentos em relação às teorias de dimensionamento em regime de fadiga.

O campo de atividades que tange os vasos de pressão é de muita influência principalmente para o trabalho dos engenheiros mecânicos, pois só eles em termos legais são habilitados para desenvolver trabalhos nesta área. A indústria também necessita de atenção especial, pois constantemente ela vem crescendo, tem a necessidade de ser sustentável e tem responsabilidade com o meio ambiente. Fazer este produto com um superdimensionamento, ou, ao contrário, sem ter o conhecimento na ciência é de fato arriscado (GROEHS, 2006). No território nacional estes equipamentos são construídos geralmente com a norma americana ASME VIII D.1. É importante deixar claro ao leitor que esta norma não faz dimensionamento em vasos com regimes cíclicos. No entanto um vaso de pressão pela sua natureza está submetido a regime de fadiga. E ao passar do tempo existem perdas de propriedades mecânicas. Segundo (CASTRO e MEGGIOLARO 2015) a literatura não reconhece explicitamente a fundamental importância do estado inicial da peça e casos de carregamentos complexos.

Na tentativa de promover maiores conhecimentos referentes à fadiga de vasos de pressão com detalhes específicos ou carregamentos complexos, foi desenvolvida uma bancada de testes que produz variação de pressão no sistema ao qual foi ligado, simulando um regime tanto de alto como de baixo cíclico, de forma controlada, coletando dados referentes aos fenômenos que estão se reproduzindo no

¹ Centro Universitário SOCIESC – UNISOCIESC - E-mail: ejagiello@gmail.com

² Centro Universitário SOCIESC – UNISOCIESC - E-mail: kassim.alrubaie@sociesc.org.br

ARTIGOS

corpo de prova. Com isso, os engenheiros poderão tomar decisões relacionadas a estudos práticos.

2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

2.1 DETALHAMENTO DA BANCADA

Seu funcionamento é gerenciado por um sistema eletrônico, ligado ao painel hidráulico. Em conjunto eles enviam e liberam a pressão do corpo de prova. No corpo de prova (CP) existe um leitor de pressão chamado de transdutor. É este acessório que faz a interpretação da pressão enviando sinal ao software. O software interpreta e comanda o painel hidráulico assim fechando o ciclo de funcionamento. Esta é a ideia básica do funcionamento. Contudo a bancada pode ser desmembrada em três principais partes, projeto mecânico, hidráulico e projeto eletrônico. A seguir, as partes do sistema serão detalhadamente definidas. A Figura 1 contém balões indicando os respectivos componentes e no decorrer do texto os números destes balões aparecerão entre chaves “[Nº]” indicando o item que está sendo narrado.

Figura 1 - Bancada de Fadiga



Fonte: Laboratório da Empresa ARXO Industrial do Brasil

2.1.1 Projeto Mecânico

Este capítulo define o projeto mecânico e suas respectivas partes e são explanadas características técnicas de cada componente. **Bacia de contenção [1]** - Tem a finalidade de conter vazamentos e bloquear eventuais projeções de objetos no momento do rompimento. Esta parte do projeto pode ser removida e não, necessariamente, precisa estar anexa à bancada, sendo assim, não existem limitações para o tamanho geométrico do CP a ser testado.

Bancada [2] - É a estrutura para suporte dos computadores, apoio das bombas hidráulicas [3], fixação do painel hidráulico [4] e fixação do painel elétrico [8]. Internamente existe o reservatório de óleo hidráulico e todo cabeamento elétrico.

Flauta [5] - É o conjunto de tubulações que direciona o fluxo de óleo para dentro do corpo de prova, ligada nas mangueiras hidráulicas, tem aparência esbelta e com saídas ao longo de seu comprimento. É possível selecionar a quantidade de saídas da flauta que estarão em serviço, ou seja, é possível testar apenas um CP ou até seis CPs que é o caso da Figura 1. Para a flauta houve cálculos de dimensionamento da espessura da parede do tubo conforme a equação abaixo.

$$t = \frac{P \times R}{S \times E - (0,6 \times P)} \quad (1)$$

onde:

P = pressão interna (Pa)

R = raio de vaso (m)

S = tensão admissível (Pa) E = eficiência de soldagem t = espessura (m)

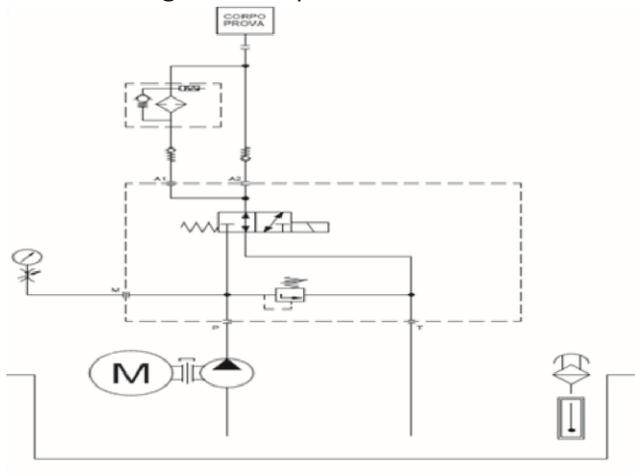
2.1.2 Projeto Hidráulico

O projeto hidráulico classificado como o mais complexo e crítico deste trabalho pelo fato de possuir diversos agravantes como: vida

útil superior a 30 milhões de ciclos; alta frequência de ciclagem; alta precisão na usinagem das válvulas e rigorosa curva de repetitividade. A figura 2 ilustra o esquema hidráulico completo, assim como a disposição dos itens. O projeto hidráulico é composto por: **Moto bombas hidráulicas [3]** - Tem a função de pressurizar os corpos de prova [11]. Potência de 2 cv, vazão de deslocamento 12 lpm e pressão máxima de 180 kgf/cm². **Painel hidráulico [4]** - Composto por:

- Filtro com capacidade de filtragem de 5 micras;
- Tubos de passagem de 1/2 polegada com parede sch. 80;
- Reguladores de pressão, por esfera e mola;
- Válvulas pilotadas por solenoide 5/2 vias;
- Válvula de retenção por esfera e mola para evitar retorno.

Figura 2 - Esquema Hidráulico



Fonte: Esquema enviado pelo fornecedor do painel

Flauta [5] - É um distribuidor e direcionador de óleo, que recebe pressão do painel hidráulico e repassa aos CPs.

Mangueiras [6] - Projetadas para uma vazão de óleo de 15 lpm, conexão JIC e trama dupla, vida infinita de fadiga e pressão máxima de 600 bar, distribuem o óleo pelos caminhos pertinentes.

Reservatório - Capacidade para até 100 litros é utilizado para manter a troca térmica do óleo e separação de alguma eventual partícula de metal.
Óleo - Hidráulico 68.

2.1.3 Projeto Eletrônico

É um sistema informatizado que sincroniza todo o projeto, envia sinais elétricos para os devidos componentes e principalmente coleta informações dos acontecimentos interno dos CPs. Equipado para coletar informações e converter dados da extensometria resistiva, facilitando o monitoramento das tensões na parede do vaso. O projeto eletrônico conta com os itens descritos abaixo:

Transdutor de pressão [7] - Conectado com a flauta, é um medidor de pressão e tem a função de enviar sinal digital para o sistema. O transdutor está situado fora do fluxo do óleo, para não sofrer erros de medição devido à dinâmica da passagem do fluido. Ele também é diretamente responsável pela plotagem gráfica de pressão que acontece internamente aos CPs e pela inversão das válvulas solenoides, possui velocidade de leitura de 100 Hz tensão de 0 a 5 V;

Painel elétrico [8] - Tem a função de conectar eletricamente todos os itens mencionados acima, ele tem os botões tradicionais de liga, desliga emergência, também equipado com temporizadores e medidores de temperatura;

Computador [9] - Possui configurações convencionais, nele está instalado o software SITRAD MOD. 64 responsável em fazer a leitura do sinal enviado pelo transdutor, também responsável por plotar gráficos do regime de trabalho sofrido pelos CPs;

Termopar [10] - Ou medidor de temperatura do óleo permite controlar os ventiladores e consequentemente a faixa ideal de temperatura do óleo, permitindo que a faixa de viscosidade atinja valores ideais que otimizam a fluidez e por consequência menor tempo de pressurização e menor desgaste dos componentes mecânicos do projeto hidráulico.

ARTIGOS

Contador de ciclos - Componente digital capaz de contar até 6 dígitos. Utilizado para contagem de ciclos de pressurização e despressurização, tensão de funcionamento 24 V.

3 TESTES

3.1 TESTES DE VALIDAÇÃO

Este capítulo irá descrever as principais atividades realizadas na bancada após sua montagem, os métodos de validação aqui propostos trazem uma base teórica de natureza estatística além do cruzamento de informações teóricas com práticas. Provando que os ciclos trazem baixa variação amostral e cumprem a matemática do projeto.

Primeiramente foram realizados testes para validação da contagem de ciclos. Feita de forma redundante para certificar-se que não existem variações. A tabela abaixo ilustra as informações coletadas:

Tabela 1 - Validação da contagem de ciclos

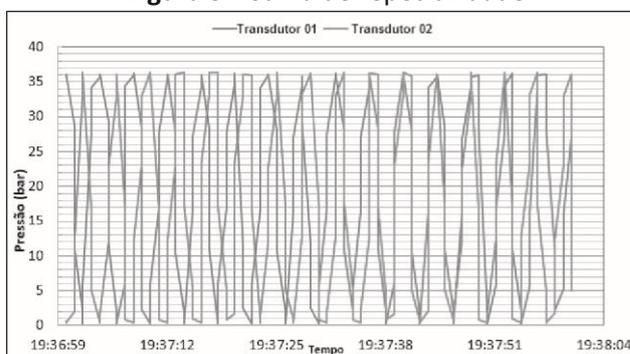
Tempo	Contagem manual	Registro digital	Registro gráfico
60 Segundos	16 Ciclos	16 Ciclos	16 Ciclos
120 Segundos	32 Ciclos	32 Ciclos	32 Ciclos
300 Segundos	155 Ciclos	155 Ciclos	155 Ciclos

Fonte: Laboratório da Empresa ARXO Industrial do Brasil

Esta contagem foi feita em diferentes tempos e os resultados se mantiveram. Mostrando que os contadores instalados estão ok. Posteriormente foram realizados os testes de segurança para desarme do sistema em caso de emergência. Sabe-se o tempo normal de um ciclo. Caso um ciclo atrase mais que o definido, constitui uma condição fora do regime normal de trabalho, indicando um possível rompimento do CP, quando isso acontece o temporizador interpreta o tempo maior que normal e manda sinal para o painel elétrico e a bancada desliga. Este teste/sistema funcionou perfeitamente. O quarto teste, um dos mais importantes é o teste de repetitividade que valida a média de pressão, a

repetitividade, as variações e todos os demais dados estatísticos do projeto. A Figura 3 mostra o exposto à cima, esta figura é rica em detalhes. Além de identificar os itens mencionados acima como repetitividade é possível também perceber os picos e vales atingidos pela bancada, seu tempo entre máximos e mínimos, os ângulos entre subida e descida assim como o tempo entre ciclos.

Figura 3 - Curva de repetibilidade



Fonte: Laboratório da Empresa ARXO Industrial do Brasil

A Tabela 2 mostra os dados gráficos convertidos na forma numérica, apresentando uma visão geral do comportamento da repetitividade da bancada de testes.

Tabela 2 - Dados estatísticos

Região	Variação estatística			Média	% Erro
	Alvo	Bar	Quantidade amostral		
Máximo Superior	36	36,2	350	36,04	0,11
Mínimo Superior	36	36	350		
Máximo Inferior	0	0,3	350	0,1	0,28
Mínimo Inferior	0	0	350		

Fonte: Produção do próprio autor

A partir deste ponto, foi utilizado o método de extensometria resistiva para validar a reposta e reação do CP quando submetido a pressão interna. Utilizando a Equação 2 é possível converter a tensão máxima admissível trazida pela norma ASME VIII D.1 em pressão interna.

E pela lei de Hooke, na equação 3 converter tensão em deformação.

$$P = \frac{S \times E \times t}{R + (0,6 \times t)} \quad (2)$$

Os valores característicos de cada incógnita são:

S = Tensão admissível = 114 (MPa) E = Eficiência de soldagem = 1 t = Espessura do corpo de prova = $4,8 \cdot 10^{-3}$ (m)

R = Raio do corpo de prova = 0,15 (m)

$$P = \frac{114,45 \times 10^6 \times 1 \times 4,8 \times 10^{-3}}{150 \times 10^{-3} + (0,6 \times 4,8 \times 10^{-3})} = 3,59 \text{ MPa} \cong 36 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (3)$$

Os valores característicos de cada incógnita são:

σ = Tensão admissível do material = 114 MPa.

E = Módulo de elasticidade = 190 GPa. ε = Deformação (mm/mm)

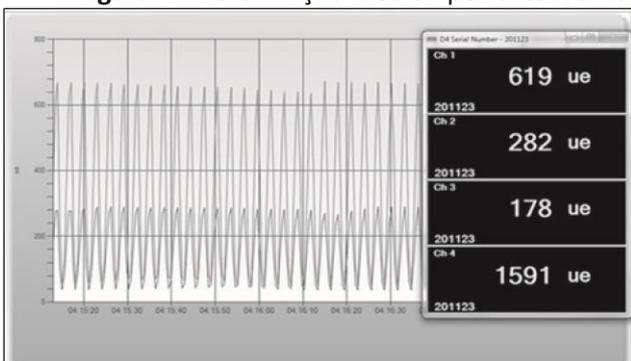
$$114 \times 10^6 = 190 \times 10^9 \times \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{114 \times 10^6}{190 \times 10^9}$$

$$\varepsilon = 0,0006 \text{ m/m} = \frac{600 \mu\text{m}}{\text{m}}$$

Este número denota que o CP deverá deformar 600 $\mu\text{m/m}$ no sentido circunferencial quando aplicado à pressão de 36 kgf/cm^2 (Jagiello, 2015). A Figura 4 reforça o exposto acima. Esta imagem foi capturada do software de extensometria resistiva (Micro Measurements 2015) no momento da aplicação da pressão, ela mostra no canto superior direito o valor de 619 μm . Este número está em torno de 3% divergente do calculado na equação 3, isto acontece devido a fatores, como por exemplo, a propriedade do material desconforme, erros humanos no momento da fixação do strain gauge. Contudo este valor foi inferido como dentro da tolerância e assim foi validado que a pressão interna do CP produz a resposta esperada e a bancada de testes induz a pressão para a deformação correta no corpo de prova.

Figura 4 - Deformação medida por extensometria

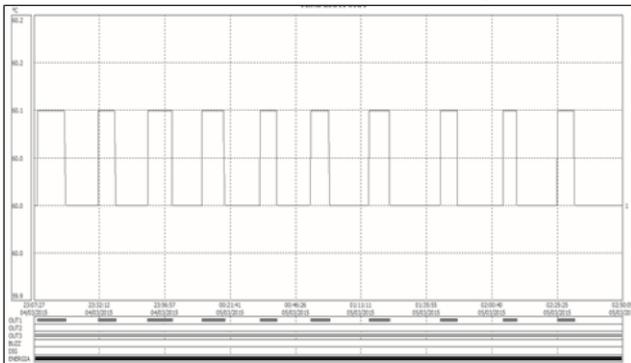


Fonte: Software D4, extensometria resistiva

A viscosidade do óleo está ligada à temperatura do sistema, causando variações de velocidade entre ciclos e mudança nos picos e vales de pressão. Então faz-se necessário um mecanismo de resfriamento. Foram utilizados dois ventiladores industriais para este resfriamento, um direcionado ao painel hidráulico e outro direcionado ao reservatório de fluido. Um termopar instalado dentro do reservatório interpreta e comanda o ligamento e o desligamento dos resfriadores conforme necessidade. O range de temperatura ideal encontrado foi de 60 a 60,2

graus Celsius. Mantendo constante a repetitividade dos picos e vales assim como a velocidade entre ciclos. Validando os controles de temperatura. A figura abaixo ilustra a validação dos controles de temperatura.

Figura 5 - Controle de Temperatura



Fonte: Software Sitrad

4 CONCLUSÃO

Em paralelo a este trabalho foram executados testes de pressão em regime de fadiga em 33 corpos de prova para a defesa da dissertação de mestrado do autor (Jagiello, 2015), cuja intenção era estudar concentradores de tensão na forma de defeitos superficiais. A bancada mostrou ótimos resultados na obtenção de dados com qualidade e confiabilidade. Comprovando seu funcionamento a qual foi designado. Operando por mais de 40 milhões de ciclos sem apresentar falhas.

Um fato observado é que a concepção deste projeto não é apenas designado para testes de fadiga em vasos de pressão. Por exemplo, esta bancada pode ser utilizada em testes estáticos de pressão, testes em tubulações, testes hidrostáticos, acionamento de pistões ou qualquer outra aplicação que designe deslocamento de pressão com patamares prédefinidos. Outro setor a ser beneficiado é o de inspeção de vasos, pois sempre esteve desprovido de tal modelo de equipamento.

O uso do óleo mostrou um custo superior no desenvolvimento dos testes, comparado com o da água, a escolha do óleo foi devido aos componentes hidráulicos disponíveis no mercado, não estarem preparados para a utilização com água.

A segurança que a bancada fornece também foi tomada como aceitável, pois existe redundância em vários componentes, e o fluido sendo incompressível torna-a ainda mais segura.

A bancada apresentou grande importância para o mercado nacional e para a indústria de vasos de pressão, este equipamento é capaz de validar projetos de forma prática e confrontar com a teoria, ou ainda, testar itens que não estão totalmente definidos pela teoria.

REFERÊNCIAS

CASTRO, Jaime Tupiassú Pinho de; MEGGIOLARO, Marco Antônio. **Comentários sobre a automação do método E-N para Dimensionamento à fadiga sob carregamentos complexos**. PUC Rio, Rio de Janeiro, v. 1, p.110, 01 maio 2015.

FULL GAUGE CONTROLS (Org.). **Software Sitrad**. 2015. Disponível em: <<http://www.sitrad.com.br/>>. Acesso em: 14 maio 2015.

GROEHS, Ademar Gilberto. **Resistência dos materiais e vasos de pressão**. 5. Ed. São Leopoldo: Unisinos, 2006

JAGIELLO, Elias Inacio. **Análise teórica e experimental de vasos de pressão submetidos à fadiga com influência de defeitos superficiais**. 2015. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Unisociesc, Joinville, 2015.

MICRO MEASUREMENTS (Unites States). **Stress analisys strain gauges**. 2015. Disponível em:<<http://www.vishaypg.com/micromeasurements/>>. Acesso em: 14 maio 2015.

EQUIPMENT FOR FATIGUE TEST ON PRESSURE VESSELS

Abstract: *This paper presents the elements that constitute the construction of an equipment for cyclic tests on pressure vessels, also called fatigue bench. The pressure vessels were pressurized with a sinusoidal or irregular basis. To pressurize with 180 kgf/cm² (18 MPa), a determined fluid with a flow rate of 12 liters per minute and a reading frequency of 4 Hz was moved to vessels. The fatigue bench has broad application in any industry that manufactures pressure vessels. For this fatigue bench, it was described the main specifications of mechanical, hydraulic, and electronic elements. The collection of data and its quality help technicians and engineers to develop new theories, confronting existing theories and further validating equipments with dubious construction. The development of the bench was mainly focused on the lack of national equipments for fatigue tests on real pressure vessels. After the completion of fatigue bench, 30 tests were carried out, obtaining reliable and acceptable quality data.*

Keywords: *Fatigue, pressure vessels, Bench, Equipment.*