

INCERTEZA DE MEDIÇÃO APLICADA A ENSAIOS DE INDENTAÇÃO PÓS FADIGA EM COLCHÕES E COLCHONETES DE ESPUMA FLEXÍVEL DE POLIURETANO¹

Leandro Sosnoski²

Resumo

Avaliar a qualidade de colchões de espuma flexível de poliuretano condiz com o bem de consumo destinado ao repouso humano, constituído, parcial ou integralmente, por lâminas flexíveis de poliuretano, devidamente revestido. Existem normas para confecção, densidade, deformação permanente à compressão, dentre outras, para que os fabricantes e importadores de colchões mantenham a mesma qualidade dos produtos oferecidos ao consumidor. Estas normas são regidas pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, onde esta faz referências a todos os itens normalizados que o colchão precisa ter para poder ser comercializado dentro do território nacional. Este trabalho visa estudar a incerteza de medição no levantamento do comportamento em indentação pós fadiga da espuma para colchões de espuma flexível de poliuretano. Embora existam normas sobre a análise estatística dos resultados, avaliam-se apenas a dispersão no número de ciclos, não considerando fatores como as fontes de incerteza das tensões aplicadas, da máquina de ensaios utilizada.

Palavras-chave: Indentação pós fadiga; Colchão de espuma; Incerteza de medição.

UNCERTAINTY OF MEASUREMENT APPLIED TO FATIGUE TESTING OF POST INDENTATION IN MATTRESSES AND MATS FLEXIBLE POLYURETHANE FOAM

Abstract

Assessing the quality of foam mattresses flexible polyurethane matches the consumer goods intended for human home, consisting, in part or in full by flexible polyurethane blades, properly coated. There are rules for making, density, compressive permanent deformation, among others, for manufacturers and importers of mattresses maintain the same quality of products offered to consumers. These rules are governed by ABNT - Brazilian Association of Technical Standards, where it makes references to all the standard items that the mattress need to be marketed within the territory. This work aims to study the uncertainty of measurement in the survey of post-indentation fatigue behavior of foam mattresses flexible polyurethane. Although there are regulations on the statistical analysis, evaluate only the dispersion in the number of cycles, not considering such factors as the sources of uncertainty of the applied stress, the testing machine used.

Key words: Post indentation fatigue; Memory foam; Measurement uncertainty.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheiro Mecânico do SENAI, Centro Tecnológico do Mobiliário, Bento Gonçalves, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Avaliar a qualidade de colchões de espuma flexível de poliuretano condiz com o bem de consumo destinado ao repouso humano, constituído, parcial ou integralmente, por lâminas flexíveis de poliuretano, devidamente revestido conforme NBR 13579-1.⁽¹⁾

O fato de se passar “metade” de nossa vida dormindo, faz com que existam normas para confecção, densidade, deformação permanente à compressão, teor de cinzas, dentre outras, para que os fabricantes e importadores de colchões mantenham a mesma qualidade dos produtos oferecidos ao consumidor. Estas normas são regidas pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, onde esta faz referências a todos os itens normalizados que o colchão precisa ter para poder ser comercializado dentro do território nacional.

Existem diversas lacunas no conhecimento no que diz respeito à incerteza de medição aplicada a ensaios de indentação pós fadiga em colchões e colchonetes de espuma flexível de poliuretano, apesar de existirem normas para avaliação estatística de dados e também procedimentos para estimativa da incerteza para alguns tipos de ensaio de fadiga.

A estimativa da incerteza de medição deve ser uma preocupação dos laboratórios de ensaios por ser uma das ferramentas que fornecem confiança às medições realizadas, conforme Pizzolato,⁽²⁾ além de ser uma exigência para acreditação dos laboratórios de ensaios pela norma ABNT NBR ISO 17025,⁽³⁾ junto a institutos como o Inmetro, por exemplo.

Um procedimento correlato é o Uncert CoP 05 de SM&T⁽⁴⁾ que trata de ensaios de taxa de propagação de trincas. A análise estatística utilizada é a mesma utilizada para os ensaios de taxa de propagação, conforme Stephens et al.⁽⁵⁾ Mesmo este dado não ser relevante para espuma de poliuretano flexível, cabe o conceito para verificação de dados de máquina e do próprio corpo-de-prova.

Diversos trabalhos publicados recentemente tratam de alguma forma da incerteza de medição em fadiga. Geralmente tratam da incerteza de certos modelos de previsão de vida em fadiga ou da incerteza relacionada à fadiga em algumas aplicações específicas, Svenssons.⁽⁶⁾ Karadeniz,⁽⁷⁾ Koutsourelakis⁽⁸⁾ e Bengtsson.⁽⁹⁾ Existe pouco material publicado a respeito de incerteza dos resultados dos ensaios de indentação pós fadiga, que são os dados utilizados em projeto, e por isso são de grande importância. Deve ser destacado que há uma estimativa que 90% das falhas de componentes mecânicos ocorrem devido à fadiga.^(5,10,11)

Existem, também, modelos mais sofisticados de redes neurais artificiais.⁽¹²⁾ Nestes modelos inicialmente o sistema é treinado através de dados fornecidos ao programa e depois este pode ser utilizado para prever certas soluções de diferentes problemas. Porém os resultados deste tipo de sistema dependerão da qualidade dos dados utilizados para fazer seu treinamento.⁽¹³⁾ Neste contexto também seria interessante serem conhecidos os valores de incerteza dos dados de fadiga utilizados para o treinamento do sistema, podendo estes valores ser levados em consideração ou servirem apenas como indicativos da qualidade dos dados.

Assim os objetivos deste trabalho são: listar, avaliar e quantificar as diversas fontes de incerteza envolvidas nos ensaios de indentação pós fadiga em colchões e colchonetes de espuma flexível de poliuretano; determinar as fontes mais importantes; apresentar planilhas que expressem a incerteza do ensaio.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Fadiga Dinâmica em Colchões de Espuma Flexível de Poliuretano

Os testes de fadiga dinâmica foram desenvolvidos para prever o desempenho ao deitar e sentar, pela aplicação de uma carga alternante, com um indentador. A fadiga é usualmente descrita como a perda de suporte de carga ou espessura em função do tempo de uso. Estudos indicam que o aumento do teor de água na formulação resulta em maior perda de suporte de carga, atribuída ao maior teor poli uréia e mais ligações de hidrogênio.⁽¹⁴⁾ Resultados relativos ao efeito dos polióis são conflitantes. As espumas HR mostram melhor resistência à fadiga quando o peso molecular e funcionalidade do polioli aumentam, porém, a adição de dióis e trióis de baixo PM leva à redução da resistência à fadiga. Quanto ao isocianato, o aumento do teor de isômero 2,6, leva a maior formação de poli uréia e diminuição da resistência à fadiga. Índices muito superiores a 100 podem resultar em deterioração do desempenho. Em espumas de mesma dureza, a densidade e a histerese são fatores que afetam a fadiga. Nas de mesma densidade a durabilidade será maior naquelas feitas com os polióis que proporcionem melhor histerese. Surfactantes que promovam uma boa estrutura celular com alta porosidade melhoram a resistência à fadiga, que geralmente piora quando a catálise da expansão e polimerização não foi bem balanceada, e com a utilização de catalisadores de estanho.⁽¹⁵⁾

Nas espumas HR em comparação com as convencionais, em geral o alongamento na ruptura, resistência ao rasgo, à compressão (CLD) são menores. Porém, são maiores a resiliência e o fator de conforto (próximo a três), que é expresso pela razão entre as forças de indentação a 65% e a 25%. No Brasil, as propriedades de espumas flexíveis para colchões, são especificadas pela NBR 13579-1⁽¹⁾ da Tabela 1.

Tabela 1. Propriedade das espumas

Propriedades	D18	D20	D23	D26	D28	D33	D40	D45
Força de indentação (FI) – Dureza a 40%, N (mín.)	80	95	110	130	145	165	185	200
Densidade (kg/m ³), (mín.)	16,2	18,0	20,7	23,4	25,2	29,7	36,0	40,5
Tensão de ruptura (kPa), (mín.)	70	90	90	90	90	90	90	90
Alongamento %, (mín.)	120	120	120	120	120	120	100	100
Resistência ao rasgo (N/m), (mín.)	400	450	450	450	450	450	450	450
Resiliência % (mín.)	30		35			40		
Deformação permanente à compressão 90% , % (máx.)	12	10			8			
Suporte de carga, 65% (N), (mín.)	140	160	180	220	240	270	330	340
Fator de conforto, (mín.)	2,0		2,1		2,2			
Cinzas %, (máx.)	1							
Fadiga dinâmica - Perda de espessura %, (máx.)	8	6	5			4		
Perda de suporte 25%, % (máx.)	30	30	25	25	25	25	25	25

2.2 Incerteza de Medição

A incerteza de medição é um parâmetro não-negativo que caracteriza a dispersão de um valor quantitativo atribuído a um mensurando (grandeza submetida à medição) baseado nas informações usadas.⁽¹⁶⁾

O cálculo de incerteza de medição faz uso de cálculos estatísticos, mas é diferente de uma simples análise estatística baseada em média e desvio padrão. Pois esta além de envolver vários passos de análise também leva em consideração outras fontes de erro. Vejamos um exemplo: se realizarmos diversos ensaios de tração para a determinação da tensão de ruptura de certo material, pode-se analisar os resultados estatisticamente a partir da média e do desvio padrão dos valores obtidos. Assim estaríamos analisando a partir do desvio padrão a dispersão dos resultados. Já no cálculo da incerteza de medição além dessa dispersão nos resultados podemos ainda levar em conta a incerteza da carga aplicada e também das medidas utilizadas para calcular a área dos corpos de prova, valores esses que podem ser obtidos, por exemplo, dos certificados de calibração dos equipamentos utilizados.

Passos para determinação da incerteza de medição:

- definir o mensurando e seu modelo;
- identificar as fontes de incerteza;
- quantificar as fontes de incerteza;
- calcular os coeficientes de sensibilidade;
- calcular as componentes de incerteza;
- calcular a incerteza combinada;
- calcular o número de graus de liberdade efetivos;
- calcular o coeficiente de abrangência; e
- calcular a incerteza expandida.

Em geral o mensurando não é medido diretamente, mas sim determinado em função de outras grandezas. Sendo o mensurando Z determinado a partir das grandezas $X_1, X_2, X_3, \dots, X_L$, através da Equação 1, a incerteza de medição de combinada de Z pode ser determinada a partir da Equação 2. No caso das grandezas $X_1, X_2, X_3, \dots, X_L$, serem independentes a Equação 2 pode ser simplificada na Equação 3.⁽¹⁷⁾

$$Z = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_L) \quad (1)$$

$$u_{0z}^2 = \sum_{i=1}^L \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^L \sum_{j=i+1}^L \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) u_{x_i} u_{x_j} r(x_i, x_j) \quad (2)$$

$$u_{0z}^2 = \sum_{i=1}^L \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2 \quad (3)$$

As derivadas parciais presentes na expressão são denominadas coeficientes de sensibilidade (c_{xi}). E o produto do coeficiente de sensibilidade de uma grandeza e sua incerteza é denominado componente de incerteza. A partir da análise dos componentes de incerteza pode-se verificar quais grandezas que mais contribuem

para a incerteza na medição do mensurando Z e, se necessário, tentar reduzir sua influência.

O cálculo do número de graus de liberdade efetivos (v_{eff}) pode ser feito através da Equação 4. Com o valor de v_{eff} e com o nível de confiança (geralmente 95%) é determinado o coeficiente de abrangência com o uso de tabelas da distribuição *t-Student*. E, finalmente, a incerteza expandida é obtida conforme Equação 5.

$$v_{eff} = \frac{u_Z^4}{\sum \frac{u_{x_j}^4}{v_{x_i}}} \quad (4)$$

$$U_Z = k \cdot u_{0_z} \quad (5)$$

Tendo obtido um valor para v_{eff} , a tabela *t-Student* será utilizada para encontrar um valor de $t_p(v)$. A Tabela 2 apresenta alguns valores para $t_{95,45}(v)$.

Tabela 2. *t-Student*

v_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16
$t_{95,45}(v)$	13,9	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,23	2,20	2,17

v_{eff}	18	20	25	30	35	40	45	50	60	80	100	∞
$t_{95,45}(v)$	2,15	2,13	2,11	2,09	2,07	2,06	2,06	2,05	2,04	2,03	2,02	2,00

Fonte: EA-4/02

As incertezas padrão individuais são combinadas para produzir um valor total de incerteza, denominada como *incerteza padrão combinada*. Esta incerteza padrão combinada da estimativa y é representada na Equação 6. A incerteza padronizada é dada pela Equação 7.

$$u_c = \sqrt{a_1^2 \cdot c_{s1} + a_2^2 \cdot c_{s2} + \dots + a_n^2 \cdot c_{sn}} \quad (6)$$

A *incerteza padronizada* é dada pela Equação 2.7.

$$u_p = \frac{U_z}{k} \quad (7)$$

2.2.1 Tipo de fonte de incerteza

As fontes de incerteza podem ser divididas em dois tipos: A e B.⁽¹⁷⁾

Incertezas do tipo A: são provenientes de observações repetidas, nesse caso o valor da incerteza (u) pode ser estimado como o desvio padrão (s) dividido pela raiz do número de observações realizadas.

A dispersão dos resultados indica a repetitividade do processo de medição e depende dos equipamentos utilizados, do método, e algumas vezes do técnico que está efetuando a medição. A função estatística utilizada para caracterizar a dispersão nos resultados é o desvio padrão amostral dos n valores que compõe a amostra (Equação 8).

$$s(x_k) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad (8)$$



Neste caso, a incerteza padrão será caracterizada pelo desvio padrão experimental da média (Equação 9).

$$s(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

Incertezas do tipo B: são aqueles provenientes do julgamento, conhecimentos prévios dos equipamentos, certificados, manuais etc. Os casos mais comuns deste tipo de incerteza são listados na Tabela 3, sendo “a” um valor estimado/parâmetro das distribuições. A distribuição uniforme geralmente é usada quando se conhecem os valores máximo e mínimo de erro de uma medida e não se tem informação alguma sobre sua distribuição. A distribuição triangular é usada quando se conhecem os valores máximo e mínimo e também é conhecido o valor mais provável.

Algumas vezes a mesma fonte de incerteza pode ser considerada do tipo A ou B dependendo da forma pela qual ela é estimada.

Tabela 3. Incertezas tipo B⁽¹⁷⁾

	Valor de incerteza	Gráfico da distribuição
Distribuição uniforme ou retangular	$u = \frac{a}{\sqrt{3}}$	
Distribuição triangular	$u = \frac{a}{\sqrt{6}}$	
Distribuição triangular com uso de instrumento com indicação digital	$u = \frac{r}{2\sqrt{3}}$	

Onde, r = resolução do instrumento a ser calibrado.

2.2.2 Importância da incerteza de medição

Sendo o resultado de uma medição apenas uma estimativa do valor verdadeiro, a incerteza é necessária para expressar o grau de dúvida associado a este resultado. Assim é fácil notar que a incerteza é um dos instrumentos que fornece confiança às medições. Os outros instrumentos que fornecem confiança nas medidas são listados abaixo.⁽²⁾

- sistema internacional de unidade (SI);
- rastreabilidade;
- materiais de referência;
- acordos de reconhecimento mútuo;
- ensaios de proficiência; e
- acreditação.

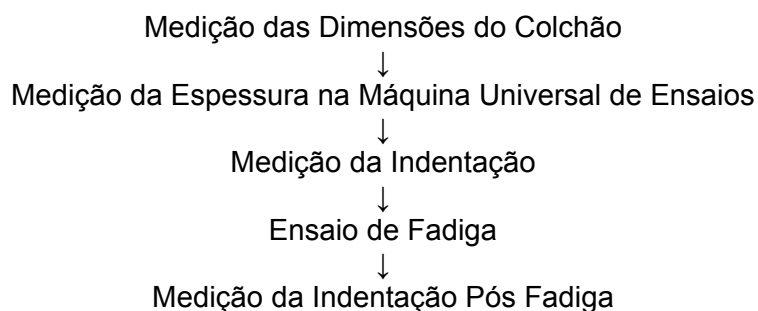
A incerteza também é fundamental em situações como interpretações de resultados de medições e para verificação de conformidade tanto na área de ensaios quanto na de calibração.⁽¹⁸⁾

A incerteza também pode ser um diferencial competitivo, pois o cliente tende a buscar o laboratório com melhor qualidade em suas medidas e, portanto, a menor incerteza. Adicionalmente, a incerteza é uma ferramenta valiosa para o laboratório,

pois permite a identificação dos fatores que mais influenciam no resultado da medição. Desta forma é possível programar formas de controle adequadas para a garantia da qualidade e da melhoria contínua.⁽¹⁹⁾

2.3 Diagrama de Realização de Ensaio

Para a realização dos ensaios são necessários alguns procedimentos, conforme demonstrado no diagrama a seguir:



2.4 Material e Corpos de Prova

Para entendermos dos materiais e corpos de prova que serão usados nos ensaios devemos descrever o seguinte:

- colchão de espuma flexível de poliuretano: Bem de consumo destinado ao repouso humano, constituído, parcial ou integralmente, por lâmina(s) flexível(eis) de poliuretano, devidamente revestido.
- densidade nominal (D): valor numérico que indica a densidade de referência expressa em kg/m^3 ;
- densidade real (D_r): valor numérico obtido por metodologia de ensaio, expressa em kg/m^3 ;
- fator de conforto (F.C): relação entre a força de indentação a 65% e a força de indentação a 25%.

2.4.1 Dimensões do colchão para ensaio

As dimensões totais da espessura, largura e comprimento, assim como da espessura da lâmina de espuma foram verificadas da seguinte forma.

2.4.1.1 Medição do comprimento, largura e altura do colchão e colchonete acabado

- Estendeu-se o colchão/colchonete sobre uma superfície plana e rígida maior que a área do colchão/colchonete;
- manteve-se em repouso o colchão/colchonete por um período não inferior a 30 minutos;
- mediu-se a largura total com a trena, considerando o revestimento, colocando os dois esquadros sobre a superfície plana, encostando as faces verticais (90°) nas laterais do colchão/colchonete, em posições opostas, em três pontos equidistantes, considerando como sua largura total o valor médio encontrado, expresso em centímetros;
- mediu-se o comprimento total com a trena, considerando o revestimento, colocando os dois esquadros sobre a superfície plana, encostando as faces verticais (90°) nas extremidades do colchão/colchonete, em posições opostas,

em três pontos equidistantes, considerando como seu comprimento total o valor médio encontrado, expresso em centímetros; e

- mediu-se a altura total, considerando o revestimento, com a régua ou escala milimétrica. Apoiar longitudinalmente no centro do colchão/colchonete, uma régua sem escala, de forma a ultrapassar as extremidades, a distância entre a superfície de apoio do colchão/colchonete e a parte inferior da régua nas duas extremidades, considerando como sua altura total o valor médio encontrado, expresso em centímetros.

2.4.1.2 Medição da espessura da lâmina de espuma do colchão/colchonete

- Após retirado o revestimento, estendeu-se a(s) lâmina(s) de espuma do colchão/colchonete sobre uma superfície plana e rígida maior que a área da lâmina;
- manteve-se em repouso a(s) lâmina(s) de espuma por um período não inferior a 30 minutos; e
- mediu-se a espessura da(s) lâmina(s) de espuma utilizada na(s) face(s) do colchão/colchonete, com a régua ou escala milimétrica. Apoiou-se longitudinalmente no centro da lâmina de espuma, uma régua sem escala, de forma a ultrapassar as extremidades, a distância entre a superfície de apoio da lâmina de espuma e a parte inferior da régua nas duas extremidades, considerando como sua espessura o valor médio encontrado, expresso em centímetros.

São admitidas tolerâncias com relação à largura e comprimento do produto acabado de $\pm 1,5$ cm e para a altura de $-0,5/+1,5$ cm, com base nas dimensões declaradas na etiqueta pelo fabricante.

A espessura mínima da lâmina do colchão ou colchonete, sem o revestimento, deve corresponder à medida especificada na Tabela 4, sendo admitida tolerância de $\pm 0,5$ cm, da espessura total e individual de cada lâmina.

A soma das espessuras dos materiais que compõem o revestimento do colchão (infantil, geral, misto) não deve exceder 1/3 da altura total;

Tabela 4. Dimensões mínimas: colchonete e colchão de espuma flexível e poliuretano⁽¹⁾

Tipos	Espessuras	
	Mínima (cm)	Máxima (cm)
Colchonete (a)	4	8
Colchão geral	12	Não há
Colchão box conjugado (b)	5	Não há
Colchão misto (b)	5	Não há

(a) Colchonete nas medidas acabadas, com revestimento;
(b) Colchão box conjugado e misto devem ter densidade ≥ 28 .

2.4.2 Metodologia e detalhamento

São necessários para cada ensaio um mínimo de quatro corpos de prova por amostra, sendo que três foram selecionados para o ensaio e um servirá como contra prova em caso de dúvidas de resultados dos testes realizados.

Verificou-se as dimensões dos corpos de prova que devem ser de no mínimo $(380 \pm 10) \times (380 \pm 10) \times (50 \pm 2)$ mm, tendo suas bases planas e paralelas e as faces laterais perpendiculares às mesmas. Os corpos de prova podem ser obtidos pelo

empilhamento de no máximo duas camadas do mesmo material, sem a utilização de adesivo.

2.4.2.1 Preparação de equipamentos e instrumentos

- Preparou-se a Máquina Universal de Ensaio de 30 toneladas, com célula de carga de 500 kgf e dispositivos para a execução do ensaio (Figura 1);

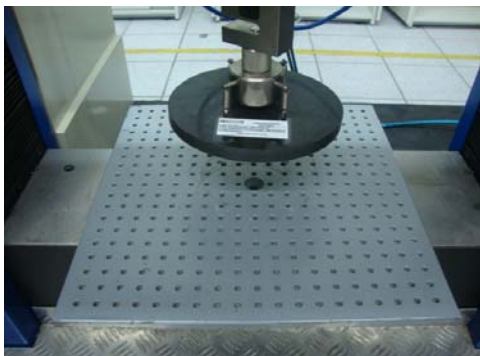


Figura 1. Montagem da placa de apoio e indentador da máquina universal de ensaio.

- preparou-se a Máquina de Fadiga em espuma, capaz de produzir um movimento uniforme de compressão e descompressão da espuma com uma frequência de (70 ± 10) ciclos/min;
- montou-se a placa de apoio na Máquina Universal de Ensaio, onde colocou-se uma chapa metálica rígida horizontal, contendo furos de $(6,5 \pm 0,5)$ mm, distanciados de aproximadamente (20 ± 1) mm um do outro, a fim de permitir escape do ar durante o ensaio; e
- o indentador metálico deve ser rígido, com diâmetro de (250 ± 10) mm, borda arredondada de raio (25 ± 5) mm, com um dispositivo que permita comprimir a espuma flexível em $(70 \pm 5)\%$ e uma espuma aglomerada em $(50 \pm 5)\%$ da espessura inicial. O indentador foi fixado rigidamente a sua guia e sua superfície deve ser lisa, mas não polida.

2.4.2.2 Execução

As amostras utilizadas são feitas de espuma flexível de poliuretano com densidade pré-estabelecida pelo fabricante, modelo D-33.

Antes da realização do ensaio e somente após 24 h de sua manufatura, os corpos de prova foram condicionados de 12 horas a temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e $(50 \pm 5)\%$ de umidade relativa, onde esta condição foi monitorada.

Foram ensaiados três corpos de prova para cada amostra, onde a realização do ensaio foi na direção (ou lado) na qual o produto final será solicitado.

Na máquina universal de ensaios, realizou-se o ensaio de indentação da seguinte forma:

- por três vezes seguidas, o corpo-de-prova foi pré-comprimido a $(70 \pm 5)\%$ da espessura original a uma velocidade de (100 ± 10) mm/min. Aliviou-se a força após atingir os $(70 \pm 5)\%$ de compressão na mesma velocidade;
- comprimiu-se o corpo-de-prova a $(25 \pm 1)\%$ de sua espessura original. Manteve-se esta compressão por (30 ± 1) s. Mediu-se então a força de indentação a $(25 \pm 1)\%$;

- aumentou-se a compressão do corpo-de-prova para $(40\pm 1)\%$ de sua espessura original. Manteve-se esta compressão por (30 ± 1) s. Mediu-se então a força de indentação a $(40\pm 1)\%$; e
- aumentou-se a compressão do corpo-de-prova para $(65\pm 1)\%$ de sua espessura original. Manteve-se esta compressão por (30 ± 1) s. Mediu-se então a força de indentação a $(65\pm 1)\%$.

Após as compressões terem sido feitas imprimiu-se o relatório fornecido pelo *software* da máquina.

Foram colocados os corpos de prova na máquina de fadiga em espuma sobre a placa de apoio, de modo que ficaram centralizados sob o indentador. Ajustou-se a amplitude do ciclo para que a espuma flexível seja comprimida a $(70\pm 5)\%$.

Ajustou-se a máquina de fadiga para uma espuma com 50 mm de espessura (espuma flexível – 70%), deve-se reduzir até 15 mm de sua espessura (Figura 2).

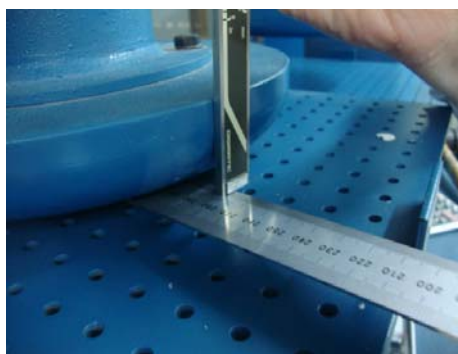


Figura 2. Verificação da amplitude do ciclo na máquina de fadiga.

Foram realizados 80.000 ciclos contínuos (a máquina levou em torno de 19 horas para finalizar o ensaio) e após retirou-se o corpo-de-prova do equipamento, deixando-o em repouso por 20 minutos.

Na máquina universal de ensaios, determinou-se a espessura (E_f) e a força de indentação (F_{if}), excluindo-se a pré-compressão a $(70\pm 5)\%$, onde foi executado o ensaio de pós fadiga, conforme NBR 9177,⁽²⁰⁾ que se repete com relação ao ensaio de indentação anterior.

2.4.2.3 Expressão dos Resultados

O resultado é a média aritmética dos três ensaios efetuados para cada compressão (25%, 40% e 65%), expresso como força de indentação, em Newton, com precisão de 1 N.

Calcular o fator de conforto utilizando a equação abaixo, baseada na NBR 9176 (Equação 10).⁽²¹⁾

$$\text{Fator de conforto} = \frac{\text{força de indentação a 65\%}}{\text{força de indentação a 25\%}} \quad (10)$$

Perda de Espessura: a perda de espessura é calculada pela Equação 11.

$$P_E = \frac{E_0 - E_f}{E_f} \cdot 100 \quad (11)$$

Onde:

- P_E é a perda em espessura, em porcentagem;
- E_0 é a espessura original, em milímetros; e
- E_f é a espessura final, em milímetros.

Perda de Força de Indentação: a perda de força de indentação é calculada pela Equação 12.

$$P_{FI} = \frac{FI_0 - FI_f}{FI_0} \cdot 100 \quad (12)$$

Onde:

- P_{FI} é a perda de força de indentação percentual, em porcentagem;
- FI_0 é a força de indentação a 25%, 40% e 65% antes do ensaio, em Newton;
- FI_f é a força de indentação a 25%, 40% e 65% após o ensaio de fadiga, em Newton.

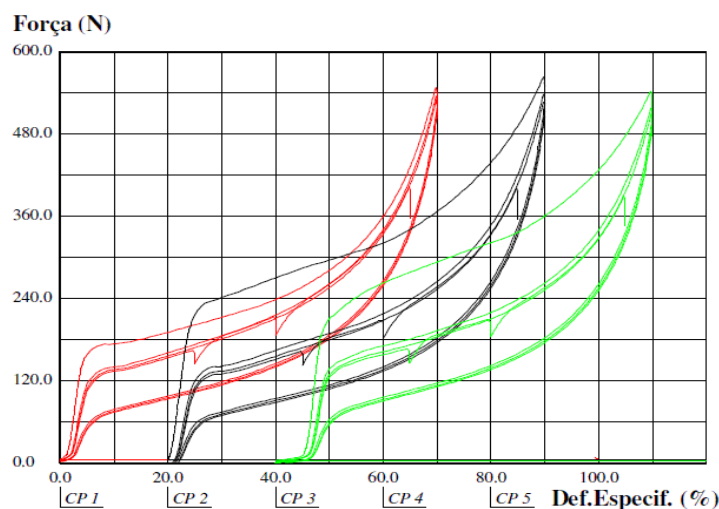
O relatório de ensaio deve conter a perda de espessura e a perda de força de indentação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos no ensaio de indentação foram obtidos na máquina bem como o cálculo do fator de conforto (Tabela 5). A Figura 3 mostra o gráfico Força (N) X Deformação Específica (%), para indentação dos corpos de prova.

Tabela 5. Resultados do ensaio de indentação e cálculo do fator de conforto

Corpo-de-prova	Espessura original (mm)	Força de indentação a 25 % (N)	Força de indentação a 40 % (N)	Força de indentação a 65 % (N)	Fator de conforto
CP1	53,4	145,4	186,6	357,7	2,46
CP2	51,1	142,8	182,3	355,5	2,49
CP3	50,8	146,1	184,4	347,1	2,38
Número de CPs	3	3	3	3	3
Média	51,79	144,8	184,4	353,4	2,441
Desvio Padrão	1,419	1,734	2,165	5,563	0,05863
Coef. Var. (%)	2,741	1,189	1,174	1,574	2,402
Mínimo	50,83	142,8	182,3	347,1	2,376
Máximo	53,42	146,1	186,6	357,7	2,488



Observação: Força aplicada para medição de espessura: 5 N

Figura 3. Gráfico força (N) X Deformação específica (%) para indentação.

Na Tabela 6 e Tabela 7 estão determinadas às forças de indentação, fator de conforto, perda de espessura e perda de força de indentação conforme pede a norma NBR 9176⁽²¹⁾ e NBR 9177.⁽²²⁾ O cálculo de perda de espessura utiliza a Equação 11 e a perda de força de indentação a Equação 12. Tais valores foram obtidos diretamente do *software* da máquina, que gera automaticamente estes resultados.

Tabela 6. Determinação da força de indentação e fator de conforto

Amostra	Força de indentação a 25% (N)	Força de indentação a 40% (N)	Força de indentação a 65% (N)	Fator de conforto médio*
01	144,8	184,4	353,4	2,44

* Nota: Para cada corpo-de-prova, utiliza-se a Equação 10.

Tabela 7. Determinação da perda de espessura e da perda de força de indentação (fadiga dinâmica)

Amostra	Perda de força de indentação a 25% (%)	Perda de força de indentação a 40% (%)	Perda de força de indentação a 65% (%)	Perda de espessura (%)
01	15,44	19,17	18,33	1,65

Na Tabela 8, encontra-se a planilha da incerteza do ensaio de indentação para uma célula de carga de 500 kgf.

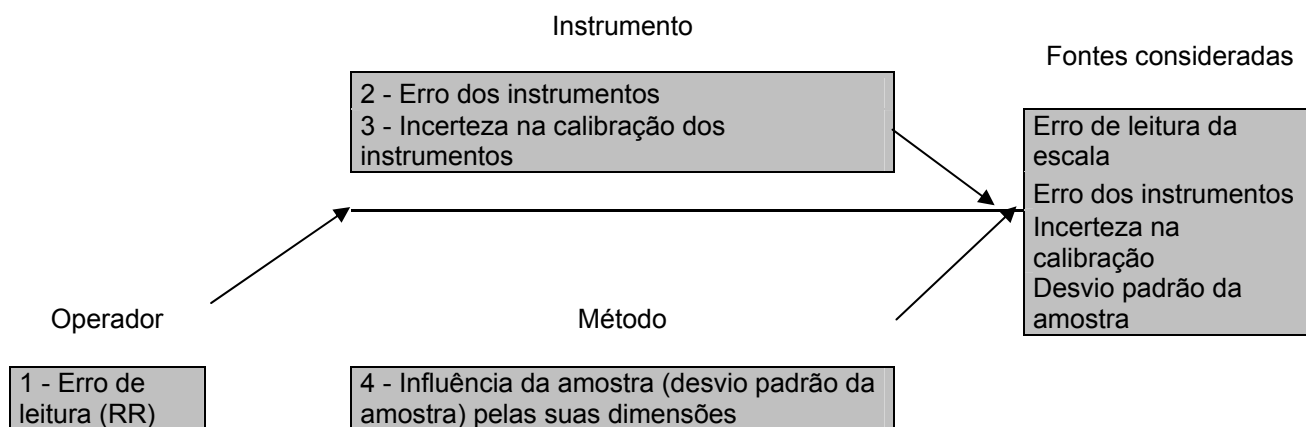
Tabela 8. Incerteza do ensaio de indentação para célula de carga de 500 kgf

FONTE DE INCERTEZA	Valor Incerteza Expandida (N)	Distribuição de Probabilidade	Divisor	Coefficiente Sensibilidade (Cs)	Incerteza Padronizada (N)	Graus de Liberdade
Erro de divisão de escala (Máquina Universal)	0,0500	Retangular	1,73	1	0,029	Infinitos
Incerteza na calibração da célula na compressão	1,9000	Retangular	1,73	1	1,097	Infinitos
Maior erro da escala na compressão	5,0000	Retangular	1,73	1	2,887	Infinitos
Desvio padrão da amostra (Divisor <i>t-Student</i> 2 pois são 3 corpos de prova logo $n-1=2$)	1,4190	Normal	4,53	1	0,313	2
Incerteza padronizada combinada (N)					3,104	
Incerteza expandida (N)			k =	2	6,208	267.394.233,6

Os resultados obtidos após a confecção das planilhas, demonstram que a incerteza padronizada combinada tem valor de 3,104 N e a incerteza expandida é de 6,208 N. Estes valores são o resultado de todas as considerações de fontes de incerteza relacionados as máquinas e instrumentos utilizados nos ensaios, conforme análise feita pelo tópico 2.2.1 deste artigo.

Os valores estão dentro do aceitável para o Laboratório de Controle de Qualidade onde foram executados os testes, pois até então, não se sabia quais os valores de incerteza das máquinas e instrumentos.

Após a confecção destas planilhas, foram incorporados aos relatórios finais tais resultados obtidos, melhorando ainda mais a confiabilidade do processo, visto que o laboratório é um prestador de serviços e os valores de incertezas devem ser o menor possível, já que os valores demonstram a confiabilidade dos ensaios. As fontes de incerteza no ensaio de indentação foram consideradas conforme o diagrama *Ishikawa* apresentado abaixo.



4 CONCLUSÃO

Com base na Tabela 8, pode-se verificar que a incerteza padronizada combinada foi de aproximadamente 3 N e a incerteza expandida de aproximadamente 6 N. Para uma melhora significativa nestes valores, deve-se aumentar o número de corpos de prova para que o coeficiente de *t-student* seja melhorado. No caso prático em questão usou-se apenas 3 corpos de prova conforme a norma NBR 9176,⁽²¹⁾ sendo que para diminuir consideravelmente a incerteza dever-se-ia utilizar em torno de 20 unidades, porém o tempo e custo do ensaio aumentariam consideravelmente.

Outro ponto importante é relacionado à calibração das máquinas e instrumentos, pois operações e manipulação inadequada aumentam significativamente o valor do erro intrínseco dos valores de incerteza (Tabela 8), onde aparecem os valores de incerteza expandida oriundos de Certificados de Calibração.

REFERÊNCIAS

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR 13579-1: **Colchão e Colchonete de Espuma Flexível de Poliuretano e Bases – Parte 1: Requisitos e Métodos de Ensaio**, 3. Ed, Rio de Janeiro, 2011.
- 2 PIZZOLATO M. Mapeamento da Estrutura Global que Fornece Confiança às Medições: Análise da Inserção Brasileira, Tese PPGEP: UFRGS, 2006.
- 3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR 17025: Requisitos Gerais para a Competência de Laboratórios de Ensaios e Calibrações, Rio de Janeiro, 2005.
- 4 STANDARDS MEASUREMENT & TEST MEASUREMENTS (SM&T), UNCERTE CoP 05 – Manual of Codes of Practice for Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Material n° 05 – The Determination of Uncertainties in Low Cycle Fatigue Testing, 2000.
- 5 STEPHENS R. et al. Metal Fatigue in Engineering, 2 Ed, New York: Wiley Interscience, 2001.
- 6 SVENSSON T. Prediction Uncertainties at Variable Amplitude Fatigue, International Journal of Fatigue 19, p.295-302, Elsevier, 1997.

- 7 KARADENIZ H. Uncertainty Modeling in the Fatigue Reliability Calculation of Offshore Structures, Reliability Engineering & System Safety 74, p.323-335, Elsevier, 2001.
- 8 KOUTSOURELAKIS S. Effect of Material Uncertainties on Fatigue Life Calculations of Aircraft Fuselages: A Cohesive Element Model, Engineering Fracture Mechanics 73, p.1202-1219, Elsevier, 2006.
- 9 BENGTTSSON, A. Uncertainty in Fatigue Life Prediction of Structures to Gussian Loads, Probabilistic Engineering Mechanics 24, p.224-235, Elsevier, 2009.
- 10 DIETER, G. Mechanical Metallurgy, 3 Ed. London: McGraw-Hill, 1988.
- 11 CALLISTER, W. Materials Science and Engineering. 7 Ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2007.
- 12 PIERCE S. Uncertainty Analisis of a Neural Network Used for Fatigue Lifetime Prediction, Mechanical System and Signal Processing 22, p.1395-1411, Elsevier, 2008.
- 13 BUCAR T. A Neural Network Approach to Describing the Satter of S-N Curves, International Journal of Fatigue 28, p.311-323, Elsevier, 2006.
- 14 VILAR W. Química e Tecnologia de Poliuretanos, 2 Ed, Rio de Janeiro, Vilar Consultoria, 1998.
- 15 VILAR W. Química e Tecnologia de Poliuretanos, 3 Ed, Rio de Janeiro, Vilar Consultoria, 2004.
- 16 JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). JCGM 200: International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM) 2008b.
- 17 JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). JCGM 100: Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), 2008a.
- 18 EUROPEAN CO-OPERATION FOR ACREDITATION, EA-4/16: Guidelines on the Expression of Uncertainty in Quantitative Testing, 2003.
- 19 JORNADA, D. Implantação de um Guia Orientativo de Incerteza de Medição para Avaliadores de laboratório da Rede Metrológica RS, Dissertação PPGEP: UFRGS, 2009.
- 20 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR 9177: Espuma Flexível de Poliuretano – Determinação da Fadiga Dinâmica, Rio de Janeiro, 2003.
- 21 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR 9176: Espuma Flexível de Poliuretano – Determinação da Força de Indentação, Rio de Janeiro, 2003.