

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais.

PPGE3M

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

**Leandro Sosnoski**

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais.

PPGE3M

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

LEANDRO SOSNOSKI  
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), dentro do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M), como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciências e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre, 2012

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciências dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Otávio Damas Martins (UPF)

Prof. Dra. Rejane Maria Candiota Tubino (UFRGS)

Prof. Dr. Thomas Clarke (UFRGS)

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGE3M

*Dedico à família Conci Sosnoski, em especial ao Sr. Alessandro Sosnoski, meu irmão, para quem este trabalho deve seguir como um exemplo em suas futuras aspirações acadêmicas e a meu pai.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus que me deu força, saúde e perseverança para enfrentar os desafios, as dificuldades inerentes à vida acadêmica e absorver conhecimento nesta etapa.

A minha família Conci Sosnoski em especial aos meus avós, pela educação e cuidados a mim dispensados e o Sr. Alessandro Sosnoski por ser uma das forças motrizes deste trabalho bem como meu pai exemplo de luta e idoneidade.

Ao meu orientador Prof. Dr. Afonso Reguly pelos esclarecimentos prestados durante a execução deste trabalho; ao coordenador do LAMEF-UFRGS Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker pela oportunidade de fazer parte do LAMEF e adquirir valiosos conhecimentos técnicos.

A Escola de Educação Profissional SENAI do Mobiliário de Bento Gonçalves, em especial aos colegas docentes e a Sra. Maria Ballestrin Bertarello que sempre me incentivaram e apoiaram na conclusão deste trabalho.

A todos que de uma forma ou outra contribuíram para a realização deste trabalho, o meu agradecimento.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VIII
LISTA DE TABELAS .....	IX
LISTA DE TABELAS .....	IX
LISTA DE EQUAÇÕES .....	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	XI
RESUMO .....	XII
ABSTRACT .....	XIII
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 - Fadiga Dinâmica em Colchões de Espuma Flexível de Poliuretano .....	4
2.2 - Tipos de Espumas Flexíveis em Bloco .....	4
2.3 - Controle das Propriedades das Espumas Flexíveis.....	7
2.3.1 - Dureza e Densidade .....	7
2.3.2 - Tamanho das células .....	10
2.3.3 - Resiliência e viscoelasticidade.....	11
2.3.4 - Propriedades de tensão.....	11
2.3.5 - Deformação permanente .....	12
2.3.6 - Efeito das condições atmosféricas .....	12
2.3.7 - Resistência ao fogo .....	12
2.3.8 - Propriedades acústicas .....	13
2.3.9 - Antiestática .....	13
2.4 - Problemas na Fabricação dos Blocos.....	13
2.4.1 - Células fechadas.....	14
2.4.2 - Rachos.....	14
2.4.3 - Queima do bloco .....	16
2.5 - Avaliação da Durabilidade.....	17
2.5.1 - Testes de escoamento ("creep") .....	17
2.5.2 - Deformação permanente .....	18
2.5.3 - Resistência à fadiga.....	19
2.5.4 - Resistência à abrasão .....	20
2.5.5 - Desenvolvimento de calor.....	21
2.6 - Incerteza de Medição .....	21

2.6.1 - Tipo de fonte de incerteza.....	24
2.6.2 - Importância da incerteza de medição.....	25
3. ESTIMATIVA DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO .....	27
3.1 - Ensaios de Certificação de Produtos.....	27
3.1.1 - Identificação das fontes de incerteza .....	27
3.1.2 - Quantificação e avaliação das fontes de incerteza .....	29
3.1.3 - Cálculo da média aritmética.....	30
3.1.4 - Medidas de dispersão .....	30
3.1.5 - Cálculo dos coeficientes de sensibilidade.....	31
3.1.6 - Cálculo dos componentes de incerteza, incerteza combinada e graus de liberdade efetivos .....	32
3.1.7 - Cálculo do coeficiente de abrangência .....	32
3.2 - Incerteza da Carga/Força Aplicada nos Ensaios de Fadiga .....	32
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	34
4.1 - Diagrama de Realização dos Ensaios .....	34
4.2 - Material e Corpos de Prova.....	34
4.2.1 - Dimensões do colchão para ensaio .....	35
4.3 - Determinação da Fadiga Dinâmica e Força de Indentação de Espuma Flexível de Poliuretano .....	37
4.3.1 - Metodologia e detalhamento.....	37
4.4 - Máquina de Ensaios (Fadigômetro de Espumas) e Dispositivos de Fixação.....	40
4.5 - Máquina Universal de Ensaios.....	42
4.6 - Cálculos Estatísticos e da Incerteza de Medição .....	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	44
5.1 - Avaliação do Ensaio de Indentação .....	44
5.2 - Planilhas de Ensaio de Indentação .....	47
5.3 - Planilhas de Perda de Dureza para Compressão .....	48
6. CONCLUSÕES.....	50
7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	52
BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS .....	54
ANEXO A – FORMULÁRIO DE ENSAIOS .....	56
ANEXO B – RELATÓRIOS DE ENSAIOS .....	58
ANEXO C – MEMORIAL DE CÁLCULOS .....	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Relação água/densidade em espumas flexíveis [VILAR, 1998].	8
Figura 2.2 - Efeito dos agentes de expansão na densidade e dureza [VILAR, 1998].	9
Figura 2.3 - Componentes/qualidade da espuma [Adaptado de VILAR, 1998].	14
Figura 2.4 - Testes de escoamento (“creep”) [Adaptado de VILAR, 1998].	17
Figura 2.5 - Teste de deformação permanente em espumas flexíveis [VILAR, 1998].	18
Figura 2.6 - Teste de deformação permanente em elastômeros [VILAR, 1998].	19
Figura 2.7 - Teste de fadiga dinâmica em espumas flexíveis [VILAR, 1998].	20
Figura 2.8 - Fadiga compressiva e histerese em elastômeros [VILAR, 1998].	20
Figura 2.9 - Aparelhagem para teste dinâmico de rodas e pneus [VILAR, 1998].	21
Figura 2.10 - Diagrama do método de estimativa de incerteza [PIZZOLATO, 2006].	24
Figura 2.11 - Avaliação da conformidade de uma medida.	26
Figura 3.1 - Diagrama de causa e efeito mostrando as possíveis fontes de incerteza na determinação da indentação e da dureza de espuma de poliuretano.	29
Figura 4.1 - Montagem da placa de apoio e indentador da máquina Universal de Ensaio.	38
Figura 4.2 - Verificação da amplitude do ciclo na Máquina de Fadiga.	39
Figura 4.3 - Máquina de ensaios utilizada (Fadigômetro) e detalhe da fixação do corpo de prova.	41
Figura 4.4 - Máquina de ensaios utilizada (Universal) e detalhe da fixação do corpo de prova.	43
Figura 4.5 - Acessório para indentador.	43
Figura 5.1 - Gráfico Força (N) X Deformação Específica (%) para indentação.	45
Figura 5.2 - Gráfico Força (N) X Deformação Específica (%) para pós fadiga.	46
Figura 5.3 - Ishikawa para fontes de incerteza nos ensaios de indentação.	48
Figura 5.4 - Ishikawa para fontes de incerteza na perda de dureza por compressão.	48



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades de espumas flexíveis convencionais e HR segundo NBR 13579-1 [ABNT, 2011] .....	5
Tabela 2.2 - Propriedade das espumas segundo NBR 13579-1 [ABNT, 2011].....	6
Tabela 2.3 - Propriedades de espumas de baixa densidade segundo NBR 13579-1 [ABNT, 2011] .....	10
Tabela 2.4 - t-Student [EA-4/02, 2003].....	23
Tabela 2.5 - Incertezas tipo B [JCGM, 2008a] .....	25
Tabela 3.1 - Tipo e estimativa do valor para as fontes de incerteza levantadas.....	30
Tabela 4.1 - Dimensões mínimas: colchonete e colchão de espuma flexível e poliuretano segundo NBR 13579-1 [ABNT, 2011] .....	37
Tabela 5.1 - Resultados do ensaio de indentação e cálculo do fator de conforto.....	44
Tabela 5.2 - Resultados do ensaio de pós fadiga.....	46
Tabela 5.3 - Determinação da força de indentação e fator de conforto.....	47
Tabela 5.4 - Determinação da perda de espessura e da perda de força de indentação (Fadiga Dinâmica).....	47
Tabela 5.5 - Incerteza do ensaio de indentação para célula de carga de 500kgf.....	47
Tabela 5.6 - Incerteza de perda de dureza para compressão de 25%. .....	48
Tabela 5.7 - Incerteza de perda de dureza para compressão de 40%. .....	49
Tabela 5.8 - Incerteza de perda de dureza para compressão de 65%. .....	49

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 - Modelo para o mensurando .....	22
Equação 2.2 - Cálculo de incerteza do mensurando.....	23
Equação 2.3 - Simplificação do cálculo de incerteza.....	23
Equação 2.4 - Graus de liberdade efetivos .....	23
Equação 2.5 - Incerteza expandida.....	23
Equação 2.6 - Incerteza padrão combinada.....	23
Equação 2.7 - Incerteza padronizada.....	24
Equação 2.8 - Desvio padrão amostral .....	24
Equação 2.9 - Desvio padrão experimental da média .....	24
Equação 3.1 - Média aritmética.....	30
Equação 3.2 - Variância .....	31
Equação 3.3 - Desvio padrão.....	31
Equação 3.4 - Coeficiente de sensibilidade.....	31
Equação 3.5 - Coeficiente de sensibilidade do percentual de incerteza.....	31
Equação 3.6 - Coeficiente de sensibilidade derivado do percentual de incerteza.....	32
Equação 4.1 - Fator de conforto .....	40
Equação 4.2 - Perda de espessura do colchão .....	40
Equação 4.3 - Perda de força de indentação do colchão .....	40

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

U	Incerteza expandida;
$u_c$	Incerteza combinada;
$u_i$	Incerteza da grandeza i;
$u_p$	Incerteza padronizada;
$c_s$	Coefficiente de sensibilidade;
$c_i$	Coefficiente de sensibilidade da grandeza i;
$\bar{x}$	Valor médio de x;
s	Desvio padrão;
a	Parâmetro/valor estimado para as distribuições uniformes e triangular;
$v_i$	Graus de liberdade da incerteza da grandeza i;
$v_{eff}$	Graus de liberdade efetivos;
k	Coefficiente de abrangência;
n	Número de amostras;
P	Carga/Força;
R	Razão de fadiga;
Z	Mensurando;
$P_E$	Perda de espessura;
$E_0$	Espessura original;
$E_f$	Espessura final;
$P_{FI}$	Perda de força de indentação;
$FI_0$	Força de indentação antes do ensaio;
$FI_F$	Força de indentação depois do ensaio;
HR	Espuma de alta densidade;
PM	Polímero de baixo peso molecular;
PU	Poliuretano;
CETEMO	Centro Tecnológico do Mobiliário.

## RESUMO

Avaliar a qualidade de colchões de espuma flexível de poliuretano que 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, 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.

Desta forma vem se tornando cada vez mais importante o conhecimento da incerteza de medição em todas as áreas de ensaios experimentais. Este trabalho visa estudar a incerteza de medição no levantamento do comportamento em indentação pós fadiga da espuma para colchões e colchonetes de espuma flexível de poliuretano. Embora existam diversas normas e códigos sobre a análise estatística dos resultados obtidos em fadiga, eles avaliam apenas a dispersão no número de ciclos para a falha, não considerando fatores como as fontes de incerteza das tensões aplicadas, da máquina de ensaios utilizada, entre outros.

A metodologia de ensaio está baseada nas normas NBR 9176 [ABNT, 2003g], NBR 9177 [ABNT, 2003h] e NBR 13579-1 [ABNT, 2011], onde estas relatam o passo a passo dos ensaios realizados, inclusive o número de corpos de prova a serem utilizados.

Os resultados de incerteza obtidos nos ensaios foram de até 6% sendo que os mesmos não devem ultrapassar um máximo de 8%, conforme acordos entre laboratórios que realizam tais ensaios, bem como a expectativa de resultados do LCQ – Laboratório de Controle de Qualidade do SENAI.

Palavra chave: indentação pós fadiga, colchão de espuma, incerteza de medição.

## ABSTRACT

Assessing the quality of foam mattresses flexible polyurethane matches that is the consumer goods used for human home, consisting, in part or in full by flexible polyurethane blades, properly coated. There are rules for making, density, compressive permanent deformation, ash content, 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 way is becoming increasingly important to know the uncertainty of measurement in all areas of experimental trials. This work aims to study the uncertainty of measurement in the survey of post-indentation fatigue behavior of foam mattresses and mats of flexible polyurethane foam. Although there are various standards and codes on the statistical analysis of results in fatigue, they only assess the dispersion in the number of cycles to failure, considering factors such as the sources of uncertainty of the applied voltages, the testing machine used, among others.

The test methodology is based on the NBR 9176 [ABNT, 2003g], NBR 9177 [ABNT, 2003h] and NBR 13579-1 [ABNT, 2011], where they report a walkthrough of the tests, including the number of specimens to be used.

The results of uncertainty obtained was up 6% and that they should not exceed a maximum of 8%, according to agreements between laboratories performing such tests and the expected results of the LCQ - Laboratory Quality Control SENAI.

Keyword: post indentation fatigue, memory foam, measurement uncertainty.

## 1. INTRODUÇÃO

Avaliar a qualidade de colchões de espuma flexível de poliuretano que condiz com o bem de consumo destinado ao repouso humano, constituído, parcial ou integralmente, por lâminas flexíveis de poliuretano, devidamente revestido [ABNT NBR 13579-1, 2011].

O fato de se passar “metade” da 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 [PIZZOLATO, 2006] além de ser uma exigência para acreditação dos laboratórios de ensaios pela norma ABNT NBR ISO 17025, 2005, junto a institutos como o INMETRO, por exemplo.

As normas disponíveis sobre fadiga dizem respeito apenas a métodos para análise estatística dos dados, e não levam em consideração os erros advindos da máquina de ensaios utilizada, nem os que podem advir diretamente do corpo de prova. Como fonte de erro advinda da máquina de ensaios pode citar: a calibração dinâmica, desalinhamento, controle dinâmico de carga, inércia do sistema e aquisição de dados do sistema, vibração do sistema, etc. Para o caso do próprio corpo de prova pode-se citar desalinhamento, dimensional, porosidade, etc.

Um procedimento correlato é o Uncert CoP 05 [SM&T, 2000] 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 [STEPHENS et al., 2001]. 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 [SVENSSON, 1997, KARADENIZ, 2001, KOUTSOURELAKIS, 2006, BENGTSSON, 2009]. 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 [DIETER, 1988, STEPHENS et. al., 2001, CALLISTER, 2007].

Existem, também, modelos mais sofisticados de redes neurais artificiais [PIERCE et. al., 2008]. 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 [BUCAR et. al., 2006]. 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.

Todos os ensaios realizados foram feitos no Laboratório de Controle de Qualidade (LCQ) do SENAI/CETEMO de Bento Gonçalves que faz parte da Rede Brasileira de Calibração e Ensaio do INMETRO. Têm acreditados os ensaios de névoa salina (salt-spray), inflamabilidade, medição da densidade em espumas de poliuretano e medição de espessura de camada em substratos metálicos; avaliação dimensional e segurança, estabilidade, resistência e durabilidade de cadeiras de escritório, berços infantis, beliches e cadeiras de uso geral; ensaios em conjunto aluno (móveis escolares) e em cadeiras plásticas monobloco; armários de escritório; mesas de escritório; estações de trabalho; divisórias tipo painel, móveis de informática e mesas de desenho.

Além dos ensaios acreditados pelo INMETRO, o LCQ está capacitado para realizar ensaios em outros tipos de mobiliário: armários, mesas, estofados, móveis de cozinha, mobiliário de uso exterior, mobiliário para informática e escritório, baús, bem como em matérias-primas (aglomerado, compensado, MDF), insumos e acessórios (puxadores, correções, dobradiças), cadeiras de rodas, entre outros.

Possui certificação ABNT ISO 9001, ABNT ISO 17025:2005 e em implantação da ISO 14001 sendo que está preparado para atender as demandas do mercado nacional e internacional, sendo que seus serviços são principalmente utilizados pelas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil. Conta com parcerias com Centros de Tecnologia Europeus como a AIDIMA (Espanha) e Catas (Itália).

O motivo de realizar este trabalho é de que o Laboratório de Controle de Qualidade (LCQ) não fazia os cálculos de incerteza de medição aplicada a ensaios de indentação pós fadiga

em colchões e colchonetes de espuma flexível de poliuretano, onde não se sabia quais eram os erros envolvidos tampouco a quantificação dos mesmos.

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 e apresentar planilhas que expressem a incerteza do ensaio.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão relatados conceitos de fadiga dinâmica, tipos de espumas flexíveis, controle das propriedades, problemas de fabricação e incertezas de medição utilizada nos colchões e colchonetes de espuma flexível de poliuretano.

### *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 de poli-uréia e mais ligações de hidrogênio [VILAR, 1998]. Resultados relativos ao efeito dos polióis são conflitantes. As espumas HR mostram melhor resistência à fadiga quando o peso molecular e funcionalidade do poliálcool aumentam, porém, a adição de dióis e trióis de baixo PM leva à redução da resistência à fadiga. A diminuição do teor de monol do poliálcool resulta em melhor reticulação, e aumento da resistência à tensão, ao rasgo e 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. Espumas com menor densidade têm pior desempenho, o que pode estar relacionado ao maior teor de poli-uréia. 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 [VILAR, 2004].

### *2.2 - Tipos de Espumas Flexíveis em Bloco*

Há quatro tipos principais de espumas flexíveis em bloco: espuma convencional, espuma de alta resiliência (HR), espuma com carga e a espuma com alto suporte de carga.

**Espumas Convencionais** - As formulações de espumas convencionais podem ser modificadas para produzir espumas com uma extensa gama de propriedades que podem ser classificadas em quatro tipos conforme a dureza (Tabela 2.1).

**Espuma de Alta Resiliência (HR)** - As espumas HR estão disponíveis em uma extensa gama de densidades e durezas e são projetadas para oferecer principalmente características de alto suporte

de carga. Considerando que elas são mais caras que as espumas convencionais, o uso delas está limitado aos produtos de alto desempenho.

**Espumas com carga** - Espumas flexíveis em bloco com carga usam cargas inorgânicas para aumentar a densidade da espuma e melhorar as características de suporte de carga, porém este aumento normalmente é acompanhado por uma redução na resistência à tração e ao rasgo, alongamento, e talvez uma diminuição a longo prazo da resistência à fadiga. Também podem ser usadas cargas como melamina para melhorar resistência ao fogo.

**Espumas de Alto Suporte de Carga** - Espumas com alto suporte de carga incorporam um polioli polimérico na formulação para aumentar a dureza. Porém, os fabricantes têm que equilibrar cuidadosamente a melhoria na dureza contra o aumento de densidade a fim de evitar sacrificar outras propriedades físicas da espuma. Caso contrário eles podem apresentar diminuição na resistência à fadiga [VILAR, 2004].

**Tabela 2.1 - Propriedades de espumas flexíveis convencionais e HR segundo NBR 13579-1 [ABNT, 2011]**

Tipo de espuma	Convencional				HR	
	Macia	Firme	Alto suporte	Com carga	D 30	D 42
<b>Formulação</b>						
Poliol (OH = 56) <sup>1</sup>	100	100		100		-
Poliol Polimérico <sup>2</sup> (OH = 33)	-	-	85	-		-
Poliol (OH = 48)	-	-	15	-		-
Poliol Polimérico <sup>3</sup> (OH=44)						100
Poliol Polimérico (OH=30)	-	-	-	-	100	-
Água (%)	3,0	3,9	2,3	2,5	3,1	2,2
DEA (dietanolamina)	-	-	-	-	1,2	0,7
Cloreto de Metileno	22,5	-	-	-	-	-
Dimetiletanolamina (DMEA)	0,37	0,18	0,09	0,30	0,10	0,36
Octoato de estanho	0,47	0,23	0,10	0,32	0,20	-
Surfactante de silicone	1,5	1,0	1,0	1,0	0,3	0,9
Carbonato de cálcio	-	-	-	50	-	-
Sulfato de bário	-	-	-	50	-	-
Retardante de chama	-	-	-	-	4	5
TDI	37,7	51,6	51,6	35,5		31,8
Índice	100	112	112	108	108	115
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	16	26	43	63	30	42
Tensão de ruptura (kPa)	51	151	87	87	131	120
Alongamento (%)	287	247	210	164	136	150
Resistência ao rasgo (N/m)	298	542	420	222	436	245
Resiliência (%)	48	47	38	48	60	60
Deformação permanente (%)	8,1	5,6	6,2	2,8	7,5	5,1
Suporte de carga, 40% ILD (N)	20	160	400	250	113	140
Passagem de ar ml/min	23	16	4	4	11	-

1) mg de KOH/g; 2) teor de sólidos = 40% e 3) teor de sólidos = 20%

Os fatores que contribuem para as diferenças de propriedades mecânicas entre os tipos de espuma são: a diferença na seqüência das reações, que é fator determinante da morfologia do PU; o fato de que durante o crescimento das espumas de HR ocorre coalescência de algumas bolhas ocasionando uma maior dispersão de tamanho das células; e a menor abertura das células nas espumas de HR. 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 (Tabela 2.2).

**Tabela 2.2 - Propriedade das espumas segundo NBR 13579-1 [ABNT, 2011]**

<b>Propriedades</b>	<b>D18***</b>	<b>D20</b>	<b>D23</b>	<b>D26</b>	<b>D28</b>	<b>D33</b>	<b>D40</b>	<b>D45</b>
Força de indentação (FI) – Dureza* a 40%, N (mín)	80	95	110	130	145	165	185	200
Densidade (kg/m <sup>3</sup> ), (mín)	16,2	18,0	20,7	23,4	25,2	29,7	36,0	40,5
Tensão de ruptura (kPa), (mín)	70	90						
Alongamento %, (mín)	120							100
Resistência ao rasgo (N/m), (mín)	400	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		25					
* A força de indentação pode ser expressa por F.I., referindo-se à espuma não fadigada.								
** O fator de conforto pode ser expresso por F.C.								
*** Densidade utilizada somente para colchões de uso infantil (berço).								

Outras espumas especiais são: Espumas Antiestáticas; Espumas Viscoelásticas e as Espumas Hiper-moles.

**Espumas Antiestáticas** - É possível incluir propriedades de controle estáticas em espumas flexíveis, tornando-a uma escolha excelente para aplicações de empacotamento eletrônico.

**Espumas Viscoelásticas** - Espumas com baixa resiliência / com recuperação lenta são um tipo de espuma com resiliência menor que 20%, comparado com 40% para a espuma convencional e 60% para espumas de alta resiliência. Estas espumas encontram muitas aplicações especiais, por exemplo, em colchões medicinais e outros mercados médicos, por causa do toque macio e sem

igual e devido à redução de pontos de tensão quando em contato com a pele. Elas também exibem boas propriedades de absorção de som e vibrações.

**Espumas Hiper-moles** - Espumas hiper-moles ou hiper-macias, são usadas principalmente em camadas superficiais de estofos de mobiliários e são caracterizadas por um toque inicial muito macio, baixa resistência à compressão e excelente histerese e propriedades de alongamento.

### ***2.3 - Controle das Propriedades das Espumas Flexíveis***

As propriedades das espumas podem ser controladas pela escolha das matérias primas, bem como dos equipamentos, e condições de processo utilizadas.

#### **2.3.1 - Dureza e Densidade**

Nas espumas flexíveis, a dureza (rigidez ou suporte de carga) é determinada através de testes similares, como da força de indentação (IFD), ou da resistência à compressão (CFD). No IFD é medida a força exercida, por um indentador circular, e, no CFD a tensão exercida por um prato que excede o tamanho do bloco padrão, em reentrâncias de 25, 40 e 65%. A indentação de 65% é comparável à força exercida por um adulto sentado. A seguir é descrito as formas utilizadas para a variação da dureza e densidade das espumas flexíveis [VILAR, 1998].

**Índice** - O método mais comum para ajuste da rigidez é pelo índice de isocianato, pois este representa a quantidade de grupamentos NCO que estarão disponíveis para a reticulação. Na manufatura de grandes blocos não é recomendável um índice muito superior a 110, pois o excesso de NCO não reagido aumenta o risco de incêndio durante a cura final da espuma, devido à exotermia da reação. Em geral a elevação do índice aumenta a dureza, e diminui a tração, rasgo e o alongamento.

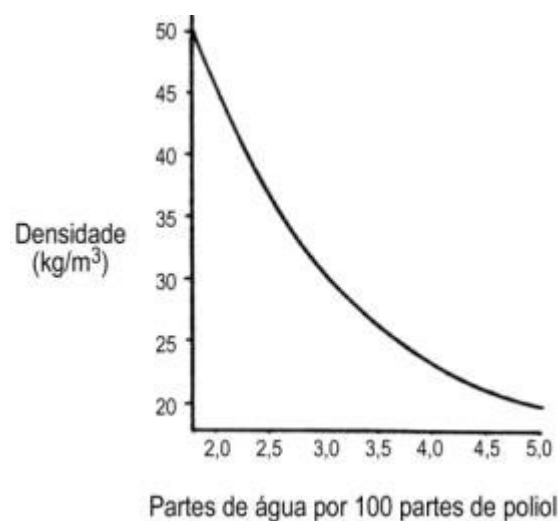
**Poliol polimérico** - O aumento da dureza da espuma pode ser obtido com o uso de polióis poliméricos com diferentes teores de sólidos. Aumentando-se a percentagem de sólidos numa formulação obtem-se espuma com maior dureza, porém pode ocorrer perda de propriedades como redução da resistência à fadiga, do alongamento, e aumento da deformação permanente.

**Cargas** - O uso de cargas minerais aumenta a dureza e dá à espuma uma aparência de melhor qualidade, porém causa diminuição em propriedades como: tensão de ruptura, alongamento, resistência ao rasgo e à fadiga.

**Endurecedores** - Para aumentar a dureza da espuma através do aumento do teor de ligações cruzadas, pode-se também usar endurecedores de espuma, que são polióis de elevada funcionalidade, miscíveis com o poliol convencional, possuindo viscosidade em torno de 1000 e teor de OH de 150mg de KOH/g.

**Variação do teor de água** - Numa determinada pressão, a densidade da espuma é controlada pela quantidade de água e agentes de expansão auxiliares (AEA). Todavia, na reação de expansão da

água com o isocianato, liberando gás carbônico, formam-se estruturas rígidas de poliuréia, que contribuem para o aumento da dureza da espuma. Este aumento da rigidez molecular é a explicação para a pequena variação nas propriedades de suporte de carga (dureza) quando se reduz a densidade, em espumas expandidas com água. De acordo com a densidade desejada podem ser empregadas de 1,5 a 6 partes em peso de água por cem partes em peso do polioli. Porém, por questões de segurança não são recomendados teores acima de 4,6 partes em peso de água como único agente de expansão. O aumento do teor de água na formulação irá diminuir a densidade da espuma e, devido à formação de poliuréia, aumentar a dureza, o alongamento, e resistências à tração e ao rasgo. A Figura 2.1 ilustra o efeito da quantidade de água na densidade de uma espuma flexível feita com TDI [VILAR, 1998].



**Figura 2.1 - Relação água/densidade em espumas flexíveis [VILAR, 1998].**

**Uso de agentes de expansão auxiliares (AEA)** - Para diminuir a densidade e a dureza das espumas flexíveis podem ser utilizados agentes de expansão auxiliares (AEA). Os AEAs são volatilizados pelo calor da reação, diminuindo os riscos de incêndio, e como não formam segmentos rígidos de poliuréia não aumentam a dureza da espuma. A variação da proporção de água/AEA permite que sejam feitas espumas com a mesma densidade e diferentes durezas. Com as restrições ambientais aos CFCs, são utilizados: o cloreto de metileno que sofre restrições em países europeus; a acetona que é inflamável; e o dióxido de carbono líquido. Como o volume de gases gerado é proporcional ao peso molecular do AEA, uma parte em peso de água libera um volume de gases equivalente ao liberado por 10 partes em peso de CFC, 8,5 de cloreto de metileno, 6 de acetona, e 3,3 de dióxido de carbono líquido. O aumento do teor de AEA na formulação acarreta diminuições da densidade, dureza, alongamento e resistências à tração e ao rasgo. A Figura 2.2 mostra a variação do suporte de carga (para uma indentação de 40%) em

função da densidade de espumas convencionais feitas com água e cloreto de metileno [VILAR, 1998].

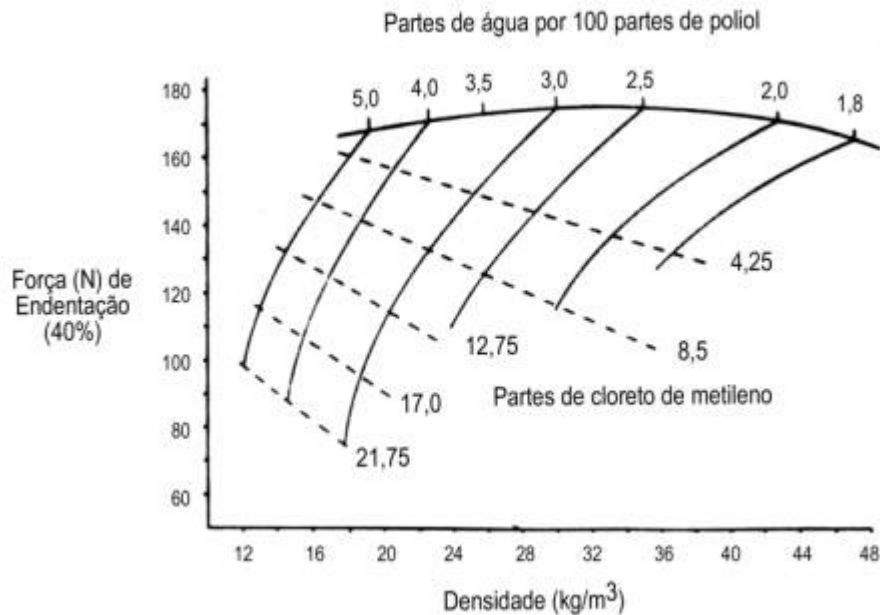


Figura 2.2 - Efeito dos agentes de expansão na densidade e dureza [VILAR, 1998].

**Amaciantes da espuma** - Outra forma, para a produção de espumas de baixa densidade, moles e hiper moles, sem o uso de AEAs, consiste em utilizar amaciantes de espuma, que são polióis poliéteres reativos com alto teor de óxido de etileno e maior PM (4500). Isto causa uma maior solubilidade da água na massa reagente, diminuindo a existência de fases heterogêneas com grande concentração de água, onde ocorre uma maior reação da água com o isocianato formando esferas de poliuréia, diminuindo desta forma a dureza da espuma. Como estes polióis não são miscíveis no polioliol convencional, devem ser adicionados em até 15%.

**Variação da pressão de espumação** - Quando se utiliza uma mesma formulação, o aumento da pressão durante a espumação resulta em maior densidade, da mesma forma que a redução diminui a densidade da espuma. Nas espumas flexíveis, a utilização de água, como agente de expansão, forma poliuréia, resultando em aumento da dureza, alongamento, resistência à tração e ao rasgo. As espumas de alta densidade, que são fabricadas com pequeno teor de água na formulação, possuem menor teor de segmentos rígidos de poliuréia, o que pode resultar em menores propriedades. Espumas com alta densidade, maior dureza, alongamento e resistência ao rasgo e à tração, podem ser obtidas com utilização de água para a formação de poliuréia e elevação da pressão durante a espumação, para evitar a diminuição da densidade. Desta forma é possível substituir o uso de polióis poliméricos na fabricação de espumas com alta resiliência e alto suporte de carga, resultando em aumento da resistência ao rasgo e à tração [VILAR, 1998].

A diminuição da pressão durante o processo resulta em obtenção de espumas com menores densidades, e esta é uma forma para a obtenção de espumas moles e hiper moles, sem o uso de AEA's. Diversos fornecedores de máquinas desenvolveram alternativas de produção de espumas de baixa densidade em condições de pressão reduzida ou com a utilização de dióxido de carbono líquido, tanto em processos contínuos ou descontínuos. Na Tabela 2.3 observa-se algumas propriedades de formulação das espumas de baixa densidade.

**Tabela 2.3 - Propriedades de espumas de baixa densidade segundo NBR 13579-1 [ABNT, 2011]**

Formulação/Processo	Macias				Maior suporte		Hiper moles	
Poliol poliéter (OH=56 mg KOH/g) (1)	100				76	85	20	30
Poliol polimérico (OH=33 mg KOH/g) (2)	0				24	0	0	
Poliol poliéter (OH=145 mg KOH/g) (3)	0				0	15	0	
Poliol poliéter (OH=33 mg KOH/g) (4)	0				0		80	70
Água	4,8				4,1		3	4,1
Cloreto de metileno	10	0			0		0	
Dióxido de carbono líquido	0			4,5	4,3		0	
Índice – TDI 80	110		97		112	108	106	
Pressão (mbar)	1013	765		1013	1013		1013	
Exotermia (°C)	163,5	175	167,6	168	165		-	
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	15,2		15,5	15,3	16,5	16,8	28	22
Resistência à compressão (40%) (kPa)	2,1		1,6		2,45	2,75	1,1	0,8
Resistência à tração (kPa)	71	83	90	81	86		100	90
Alongamento (%)	160	200	307	233	127	98	390	335

(1) convencional, (2) alto teor de sólidos, (3) alta funcionalidade, (4) hidófilo de alta reatividade com PM 4500.

### 2.3.2 - Tamanho das células

O tamanho e homogeneidade das células têm importante efeito nas propriedades físicas de espuma, todavia, a estrutura celular é um dos parâmetros mais difíceis de definir e medir. As células de uma espuma flexível não são circulares, mas alongadas no sentido da espumação. Por causa desta anisotropia as propriedades mecânicas dependem da direção do teste e apresentam melhores valores, no sentido da espumação. A dureza da espuma pode variar em até 15% com o tamanho das células, e cresce com o aumento do tamanho das células. Este efeito é aproximadamente linear na faixa de 10 a 20 células por centímetro, para espumas com células uniformes.

O tamanho das células também influencia a tensão de ruptura e o alongamento, sendo que as espumas com células menores apresentam maiores valores. Espumas com células pequenas e heterogêneas são ligeiramente mais macias que aquelas com tamanho uniforme e apresentam uma curva tensão/deformação mais linear. Esta é a razão para a injeção de excesso de ar na mistura reagente quando da fabricação de espumas de alta resiliência [VILAR, 1993]. O aumento da quantidade de surfactante de silicone e da velocidade de agitação resulta em diminuição do

tamanho das células e no aumento do seu número. Todavia, o excesso de surfactante de silicone pode dificultar a abertura das células, enquanto uma velocidade elevada de agitação pode ocasionar nucleação excessiva durante a mistura, tornando as células demasiadamente delgadas, na etapa de crescimento, podendo causar coalescência e aparecimento de rachos na espuma.

### **2.3.3 - Resiliência e viscoelasticidade**

Para a obtenção de espumas com alta resiliência são usados polióis poliéteres de maior peso molecular, entre 4500 e 6000, feitos com óxidos de propileno/etileno, com alto teor de hidroxilas primárias, e número de OH entre 28 e 38mg de KOH/g. Ao contrário, as espumas viscoelásticas são aquelas que possuem baixa resiliência (<20%), e retorno lento após a aplicação de tensão, sendo utilizadas em aplicações médicas como colchões hospitalares, devido ao toque suave, redução de pontos de tensão na pele do paciente, além de boas propriedades de absorção de sons e vibrações. Para diminuir a velocidade de recuperação da espuma, é necessário aumentar as forças restritivas resultantes da combinação da viscosidade interna e amarras como as pontes de hidrogênio. As propriedades de viscoelasticidade são freqüentemente obtidas usando-se: menores índices; polióis com menor peso equivalente (maior teor de hidroxilas), junto com os convencionais; misturas de polióis com polaridades muito diferentes, como polióis éster e éter; ou às vezes agentes amaciantes [VILAR, 1998].

O resultado principal é uma temperatura de transição vítrea do segmento flexível ligeiramente abaixo de temperatura ambiente, devido ao aumento da viscosidade interna, causando propriedades de viscoelasticidade na temperatura ambiente. Temperaturas elevadas reduzem o comportamento viscoelástico, transformando a espuma viscoelástica em uma espuma convencional macia. Temperaturas baixas tornam a espuma viscoelástica em uma espuma dura. Espumas viscoelásticas são produzidas com MDI, TDI-65, TDI-80, e misturas deles. Enquanto a produção de espumas viscoelásticas baseadas em MDI e TDI-65 é menos crítica, as formulações com TDI 80 tendem a ter estruturas de células fechadas, e o uso de surfactantes de silicone especiais (multi blocos lineares de siloxanos e poliéter), ou abridores de células são importantes devido à tendência de formação de células fechadas.

### **2.3.4 - Propriedades de tensão**

As propriedades de tensão de ruptura, alongamento e rasgo das espumas flexíveis são superiores as requeridas na maioria das aplicações. Somente no caso de laminados têxteis e tapeçarias, que usam espuma estirada, as medidas de tensão e alongamento na ruptura são significativas. O aumento do teor de água na formulação resulta em maior formação de poliuréia e em melhores propriedades de tensão, e em geral a elevação do índice diminui à tração, rasgo e o alongamento.



### **2.3.5 - Deformação permanente**

As espumas flexíveis de poliuretano têm temperaturas baixas de transição vítrea, entre -35 a -55°C dependendo do tipo de polioliol utilizado, sendo viscoelásticas nas temperaturas usuais de utilização. Então elas escoam quando submetidas à tensão por longos períodos. A velocidade de escoamento, normalmente medida como a velocidade de deformação com o tempo, sob tensão constante, cresce com os aumentos da temperatura. Os testes de taxa de deformação permanente são testes de escoamento sob deformações constantes, sendo o teste padrão, conduzido a 50, 75, 90% por 22h a 70°C. Ele pode também ser usado para determinar o tempo de cura, pois a espuma comprimida antes de todas as reações estarem completas, formará ligações cruzadas, e apresentará altas taxas de deformação. O escoamento macromolecular é dificultado pela existência de ligações cruzadas, e desta forma a elevação do índice ou utilização de polioliol com maior funcionalidade, irão aumentar o teor de ligações cruzadas e diminuir a deformação permanente.

### **2.3.6 - Efeito das condições atmosféricas**

É bastante conhecido o efeito das condições climáticas durante a produção e estocagem, nas propriedades físicas das espumas de PU. Pressão atmosférica mais alta leva a obtenção de espuma com maior densidade, uma vez que o volume do gás é menor, e deverão ser feitas correções na formulação, como o aumento do teor de catalisador de expansão. Além disso, a umidade influencia a dureza da espuma. Após a produção do bloco da espuma, ocorrem as reações de reticulação com a formação de ligações cruzadas alofanato e biureto. Estas reações consomem o excesso de isocianato usado na formulação. Umidade atmosférica elevada levará a reação do excesso de isocianato com a umidade do ar, diminuindo o teor de ligações cruzadas e a dureza. O efeito de redução da dureza da espuma no verão é resultado do maior teor de umidade relativa no ar durante esta estação do ano. A luz solar pode causar problema de amarelecimento da espuma, mais ou menos rapidamente dependendo da intensidade da radiação. Este amarelecimento é originado pela oxidação dos grupos nas macromoléculas que contêm átomos de nitrogênio, com a formação de derivados coloridos. A tendência ao amarelecimento é maior nas espumas de poliéter do que nas de poliéster. O amarelecimento é diretamente proporcional ao índice utilizado e inversamente à densidade da espuma. Na prática, nenhuma influência negativa do amarelecimento nas propriedades da espuma é observada. Para minimizar o problema de amarelecimento da espuma pode-se empregar isocianatos alifáticos [VILAR, 2004].

### **2.3.7 - Resistência ao fogo**

A resistência da espuma ao fogo é requisito em várias aplicações e pode ser obtida pelo uso de retardantes de chama. Os mais utilizados são os fosfatos ésteres clorados, parafinas

cloradas e melamina em pó. Todavia, a incorporação pode acarretar problemas como: aumentar a possibilidade de queima em certas formulações; aumentar a quantidade de fumaça ou queima; e causar problemas de processamento, especialmente com os retardantes reativos. Os retardantes de chama alifáticos clorados e/ou os ésteres fosfatos são os mais suscetíveis de causar desbotamento e frequentemente usa-se antioxidantes para minimizar este efeito. Os halogenetos de arila particularmente os brometos aromáticos são termicamente mais estáveis e causam menos descoloração.

### **2.3.8 - Propriedades acústicas**

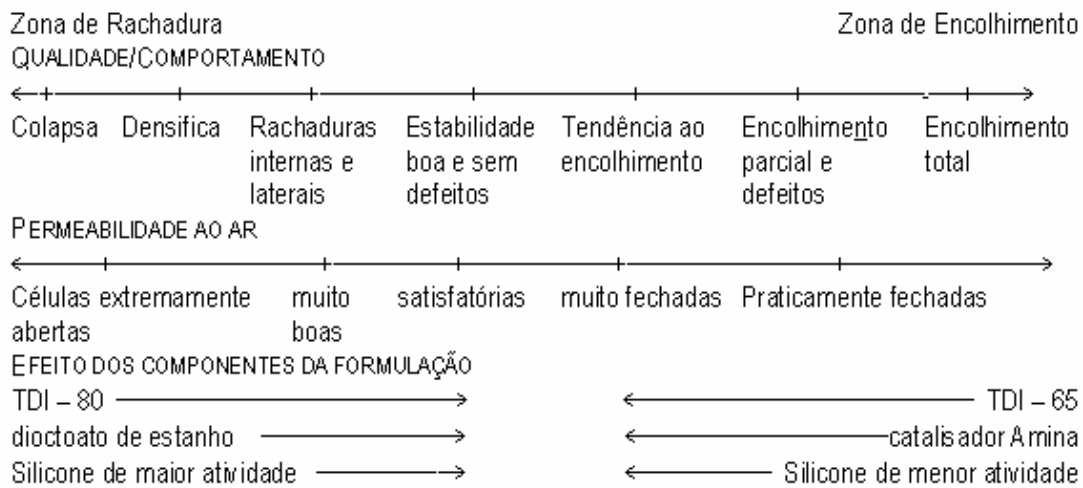
A predominância da estrutura de células abertas, a relativamente baixa resistência à passagem do ar e as propriedades elásticas tornam as espumas flexíveis de PU especialmente adequadas ao isolamento acústico. A energia sonora é absorvida, principalmente, pela fricção do ar em movimento nos poros interconectados e, em menor grau, por um processo de relaxação da rede polimérica em vibração. Espumas de baixa densidade permitem maior penetração das ondas sonoras e minimizam a reflexão na superfície da espuma. A eficiência de absorção do som aumenta com o aumento da espessura e da área da espuma.

### **2.3.9 - Antiestática**

Em algumas aplicações, como embalagem e vestuário, é necessário minimizar a resistência elétrica da espuma de forma a minimizar a formação de energia estática. Isto normalmente é feito com a adição de aditivos como os sais metálicos ionizáveis, sais de ácidos carboxílicos, ésteres fosfatos ou misturas deles.

## ***2.4 - Problemas na Fabricação dos Blocos***

Problemas, como os apresentados a seguir, podem ocorrer na produção de blocos de espuma flexível e são controlados por ajustes na formulação e controle do processo. Erros na formulação, no processo, ou problemas mecânicos podem ocasionar células fechadas, rachos ou colapso da espuma [VILAR, 1998]. Portanto é muito importante manter registros precisos nas folhas de produção. Um sumário da correlação entre os componentes da massa reagente e o aspecto da espuma é mostrado na Figura 2.3.



**Figura 2.3 - Componentes/qualidade da espuma [Adaptado de VILAR, 1998].**

### 2.4.1 - Células fechadas

Células fechadas são formadas quando as bolhas de gás não estouram no final da expansão (suspiro), resultando em baixa elasticidade (espuma morta), além de possibilidade de encolhimento. A perda de elasticidade se deve ao fato de que a flexibilidade da espuma ocorre por efeito mecânico (deflexão da cadeia polimérica) e pneumático (entrada e saída do ar nas células abertas). As paredes das células não rompidas refletem a luz e podem ser vistas na face cortada da espuma. Em baixos teores de células fechadas é possível abri-las por rompimento, porém em altos teores pode ocorrer o encolhimento da espuma. As causas de células fechadas podem ser:

- 1) Excesso de catalisador de estanho, acarretando polimerização muito rápida. Deve-se diminuir a quantidade de octoato de estanho.
- 2) Excesso ou tipo de silicone que estabiliza demasiadamente a espuma e impede o rompimento das paredes das células. Deve-se diminuir a quantidade ou surfactante e/ou usar surfactante de menor atividade.
- 3) Pouco ar de nucleação ou velocidade de agitação baixa, ocasionando pouca nucleação, e resultando em estrutura celular grosseira, com paredes espessas e difíceis de serem rompidas.
- 4) Temperatura elevada acarretando maior aumento da velocidade de polimerização em relação à expansão (devido ao impedimento estérico do polioli) de forma que uma formulação equilibrada resulta numa espuma apertada em temperatura maior.

### 2.4.2 - Rachos

Problemas químicos, mecânicos e erros de formulação podem acarretar rachos ou fendas nos blocos. Se o bloco apresenta fenda contínua ou em intervalos regulares, normalmente as

causas são erros de formulação, porém se os rachos são aleatórios provavelmente trata-se de problema mecânico.

**1) Pouco silicone** - Quantidades insuficientes de silicone resultam em instabilidade das bolhas quando a expansão é completada, causando o rompimento das mesmas e o aparecimento de rachos. Nestes casos, deve-se aumentar o teor do surfactante ou de catalisador octoato de estanho. O baixo teor de surfactante ou de octoato de estanho, ou uso de surfactante de baixa atividade pode acarretar suspiro atrasado, colapso do topo, contrações, ou a massa atinge o tamanho máximo e então cai. Se houverem células irregulares ou buracos, deve-se aumentar o teor de surfactante, de 10 a 20%, tomando-se cuidado para não ocorrer encolhimento da espuma. Rachos ou mesmo o colapso da espuma pode ser devido ao fato do surfactante não estar estabilizando a massa reagente, devido ao seu baixo teor ou pequena atividade. Deve-se aumentar o teor de surfactante em 50%, e se resolver o problema, baixar para 40% ou 30%, ou então usar surfactante de maior atividade. A escolha do surfactante é crítica na fabricação das espumas de baixa densidade pelo processo em caixote, onde são utilizados níveis de até 8 partes de água e 40 partes de agente de expansão auxiliar (AEA) por cem partes de polioliol, para a obtenção de densidades de 8kg/m<sup>3</sup>. Neste caso, o uso de um surfactante com maior poder emulsificante permite a utilização de mais AEA e obtenção de menores densidades. Nas espumas macias expandidas com CO<sub>2</sub> são recomendados surfactantes com poder moderado de estabilização e alto de emulsificação, devido à rápida formação de bolhas oriundas da gaseificação do dióxido de carbono líquido e do alto teor de nitrogênio usado em muitas formulações [VILAR, 1993].

**2) Pouco catalisador de estanho** - Falhas conhecidas como fendas de estanho, são rachos em intervalos regulares, nos ombros do topo do bloco, ou fendas laterais grandes horizontais ou verticais, no caso do teor de catalisador de estanho estar muito baixo. O aparecimento de rachos em espumas fechadas pode ser causado por excesso de catalisador de estanho e falta de silicone, ou vice versa. O nível baixo de silicone ou de estanho provoca a contração parcial da estrutura sólida da espuma logo após a expansão, podendo variar de 1% ao colapso total. Normalmente, é considerada normal, uma contração de até 2% em espumas de baixa densidade.

**3) Excesso de catalisador amina** - Excesso de catalisador de expansão acarreta efeitos similares aos da falta de catalisador de polimerização estanho. Deve-se ajustar a reação de expansão através dos tempos de creme (7-14s) e de crescimento total (80-120s).

**4) TDI** - Na fabricação de espumas macias, com densidades inferiores a 20 kg/m<sup>3</sup>, com a utilização de altos teores de agentes de expansão auxiliar (AEA) e baixo índice (103 ou 104), rachos podem ser evitados pela elevação do índice (107 ou 108) e ajuste da dureza pelo balanço

água/AEA. Em baixas temperaturas pode ocorrer a cristalização parcial do TDI. O isômero 2,4 cristaliza mais rápido do que o 2,6 e o líquido torna-se mais rico no isômero 2,6 (impedido estericamente) que reage mais lentamente com o poliols do que com a água, retardando a polimerização, e podendo acarretar rachos na espuma.

**5) Problemas de processo** - Velocidade elevada de agitação ocasiona nucleação excessiva durante a mistura. A espuma em crescimento terá células delgadas que podem coalescer ocasionando rachos. Este problema é identificado por uma estrutura muito fina em torno da fenda. Deve-se então reduzir a velocidade do agitador. Em máquinas antigas de espumação contínua a câmara de mistura de movimento transversal deposita no leito transportador uma configuração sinuosa de líquido. Nos pontos fracos podem ocorrer rachos que em muitos casos serão evitados pelo aumento de 5-10% no teor de estanho. Dobras ou trancos no movimento do papel; bem como trancos, velocidade irregular ou mudança na largura do canal do transportador, levam a fendas aleatórias, geralmente nos ombros e lados do bloco. O chamado fluxo inferior, no qual uma camada líquida recém depositada penetra debaixo da espuma em expansão é uma característica da operação incorreta em máquinas com transportador inclinado, e provoca fendas no topo ou nos ombros [VILAR, 1993]. O problema é corrigido aumentando-se a velocidade do transportador de forma que o ponto de deposição fique mais distante do de expansão da espuma, ou retardando-se a velocidade da reação pelo ajuste da catálise.

**6) Corantes & Pigmentos** - Os pigmentos podem agir como agentes de nucleação ou o corante pode conter dispersantes que afetam a estabilidade da espuma, podendo ocasionar o aparecimento de fendas em formulações equilibradas.

### 2.4.3 - Queima do bloco

A queima, causada por decomposição térmica, pode ocorrer em blocos grandes, principalmente naqueles feitos com formulações com muita água (acima de 4,6 partes em peso por 100 de poliols) e pouco agente auxiliar de expansão. Estes fatores combinados com erros de formulação, contaminação do poliols ou outros produtos com água, mau funcionamento da maquinaria, e manuseio ou armazenagem incorreta dos blocos podem levar a um incêndio. Como a maior parte do calor gerado é proveniente da reação da água com o isocianato, nas espumas com densidade inferior a 25 kg/m<sup>3</sup>, expandidas somente ou com altos teores de água, o índice não deve superar 107. O uso de retardantes de fogo contendo fósforo ou halogênio aumenta a probabilidade de queima e o nível de água poderá ter de ser reduzido. A temperatura de pós cura do bloco pode ser monitorada com um termopar. Embora a curva dependa da densidade, do tamanho do bloco etc., se decorridas quatro a seis horas a temperatura ao invés de baixar de 160-170°C tornar a subir ocorre risco de incêndio. Os poliols contêm antioxidante que reduzem o

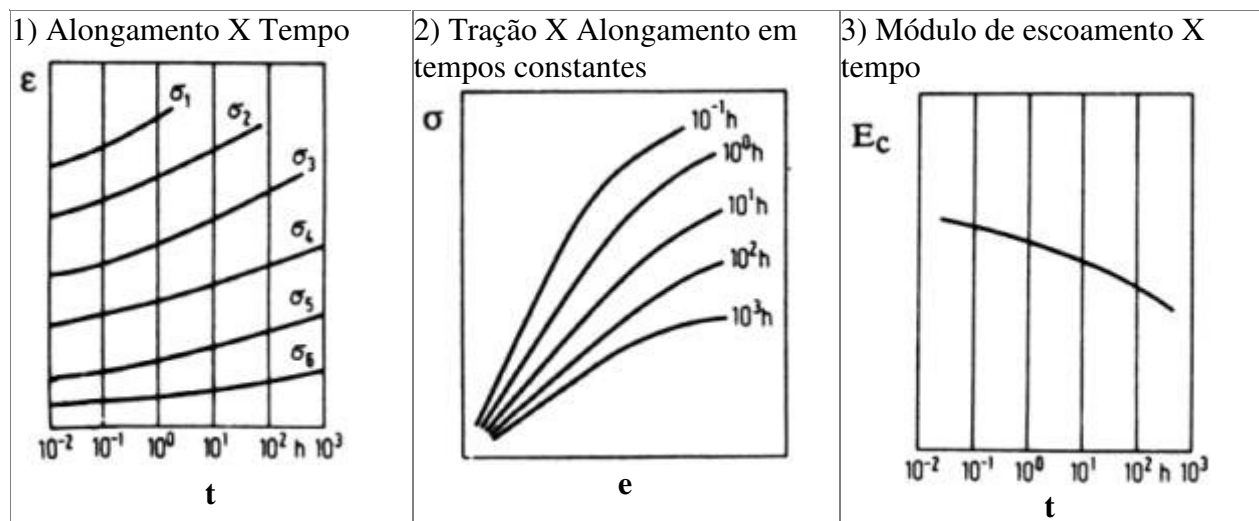
risco de queima. Todavia parte do antioxidante é consumida após contato com o ar por longos períodos em temperatura elevada. Contaminação com metais como ferro, níquel, cobre, etc., aceleram processos de oxidação e podem provocar queima.

## 2.5 - Avaliação da Durabilidade

Os testes de durabilidade destinam-se a avaliação do comportamento dos materiais após longo tempo de uso. Eles incluem: escoamento (creep), taxa de compressão e tração, fadiga dinâmica, resistência às intempéries, envelhecimento acelerado, abrasão, etc.

### 2.5.1 - Testes de escoamento ("creep")

Pela atuação de forças externas, as macromoléculas tendem a escoar e quando removida a tensão retornam parcialmente à situação primitiva. Se o material é muito cristalino, é também rígido e resiste mais à deformação; no entanto, sempre há uma variação de dimensão quando se ultrapassa o limite elástico de cada material (deformação permanente). Quando o polímero é pouco cristalino, ou está acima da sua temperatura de transição vítrea, há maior escoamento (creep) e as peças sofrem deformações mais pronunciadas, até mesmo por escoamento sob a ação de seu próprio peso (cold flow) [VILAR, 1998].



$\epsilon$  - Deformação;  $\sigma$  - Tensão;  $E_c$  - Módulo de escoamento;  $t$  - tempo.

Figura 2.4 - Testes de escoamento ("creep") [Adaptado de VILAR, 1998].

As variações das propriedades com o tempo tornam necessárias realizações de experimentos de escoamento para os PU's. A deformação de corpos de prova sob cargas constantes e condições ambientais constantes (especialmente a temperatura) é registrada como funções do tempo (Figura 2.4). O módulo de escoamento, que é lido na região linear inicial das curvas, é menor do que o módulo elástico determinado nos ensaios de tensão x deformação de

curta duração, e oferece aos projetistas a possibilidade de dimensionar o material, levando em conta deformações possíveis de ocorrer durante longas tensões [VILAR, 1998].

### 2.5.2 - Deformação permanente

O escoamento das cadeias macromoleculares, que pode ocorrer ao longo do uso de um material, pode ser avaliado através de testes de medida da deformação permanente por compressão ou tração.

**Deformação permanente por compressão** - Nas espumas flexíveis e elastômeros de PU a deformação residual, após uma deformação constante por um determinado intervalo de tempo à temperatura constante, é denominada taxa de compressão ou deformação permanente. Para as espumas flexíveis, o teste (NBR 8797 - ISO 1856, 2010) consiste na compressão de uma amostra de espuma de dimensão padrão 50, 75 e 90% do seu tamanho original, por 22h a 70°C, determinando-se seu efeito na espessura. A seguir, o material é descomprimido, deixado por um determinado tempo a 23°C e sua espessura determinada. A diferença é relacionada com a espessura inicial do corpo de prova e a taxa de compressão é expressa pela percentagem de perda na espessura. O dispositivo de compressão é feito de duas placas metálicas rígidas e planas e equipado de um sistema espaçador que permita manter as placas paralelas às distâncias previamente estabelecidas (Figura 2.5).

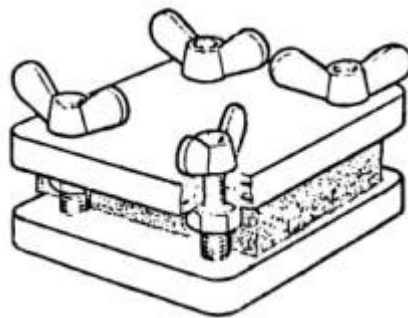


Figura 2.5 - Teste de deformação permanente em espumas flexíveis [VILAR, 1998].

Nos PU's sólidos a deformação permanente é medida pelo decréscimo residual da espessura de uma amostra padrão, 30 minutos após ter sido removida de um dispositivo adequado, no qual tenha sido submetida a uma deformação previamente determinada, por um dado período de tempo, sob condições padronizadas (Figura 2.6).

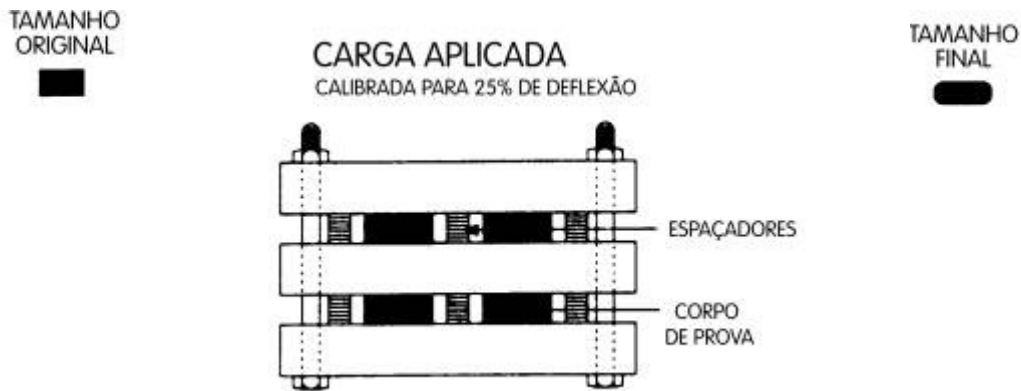


Figura 2.6 - Teste de deformação permanente em elastômeros [VILAR, 1998].

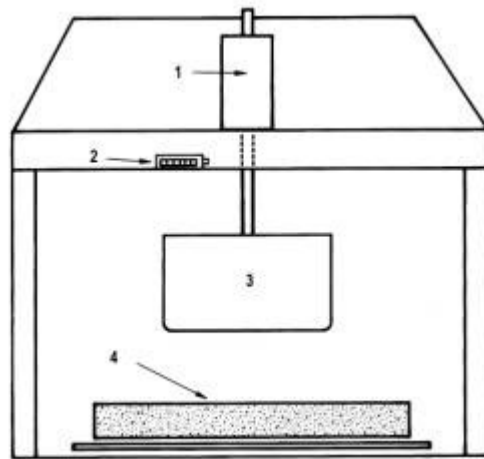
**Deformação permanente por tração** - Para a determinação da taxa de deformação permanente por tração, um corpo de prova de dimensões padrões é deformado a um alongamento específico e então, mantido por 24h na temperatura ambiente ou uma temperatura elevada especificada. Ao final do teste o material é deixado relaxar por 30 min e a sua deformação residual é medida. O quociente entre a deformação residual e a dimensão utilizada no teste é a taxa de deformação por tração.

### 2.5.3 - Resistência à fadiga

A resistência à fadiga compressiva dinâmica exprime a tensão máxima, desenvolvida alternadamente como tração e compressão, a que um material pode resistir quando a peça é submetida a esforços cíclicos. É quantificada pelo número de ciclos que o material pode suportar.

**Em espumas flexíveis** - O teste de fadiga dinâmica [NBR 9177, 2003] para assentos é destinado a avaliar a durabilidade de espumas e reproduz bem o comportamento dos assentos, durante o uso. Nele uma amostra padrão medindo 380mm x 380mm x 50mm é repetidamente comprimida por uma força de 750N a uma velocidade de 70 ciclos por minuto, por 80.000 ciclos. A espessura e a dureza são medidas antes e depois do teste e a perda percentual é usada para avaliar a resistência à fadiga. Dependendo das perdas as espumas são classificadas para diferentes tipos de aplicações. Estas perdas estão relacionadas, mas não são necessariamente equivalentes às perdas ocorridas em condições reais de uso (Figura 2.7).

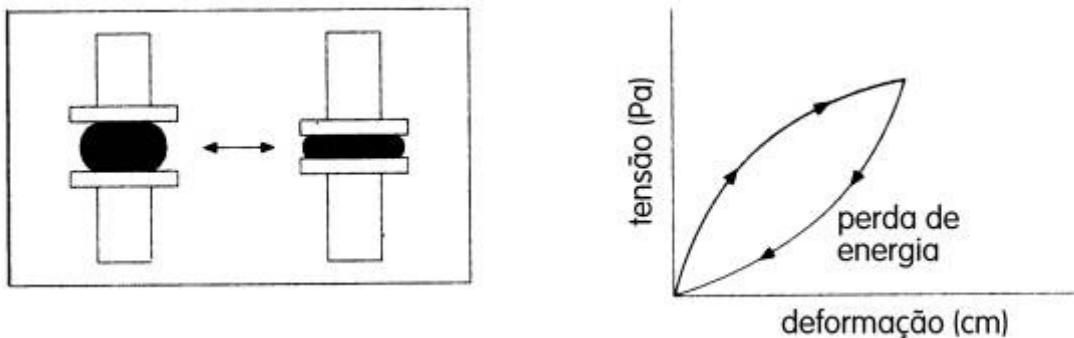




- 1) cilindro de ar,
- 2) contador,
- 3) indentador,
- 4) espuma.

Figura 2.7 - Teste de fadiga dinâmica em espumas flexíveis [VILAR, 1998].

**Em elastômeros** - Para os elastômeros de PU, uma amostra do material (Figura 2.8) é comprimida ciclicamente entre duas placas a uma frequência específica. A perda de energia histerética é medida ao longo do teste e é mostrada como a área entre as curvas com e sem carga. A temperatura interna é monitorada por um termopar inserido no elastômero. Os resultados do teste mecânico-dinâmico e da medida de geração de calor histerético são dependentes da natureza do PU. Para a determinação da resistência à fadiga flexiva dinâmica, de elastômeros de PU e espumas semi-rígidas com pele integral, são conduzidos testes contínuos de resistência à flexão, com o emprego das máquinas para testes de flexão dinâmica empregadas na indústria da borracha.



3 a 30 MPa, 20 Hz, 200000 ciclos

Figura 2.8 - Fadiga compressiva e histerese em elastômeros [VILAR, 1998].

#### 2.5.4 - Resistência à abrasão

A resistência à abrasão é a capacidade de um material resistir ao desgaste produzido por fricção, geralmente medida por comparação com o desempenho de padrões. Os PU's são os plásticos que apresentam maior resistência à abrasão, determinada pela perda de peso, volume ou

espessura de um corpo de prova friccionado contra um determinado material abrasivo, sob uma carga específica.

### 2.5.5 - Desenvolvimento de calor

O desenvolvimento de calor durante o uso (dynamic heat buildup), é avaliado em uma sucessão de ciclos de deformação e recuperação, onde ocorre transformação da energia perdida por histerese em energia térmica, causando aumento da temperatura da peça. Uma vez que nenhum material elastomérico é perfeitamente elástico, deformações cíclicas repetitivas geram calor, tais como as compressões e relaxações cíclicas num pneu rodando. Assumindo que não ocorre perda para o ambiente, a velocidade na qual a temperatura do elastômero varia depende da quantidade de deformação sob tensão, da frequência do ciclo e da natureza química do material. Em muitas aplicações dinâmicas, os PU's são materiais elastoméricos superiores, pois podem ser formulados com altas durezas; deformando menos sob uma determinada carga que as borrachas tradicionais. PU's na faixa de dureza Shore entre 90A-50D possuem propriedades de suporte de carga especialmente boas, todavia, mesmo PU's com durezas comparáveis não possuem propriedades dinâmicas iguais [VILAR, 1998]. A Figura 2.9 mostra um aparelho de teste dinâmico para rodas, que é usado para a avaliação de elastômeros de PU. Neste teste, o pneu é conectado a um eixo central de aço e gira a uma velocidade constante sob carga crescente até a temperatura subir o suficiente para causar a decomposição do polímero.

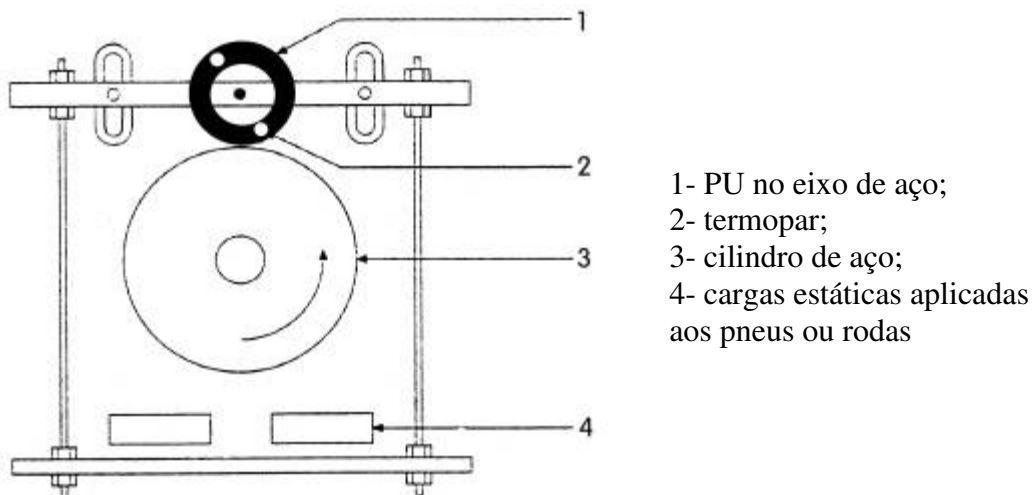


Figura 2.9 - Aparelhagem para teste dinâmico de rodas e pneus [VILAR, 1998].

### 2.6 - 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 [JCGM, 2008b].

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. Veja um exemplo: se são realizados 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 seria analisando a partir do desvio padrão a dispersão dos resultados. Já no cálculo da incerteza de medição além dessa dispersão nos resultados pode-se 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:

1. Definir o mensurando e seu modelo;
2. Identificar as fontes de incerteza;
3. Quantificar as fontes de incerteza;
4. Calcular os coeficientes de sensibilidade;
5. Calcular as componentes de incerteza;
6. Calcular a incerteza combinada;
7. Calcular o número de graus de liberdade efetivos;
8. Calcular o coeficiente de abrangência;
9. 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 2.1, a incerteza de medição de combinada de  $Z$  pode ser determinada a partir da Equação 2.2. No caso das grandezas  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_L$ , serem independentes a Equação 2.2 pode ser simplificada na Equação 2.3 [JCGM, 2008a].

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

**Equação 2.1**

$$u_{0_z}^2 = \sum_{i=1}^L \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^L \sum_{j=i+1}^L \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \left( \frac{\partial f}{\partial x_j} \right) u_{x_i} u_{x_j} r(x_i, x_j) \quad \text{Equação 2.2}$$

$$u_{O_z}^2 = \sum_{i=1}^L \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2 \quad \text{Equação 2.3}$$

As derivadas parciais presentes na expressão são denominadas coeficientes de sensibilidade ( $c_s$ ). 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 2.4. 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 2.5.

$$v_{eff} = \frac{u_z^4}{\sum \frac{u_{x_j}^4}{v_{x_j}}} \quad \text{Equação 2.4}$$

$$U_z = k.u_{0_z} \quad \text{Equação 2.5}$$

Tendo obtido um valor para  $v_{eff}$ , a tabela *t-Student* será utilizada para encontrar um valor de  $t_p(v)$ . A Tabela 2.4 apresenta alguns valores para  $t_{95,45}(v)$ .

**Tabela 2.4 - t-Student [EA-4/02, 2003]**

$v_{eff}$	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>16</b>
$t_{95,45}(v)$	13,9	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,23	2,20	2,17
$v_{eff}$	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	$\infty$
$t_{95,45}(v)$	2,15	2,13	2,11	2,09	2,07	2,06	2,06	2,05	2,04	2,03	2,02	2,00

A Figura 2.10 apresenta um diagrama que resume o método para estimativa de incerteza de medição.

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 2.6.

$$u_c = \sqrt{a_1^2.c_{s1} + a_2^2.c_{s2} + \dots + a_n^2.c_{sn}} \quad \text{Equação 2.6}$$

A incerteza padronizada é dada pela Equação 2.7.

$$u_p = \frac{U_z}{k}$$

Equação 2.7

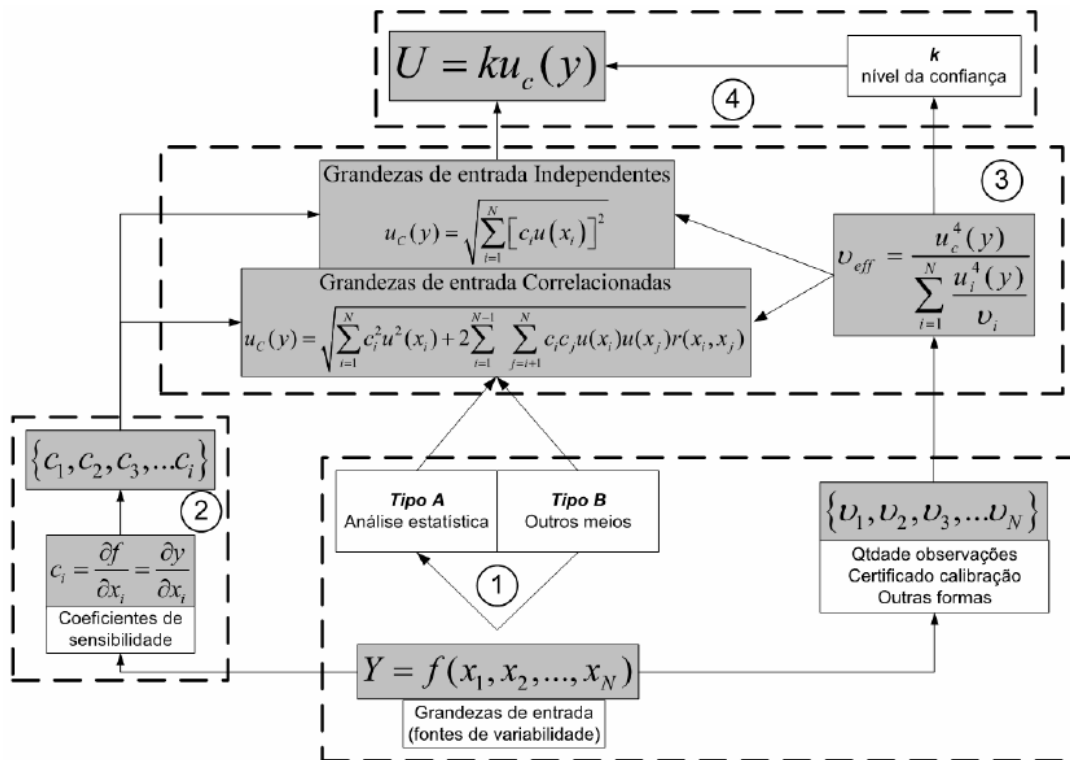


Figura 2.10 - Diagrama do método de estimativa de incerteza [PIZZOLATO, 2006].

### 2.6.1 - Tipo de fonte de incerteza

As fontes de incerteza podem ser divididas em dois tipos: A e B [JCGM, 2008a].

Incerteza 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, conforme Equação 2.8.

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

Equação 2.8

Neste caso, a incerteza padrão será caracterizada pelo desvio padrão experimental da média, dado pela Equação 2.9.

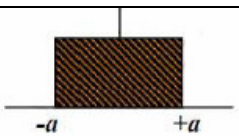
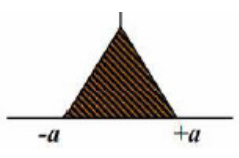
$$s(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Equação 2.9

Incertezas do tipo B: são aqueles pelo julgamento, conhecimentos prévios dos equipamentos, certificados, manuais, etc. Os casos mais comuns deste tipo de incerteza são listados na Tabela 2.5, 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 2.5 - Incertezas tipo B [JCGM, 2008a]**

	<b>Valor de incerteza</b>	<b>Gráfico da distribuição</b>
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	$u = \frac{r}{2\sqrt{3}}$	
Certificado	$u = \frac{U}{k}$	-

onde, r = resolução do instrumento a ser calibrado.

### 2.6.2 - 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 a seguir [PIZZOLATO, 2006]:

- Sistema Internacional de Unidade (SI)
- Rastreabilidade
- Materiais de referência
- Acordos de reconhecimento mútuo
- Ensaio de proficiência
- 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

[EA-4/16, 2003]. A Figura 2.11 apresenta, esquematicamente, a avaliação da conformidade de uma medida quando são especificados limites de tolerância máximo e mínimo.

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 [JORNADA, 2009].

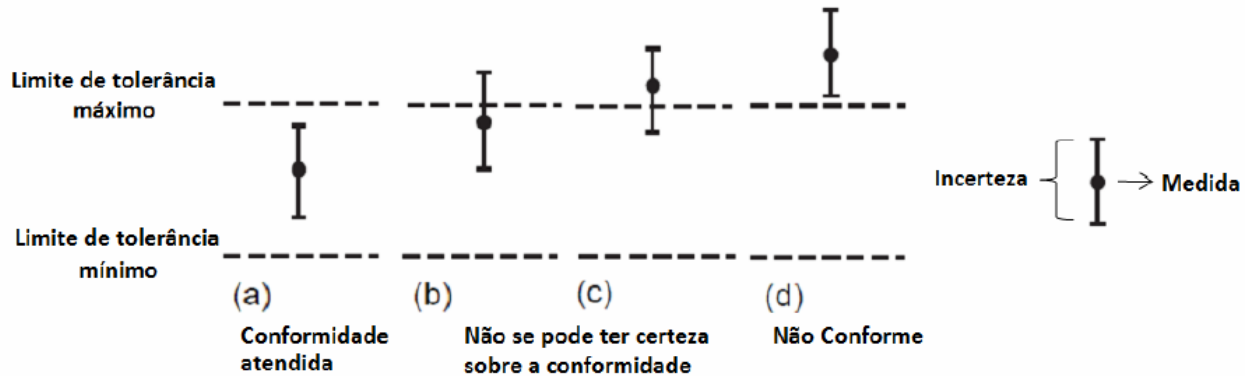


Figura 2.11 - Avaliação da conformidade de uma medida.

### 3. ESTIMATIVA DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Ensaaios de fadiga dinâmica e determinação de força de indentação podem ser realizados com diversos objetivos. Fizeram-se aqui algumas dessas possibilidades e a possível metodologia para estimativa da incerteza de medição, em especial o levantamento de dados para a confecção de planilhas de incertezas.

#### *3.1 - Ensaaios de Certificação de Produtos*

Existem normas para alguns tipos de produtos (colchões e colchonetes de espuma flexível de poliuretano) que especificam uma vida mínima para o componente para certa condição de carregamento. Neste tipo de ensaio são aplicadas as solicitações descritas na norma [NBR 9176, ABNT, 2003g] e é verificado se o componente resiste sem avarias o número de ciclos especificado. Estes ensaios são do tipo passa ou não passa, sendo que o resultado propriamente dito não é quantitativo.

O objetivo deste ensaio prescreve o método para determinação da força necessária para se produzir uma compressão pré-fixada sobre uma amostra flexível de espuma de poliuretano, aplicada sobre uma área determinada [NBR 9176, ABNT, 2003g].

Apesar do resultado em si não ser quantitativo e não se podendo ter assim estimativa da incerteza, a solicitação aplicada possui incerteza, e seria uma boa prática reportar seu valor no relatório de ensaio para fins de comparação com outros ensaios.

#### **3.1.1 - Identificação das fontes de incerteza**

Fontes de incerteza na determinação da indentação de espuma de poliuretano:

- Fatores ambientais (umidade e temperatura);
- Critérios de ensaios;
- Erros de leitura do operador;
- Erro dos instrumentos;
- Incerteza na calibração dos instrumentos;
- Resolução do instrumento;
- Dimensões do corpo de prova;
- Dispersão/repetibilidade dos resultados;
- Desalinhamento (planicidade do acessório).

Fatores ambientais como temperatura, umidade e também a frequência do ensaio são considerados como tendo influência desprezível para a maioria dos materiais poliméricos quando



ensaiados a temperatura controlada de  $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ . Tal fator só será considerado caso o ensaio ocorra em ambiente agressivo [BRANCO, 1985].

O critério para ensaios de fadiga e indentação pode ser o surgimento de regiões com maior compactação sendo que deverá ser inspecionado a cada quantidade de ciclos pré-definida, onde é verificado se há compactação heterogênea no corpo de prova.

Os erros de leitura do operador são desprezíveis, pois a máquina de ensaio emite um laudo automático depois de ter efetivado o ensaio, onde o mesmo só tem o trabalho de alocar os valores na planilha de incertezas.

Os erros de instrumentos estão intimamente relacionados à temperatura. Exemplo típico é o da não estabilidade dos sistemas elétricos de medição, num determinado tempo, após serem ligados. É necessário aguardar a estabilização térmica dos instrumentos/equipamentos para reduzir os efeitos da temperatura. Tal erro também será desconsiderado pois o laboratório possui um controle rigoroso deste efeito.

A incerteza na calibração dos instrumentos será descartada devido o fato de que, os corpos de prova são de material “esponjoso” o que poderia dar um desvio de dimensões muito grande.

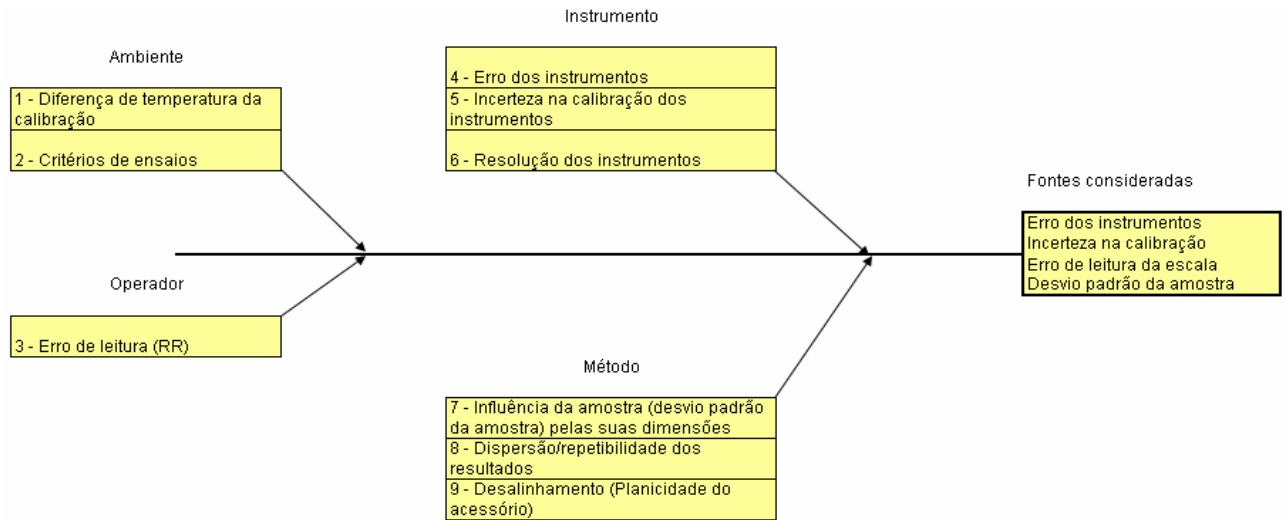
Na resolução do instrumento pode-se destacar que a peça é medida somente com trena, e devido a sua construção pode ocasionar erro em torno de 1mm, não influenciando assim diretamente no ensaio.

As dimensões do corpo de prova influenciam no processo por ser um poliuretano expandido e o mesmo não possuir medidas com alto valor de tolerância dimensional.

A dispersão dos resultados pode ser atribuída a fatores internos (micro variações da composição química e estrutura) naturais e inerentes ao processo de fabricação dos materiais. Tal valor será desconsiderado, pois segundo a NBR 9177 [ABNT, 2003h], devem ser ensaiados apenas três corpos de prova, fazendo com que a dispersão seja demasiadamente grande.

O desalinhamento também pode ser avaliado com procedimentos documentados em norma, como por exemplo, a ASTM E1012, 2005. O desalinhamento pode ser proveniente da própria máquina de ensaios, da geometria do corpo de prova e do sistema de fixação do corpo de prova, bem como do acessório a ser utilizado. Em geral o desalinhamento diminui com o aumento da carga aplicada no caso de solicitações trativas que não é o caso. O valor do desalinhamento é compensado pelo acessório utilizado na máquina. Tal acessório é composto de molas para compensação de desalinhamento de planicidade, conforme Figura 4.5.

A Figura 3.1 apresenta um diagrama causa e efeito mostrando as possíveis fontes de incerteza na determinação da indentação de espuma de poliuretano e da incerteza em cada dureza.



**Figura 3.1 - Diagrama de causa e efeito mostrando as possíveis fontes de incerteza na determinação da indentação e da dureza de espuma de poliuretano.**

### 3.1.2 - Quantificação e avaliação das fontes de incerteza

A Tabela 3.1 apresenta um quadro contendo o tipo e as possibilidades de como se estimar a incerteza de cada fonte levantada no passo anterior.

**Tabela 3.1 - Tipo e estimativa do valor para as fontes de incerteza levantadas.**

Fonte de incerteza	Tipo	Estimativa do Valor
Fatores ambientais (umidade e temperatura)	A/B	Tipo A: se forem feitos uma série de registros ao longo do ensaio. Tipo B: se o valor for obtido do certificado de calibração dos instrumentos*.
Crítérios de ensaios	B	Caso o critério de falha seja ruptura da amostra seu valor é desprezível. Se o critério for adotado pode-se assumir uma distribuição uniforme com valor de “a” igual ao número de ciclos entre as inspeções.
Erro de leitura	A	Do operador são desprezíveis, pois a máquina emite relatório automático.
Erro dos instrumentos	B	Pode ser estimado através do desvio padrão do instrumento dividindo por dois.
Incerteza na calibração dos instrumentos	B	Através do certificado de calibração dos instrumentos
Resolução do instrumento	A	Devido à observação e utilização de instrumento próprio para o uso.
Medida das dimensões do corpo de prova	A/B	Tipo B: se a estimativa provier de um certificado de calibração do instrumento de medição utilizado. Tipo A: se forem realizadas diversas medidas de cada dimensão.
Dispersão/repetibilidade dos resultados (do número de ciclos)	A	Pode ser estimada através do desvio padrão do logaritmo do número de ciclos dividido pela raiz do número de amostras. (se este tem distribuição log-normal)
Desalinhamento (planicidade do acessório)	B	Pode ser considerado como tendo distribuição uniforme.

\*Pode ser considerado do tipo B, caso seja registrado somente valores mínimo e máximo durante o ensaio, função essa que termo-higrômetros digitais mais simples tem. Lembrando que alguns ensaios dependendo das condições podem demorar mais de um dia e assim estarem sujeitos a grandes variações de temperatura e umidade nesse período.

### 3.1.3 - Cálculo da média aritmética

As medidas de posição mais importantes são as medidas de tendência central, que recebem este nome pelo fato dos dados tenderem ao agrupamento em torno dos valores centrais.

A média aritmética é a soma de todos os valores do conjunto, dividido pelo número de valores do conjunto. A Equação 3.1 refere-se à média aritmética, porém não será feito o cálculo, pois a máquina de ensaios gera a média automaticamente.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad \text{Equação 3.1}$$

### 3.1.4 - Medidas de dispersão

As medidas de dispersão indicam o quão próximos ou separados uns dos outros, estão os dados coletados.

**Variância:** É definida como a média dos desvios ao quadrado em relação à média da distribuição (amostra). O cálculo da variância é definido pela Equação 3.2.

$$s^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 \quad \text{Equação 3.2}$$

**Desvio padrão:** É o afastamento médio quadrático dos desvios em relação à média aritmética; nada mais é do que a raiz quadrada da variância. O cálculo do desvio padrão é definido pela Equação 3.3.

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad \text{Equação 3.3}$$

### 3.1.5 - Cálculo dos coeficientes de sensibilidade

Das fontes relacionadas ao número de ciclos:

Para a dispersão/repetibilidade dos resultados do número de ciclos os coeficientes de sensibilidade tem valor igual a unidade, pois os mesmos já são expressos em termos do próprio número de ciclos.

Para as fontes relacionadas à tensão:

Da maneira como aqui foi estimada a contribuição do desalinhamento o coeficiente de sensibilidade desta fonte é igual à unidade, pois sua incerteza já estará expressa em termos de tensão.

Para incerteza dimensional e da carga aplicada o cálculo deve ser feito através de derivadas parciais. A seguir o cálculo é exemplificado pela quantidade de saída por cada quantidade de entrada. Matematicamente, esta variação é expressa pela derivada parcial da função. Se esta função for expressa pela equação  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i, X_N)$ , tem-se:

$$c_s = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad \text{Equação 3.4}$$

onde  $c_s$  é o coeficiente de sensibilidade.

Para o cálculo de pós fadiga levou-se em consideração a Equação 3.5, na qual é feita a regra de três para obtenção do percentual da incerteza de perda de dureza, para 25%, 40% e 65%, conforme norma NBR 9176 [ABNT, 2003g].

$$c_s = \frac{c_{si} \cdot c_s}{c_{sf} \cdot 100} \quad \text{Equação 3.5}$$

Para cálculo do percentual do erro de pós fadiga derivou-se a Equação 3.5 em função de  $c_s$  e obteve-se a Equação 3.6, utilizada para cálculo do Coeficiente de Sensibilidade.

$$c_s = \frac{c_{si}}{c_{sf} \cdot 100} \quad \text{Equação 3.6}$$

No balanço de incertezas, a incerteza padronizada deverá ser multiplicada pelo coeficiente de sensibilidade. Nas medições diretas, o coeficiente de sensibilidade será geralmente 1.

### **3.1.6 - Cálculo dos componentes de incerteza, incerteza combinada e graus de liberdade efetivos**

O cálculo dos componentes de incerteza é feito multiplicando-se o valor de incerteza estimado pelo seu coeficiente de sensibilidade. Este valor calculado para cada uma das fontes de incerteza permite sua comparação e identificação das fontes mais importantes.

O cálculo da incerteza combinada é feito através da Equação 2.3 (do capítulo anterior), isto é, é a raiz da soma dos quadrados dos componentes de incerteza.

O cálculo dos números de graus de liberdade efetivos é feito conforme Equação 2.4 (do capítulo anterior), sendo que para as incertezas do tipo B os graus de liberdade são considerados infinitos.

### **3.1.7 - Cálculo do coeficiente de abrangência**

Tendo-se o valor do número de graus de liberdade efetivos e estipulando-se um nível de confiança (geralmente 95%) pode-se com o auxílio de tabelas de *t-Student* determinar o valor de k.

Para o caso de números de ciclos, pode-se calcular um só valor de k para todos os níveis de carga. Por isso tomam-se os graus de liberdade como o número de amostras ensaiadas menos dois, do mesmo modo que se faria para o cálculo das bandas de confiança. Essa metodologia será adotada, pois se for calculado o valor de k individualmente para cada nível de tensão seu valor será muito grande, devido ao baixo número de amostras em cada nível de tensão, isso tornaria os resultados excessivamente conservadores.

## **3.2 - Incerteza da Carga/Força Aplicada nos Ensaios de Fadiga**

A norma ASTM E467, 2008, descreve procedimentos e requisitos para a realização da calibração dinâmica de máquinas de ensaios. Outra norma que também trata deste assunto é a BS 7935-1, 2004, sendo o procedimento para a calibração das duas normas praticamente o mesmo. A seguir segue um resumo do procedimento para calibração:

1. Exercitar o sistema indo até 5% acima da carga máxima sendo verificada, retornando a carga até zero e tarando a indicação dos *strain gauges* instalados no corpo de prova.
2. Aplicar lentamente as cargas pontuais indicadas a seguir, tomando nota dos valores indicados pelos *strain gauges* em cada carga.
  - Carga máxima menos 5% da amplitude de carga sendo calibrada.
  - Carga máxima.
  - Carga máxima mais 5% da amplitude de carga sendo calibrada.
  - Carga mínima mais 5% da amplitude de carga sendo calibrada.
  - Carga mínima.
  - Carga mínima menos 5% da amplitude de carga sendo calibrada.
3. Iniciar o comando cíclico na máquina de ensaios e aguardar que os valores de máximos e mínimos de carga sejam atingidos e fiquem estáveis.
4. Adquirir pelo menos cinquenta pontos de carga máxima e mínima simultaneamente na máquina e nos *strain gauges*.
5. Para cada ciclo verificar o erro existente entre o valor da carga medido pela máquina de ensaios, já aplicados fatores de correção, e o valor da medida feita pelos *strain gauges*.

O valor do erro calculado no passo 5 não pode ultrapassar 1%, para nenhum dos ciclos.

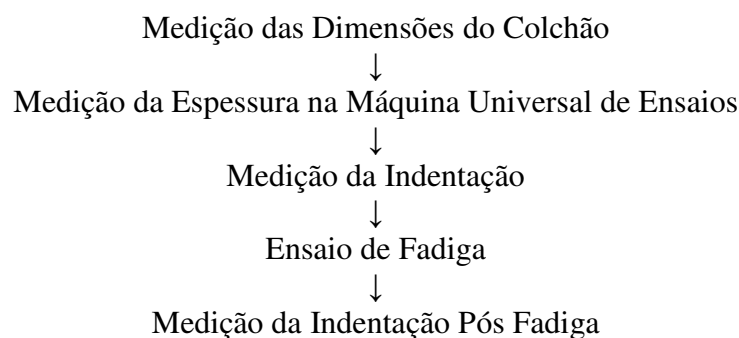
No passo 5 fala-se em valores de carga corrigidos. Isso se deve a inércia do sistema e sua aceleração e desaceleração durante os ciclos de fadiga. O valor de carga medido pela célula de carga e o efetivamente aplicado ao corpo de prova são diferentes. Sendo assim deve-se corrigir o valor medido pela máquina, e esse valor corrigido deve ser usado para calcular a tensão.

Utilizando esse procedimento pode-se estimar o valor da incerteza da carga aplicada estimado pelo desvio padrão dos valores obtidos pela amostra instrumentada e pela incerteza da calibração estática, devido ao exposto no passo 2.

## 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1 - Diagrama de Realização dos Ensaios

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



### 4.2 - Material e Corpos de Prova

Para se entender dos materiais e corpos de prova que serão usados nos ensaios deve-se descrever o seguinte:

**AGLOMERADO DE ESPUMA:** Material triturado, prensado e aglutinado, composto de flocos de espuma flexível de poliuretano, podendo conter cascas de bloco de espuma, aparas têxteis e outros materiais oriundos da indústria de poliuretano.

**AGLUTINANTE:** Material ou combinação de materiais cuja função é unir os flocos para obtenção do aglomerado de espuma.

**CASCAS:** Material densificado, oriundo do processo de fabricação da espuma, localizado na periferia do bloco.

**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.

**COLCHÃO INFANTIL:** Colchão de espuma flexível de poliuretano destinado ao uso infantil em berço ou camas.

**COLCHÃO GERAL:** Colchão de espuma flexível de poliuretano destinado ao uso em cama ou “box”, de solteiro ou casal.

**COLCHÃO BOX CONJUGADO:** Conjunto monobloco, devidamente revestido, formado por colchão de espuma flexível de poliuretano e estrutura constituída integralmente por madeira maciça ou composta por madeira maciça e compensado ou com chapa dura ou com outros materiais com funções similares.

**COLCHÃO AUXILIAR:** Colchão de espuma flexível de poliuretano para uso eventual, devidamente revestido, podendo ser constituído integralmente por espumas ou conjugado com estrutura em madeira maciça ou composta por madeira maciça e compensado ou com chapa dura ou com outros materiais com funções similares, quando para utilização em estrutura box, bicamas (beliche) e tricamas (treliche).

**COLCHÃO MISTO:** Conjunto, devidamente revestido, formado por uma estrutura constituída integralmente por madeira maciça podendo ser, também, composta por madeira maciça e compensado, com chapa dura ou com outros materiais com funções similares, sobreposta por lâmina(s) de espuma(s), em uma ou em ambas as faces e nas laterais.

Quanto à classificação do colchão de espuma flexível de poliuretano ele pode ser:

**Tipo composto:** colchão constituído por lâmina(s) de espuma(s) flexível(eis) de poliuretano com características diversas, inclusive aglomerado de espuma;

**Tipo simples:** colchão constituído integralmente de espuma(s) com característica(s) única;

**Colchonete de espuma flexível de poliuretano:** bem de consumo de uso eventual para o repouso humano, cujo conteúdo é constituído de lâmina(s) de espuma(s) flexível(is) de poliuretano, devidamente revestido;

**Densidade nominal (D):** valor numérico que indica a densidade de referência expressa em  $\text{kg/m}^3$ ;

**Densidade real (Dr):** valor numérico obtido por metodologia de ensaio, expressa em  $\text{kg/m}^3$ ;

**Fator de conforto (F.C):** relação entre a força de indentação a 65% e a força de indentação a 25%.

#### **4.2.1 - Dimensões do colchão para ensaio**

As dimensões totais da espessura, largura e comprimento, assim como da espessura da lâmina de espuma devem ser verificadas da seguinte forma:

##### **Medição do comprimento, largura e altura do colchão e colchonete acabado:**

- a) Estender o colchão/colchonete sobre uma superfície plana e rígida maior que a área do colchão/colchonete;
- b) Manter em repouso o colchão/colchonete por um período não inferior a 30 (trinta) minutos;
- c) Medir a largura total com a trena, considerando o revestimento, colocando os dois esquadros sobre a superfície plana, encostando as faces verticais ( $90^\circ$ ) nas laterais do colchão/colchonete, em posições opostas, em três pontos equidistantes, considerando como sua largura total o valor médio encontrado, expresso em centímetros;



d) Medir 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) Medir 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.

#### **Medição da espessura da lâmina de espuma do colchão/colchonete:**

a) Após retirar o revestimento, estender a(s) lâmina(s) de espuma do colchão/colchonete sobre uma superfície plana e rígida maior que a área da lâmina;

b) Manter em repouso a(s) lâmina(s) de espuma por um período não inferior a 30 (trinta) minutos;

c) Medir a espessura da(s) lâmina(s) de espuma utilizada na(s) face(s) do colchão/colchonete, com a régua ou escala milimétrica. Apoiar 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.

Nota: No caso de produtos que apresentarem mais de uma lâmina de espuma deve-se executar este procedimento em todas as lâminas, não sendo necessário o descolamento entre as lâminas.

- São admitidas tolerâncias com relação à largura e comprimento do produto acabado de  $\pm 1,5\text{cm}$  e para a altura de  $- 0,5/+1,5\text{cm}$ , 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 4.1, sendo admitida tolerância de  $\pm 0,5\text{cm}$ , da espessura total e individual de cada lâmina. A espessura é referente à lâmina de espuma sem revestimento.

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

\* Colchonete: a altura total não pode exceder 8cm, inclusive com o revestimento;

\* Conjugado e auxiliar: A soma das espessuras dos materiais que compõem o revestimento do colchão conjugado e auxiliar não deve exceder 1/3 da espessura da lâmina de espuma.

**Tabela 4.1 - Dimensões mínimas: colchonete e colchão de espuma flexível e poliuretano segundo NBR 13579-1 [ABNT, 2011]**

Tipos	Espessuras	
	Mínima (cm)	Máxima (cm)
Colchonete <sup>a)</sup>	4	8
Colchão infantil	7	Não há
Colchão geral	12	Não há
Colchão auxiliar <sup>b)</sup>	5	Não há
Colchão box conjugado <sup>b)</sup>	5	Não há
Colchão misto <sup>b)</sup>	5	Não há
<sup>a)</sup> Colchonete nas medidas acabadas, com revestimento; <sup>b)</sup> Colchão auxiliar, box conjugado e misto deve ter densidade $\geq 28$ .		

No anexo A se encontra um Formulário de Ensaio denominado Requisitos de Colchão e Colchonete de Espuma Flexível de Poliuretano e Bases, onde são anotados todos os resultados das avaliações feitas experimentalmente pelo Laboratório de Controle de Qualidade do CETEMO (Centro Tecnológico do Mobiliário).

#### **4.3 - Determinação da Fadiga Dinâmica e Força de Indentação de Espuma Flexível de Poliuretano**

Este procedimento descreve a atividade de realização do ensaio de **Determinação da Fadiga dinâmica – ABNT NBR 9177 [ABNT, 2003h]**, realizados pelo Laboratório de Controle de Qualidade do CETEMO.

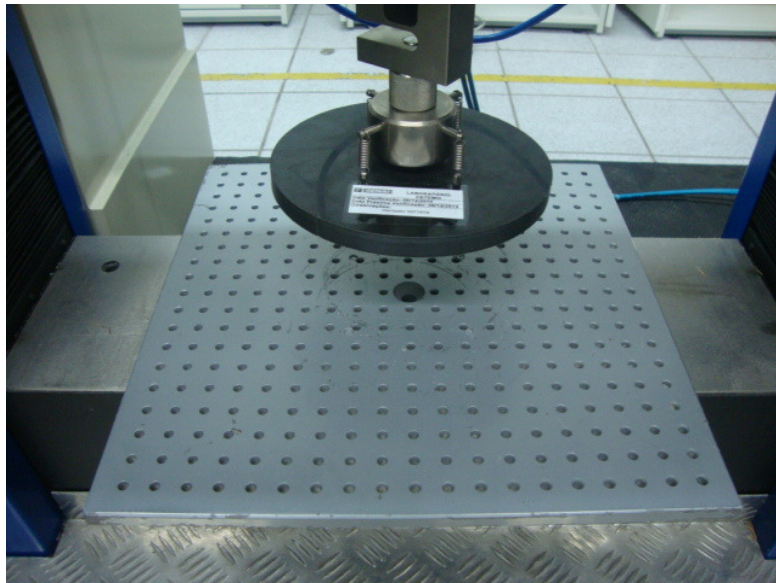
##### **4.3.1 - Metodologia e detalhamento**

São necessários para cada ensaio um mínimo de 04 corpos de prova por amostra, sendo que 03 serão selecionados para o ensaio e 01 servirá como testemunha.

Devem-se verificar 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 mesmos devem ser obtidos pelo empilhamento de no máximo duas camadas do mesmo material, sem a utilização de adesivo.

##### Preparação dos equipamentos e instrumentos:

1) Deve-se preparar a Máquina Universal de Ensaio de 30 toneladas, com célula de carga de 500kgf e dispositivos para a execução do ensaio conforme Figura 4.1.



**Figura 4.1 - Montagem da placa de apoio e indentador da máquina Universal de Ensaio.**

- 2) Máquina de Fadiga em espuma, capaz de produzir um movimento uniforme de compressão e descompressão da espuma com uma frequência de  $(70 \pm 10)$  ciclos/min.
- 3) Montar a placa de apoio na Máquina Universal de Ensaio consiste em colocar uma chapa metálica rígida horizontal, contendo furos de  $(6,5 \pm 0,5)$ mm, distanciados de aproximadamente  $(20 \pm 1)$ mm um do outro, a fim de permitir escape do ar durante o ensaio.
- 4) O indentador metálico deve ser rígido, com diâmetro de  $(250 \pm 10)$ mm, borda arredondada de raio  $(25 \pm 5)$ 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 deve ser fixado rigidamente a sua guia e sua superfície deve ser lisa, mas não polida.

#### 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 24h 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:

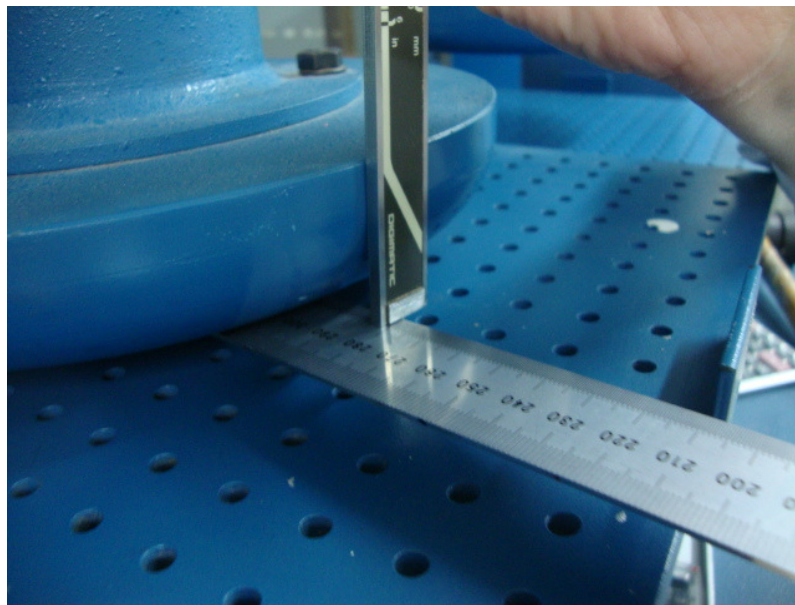
- Por três vezes seguidas, o corpo de prova foi pré-comprimido a  $(70 \pm 5)\%$  da espessura original a uma velocidade de  $(100 \pm 10)$ mm/min. Aliviou-se a força após atingir os  $(70 \pm 5)\%$  de compressão na mesma velocidade.

- Comprimiu-se o corpo de prova a  $(25\pm 1)\%$  de sua espessura original. Manteve-se esta compressão por  $(30\pm 1)$ 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  $(30\pm 1)$ s. Mediu-se então a força de indentação a  $(40\pm 1)\%$ .
- Aumentou-se a compressão do corpo de prova para  $(65\pm 1)\%$  de sua espessura original. Manteve-se esta compressão por  $(30\pm 1)$ 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 50mm de espessura (espuma flexível – 70%), deve-se reduzir até 15mm de sua espessura. Pode-se ver o ajuste da máquina conforme mostra a Figura 4.2.



**Figura 4.2 - 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.

Após, na máquina universal de ensaios, determinou-se a espessura ( $E_f$ ) e a força de indentação ( $FI_f$ ), excluindo-se a pré-compressão a  $(70\pm 5)\%$ , onde foi executado o ensaio de pós fadiga conforme NBR 9177 [ABNT, 2003h], que se repete com relação ao ensaio de indentação anterior.

## 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 1N.

Calcular o fator de conforto utilizando a equação abaixo conforme NBR 9176 [ABNT, 2003g]:

$$\text{Fator de conforto} = \frac{\text{força de indentação a 65\%}}{\text{força de indentação a 25\%}} \quad \text{Equação 4.1}$$

### *Perda de Espessura:*

A perda de espessura é calculada pela equação:

$$P_E = \frac{E_0 - E_f}{E_f} \cdot 100 \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde:

$P_E$  é a perda em espessura, em porcentagem;

$E_0$  é a espessura original, em milímetros;

$E_f$  é a espessura final, em milímetros.

### *Perda de Força de Indentação:*

A perda de força de indentação é calculada pela equação:

$$P_{FI} = \frac{FI_0 - FI_f}{FI_0} \cdot 100 \quad \text{Equação 4.3}$$

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.

## **4.4 - Máquina de Ensaio (Fadigômetro de Espumas) e Dispositivos de Fixação**

A máquina utilizada foi uma Maqtest com duplo disco, sendo que a norma NBR 9177 [ABNT, 2003h] descreve o aparelho, os procedimentos de teste e de análise do corpo de prova durante e após o teste. Este aparelho permite determinar a fadiga dinâmica por compressão de espuma flexível de poliuretano. O corpo de prova é deformado repetidamente entre uma placa de apoio perfurada e um indentador circular de base lisa, fixado rigidamente ao corpo do aparelho.

A máquina possui uma capacidade máxima de 5000N e sua resolução é de 1N.

A deformação da espuma aglomerada é de  $(50 \pm 5)\%$ .

A deformação da espuma não aglomerada é de  $(70\pm 5)\%$ .

### Características do Equipamento:

- Corpos de prova: 1, 2 ou 3;
- Frequência:  $(70\pm 10)$  ciclos/min.;
- Dimensões da placa de apoio:  $(400\times 400)$ mm;
- Diâmetro dos furos da placa de apoio:  $(6,5\pm 0,5)$ mm;
- Distância entre furos de placas de apoio:  $(20\pm 1)$ mm;
- Diâmetro do indentedor:  $(250\pm 10)$ mm;
- Excêntricos montados no eixo de saída do redutor: 1 ou 2;
- Bielas rolamentadas;
- Eixos de levantamento da placa de apoio retificados e temperados, guiados em rolamentos lineares;
- Placa de apoio: fabricada em alumínio, com  $(400\times 400)$  mm, perfurada com furos de  $\varnothing(6,5\pm 0,5)$ mm, distanciados a  $(20\pm 1)$ mm;
- Indentador circular com  $\varnothing(250\pm 10)$ mm e borda arredondada com raio de  $(25\pm 5)$ mm;
- Contador digital de ciclos, programável e memorizado;

Este aparelho é utilizado para medir a resistência à fadiga de espumas flexíveis de poliuretano conforme norma NBR 9177 [ABNT, 2003h]. A Figura 4.3 apresenta os dispositivos de fixação utilizados para a realização das calibrações e ensaios já com o corpo de prova montado.



Figura 4.3 - Máquina de ensaios utilizada (Fadigômetro) e detalhe da fixação do corpo de prova.

#### **4.5 - Máquina Universal de Ensaios**

Os ensaios foram realizados em uma máquina servo-hidráulica marca EMIC modelo DL com capacidade de carga de 300kN com célula de carga de 500kgf. A Figura 4.4 apresenta os dispositivos de fixação utilizados para realização dos ensaios já com o corpo de prova montado. A Figura 4.5 apresenta o acessório para o indentador.

Os ensaios para levantamento da curva Força X Deformação Específica, foram realizados com auxílio do software TESC versão 3.04, conforme norma NBR 9176 [ABNT, 2003g] e NBR 9177 [ABNT, 2003h], estando dentro dos parâmetros recomendados pela norma citada.

##### **Características do Equipamento:**

- Campo de ensaio: duplo, permitindo a instalação permanente de acessório de elevado peso no campo superior;
- Acionamento: Fusos de Esferas Recirculantes;
- Faixa de Velocidades: 0,01 a 500mm/min;
- Medição de Força: Através de células de carga intercambiáveis;
- Classe de Medição de Força: Classe 1 segundo a Norma NM ISO7500-1 com Certificado de Calibração RBC (Rede Brasileira de Calibração);
- Console (Teclado ou Joystick): Com funções básicas de movimentação para ajustes de acessórios;
- Curso Útil: 1200mm;
- Distância entre Colunas: 650mm;
- Altura: 2300mm;
- Largura: 1340mm;
- Profundidade: 1000mm.

Os ensaios para levantamento dos dados foram realizados com pré-carga de  $5N \pm 1N$  correspondendo esta distância à espessura a ser utilizada para os cálculos do ensaio. O *software* e aparelhos da máquina de ensaios utilizada foram avaliados conforme norma [ASTM E1942, 2004], estando dentro dos parâmetros recomendados pela norma citada. O critério adotado foi o preconizado na norma NBR 9176 [ABNT, 2003g] que diz que devem ser ensaiados no mínimo três corpos de prova.



Figura 4.4 - Máquina de ensaios utilizada (Universal) e detalhe da fixação do corpo de prova.



Figura 4.5 - Acessório para indentador.

#### 4.6 - Cálculos Estatísticos e da Incerteza de Medição

O cálculo de incerteza da indentação levou em consideração as incertezas provenientes da medida do corpo de prova e da carga aplicada.

Todos os cálculos foram desenvolvidos em planilhas eletrônicas utilizando-se *software* Microsoft Excel 2003®. Para o cálculo do coeficiente de abrangência (k) foi utilizada a função INVT (probabilidade; graus\_de\_liberdade), onde o valor de probabilidade usado foi igual a 0,05, o que corresponde a um nível de confiança de 95%.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 - Avaliação do Ensaio de Indentação

Os resultados obtidos no ensaio de indentação foram obtidos na máquina bem como o cálculo do fator de conforto conforme Tabela 5.1. A Figura 5.1 mostra o gráfico Força (N) X Deformação Específica (%), para indentação dos corpos de prova.

**Tabela 5.1 - 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

Com os resultados obtidos da Tabela 5.1 e fazendo um comparativo com a Tabela 2.2, chega-se aos seguintes resultados:

- A força de indentação (FI) a 40% para uma espuma não fadigada, deve ser de no mínimo 165N, como a média dos corpos de prova ficou em 184,4N, significa dizer que passaram no teste. Mesmo observando individualmente percebe-se que os mesmos estão dentro do especificado.

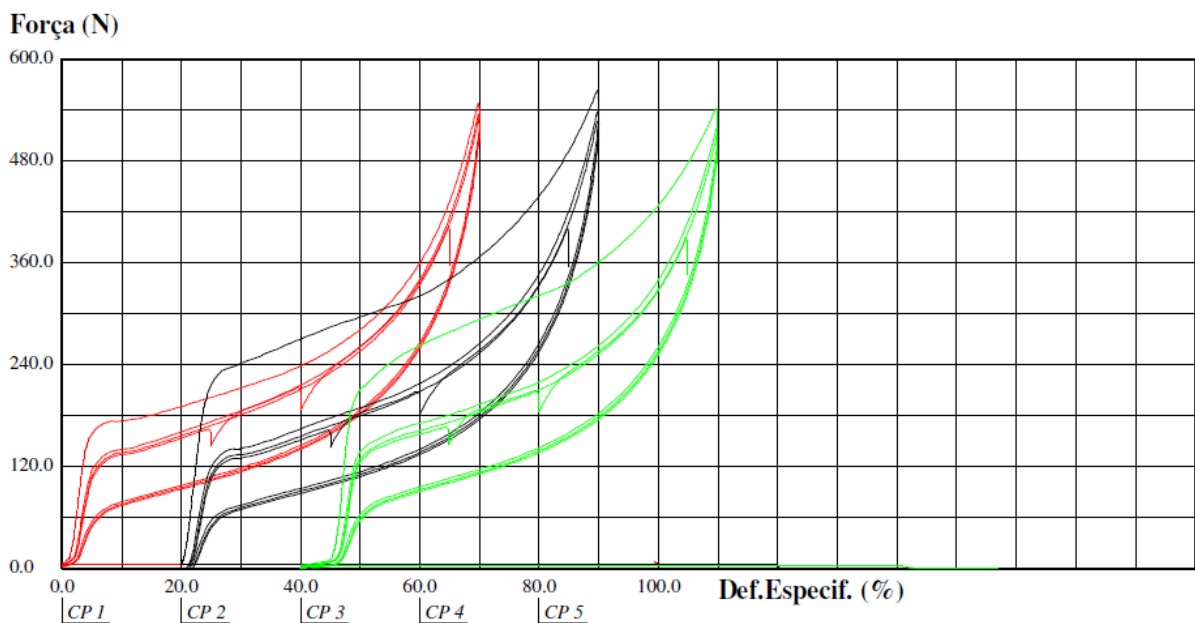
- O fator de conforto deve ficar no mínimo em 2,2, como a média dos corpos de prova ficou em 2,441, significa dizer que passaram no teste. Mesmo observando individualmente percebe-se que os mesmos estão dentro do especificado.

- A medição da espessura original dos corpos de prova, segundo a NBR 9176 [ABNT, 2003g] deve ser de 50mm  $\pm$ 2mm, onde na média os colchões ficaram dentro da tolerância. Os

corpos de prova número 2 e número 3 ficaram dentro desta tolerância, porém o número 3 ficou fora do especificado. Poder-se-ia ter utilizado o corpo de prova testemunha para uma contraprova de medição de espessura. O mesmo não foi utilizado por se tratar de um estudo de indentação pós fadiga e não diretamente relacionado à espessura dos colchões de espuma flexível de poliuretano.

- Caso fossem aumentados o número de corpos de prova, seria possível uma melhora significativa do desvio padrão e das médias utilizadas nas planilhas, porém não se aplicou no ensaio, pois segundo o procedimento da NBR 9176 [ABNT, 2003g], são necessários apenas três corpos de prova e caso fossem feitos novos testes aumentaria significativamente o valor do ensaio a ser cobrado pelo cliente sem justificativa plausível.

O gráfico da Figura 5.1 demonstra as curvas obtidas na máquina universal de ensaio onde são verificadas as curvas de medição de espessura e indentação. Os picos das curvas representam quando foi retirada a carga e o corpo de prova deu a resposta contrária de indentação na célula de carga.



Observação: Força aplicada para medição de espessura: 5N

**Figura 5.1 - Gráfico Força (N) X Deformação Específica (%) para indentação.**

Na Tabela 5.2 encontram-se os valores gerados pela máquina para o ensaio de pós fadiga. A Figura 5.2 mostra o gráfico Força (N) X Deformação Específica (%), para pós fadiga dos corpos de prova.

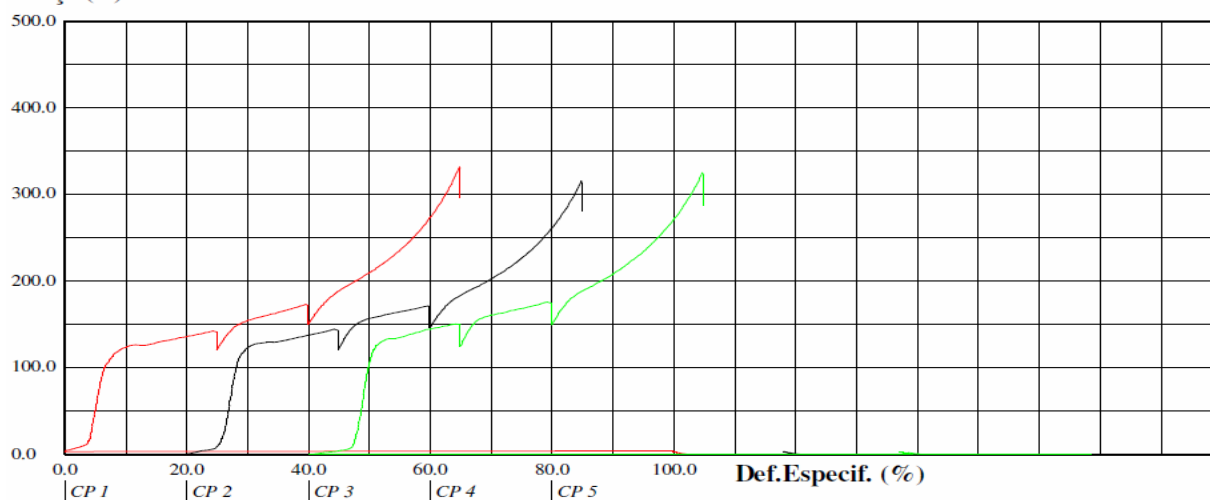
Tabela 5.2 - Resultados do ensaio de pós fadiga.

Corpo de prova	Perda de dureza absoluta a 25% (N)	Perda de dureza absoluta a 40% (N)	Perda de dureza absoluta a 65% (N)	Perda de dureza percentual a 25% (%)	Perda de dureza percentual a 40% (%)	Perda de dureza percentual a 65% (%)	Perda de Espessura Percentual (%)
CP1	24,55	36,32	60,94	16,88	19,46	17,04	0,10
CP2	21,26	35,48	74,15	14,89	19,46	20,86	2,00
CP3	21,27	24,29	59,34	14,56	18,60	17,10	2,87
Número de CPs	3	3	3	3	3	3	3
Média	22,36	35,36	64,81	15,44	19,17	18,33	1,654
Desvio Padrão	1,898	1,019	8,127	1,260	0,5005	2,189	1,418
Coef. Var. (%)	8,489	2,880	12,54	8,156	2,610	11,94	85,74
Mínimo	21,26	34,29	59,34	14,56	18,60	17,04	0,09606
Máximo	24,55	36,32	74,15	16,88	19,46	20,86	2,869

Com os resultados obtidos da Tabela 5.2 e fazendo um comparativo com a Tabela 2.2, chega-se aos seguintes resultados:

- A perda de espessura máxima em percentual deve ser de no máximo 4%. A média dos corpos de prova ficou em 1,654% ficando dentro do esperado mesmo observando individualmente, os mesmos ficaram dentro do especificado. A diferença maior ficou entre o corpo de prova número 1 e o número 3 fazendo com que o desvio padrão aumentasse. Nada que mude o aceite do ensaio, pois para efeitos de cálculos, utilizou-se a média dos corpos de prova.

Força (N)



Observação: Força aplicada para medição de espessura: 5N

Figura 5.2 - Gráfico Força (N) X Deformação Específica (%) para pós fadiga.

No anexo C encontram-se os relatórios gerados pela máquina de ensaio.

Na Tabela 5.3 e Tabela 5.4 estão determinadas às forças de indentação, fator de conforto, perda de espessura e perda de força de indentação conforme pede a norma NBR 9176 [ABNT, 2003g] e NBR 9177 [ABNT, 2003h]. O cálculo de perda de espessura utiliza a Equação 4.2 e a perda de força de indentação a Equação 4.3.

**Tabela 5.3 - 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

\*Para cada corpo de prova, utiliza-se a Equação 4.1.

**Tabela 5.4 - 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

## 5.2 - Planilhas de Ensaio de Indentação

Na Tabela 5.5, encontra-se a planilha da incerteza do ensaio de indentação para uma célula de carga de 500kgf.

**Tabela 5.5 - Incerteza do ensaio de indentação para célula de carga de 500kgf.**

INCERTEZA ENSAIO DE FADIGA - FORÇA DE INDENTAÇÃO - CÉLULA 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
<b>Incerteza padronizada combinada (N)</b>					<b>3,104</b>	
<b>Incerteza expandida (N)</b>			<b>k =</b>	2,13	<b>6,612</b>	19,83

Foram consideradas distribuições de probabilidade retangular por se tratarem de erros certificados de calibração de máquinas e normal por levar em conta desvios padrões relatados no relatório emitido pela máquina universal de ensaios.

As fontes de incerteza no ensaio de indentação foram consideradas conforme o diagrama *Ishikawa* apresentado na Figura 5.3.

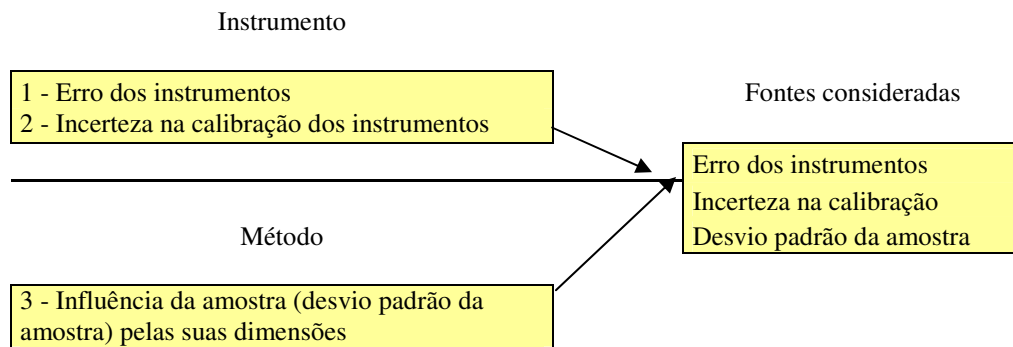


Figura 5.3 - Ishikawa para fontes de incerteza nos ensaios de indentação.

### 5.3 - Planilhas de Perda de Dureza para Compressão

Na Tabela 5.6, 5.7 e 5.8, encontram-se as planilhas da incerteza de perda de dureza para 25, 40 e 65% de compressão respectivamente.

Tabela 5.6 - Incerteza de perda de dureza para compressão de 25%.

INCERTEZA DA PERDA DE DUREZA 25 (%)						
FONTE DE INCERTEZA	Valor	Distribuição de Probabilidade	Divisor	Coefficiente de Sensibilidade	Incerteza Padronizada (%)	Graus de Liberdade
Desvio Padrão (%)	1,260	Retangular	1,73	1	0,727	2
Incerteza da medição da força (N)	6,612	Retangular	1,73	0,012	3,817	Infinitos
<b>Incerteza padronizada combinada (%)</b>					<b>0,839</b>	
<b>Incerteza expandida (%)</b>			$k =$	3,31	<b>2,775</b>	2,27

As fontes de incerteza na perda de dureza para compressão a 25, 40 e 65% foram consideradas conforme o diagrama *Ishikawa* apresentado na Figura 5.4.

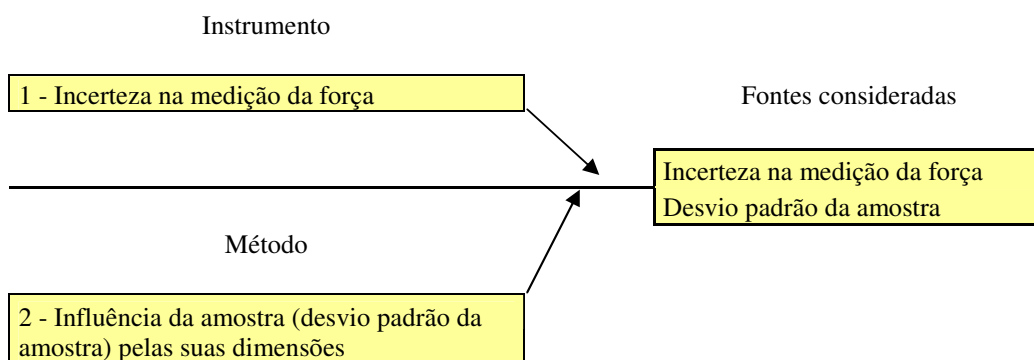


Figura 5.4 - Ishikawa para fontes de incerteza na perda de dureza por compressão.

**Tabela 5.7 - Incerteza de perda de dureza para compressão de 40%.**

INCERTEZA DA PERDA DE DUREZA 40 (%)						
FONTE DE INCERTEZA	Valor	Distribuição de Probabilidade	Divisor	Coefficiente de Sensibilidade	Incerteza Padronizada (%)	Graus de Liberdade
Desvio Padrão (%)	0,5005	Retangular	1,73	1	0,289	2
Incerteza da medição da força (N)	6,612	Retangular	1,73	0,0124	3,817	Infinitos
<b>Incerteza padronizada combinada (%)</b>					<b>0,514</b>	
<b>Incerteza expandida (%)</b>			$k =$	2,87	<b>1,475</b>	3,56

**Tabela 5.8 - Incerteza de perda de dureza para compressão de 65%.**

INCERTEZA DA PERDA DE DUREZA 65 (%)						
FONTE DE INCERTEZA	Valor	Distribuição de Probabilidade	Divisor	Coefficiente de Sensibilidade	Incerteza Padronizada (%)	Graus de Liberdade
Desvio Padrão (%)	2,189	Retangular	1,73	1	1,264	2
Incerteza da medição da força (N)	6,612	Retangular	1,73	0,012	3,817	Infinitos
<b>Incerteza padronizada combinada (%)</b>					<b>1,331</b>	
<b>Incerteza expandida (%)</b>			$k =$	4,53	<b>6,026</b>	2,11

OBS: Todos os cálculos para validação das planilhas encontram-se no ANEXO C.

O valor da incerteza expandida obtido na Tabela 5.5 de 6,612N, ficou dentro do esperado de até 10N, dado este obtido do acordo entre os laboratórios que prestam tal serviço.

Para as incertezas de perda de dureza por compressão a 25, 40 e 65% onde obteve-se respectivamente 2,775%, 1,475% e 6,026% como resultado da incerteza expandida, também ficou dentro do esperado de até 8%, dado este, também obtido do acordo entre os laboratórios prestadores de tal serviço.

## 6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e análises realizadas, conclui-se que:

Quanto ao erro dos instrumentos:

- O valor do erro dos instrumentos está intimamente ligado à incerteza total, quanto menor este valor menor será a incerteza final.
- O erro da máquina universal e da célula de carga também é considerável, porém como os mesmos passam por calibração periódica, fica dentro do exigido pela norma NBR 17025 [ABNT, 2005].

Quanto à curva Força X Deformação Específica para Indentação e Pós fadiga:

- Mais uma vez, neste caso, observa-se que o número de corpos de prova influencia diretamente na construção do gráfico.
- A variação do desvio padrão em função da força de indentação e pós fadiga aplicada não se deve à variação da incerteza da tensão aplicada, mas sim ao comportamento do próprio material e da quantidade de corpos de prova.

Quanto às estimativas de incerteza:

- A incerteza devido ao número de corpos de prova e do desvio padrão da amostra são as fontes mais importantes na avaliação da incerteza.

## **7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com base nos resultados obtidos podem-se sugerir os seguintes futuros trabalhos:

- Estudar o efeito da incerteza da determinação da resistência ao rasgamento.
- Estudar o efeito da incerteza da determinação da densidade.
- Estudar o efeito da incerteza da determinação da deformação permanente à compressão.
- Estudar o efeito da incerteza da determinação das características de queima.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR 8797: **Espuma Flexível de Poliuretano – Determinação da Deformação Permanente à Compressão**, Rio de Janeiro, 2003e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR 9176: **Espuma Flexível de Poliuretano – Determinação da Força de Indentação**, Rio de Janeiro, 2003g.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR 9177: **Espuma Flexível de Poliuretano – Determinação da Fadiga Dinâmica**, Rio de Janeiro, 2003h.

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.

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.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1012: **Standard Practice for Verification of Specimen Alignment Under Tensile Loading**, Pennsylvania, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1942: **Standard Guide for Evaluation Data Acquisition Systems Used in Cyclic Fatigue and Fracture Mechanics Testing**, Pennsylvania, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E467: **Standard Practice for Verification of Constant Amplitude Dynamic Forces in an Axial Fatigue Testing System**, Pennsylvania, 2008.

BENGTSSON, A. **Uncertainty in Fatigue Life Prediction of Structures to Gaussian Loads, Probabilistic Engineering Mechanics** 24, p.224-235, Elsevier, 2009.

BRANCO, C. A. G. M., **Mecânica dos Materiais**, 2<sup>a</sup> ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1985.

BRITISH STANDARD, BS 7935-1: **Constant Amplitude Dynamic Force Calibration – Part 1: Calibration and verification of non-resonant uniaxial dynamic testing system – Method**, Londres, 2004.

BUCAR T. **A Neural Network Approach to Describing the Scatter of S-N Curves, International Journal of Fatigue** 28, p.311-323, Elsevier, 2006.

CALLISTER, W. **Materials Science and Engineering**. 7 Ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2007.

DIETER, G. **Mechanical Metallurgy**, 3 Ed. London: McGraw-Hill, 1988.

EUROPEAN CO-OPERATION FOR ACREDITATION, EA-4/16: **Guidelines on the Expression of Uncertainty in Quantitative Testing**, 2003.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). JCGM 100: **Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)**, 2008a.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). JCGM 200: **International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)** 2008b.

JORNADA, D. **Implantação de um Guia Orientativo de Incerteza de Medição para Avaliadores de laboratório da Rede Metrológica RS**, Dissertação PPGE: UFRGS, 2009.

KARADENIZ H. **Uncertainty Modeling in the Fatigue Realiability Calculation of Offshore Structures**, Realiability Engineering & System Safety 74, p.323-335, Elsevier, 2001.

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.

PIERCE S. **Uncertainty Analisis of a Neural Network Used for Fatigue Lifetime Prediction**, Mechanical System and Signal Processing 22, p.1395-1411, Elsevier, 2008.

PIZZOLATO M. **Mapeamento da Estrutura Global que Fornece Confiança às Medições: Análise da Inserção Brasileira**, Tese PPGE: UFRGS, 2006.

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**, 2000c.

SVENSSON T. **Prediction Uncertainties at Variable Amplitude Fatigue**, International Journal of Fatigue 19, p.295-302, Elsevier, 1997.

STEPHENS R. et al. **Metal Fatigue in Engineering**, 2 Ed, New York: Wiley Interscience, 2001.

VILAR W. **Química e Tecnologia de Poliuretanos**, 1 Ed, São Paulo, Pronor, 1993.

VILAR W. **Química e Tecnologia de Poliuretanos**, 2 Ed, Rio de Janeiro, Vilar Consultoria, 1998.

VILAR W. **Química e Tecnologia de Poliuretanos**, 3 Ed, Rio de Janeiro, Vilar Consultoria, 2004.

## BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), ANEXO DA PORTARIA INMETRO N° 079/2011: **Requisitos de Avaliação da Conformidade (RAC) para Colchões e Colchonetes de Espuma Flexível de Poliuretano**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR 8515: **Espuma Flexível de Poliuretano – Determinação da Resistência à Tração**, Rio de Janeiro, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR 8516: **Espuma Flexível de Poliuretano – Determinação da Resistência ao Rasgamento**, Rio de Janeiro, 2003b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR 8537: **Espuma Flexível de Poliuretano – Determinação da Densidade**, Rio de Janeiro, 2003c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR 8619: **Espuma Flexível de Poliuretano – Determinação da Resiliência**, Rio de Janeiro, 2003d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR 8910: **Espuma Flexível de Poliuretano – Determinação da Resistência à Compressão**, Rio de Janeiro, 2003f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR 9178: **Espuma Flexível de Poliuretano – Determinação das Características de Queima**, Rio de Janeiro, 2003i.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR 13578: **Colchão e Colchonete de Espuma Flexível de Poliuretano – Dimensões e Tolerâncias - Padronização**, 3. Ed, Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR 13579-2: **Colchão e Colchonete de Espuma Flexível de Poliuretano e Bases – Parte 1: Revestimento**, 3. Ed, Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR 14961: **Espuma Flexível de Poliuretano: Determinação do Teor de Cinzas**, 2. Ed, Rio de Janeiro, 2007.

FROST, W. Q., et. al. **Fatigue**, Oxford, Clarendon Press, 1974.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO), SOCIEDADE BRASILEIRA DE METROLOGIA (SBM) E ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), EA-4/02: **Expressão da Incerteza de Medição na Calibração**, 1 Ed. Rio de Janeiro, 1999.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO), SOCIEDADE BRASILEIRA DE METROLOGIA (SBM) E

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), EA-4/02: **Expressão da Incerteza de Medição na Calibração - Exemplos**, 1 Ed. Rio de Janeiro, 1999.

SHIGLEY J.E., MISCHKE C.R., **Mechanical Engineering Design**, 8 Ed. Estados Unidos: Mc Graw Hill, 2001.

STANDARDS MEASUREMENT & TEST MEASUREMENTS (SM&T), UNCERTE CoP 01 – Manual of Codes of Practice for Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Material n° 01 – **The Determination of Uncertainties in High Cycle Fatigue Testing (for plani and notch-sensitive specimens)**, 2000a.

STANDARDS MEASUREMENT & TEST MEASUREMENTS (SM&T), UNCERTE CoP 02 – Manual of Codes of Practice for Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Material n° 02 – **The Determination of Uncertainties in Fatigue Crack Growth Measurement**, 2000b.

<http://www.poliuretanos.com.br/Cap3/35propriedades.htm> Acessado em: 28/09/2011 - 09:40h

<http://www.poliuretanos.com.br/Cap8/813durabilidade.htm> Acessado em: 28/09/2011 - 10:07h

## ANEXO A – FORMULÁRIO DE ENSAIOS

### FORMULÁRIO DE ENSAIOS – REQUISITOS DE COLCHÃO E COLCHONETE DE ESPUMA FLEXÍVEL DE POLIURETANO E BASES

RECEBIMENTO N°: \_\_\_\_ / \_\_\_\_

Amostra(s):	Página 1 de 1
Data de Início:	Data de Término:
Executor(s):	Conferente:

ITEM DA NORMA	REQUISITO/AVALIAÇÃO									
<b>Propriedades das espumas</b>	<b>Espuma convencional:</b> utilizada na fabricação da lâmina central do colchão/colchonete:									
	<b>Propriedades</b>	<b>D18</b>	<b>D20</b>	<b>D23</b>	<b>D26</b>	<b>D28</b>	<b>D33</b>	<b>D40</b>	<b>D45</b>	<b>RESULTADO/AVALIAÇÃO</b>
	Força de indentação (F.I.) a 40%, N(min)	80	95	110	130	145	165	185	200	
	Fator de conforto (F.C.), (min)	2,0		2,1		2,2				
	Fadiga dinâmica – perda de espessura, % (máx.)	8	6	5			4			
	Perda de F.I. a 40% , % (máx.)	32	27				23			
	Deformação permanente a compressão de 90%, % (máx)	12	10			8				
	Resiliência, % (min)	30		35				40		
	Teor de cinzas, % (máx)	1								
<p><b>Obs.: D18 é somente utilizada para colchões de uso infantil (berço).</b>  *É admitida uma tolerância de <math>\pm 10</math> % na densidade real (Dr) verificada em ensaios, com base na densidade nominal declarada na etiqueta pelo fabricante.</p>										

**Espuma hipermacia:** utilizada em colchões compostos, na camada de toque (zona de conforto).

Propriedades	D20	D24	D29	D35	RESULTADO/ AVALIAÇÃO*
Resiliência, % (min)	30				
D.P.C. a 50%, % (máx)	15				
F.I. a 40%, N(máx)	35	35	50	150	
Teor de cinzas, % (máx)	1				

\*É admitida uma tolerância de  $\pm 10\%$  na densidade real ( $D_r$ ) verificada em ensaios, com base na densidade nominal declarada na etiqueta pelo fabricante.







## ANEXO C – MEMORIAL DE CÁLCULOS

### *Cálculo da Incerteza da Força de Indentação:*

- Como fonte de incerteza da divisão da escala da máquina universal de ensaios tem-se o valor de 0,05N conforme certificado de calibração da mesma. Foi utilizada para o cálculo uma distribuição de probabilidade retangular, que equivale a um divisor de  $\sqrt{3}$ .
- O corpo de prova tem medidas de  $(380\pm 10)\times(380\pm 10)\times(50\pm 2)$ mm. Para desvio padrão da amostra foi utilizado o divisor *t-student* igual a 4,53, conforme Tabela 2.4 para um total de 3 corpos de prova, conforme a norma NBR 9176 [ABNT, 2003g] exige.
- A incerteza na calibração da célula de carga é de 1,9N conforme certificado de calibração da mesma. Aqui também foi utilizada uma distribuição de probabilidade retangular.
- O maior erro da escala na compressão é de 5N conforme certificado onde também foi utilizada uma distribuição de probabilidade retangular.
- Os coeficientes de sensibilidade foram utilizados de 1 (um), pois as medições são diretas em N (Newton).

Cálculo das incertezas padronizadas (Equação 2.7):

$$u_p = \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,029$$

$$u_p = \frac{1,9}{\sqrt{3}} = 1,097$$

$$u_p = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2,887$$

$$u_p = \frac{1,419}{4,53} = 0,313$$

Incerteza combinada e graus de liberdade efetivos (Equações 2.4, 2.5 e 2.6):

$$u_c = \sqrt{0,029^2 \cdot 1 + 1,097^2 \cdot 1 + 2,887^2 \cdot 1 + 0,313^2 \cdot 1} = 3,104N$$

$$v_{eff} = \frac{3,104}{\frac{0,029}{\infty} + \frac{1,097}{\infty} + \frac{2,887}{\infty} + \frac{0,313}{2}} = 19,83$$

Para os graus de liberdade acima e nível de confiança de 95% tem-se  $k=2,13$  (Tabela 2.4) e assim a incerteza expandida será:

$$U = 3,104 \cdot 2,13 = 6,612N$$

**Cálculo da Incerteza da Perda de Dureza a Compressão de 25%:**

- Para os cálculos de perda de espessura percentual, foram utilizados os valores de desvio padrão gerados pela máquina universal. No caso da compressão de 25%, utilizou-se o valor de 1,26.
- Para incerteza da medição da força em Newton (N), utilizou-se o valor adquirido da incerteza expandida de 6,612N, Tabela 5.5.
- Para o desvio padrão e para a incerteza de medição da força, foram utilizados fatores de distribuição de probabilidade retangular com divisor de  $\sqrt{3}$ .
- O coeficiente de sensibilidade para o desvio padrão foi utilizado de 1 (um), pois a medição é direta.

Cálculo do coeficiente de sensibilidade para a incerteza de medição da força (Equação 3.6):

$$c_s = \frac{145,4}{(145,4 - 24,55).100} = 0,012\%$$

Cálculo das incertezas padronizadas (Equação 2.7):

$$u_p = \frac{1,26}{\sqrt{3}} = 0,727$$

$$u_p = \frac{6,612}{\sqrt{3}} = 3,817$$

Incerteza combinada e graus de liberdade efetivos (Equações 2.4, 2.5 e 2.6):

$$u_c = \sqrt{0,727^2 \cdot 1 + 3,817^2 \cdot 0,012} = 0,839\%$$

$$v_{eff} = \frac{0,839}{\frac{0,727}{2} + \frac{3,817}{\infty}} = 2,27$$

Para os graus de liberdade acima e nível de confiança de 95% tem-se  $k=3,31$  (Tabela 2.4) e assim a incerteza expandida será:

$$U = 0,839 \cdot 3,31 = 2,775\%$$

**Cálculo da Incerteza da Perda de Dureza a Compressão de 40%:**

- Para os cálculos de perda de espessura percentual, foram utilizados os valores de desvio padrão gerados pela máquina universal. No caso da compressão de 40%, utilizou-se o valor de 0,5005.
- Para incerteza da medição da força em Newton (N), utilizou-se o valor adquirido da incerteza expandida de 6,612N, Tabela 5.5.
- Para o desvio padrão e para a incerteza de medição da força, foram utilizados fatores de distribuição de probabilidade retangular com divisor de  $\sqrt{3}$ .

- O coeficiente de sensibilidade para o desvio padrão foi utilizado de 1 (um), pois a medição é direta.

Cálculo do coeficiente de sensibilidade para a incerteza de medição da força (Equação 3.6):

$$c_s = \frac{186,6}{(186,6 - 36,32).100} = 0,0124\%$$

Cálculo das incertezas padronizadas (Equação 2.7):

$$u_p = \frac{0,5005}{\sqrt{3}} = 0,289$$

$$u_p = \frac{6,612}{\sqrt{3}} = 3,817$$

Incerteza combinada e graus de liberdade efetivos (Equações 2.4, 2.5 e 2.6):

$$u_c = \sqrt{0,289^2 \cdot 1 + 3,817^2 \cdot 0,0124} = 0,514\%$$

$$v_{eff} = \frac{0,514}{\frac{0,289}{2} + \frac{3,817}{\infty}} = 3,56$$

Para os graus de liberdade acima e nível de confiança de 95% tem-se  $k=2,87$  (Tabela 2.4) e assim a incerteza expandida será:

$$U = 0,514 \cdot 2,87 = 1,475\%$$

#### ***Cálculo da Incerteza da Perda de Dureza a Compressão de 65%:***

- Para os cálculos de perda de espessura percentual, foram utilizados os valores de desvio padrão gerados pela máquina universal. No caso da compressão de 65%, utilizou-se o valor de 2,189.
- Para incerteza da medição da força em Newton (N), utilizou-se o valor adquirido da incerteza expandida de 6,612N, Tabela 5.5.
- Para o desvio padrão e para a incerteza de medição da força, foram utilizados fatores de distribuição de probabilidade retangular com divisor de  $\sqrt{3}$ .
- O coeficiente de sensibilidade para o desvio padrão foi utilizado de 1 (um), pois a medição é direta.

Cálculo do coeficiente de sensibilidade para a incerteza de medição da força (Equação 3.6):

$$c_s = \frac{357,7}{(357,7 - 60,94).100} = 0,012\%$$

Cálculo das incertezas padronizadas (Equação 2.7):

$$u_p = \frac{2,189}{\sqrt{3}} = 1,264$$

$$u_p = \frac{6,612}{\sqrt{3}} = 3,817$$

Incerteza combinada e graus de liberdade efetivos (Equações 2.4, 2.5 e 2.6):

$$u_c = \sqrt{1,264^2 \cdot 1 + 3,817^2 \cdot 0,012} = 1,331\%$$

$$v_{eff} = \frac{1,331}{\frac{1,264}{2} + \frac{3,817}{\infty}} = 2,11$$

Para os graus de liberdade acima e nível de confiança de 95% tem-se  $k=4,53$  (Tabela 2.4) e assim a incerteza expandida será:

$$U = 1,331 \cdot 4,53 = 6,026\%$$