



Reconectando Pessoas,
Ciências, Artes e
Tecnologia

Anais do

XI Congresso de Engenharias da UFSJ

Part of ISSN 2237-0358

Conteúdo disponível em: doi.org/10.29327/1317088.11-1



PROJETO DE CÉLULA DE CARGA PARA INSTRUMENTAÇÃO DE DISPOSITIVO DE ENSAIOS DE FADIGA EM FLEXÃO PLANA

Bárbara Andrade Vargas ⁽¹⁾ (b.vargas@hotmail.com.br)

José de Ávila Júnior ⁽¹⁾ (jose.avila@ufs.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal de São João del-Rei. Departamento de Engenharia Mecânica e Produção. São João del-Rei –MG

RESUMO: O presente trabalho consiste na adaptação de um sistema que exerça a função de uma célula de carga para incorporação no dispositivo de ensaio de fadiga em flexão plana criado pelo Departamento de Engenharia Mecânica e Produção da UFSJ, visando a instrumentação e a modernização do equipamento. O dispositivo de ensaio de fadiga tem como finalidade, avaliar a durabilidade de amostras poliméricas planas quando sujeitas a tensões de flexão. Entretanto, o dispositivo ainda não possuía instrumentação necessária capaz de medir as forças e tensões que atuavam sobre as amostras ensaiadas. Baseando-se em resultados de simulação numérica computacional e dados experimentais, foi possível determinar tais parâmetros, juntamente com o deslocamento máximo suportado na extremidade da amostra, que recebe o movimento rotacional transmitido pela barra, resultante de um sistema motriz. Por fim, novas configurações na estrutura física do mecanismo foram sugeridas para a incorporação de uma célula de carga simplificada. Essa nova configuração do sistema incluiria uma nova barra, sobre a qual seriam posicionados os extensômetros responsáveis por captar a deformação mecânica causada na amostra polimérica submetida a um estado de tensão.

PALAVRAS-CHAVE: fadiga em flexão, análise por elementos finitos, projeto de sistemas mecânicos.



Os autores são os únicos detentores dos direitos autorais.

São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil

25-29 de setembro de 2023

[B.L. Resende](#), [C.M. Vale](#) & [R.J. Silva](#) (Organização & Edição)

1. INTRODUÇÃO

A análise de componentes estruturais está diretamente relacionada ao projeto de sistemas mecânicos, uma vez permitir avaliar, ainda em fase de projeto, o desempenho desses componentes a fim de se evitar possíveis falhas. A maioria dos sistemas mecânicos possuem componentes cuja função básica é suportar e transmitir esforços. Logo, estes componentes estruturais do sistema precisam ser corretamente dimensionados de modo a resistirem às cargas previstas no projeto, ficando evidente a importância da análise estrutural.

Segundo, Callister Jr. (2008), a fadiga é um tipo de falha estrutural decorrente da atuação de carregamentos dinâmicos, como os que atuam sobre pontes, aeronaves e componentes de máquinas, e ocorre, geralmente, a um nível de tensão bem inferior ao limite de escoamento do material. Deste modo, a falha por fadiga é sempre provocada pela exposição do componente a um número de ciclos de carregamento superior ao que ele é capaz de resistir.

Grande parte dos polímeros possui um limite de resistência à fadiga (e, conseqüentemente, um limite de durabilidade) que resulta em um patamar de vida não infinita (ALMEIDA e SILVEIRA, 2013). Sendo assim, é de suma importância que o projetista seja capaz de estimar o número de ciclos que um componente fabricado em polímero suporte quando submetido a uma tensão de flexão variável no tempo. Para suprir esse tipo de demanda, foi desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Mecânica e Produção (DEMEP) da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) um dispositivo de ensaios de fadiga em flexão plana (Figura 1). Trata-se de um equipamento que pode ser utilizado para a análise da resistência à fadiga de amostras poliméricas planas segundo as diretrizes da norma DIN 53 442 (BEUTH VERLAG GMBH, 1990). Basicamente, o equipamento é composto por um mecanismo que é responsável por transformar o movimento rotacional do motor elétrico em movimento alternado de flexão plana da amostra. O dispositivo de ensaio também pode ser utilizado para o estudo de outro fator que interfere na durabilidade do componente: a variação da frequência de oscilação durante a exposição do componente a determinadas tensões. Além disso, o dispositivo de ensaio possui uma câmara térmica (conforme mostrado na Figura 1), responsável por manter as amostras poliméricas em temperaturas controladas durante o ensaio, permitindo-se, assim, que sejam realizados estudos sobre a influência da temperatura no limite de resistência à fadiga do material.

Embora apresente tal versatilidade de uso, o dispositivo de ensaio ainda não possuía uma célula de carga acoplada capaz de medir as forças que atuavam sobre as amostras ensaiadas. Até

então, a determinação destas forças e, consequentemente, das tensões máximas na amostra ocorria a partir da análise por elementos finitos, por meio do pacote de *softwares* Altair HyperWorks, baseando-se nos deslocamentos submetidos às amostras poliméricas durante o ensaio de fadiga.



FIGURA 1. Primeira versão do dispositivo para ensaios de fadiga em flexão plana.

Fonte: de autoria própria.

1.1. Célula de carga e extensometria

Extensimetria é a técnica que utiliza a célula de carga para análise e medição de tensões e deformações em estruturas mecânicas. Segundo Beck (1983), célula de carga é um dispositivo eletromecânico que funciona como um transdutor de medição de força, capaz de transformar um tipo de energia em outra. Em uma célula de carga (Figura 2), o sinal elétrico de resposta ao estímulo mecânico é obtido através de extensômetros. Os extensômetros são sensores elétricos medidores de deformação capazes de captar, por meio da variação de sua resistência elétrica, a deformação mecânica causada no material sujeito a um estado de tensão. A funcionalidade de um extensômetro baseia-se exatamente na relação deformação-resistência do material condutor elétrico do qual é feito, tendo-se em vista que todo condutor elétrico muda sua resistência elétrica quando submetido a esforços mecânicos (GRANTE, 2004; ARAÚJO *et al.*, 2012; SPINARDI *et al.*, 2014).

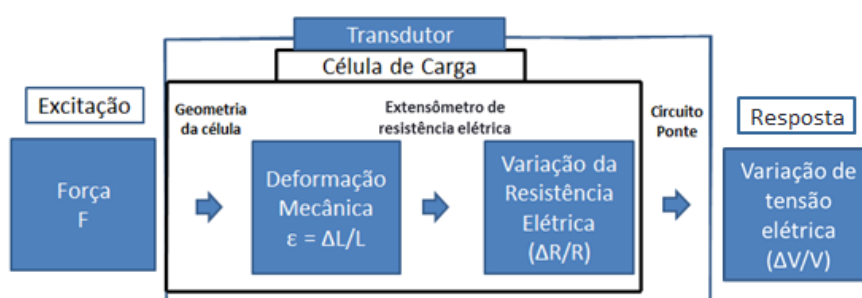


FIGURA 2. Diagrama de processamento de informação de uma célula de carga desde sua excitação até a resposta de medição. **Fonte:** Weber (2014).

Uma característica fundamental de um extensômetro é sua sensibilidade à deformação, ou *gage fator* (k), que relaciona a variação de seu comprimento, sinal de entrada relacionado à sua deformação, com a variação de sua resistência elétrica, sinal de saída. Para se aumentar a precisão da captação da deformação dos extensômetros e se obter uma maior sensibilidade no sinal de saída, os extensômetros são, geralmente, montados em circuito ponte de Wheatstone. Deste modo, a deformação pode ser convertida em tensão elétrica e amplificada para leitura em uma placa de aquisição de dados.

1.2. Simulação numérica computacional

A simulação numérica computacional tornou-se uma ferramenta indispensável para diversas áreas de atuação da engenharia devido à sua facilidade de analisar diversos fenômenos físicos complexos. Dentre os métodos mais utilizados em simulações numéricas computacionais, destaca-se o método dos elementos finitos (FEM). Segundo Souza (2014), o método dos elementos finitos é um método numérico que permite simular os fenômenos físicos de um meio contínuo, descritos por meio de equações diferenciais parciais, dividindo o domínio do problema em sub-regiões de dimensões finitas e de geometria simples. Ou seja, é um método capaz de determinar o estado de tensão e de deformação de um corpo de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores, subdividindo o problema de resolução complexa em uma série de problemas mais simples (AZEVEDO, 2003).

O pacote de *softwares* HyperWorks, por meio do método dos elementos finitos, oferece uma ampla gama de recursos para a solução de diversos tipos de problemas. Dentre os *softwares* do HyperWorks, destacam-se: o HyperMesh, utilizado no pré-processamento ou modelagem dos problema; o HyperView e o HyperGraph, utilizando no pós-processamento ou visualização dos resultados; e o MotionSolve, o OptiStruct e o Radioss, *solvers* responsáveis pelas soluções numéricas do sistema de equações lineares tipicamente utilizado pelo método de elementos finitos.

A análise por elementos finitos utilizada para solução de problemas envolvendo estruturas sujeitas a carregamentos estáticos pode ser representada pela Equação 1, sendo K a matriz de rigidez da estrutura, u o vetor deslocamento e P o vetor dos carregamentos aplicados à estrutura. Basicamente, esta equação representa o equilíbrio entre as forças externas e as forças internas do sistema.

$$Ku = P \quad (1)$$

Para uma análise estática linear, que pode ser realizada pelo Optistruct, em que as deformações estão no regime elástico, as tensões (σ) são assumidas como funções lineares das deformações (ε). Sendo assim, a lei de Hooke pode ser utilizada para calcular as tensões atuantes na estrutura (Equação 2, sendo D a matriz constitutiva de elasticidade do material).

$$\sigma = D\varepsilon \quad (2)$$

Em análises não lineares, que podem ser realizadas pelo Radioss, a equação de movimento (Equação 3) deve ser resolvida, sendo M a matriz massa e C a matriz amortecimento do sistema. Essas matrizes são determinadas ao se dividir o domínio do problema em elementos finitos.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P \quad (3)$$

Finalmente, uma análise transiente, que pode ser realizada pelo MotionSolve, pode ser usada para se calcular respostas de sistemas multicorpos sujeitos a carregamentos e movimentos dependentes do tempo. Tipicamente, os resultados dessas análises transientes envolvem deslocamentos, velocidades, acelerações e forças, bem como, contribuições modais para tensão e deformação de corpos flexíveis. A equação do movimento resolvida por esse tipo de análise é dada pela Equação 4, sendo q o vetor das coordenadas generalizadas. Rigidez, amortecimento, forças de restrição, cargas externas e efeitos gravitacionais são todos incluídos no vetor de força externa $P(t)$.

$$M\ddot{q} = P(t) \quad (4)$$

O MotionSolve é um *solver* multicorpos, termo usado neste contexto para representar sistemas complexos encontrados em uma ampla variedade de indústrias como as de transportes, as de máquinas industriais, as de sistemas aeroespaciais e as de sistemas eletromecânicos. A característica que define todos estes sistemas é que eles podem ser submetidos a movimentos globais que são comparáveis com suas dimensões. Estes sistemas são normalmente representados por conjuntos de partículas conectoras, corpos rígidos e corpos flexíveis que são submetidos a uma variedade de forças externas (ALTAIR, 2015). Dessa forma, a metodologia de dinâmica de

multicorpos (MBD) é uma abordagem sistemática para o entendimento e a melhoria do desempenho global dos sistemas, sendo descrita por equações algébricas diferenciais de segunda ordem. Neste tipo de análise, os seguintes parâmetros são avaliados: a massa e a inércia dos componentes; as propriedades geométricas do sistema, incluindo a localização do centro de massa de cada componente, a localização das juntas que conectam o sistema, os pontos nos quais as funções específicas de movimento e forças são aplicadas; a forma geométrica dos corpos, quando o contato entre eles é importante; a conectividade (mecanismos de ligação das partes) para o sistema, definida em termos de juntas mecânicas e elementos elásticos; e a descrição das forças externas e das excitações que atuam no sistema.

1.3. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi o projeto de uma célula de carga que pudesse ser instalada no dispositivo de ensaio de fadiga em flexão plana do DEMEP/UFSJ, visando a instrumentação e modernização do equipamento. O objetivo secundário envolveu a utilização de diferentes tipos de análise por elementos finitos para se estimar as forças impostas às amostras poliméricas durante o funcionamento do dispositivo de ensaio de fadiga.

2. METODOLOGIA

Inicialmente, realizou-se a medição dos componentes principais do mecanismo de fadiga existente para, então, desenhá-lo no *software* CAD (desenho auxiliado por computador) Autodesk Inventor. Posteriormente, foram realizadas as simulações numéricas usando o método dos elementos finitos obtendo-se, assim, dados essenciais para a instrumentação da célula de carga, como, por exemplo, o valor da força a ser suportada por ela para que não comprometesse suas características (sensibilidade, material utilizado para projetá-la e comportamento mecânico diante do tipo de esforço ao qual foi submetida).

Devido à necessidade de se obter o carregamento imposto às amostras poliméricas quando um determinado deslocamento rotacional fosse aplicado a elas, utilizou-se o pacote de *softwares* HyperWorks, permitindo-se que diferentes métodos de análise fossem analisados em busca de resultados mais próximos das condições de ensaio do dispositivo de fadiga.

O método dos elementos finitos segue um modelo de procedimento representado por três etapas principais: a modelagem do problema (pré-processamento), a solução numérica e a

visualização dos resultados (pós-processamento). A primeira etapa foi realizada no HyperMesh, onde as geometrias dos componentes no formato CAD passaram por um processo de simplificação. Em seguida, malhas bi e tridimensionais foram criadas, dependendo da geometria utilizada. Antes de cada simulação, a qualidade das malhas foram verificadas, pois isso influencia diretamente na qualidade dos resultados. Na sequência, foram inseridas as propriedades dos elemento e do material utilizado, tais com o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a massa específica. Posteriormente, foram aplicadas as condições de contorno (carregamentos e restrições) do problema. Foram realizadas análises do problema em cada um dos *solvers* citados anteriormente: MotionSolve, Optistruct e Radioss. Por fim, os resultados obtidos (deslocamentos, tensões e forças) foram visualizados no HyperView e no HyperGraph.

Devido à necessidade de se confirmar que os resultados obtidos via software de simulação numérica fossem condizentes com os resultados experimentais, foi simulado o ensaio de tração de um corpo de prova padronizado fabricado em material polimérico. Os resultados experimentais do ensaio de tração do ABS (acrilonitrila butadieno estireno) (Figura 3), obtidos por Moraes e Silveira (2015), foram utilizados na comparação com os resultados das simulações numéricas. Foi considerado o intervalo linear entre as tensões de 5 a 22 MPa como a região de análise, uma vez que ocorre apenas deformação elástica nesta região. Utilizando a lei de Hooke, foi possível calcular o valor do módulo de elasticidade (E) para cada amostra polimérica.

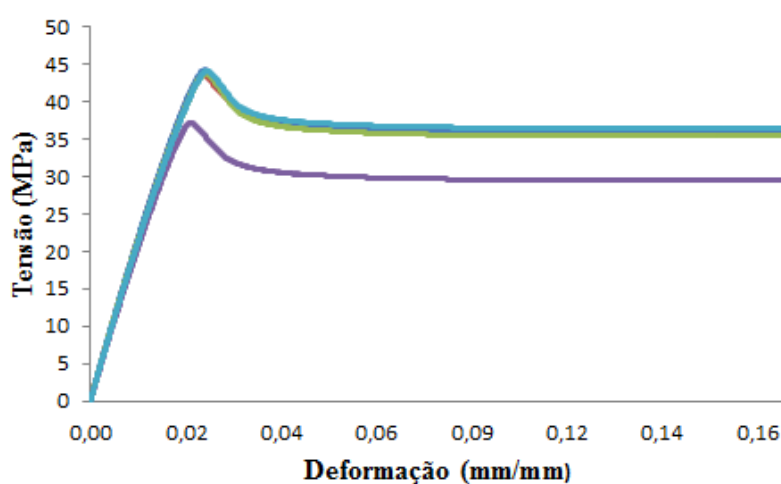


FIGURA 3. Dados experimentais referentes ao ensaio de tração. **Fonte:** de autoria própria.

Deste modo, o módulo de elasticidade utilizado para a simulação do ensaio de tração é 2.641,50 MPa, média aritmética dos valores experimentais obtidos de cinco amostras. Uma vez

definido o valor do módulo de elasticidade, foi possível realizar a simulação do ensaio de tração nos três diferentes *solvers*: MotionSolve, OptiStruct e Radioss. A análise foi executada tanto com a geometria bidimensional do corpo de prova (amostra polimérica) quanto com a geometria tridimensional, visando-se a determinação do deslocamento, da força e da tensão ao qual estaria sujeito o corpo de prova no ensaio de tração utilizando-se os mesmos parâmetros dos ensaios experimentais. Uma velocidade de deslocamento de 2 mm/min foi utilizada nas análises transientes.

No *solver* Radioss, utilizou-se, como condição de contorno, a restrição de todos os movimentos em uma das extremidades do corpo de prova e, na outra, a imposição da velocidade de deslocamento definida anteriormente, possibilitando-se a obtenção de resultados determinantes para execução dos demais procedimentos.

No *solver* Optistruct, foi realizada uma análise estática linear, em que o corpo de prova foi submetido à restrição dos movimentos translacional e rotacional em uma das extremidades e, na outra, foi imposto um deslocamento correspondente à velocidade de 2 mm/min aplicada, definido anteriormente pela simulação realizada no Radioss.

Já no MotionSolve, foi desenvolvida uma análise dinâmica de multicorpos, em que as restrições e movimentos foram realizadas por meio de conectores específicos: de um lado, uma junta fixa para limitar a movimentação de uma das extremidades do corpo de prova e, do outro, uma junta deslizante sobre a qual foi imposta a velocidade preestabelecida.

As configurações adotadas em cada análise incluíram dois tipos de elementos: os bidimensionais ou de casca e os tridimensionais representados pelo próprio sólido (Figura 4).

Além das simulações do ensaio de tração, foram analisados outros modelos baseados no funcionamento real do dispositivo de ensaio de fadiga, adotando-se as mesmas ferramentas de simulação numérica computacional. O objetivo desta análise foi representar o deslocamento rotacional imposto ao corpo de prova para se obter, posteriormente, o carregamento proveniente destes movimentos do dispositivo. Nesta nova etapa, foram realizadas duas análises em cada *solver*.

A primeira análise utilizou elementos bidimensionais, gerados a partir da superfície média do corpo de prova, e o *solver* OptiStruct. A restrição de movimento de um lado do corpo de prova foi imposta por meio de elementos rígidos, que limitam os movimentos translacional e rotacional,

em relação a um ponto localizado a 15 mm do centro do furo da superfície média, representando a posição em que o corpo de prova é preso na estrutura do dispositivo. No outro lado da superfície média, utilizou-se o mesmo elemento de restrição, mas com um afastamento do centro do furo de 32,5 mm e do centro da superfície de 2,5 mm. Além disso, um deslocamento rotacional foi imposto neste ponto distante de 2,5 mm do ponto central da superfície média, uma vez que o corpo de prova não se encontrava centralizado com o ponto de rotação real do mecanismo.

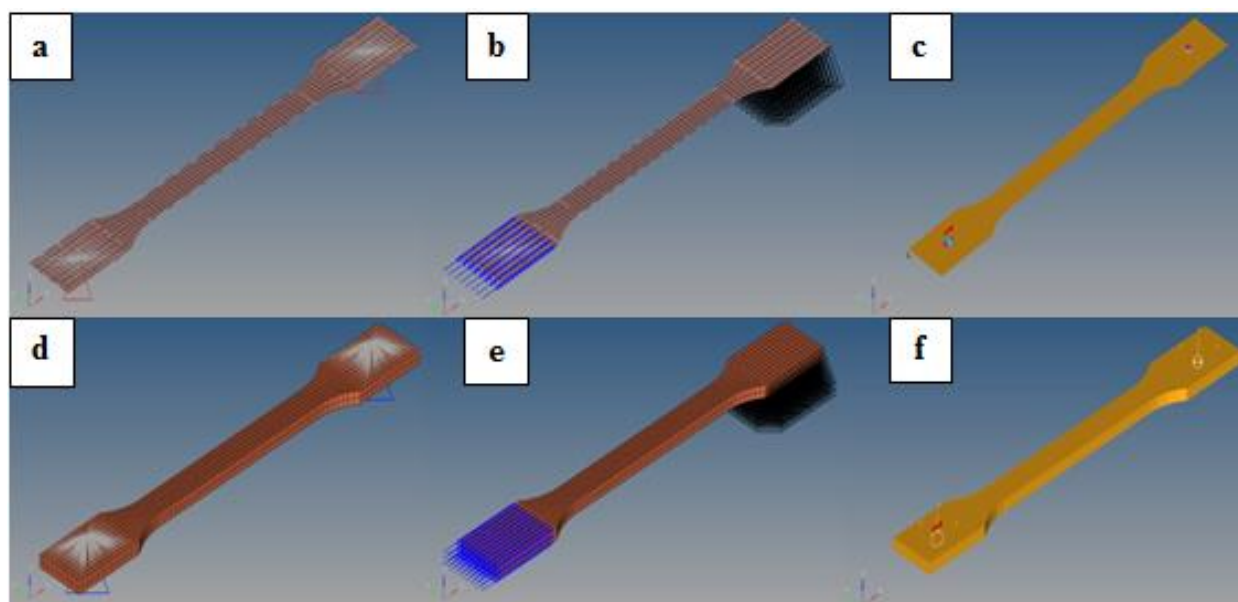


FIGURA 4. Configurações adotadas na simulação do ensaio de tração em cada *solver*: elementos de casca no Optistruct (a), no Radioss (b) e no MotionSolve (b); e elementos tridimensionais no Optistruct (d), no Radioss (e) e no MotionSolve (f). **Fonte:** de autoria própria.

Na segunda análise, também realizada no Optistruct, foram utilizados elementos tridimensionais para representar o corpo de prova. A aplicação das condições de contorno seguiu as mesmas etapas utilizadas anteriormente. A única exceção foi o ponto de rotação, agora deslocado de apenas 1 mm do ponto central da superfície do corpo de prova, já que, neste caso, não se tinha a superfície média como referência do corpo.

Na terceira análise, foi utilizado o *solver* MotionSolve. Este tipo de análise permitiu um estudo mais abrangente, envolvendo outros componentes do dispositivo de fadiga. Neste caso, além do corpo de prova, tinha-se, também, o mecanismo fixo e o mecanismo móvel do dispositivo, nos quais o corpo de prova era fixado. Também foram inseridas juntas entre esses componentes: uma para fixar a base do dispositivo e outras duas para fixar o corpo de prova em

cada um dos braços de suporte. E, novamente, um deslocamento rotacional foi imposto neste conjunto, utilizando-se uma junta rotativa no centro de rotação do mecanismo.

A quarta análise seguiu as mesmas etapas da análise anterior, com a diferença de que a geometria importada do *software* de desenho envolveu mais componentes, se assemelhando ainda mais com a estrutura física real do dispositivo. Assim, além do corpo de prova, dos mecanismos móvel e fixo formados pelos braços direito e esquerdo, incluiu-se a barra que unia o braço direito ao cursor que estava preso ao flange. E essa nova configuração fez com que a rotação deixasse de ser aplicada em um ponto deslocado do ponto central do corpo de prova, como aconteceu nas duas primeiras análises, e deixasse, também, de ser aplicada no centro de rotação do mecanismo, como na terceira análise. Dessa forma, a rotação foi aplicada no flange, uma vez que ele estava acoplado ao motor que o transmitia o movimento de rotação. Tal movimento era transmitido à barra e, conseqüentemente, ao corpo de prova.

No *solver* Radioss, as configurações adotadas foram muito similares às configurações usadas no OptiStruct: restrição dos movimentos translacional e rotacional em um extremidade do corpo de prova e imposição de rotação em um ponto localizado no centro geométrico da amostra polimérica distante da superfície em 2,5 mm na simulação utilizando elemento de casca e em 1 mm na simulação utilizando elementos sólidos. No Radioss, foram realizadas análises dinâmicas não lineares no domínio do tempo. Já no OptiStruct, as análises foram estáticas lineares.

Por fim, foi realizado, no MotionSolve, uma análise baseada nos mesmos princípios de funcionamento desenvolvidos na quarta análise. Neste caso, entretanto, simulou-se a configuração de um novo dispositivo de ensaio de fadiga com a proposta de célula de carga inserida.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para as simulações do ensaio de tração realizados nos três diferentes *solvers* são apresentados na Tabela 1. Os valores de força obtidos foram comparados com a média aritmética dos valores de força encontrados nos testes experimentais para cada amostra, de 371 N.

É possível observar que o erro relativo na predição, via método dos elementos finitos, da força aplicada durante o ensaio de tração é razoavelmente elevado (ligeiramente acima de 10%). Entretanto, deve-se levar em consideração o fato de que os resultados das simulações numéricas

foram baseados em simplificações do ensaio de tração experimental. Como os valores obtidos para a força apresentaram pequena (menor que 1%) variação entre três *solvers*, não foi possível assumir que apenas um deles era o mais preciso em relação aos dados experimentais. Sendo assim, as simulações baseadas no funcionamento real do mecanismo de ensaio de fadiga em flexão plana, também foram realizadas nos três *solvers*, resultando em novos valores para deslocamento, força e tensão, de acordo com os deslocamentos angulares aplicados. Os resultados são apresentados nas Tabelas 2 a 4.

TABELA 1. Resultados das simulações do ensaio de tração.

Fonte: de autoria própria.

<i>Solver</i> (Tipo de elemento)	<i>MotionSolve</i> (casca)	<i>MotionSolve</i> (sólido)	<i>Optistruct</i> (casca)	<i>Optistruct</i> (sólido)	<i>Radioss</i> (casca)	<i>Radioss</i> (sólido)
d (mm)	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,334
σ (MPa)	8,644	8,758	8,637	8,757	8,615	8,767
F (N)	332,5	333,3	332,5	333,4	330,3	331,1
Erro relativo (%)	10,37	10,16	10,37	10,13	10,97	10,75

TABELA 2. Resultados das simulações para o deslocamento angular de 1°.

Fonte: de autoria própria.

<i>Solver</i> (Tipo de elemento)	<i>MotionSolve</i> (montagem apenas braços e corpo prova)	<i>MotionSolve</i> (montagem completa)	<i>Optistruct</i> (casca)	<i>Optistruct</i> (sólido)	<i>Radioss</i> (casca)	<i>Radioss</i> (sólido)
d (mm)	0,7885	0,7886	0,7866	0,7883	0,7864	0,7883
σ (MPa)	4,916	4,914	4,97	4,714	3,225	4,631
F (N)	185,2	185	167,6	174,4	171,4	172,7

TABELA 3. Resultados das simulações para o deslocamento angular de 2,5°.

Fonte: de autoria própria.

<i>Solver</i> (Tipo de elemento)	<i>MotionSolve</i> (montagem apenas braços e corpo prova)	<i>MotionSolve</i> (montagem completa)	<i>Optistruct</i> (casca)	<i>Optistruct</i> (sólido)	<i>Radioss</i> (casca)	<i>Radioss</i> (sólido)
d (mm)	1,971	1,971	1,967	1,971	1,966	1,971
σ (MPa)	13,03	13,03	12,42	11,79	8,148	12,48
F (N)	502,2	501,8	419,1	436,1	436,7	446,4

TABELA 4. Resultados das simulações para o deslocamento angular de 5°.**Fonte:** de autoria própria.

<i>Solver</i> (Tipo de elemento)	<i>MotionSolve</i> (montagem apenas braços e corpo prova)	<i>MotionSolve</i> (montagem completa)	<i>Optistruct</i> (casca)	<i>Optistruct</i> (sólido)	<i>Radioss</i> (casca)	<i>Radioss</i> (sólido)
d (mm)	3,942	3,939	3,933	3,942	3,932	3,941
σ (MPa)	28,54	28,50	24,85	23,57	15,17	28,65
F (N)	1135,3	1134	838,2	872,3	850,5	898,7

Pode-se observar que, para cada valor de deslocamento angular aplicado, o deslocamento transversal se manteve aproximadamente constante entre as análises realizadas por diferentes modelos numéricos. Isso se deve ao fato de que o deslocamento transversal é uma variável cujo fator primordial de dependência é a geometria sobre a qual o carregamento é aplicado, algo que não foi alterado entre as análises.

Quanto aos valores de tensão, ocorreu uma variação maior, mas não tão significativa (menor que 10%), com exceção dos resultados encontrados para as análises com os elementos de casca no Radioss. Possivelmente, isso seja resultado da utilização de elementos rígidos para se fixar o corpo de prova e para se aplicar o carregamento. Estes elementos rígidos conectados aos elementos da malha, não permitiram que estes elementos do corpo de prova se deformassem corretamente, o que pode ter comprometido os resultados para a tensão distribuída ao longo do componente.

Em relação ao parâmetro força, principal variável de interesse, nota-se que os resultados apresentaram variações de até 26% entre simulações. Apesar do fato de que todas as análises objetivaram a simulação do funcionamento real do dispositivo de ensaio de fadiga em flexão para se obter a força ao qual a amostra polimérica era submetida, cada um dos *solvers* empregou uma metodologia diferente.

As Figuras 5 a 8 mostram os resultados de deslocamento transversal obtidos nas análises realizadas em cada solver para um deslocamento angular de 1°.

Em síntese, em relação à análise estática linear realizada pelo Optistruct e à análise dinâmica não linear realizada no Radioss, o MotionSolve ofereceu um resultado mais completo e abrangente, que exige maiores detalhes e informações do sistema a ser analisado. Como dito anteriormente, a análise pelo método dinâmico de multicorpos permitiu que os sistemas

analisados pudessem ser submetidos a movimentos globais que são comparáveis com suas dimensões, isto é, tal metodologia tentou representar, de maneira mais fiel possível, as características peculiares dos sistemas reais. Portanto, a última simulação que adotou a nova configuração estrutural do dispositivo de ensaio de fadiga foi realizada no solver MotionSolve, fornecendo novos resultados para deslocamento, tensão e força no corpo de prova (Tabela 5).

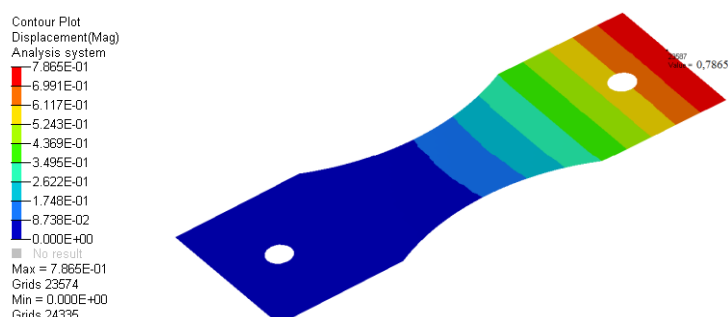


FIGURA 5. Simulação numérica realizada no Optistruct com deslocamento máximo provocado na amostra pela imposição da rotação de 1°. **Fonte:** de autoria própria.

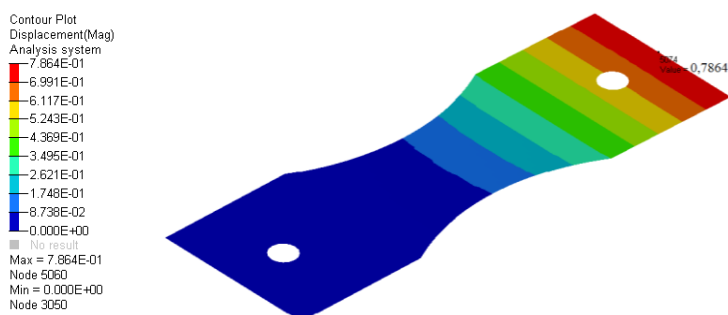


FIGURA 6. Simulação numérica no Radioss com deslocamento máximo provocado na amostra pela imposição da rotação de 1°. **Fonte:** de autoria própria.

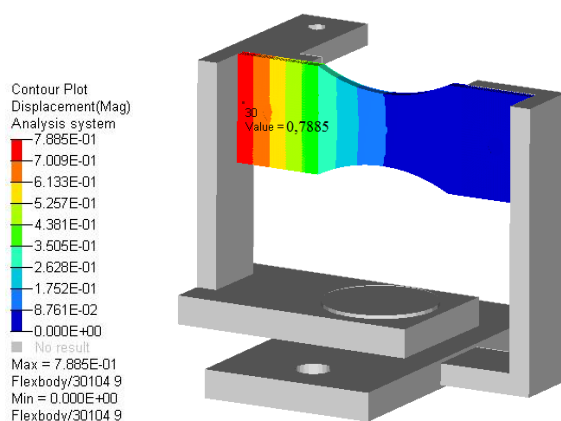


FIGURA 7. Simulação numérica realizada no MotionSolve (montagem contendo apenas braços e corpo de prova) com deslocamento máximo provocado na amostra pela imposição da rotação de 1°. **Fonte:** de autoria própria.

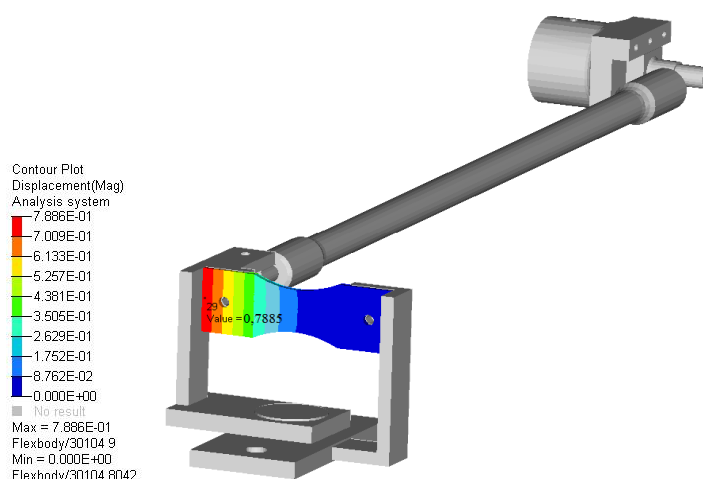


FIGURA 8. Simulação numérica realizada no MotionSolve (montagem completa) com deslocamento máximo provocado na amostra pela imposição da rotação de 1°.

Fonte: de autoria própria.

TABELA 5. Resultados das simulações realizadas no MotionSolve relacionadas à imposição de deslocamentos angulares nas amostras poliméricas. **Fonte:** de autoria própria.

Deslocamento angular	1°	2,5°	5°	7,5°
d (mm)	0,787	1,965	3,931	5,894
σ (Mpa)	2,99	8,08	18,17	30,2
F (N)	104,1	295,1	705,1	1225

Foi possível constatar que o corpo de prova não deveria ser submetido a um deslocamento rotacional superior a 7,5°, uma vez que a tensão máxima no componente, estimada pela simulação numérica, já estaria no início do regime elástico do material (conforme mostrado na Figura 3).

Nesta simulação, foi incorporada uma nova configuração estrutural do dispositivo de ensaio de fadiga, que se fez necessária diante da implementação de novos componentes que representariam uma proposta adaptável de célula de carga. A nova estrutura do dispositivo manteve alguns dos elementos do dispositivo original, como pode ser observada na Figura 9.

A concepção da célula de carga passou por uma simplificação e nenhum tipo de célula carga padronizada foi selecionada para o dispositivo. Entretanto, a opção escolhida foi a adaptação de um tipo de célula de carga que atendesse ao propósito original: instrumentar o dispositivo de fadiga para que o mesmo fosse capaz de medir a força sendo imposta ao corpo de

prova pelos movimentos cíclicos aplicados pela barra que recebe o movimento de rotação do motor.

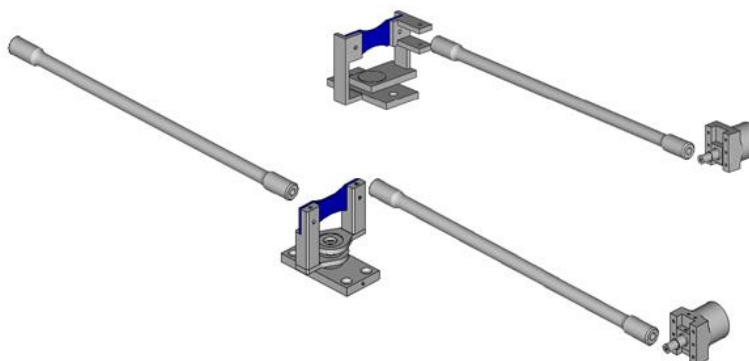


FIGURA 9. Comparação entre o dispositivo de ensaio de fadiga: (a) dispositivo original; (b) novo dispositivo proposto. **Fonte:** de autoria própria.

Dessa forma, o novo mecanismo proposto utilizou uma nova barra, além daquela que transmite a rotação do motor à estrutura móvel do dispositivo. Esta nova barra seria localizada no lado oposto do dispositivo e, acoplada a ela, teria-se um extensômetro, componente essencial para detecção da deformação causada no material da amostra polimérica. Sendo assim, o conjunto formado por esta nova barra, juntamente com o extensômetro, representou a proposta de célula de carga para a instrumentação do novo dispositivo de fadiga.

Vale ressaltar que os extensômetros devem ser posicionados na região central desta nova barra, ou seja, na região afastada da aplicação de carga e dos apoios, tendo-se, assim, variações dos valores de tensão e deformação mais lineares e permitindo-se que a deformação captada por eles fosse a mais precisa possível. A Figura 10 mostra a utilização de extensômetros colados na barra do dispositivo original, uma possível representação da proposta de célula de carga desenvolvida.



FIGURA 10. Representação de extensômetros colados na barra do dispositivo original.

Fonte: de autoria própria.

4. CONCLUSÕES

O dispositivo de ensaio de fadiga inicialmente apresentado precisou sofrer modificações para que a proposta de célula de carga pudesse ser implementada. Porém, nenhum modelo de célula de carga padronizado foi utilizado. Ao invés disso, foram propostas novas configurações do dispositivo, como a inclusão de uma nova barra à qual estaria acoplada extensômetros, resultando-se, assim, em uma célula de carga simplificada, devido à maior facilidade de adaptação desta solução no dispositivo. Os resultados de simulação apontaram a existência de um valor limite de deslocamento rotacional ao qual o corpo de prova pode ser submetido, o que já era esperado, uma vez que esta é a finalidade do dispositivo de ensaio de fadiga. Contudo, não se pode afirmar, sem a devida validação com os resultados de ensaios experimentais, que os valores encontrados com esta proposta de célula de carga do novo dispositivo serão capazes de fornecer o valor de força necessária para provocar a falha da amostra polimérica.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Simulação Numérica Aplicada (LASIN) do DEMEP/UFSJ, à Altair Brasil e à Autodesk pelo apoio na realização deste trabalho.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo das informações contidas neste artigo.

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. C.; SILVEIRA, M. E. Desenvolvimento de um mecanismo de fadiga em flexão a ser utilizado em amostras poliméricas. Anais do XI Congresso de Produção Científica, São João del Rei, 2013.

ALTAIR. Practical aspects of Multi-Body Simulation with HyperWorks, 2015.

ARAÚJO, T. R.; SILVA, J. A.; RODRIGUES, D. S.; RIBEIRO, M. V. F.; GRECO JR., P. C. Metodologia de projeto de célula de carga de geometria “S” para medição estática de empuxo de motores de foguete. Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, São Luís, 2012.

AZEVEDO, A. F. M. Método dos elementos finitos. Fundação Calouste Gulbenkian, Portugal, 2003.

BECK, J. C. P. Projeto, construção e análise de células de carga de placa e de anel. Monografia (Especialização em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 1983.

BEUTH VERLAG GMBH. DIN 53 442: Flexural fatigue testing of plastics using flat specimens. 1990. CALLISTER JR., W. D. Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. 7ed. LTC, Rio de Janeiro, 2008.

GRANTE Grupo de análise e projeto mecânico. Extensometria. Apostila. Florianópolis, 2004.

MORAIS, G. K. S.; SILVEIRA, M. E. Estudo do comportamento em fadiga por flexão plana em polímeros cromados. Anais do XIII Congresso de Produção Científica, São João del Rei, 2015.

ROSA, E. Análise de resistência mecânica - Mecânica da fratura e fadiga. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

SOUZA, R. M. O Método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor. Apostila, Belém, 2003.

SPINARDI, M. A.; CARRARA, V. M.; SILVA, E. C. N. Projeto otimizado de células de carga extensométricas. Disponível em: <<http://143.107.106.66/sites/pmr.poli.usp.br.euniversidade.com.br/files/TF%200605.pdf>>. Acesso em 14 ago. 2014.

WEBER, A. L. Metrologia e instrumentação: Extensometria. Apostila. Caxias do Sul, 2008.