



## **OBTENÇÃO DA DEFORMAÇÃO NO COMPRIMENTO ÚTIL DE CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO ENSAIO DE TRAÇÃO UTILIZANDO ANÁLISES POR ELEMENTOS FINITOS**

**Gabriel Scomparin Silva**

**Ernesto Massaroppi Jr.**

[gabriel.scomparin.silva@gmail.com](mailto:gabriel.scomparin.silva@gmail.com)

[massarop@sc.usp.br](mailto:massarop@sc.usp.br)

Centro de Tecnologia de Refrigeração - Whirlpool S.A. Rua Dona Francisca, 7200 - Distrito Industrial, CEP 89219-900, Joinville, Santa Catarina, Brasil.

Laboratório de Mecânica Aplicada e Computacional, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP). Av. Trabalhador São-carlense, 400 - Centro, CEP 13.566-590, São Carlos, São Paulo, Brasil.

**Resumo.** *O projeto mecânico e a simulação estrutural de conjuntos e componentes necessitam de propriedades mecânicas dos materiais para serem executadas. Estas propriedades devem ser o mais realistas possível, a fim de garantir a precisão dos resultados. O ensaio de tração é um dos mais utilizados para a obtenção dessas propriedades, sendo que neste ensaio a precisão da deformação no comprimento útil do corpo de prova em função da tensão é garantida através do uso de um extensômetro no comprimento útil. Ocorre que por diversos motivos nem sempre é possível o uso de extensômetros nos ensaios, sendo obtido apenas o deslocamento entre as garras da máquina de ensaio, o que confere imprecisões aos resultados. Portanto, o presente estudo visa obter, através de análises por elementos finitos, a deformação no comprimento útil do corpo de prova e avaliar diferentes formas de modelagem computacional. Os resultados de deformação no comprimento útil dos corpos de provas das diferentes configurações de modelagem são comparados a fim de se obter os parâmetros que tem efeito nos resultados de deformação utilizando a técnica de planejamentos de experimentos. Os ensaios foram realizados segundo a norma ASTM D-638.*

**Palavras-Chave:** *Ensaio de tração, análise por elementos finitos, deformação no comprimento útil, modelagem computacional, planejamento de experimentos.*

## 1. INTRODUÇÃO

O projeto de máquinas ou estruturas requer a determinação dos esforços externos e, posteriormente, internos atuando em seus elementos. A geometria dos componentes e o comportamento mecânico dos materiais que os compõe afetam diretamente o comportamento do conjunto estrutural. Desta forma, é de extrema importância a determinação das propriedades e do comportamento do material de forma precisa (Hibbeler, 2010).

A borracha, o couro e a madeira são exemplos de polímeros naturais que vem sendo utilizados por muitos séculos. Após a Segunda Guerra Mundial, os polímeros sintéticos revolucionaram o campo dos materiais, podendo ser produzidos a baixo custo e com propriedades manipuláveis. Graças a essas características, tornou-se possível a substituição de componentes metálicos e de polímeros naturais por componentes a base de polímeros sintéticos, que possuem propriedades mecânicas equivalentes e custo inferior aos materiais originais (Callister, 2002).

O polipropileno (PP) é o segundo polímero mais utilizado no mundo, dispondo de uma grande versatilidade de aplicações (Braskem, 2010). Entre as características desse polímero estão: excelente resistência química, baixo custo e propriedades mecânicas moderadas (Mano, 1991). Sendo algumas das aplicações: carcaças de eletrodomésticos, material hospitalar, recipientes para armazenamento de alimentos e uso em fornos de micro-ondas, para-choques, etc. (Mano & Mendes, 1999).

Métodos experimentais são utilizados para determinar as características inerentes ao material, entre elas a sua resistência mecânica (Hibbeler, 2010). Os valores das propriedades mecânicas são obtidos através da realização de ensaios mecânicos padronizados, sendo que o ensaio de tração é considerado como um dos mais importantes (Canevarolo, 2002). Os principais resultados, ou parâmetros, obtidos através desse ensaio e que quantificam a resistência mecânica dos materiais são: Módulo de Young ou de Elasticidade ( $E$ ), Tensão de Escoamento ( $\sigma_e$ ) e Deformação no Escoamento ( $\epsilon_e$ ) (Canevarolo, 2003).

Na indústria moderna, o desenvolvimento de produtos e soluções deve ser executado de forma rápida e econômica, garantindo segurança e qualidade. Nas atividades diárias de projeto a resolução de problemas estruturais complexos é rotineira, tornando-se impraticável o uso de técnicas analíticas clássicas. Como alternativa, a utilização de análises pelo método dos elementos finitos (MEF) computacional é a técnica mais apropriada para análises estruturais (Filho, 2007).

Adicionalmente, é comum a execução de experimentos físicos ou virtuais (simulações) alterando-se apenas um parâmetro (ou fator) por vez, não sendo possível então identificar interações entre os fatores que possam afetar a resposta. Existem técnicas que buscam permitir maior eficiência na execução de experimentos, entre elas está àquela conhecida por experimento fatorial. Esta técnica de planejamento de experimentos permite variar diversos parâmetros ao mesmo tempo, ao invés de apenas um por vez, sendo possível observar quais variáveis ou interação entre elas são responsáveis pela mudança na resposta (Montgomery, 2013).

Em uma análise estatística onde se busca verificar a significância de estatística da diferença entre grupos, é comum observar os seguintes parâmetros: “PValue”, “LogWorth” e “Estimate” (SAS, 2015).

A maneira mais comum de se abordar este tipo de problema é utilizando um teste de hipótese, em que é definida a hipótese nula e a hipótese alternativa. A hipótese nula prevê que não existe nenhuma diferença estatística entre os grupos e a hipótese alternativa prevê que existe tal diferença. É selecionado um teste estatístico para se obter a medida numérica padronizada da diferença entre grupos. O valor do teste para a hipótese nula deve ser pequeno para que haja diferença estatística entre os grupos, onde o PValue é definido como a probabilidade de se encontrar valor maior ou igual àquele do teste estatístico (Ferreira & Patino, 2015).

O software JMP 12<sup>®</sup> cita que valores de “LogWorth” que excedam 2 e PValue abaixo de 0.05 indicam que o parâmetro (ou fator) em estudo é significativo estatisticamente, onde “LogWorth” é definido por  $-\log(\text{PValue})$ . Adicionalmente, os valores de “Estimates” são os coeficientes da equação que descrevem o comportamento do modelo em função da saída desejada, ou seja, que correlaciona os fatores em estudo ao efeito medido. Estes coeficientes são utilizados para mostrar o efeito de cada parâmetro do estudo (SAS, 2015).

## **2. METODOLOGIA**

No contexto descrito acima, realizaram-se ensaios de tração para o material polipropileno segundo norma ASTM D638 (ASTM, 2003) e avaliaram-se os resultados. Obteve-se, assim, o Módulo de Elasticidade médio, calculado a partir do deslocamento entre as garras, para os cinco corpos de prova (CPs) ensaiados.

Construíram-se os modelos de elementos finitos correspondentes aos corpos de prova dos testes, de forma a se obter as deformações no comprimento útil dos corpos de prova, bem como analisar quanto cada parâmetro de modelagem influencia nos resultados das simulações.

### **2.1 Moldagem dos corpos de prova**

Os corpos de prova foram moldados com uma classe (“grade”) de polipropileno fabricado pela Braskem<sup>®</sup> e fornecidos pela Whirlpool S.A.<sup>®</sup>, sendo adicionada certa quantidade de concentrado de pigmento branco ao polímero. Os corpos de prova foram injetados de acordo com o Tipo 1 da norma ASTM D638 (ASTM, 2003). Foi utilizada uma injetora da marca Battenfeld<sup>®</sup>, modelo Plus 35. Por questão de sigilo industrial não serão detalhadas as informações de classe do polímero e nem a quantidade de concentrado de pigmento.

### **2.2 Ensaio de tração**

Foi utilizada uma máquina universal MTS<sup>®</sup> modelo BIONIX, equipada com célula de carga de 15 kN e garras hidráulicas. Os corpos de prova foram posicionados nas garras da máquina e fixados com uma pressão hidráulica de 2 MPa. Os ensaios foram realizados sequencialmente e sem interrupção, com a velocidade de deslocamento entre as garras de 5 mm/min.

## 2.3 Experimento fatorial

Optou-se por executar um experimento fatorial completo com 3 fatores, resultando em 8 diferentes modelos de elementos finitos. Os fatores em questão são: tipo de elemento, refinamento de malha e distância entre as garras. Os dois tipos de elementos considerados foram: o hexaédrico de segunda ordem "Solid 186" e o tetraédrico de segunda ordem "Solid 187" (ANSYS, 2015). Para a malha grosseira foram considerados 4 elementos ao longo da espessura total do corpo de prova, enquanto que para a refinada, foram considerados 32 elementos ao longo dessa espessura. A menor distância entre as garras foi de 113 mm e a maior de 117 mm. As configurações geradas são mostradas na fig.1.

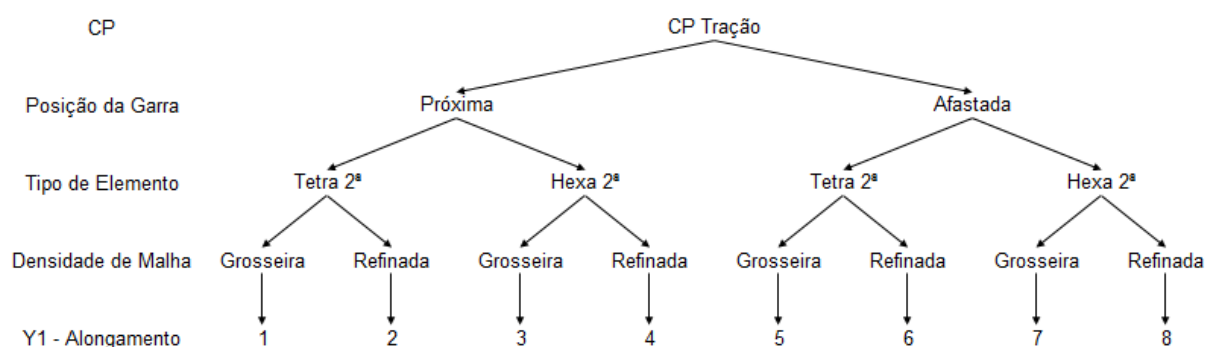


Figura 1. Configuração Experimental

## 2.4 Simulação por elementos finitos

A curva tensão em função da deformação foi analisada e selecionado o ponto de tensão de 8 MPa, visivelmente dentro do regime linear, para a determinação do módulo de elasticidade corrigido.

O modelo de elementos finitos para a geometria do corpo de prova foi construído no software Hypermesh 13®, considerando-se a simetria com referência aos três planos ortogonais do sistema de coordenadas, representando, conseqüentemente, apenas um oitavo do corpo de prova.

Foram geradas as malhas grosseiras em elementos tetraédricos e hexaédricos e, posteriormente, refinadas. O mesmo procedimento foi repetido para geração dos modelos com as garras próximas e afastadas.

Foram aplicadas condições de simetria ao modelo e deslocamento axial (eixo x) de 0.5941 mm, o deslocamento foi aplicado na região de contato entre a garra da máquina de tração e o corpo de prova. Foi aplicada a mesma magnitude de deslocamento para todas as configurações estudadas.

A Fig. 2 ilustra as regiões de condições de simetria (em verde) e aplicação de deslocamento (em amarelo).

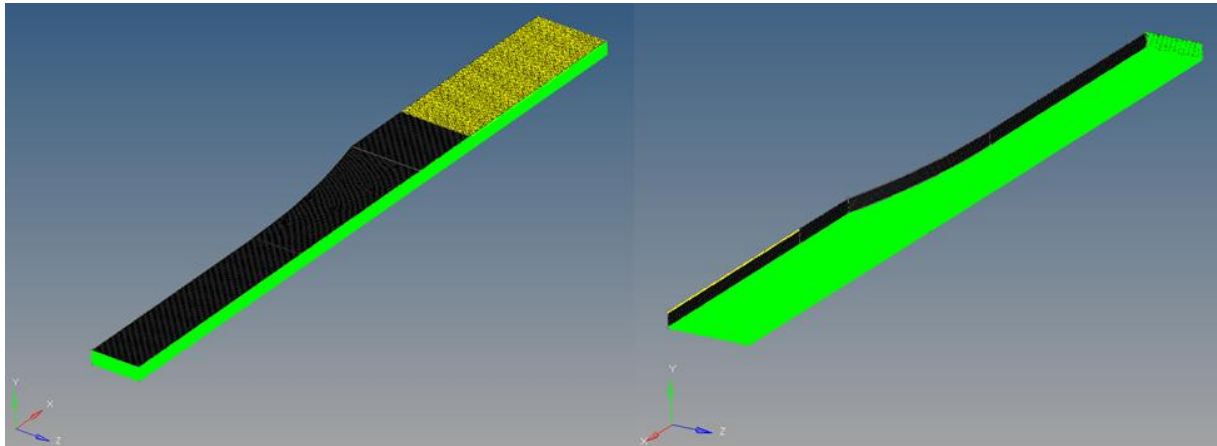


Figura 2. Condições de contorno aplicadas ao modelo do corpo de provas

## 2.5 Análise estatística

Fez-se uso do software JMP 12® onde se realizou a análise estatística dos resultados do experimento virtual. Avaliou-se a significância estatística dos resultados obtidos para os parâmetros em estudo através da observação das magnitudes de “LogWorth” e PValue.

Adicionalmente, avaliou-se o efeito dos parâmetros em estudo através da magnitude do coeficiente “Estimates”.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente foram analisados os deslocamentos obtidos em cada uma das análises, com a finalidade de certificar-se que os modelos de elementos finitos foram criados corretamente. Todos os modelos apresentaram resultados condizentes com o esperado, ou seja, deslocamento nulo na direção axial (direção x do modelo) na região da condição de simetria e deslocamento axial máximo de 0.5941 mm na região da garra (onde foram aplicados os deslocamentos). Os resultados para todos os modelos foram similares ao da configuração 8, mostrado na Fig. 3.

As deformações para todos os modelos são mostradas na Fig. 4, onde os índices numéricos em cada quadro indicam a qual configuração pertence a imagem. Nota-se que para os modelos das configurações de 1 a 4 o perfil de deformações apresenta ligeiras diferenças entre si, o mesmo acontece quando se observa as configurações de 5 a 8. Contudo, existe uma diferença apreciável entre os perfis de deformações entre as configurações de 1 a 4 e de 5 a 8.

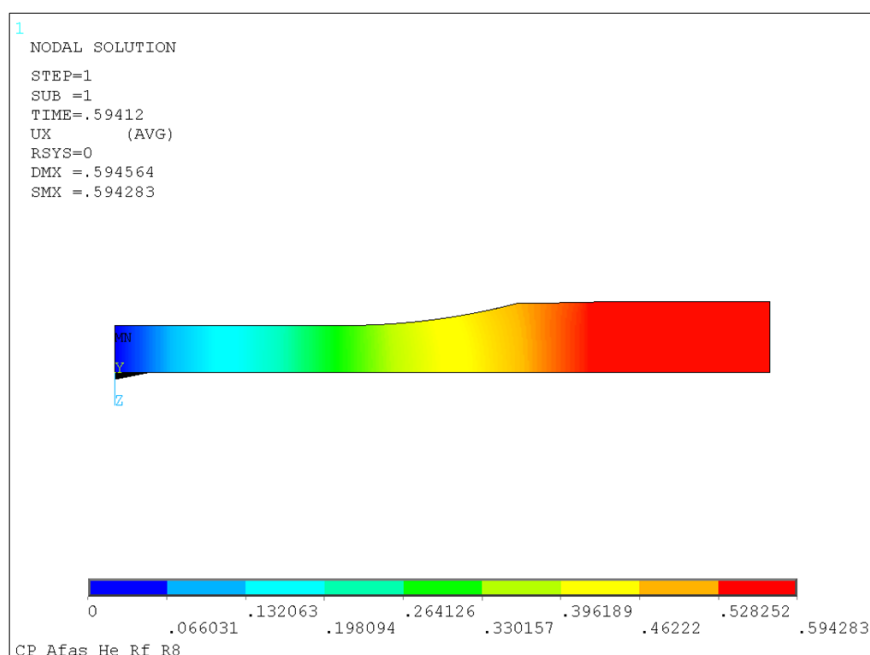


Figura 3. Deslocamentos axiais [mm] (direção x) da configuração 8

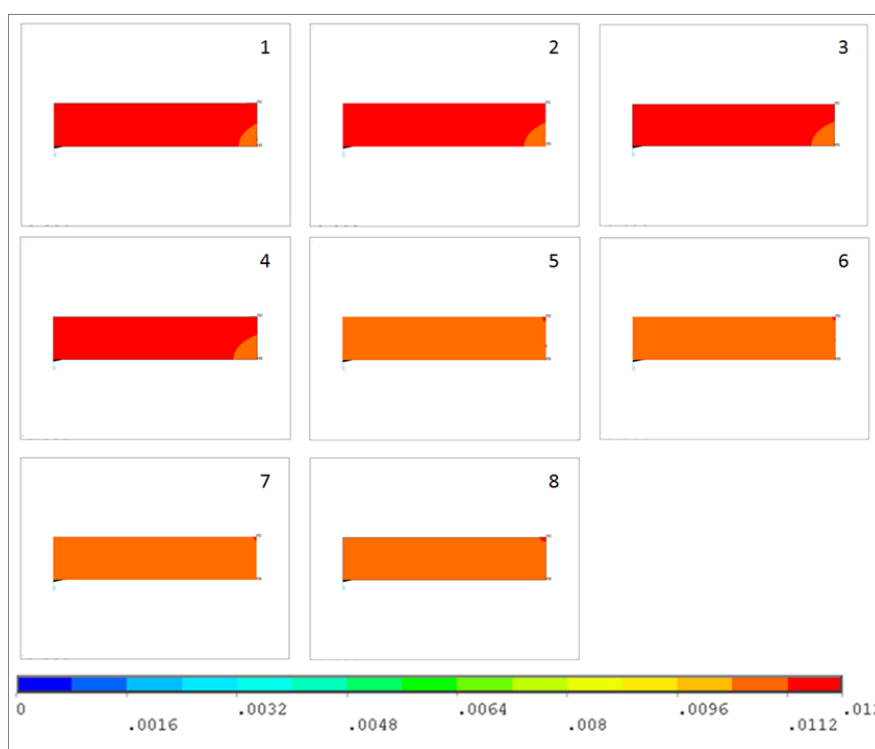


Figura 4. Deformações [-] nos comprimentos úteis dos corpos de prova das configurações de 1 a 8.

Quando se faz uma análise prática dos resultados, ordenando as configurações de modelagem em ordem crescente de deformação, é possível notar que alguns parâmetros também se ordenam, como pode ser visualizado na Tabela 1. Os padrões mostrados em

posição de garra e densidade de malha fornecem indícios de que estes parâmetros são estatisticamente significativos e possuem efeito no valor da deformação no comprimento útil, sendo a posição de garra o parâmetro preponderante.

Tabela 1. Deformação no comprimento útil ordenada de forma crescente.

| Configuração | Posição da Garra | Densidade de Malha | Tipo de Elemento     | Alongamento no Comprimento Útil [mm] | Deformação no Comprimento Útil [%] |
|--------------|------------------|--------------------|----------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 8            | Afastada         | Refinada           | Hexa 2 <sup>a</sup>  | 0,313137                             | 1,098726                           |
| 6            | Afastada         | Refinada           | Tetra 2 <sup>a</sup> | 0,313153                             | 1,098782                           |
| 5            | Afastada         | Grosseira          | Tetra 2 <sup>a</sup> | 0,313565                             | 1,100228                           |
| 7            | Afastada         | Grosseira          | Hexa 2 <sup>a</sup>  | 0,313591                             | 1,100319                           |
| 2            | Próxima          | Refinada           | Tetra 2 <sup>a</sup> | 0,321368                             | 1,127607                           |
| 4            | Próxima          | Refinada           | Hexa 2 <sup>a</sup>  | 0,321374                             | 1,127628                           |
| 3            | Próxima          | Grosseira          | Hexa 2 <sup>a</sup>  | 0,321833                             | 1,129239                           |
| 1            | Próxima          | Grosseira          | Tetra 2 <sup>a</sup> | 0,321880                             | 1,129404                           |

A Fig. 5 mostra uma análise gráfica dos valores de deformação obtidos para as diversas configurações de modelagem. Na Fig. 5A a linha representa o valor médio das deformações para o grupo posição da garra. Nota-se uma grande diferença das médias para garra afastada e garra próxima. Na Fig. 5B a linha representa o valor médio das deformações para o grupo densidade de malha, nota-se que existe uma diferença entre as médias de deformações para malha grosseira e refinada, apesar de pouco expressiva. Esta análise reforça os indícios das análises anteriores. Adicionalmente, é possível notar que praticamente não existe diferença entre os valores de deformação obtidos para os dois tipos de elementos dentro de um mesmo nível de refinamento de malha e posição de garra.

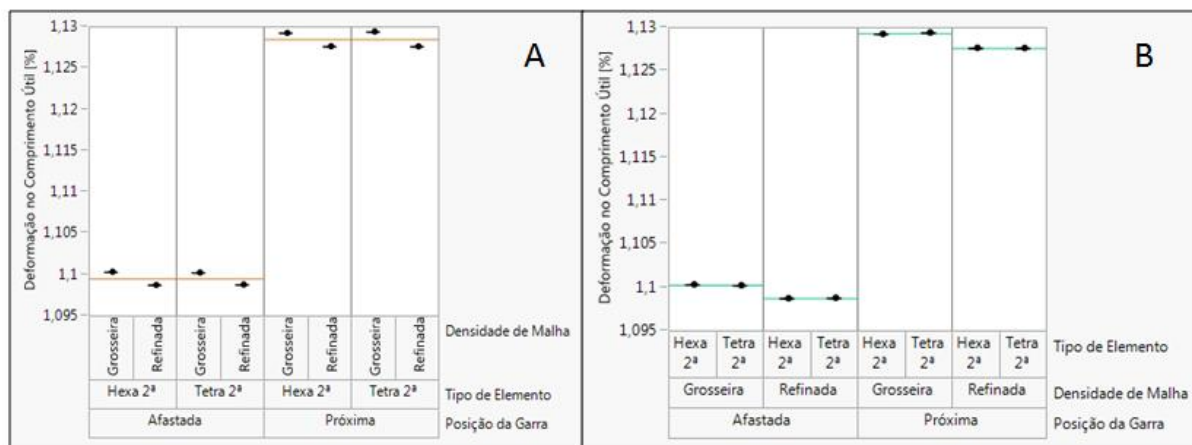


Figura 5. Deformações em função das configurações de modelagem. (A) linhas de médias para o grupo “Posição de Garra”. (B) linhas de médias para o grupo “Densidade de Malha”.

Realizando a análise estatística, através do software JMP 12®, é possível notar que o parâmetro que apresenta maior significância estatística é posição da garra, seguido de densidade de malha. A Fig. 6 mostra os resultados dessa análise e ordena os parâmetros em estudo em ordem decrescente de significância estatística. Nota-se que posição da garra e densidade de malha possuem “LogWorth” maior que 2 e “PValue” menor que 0.05 apresentando significância estatística. Por outro lado, tipo de elemento não apresenta significância estatística.

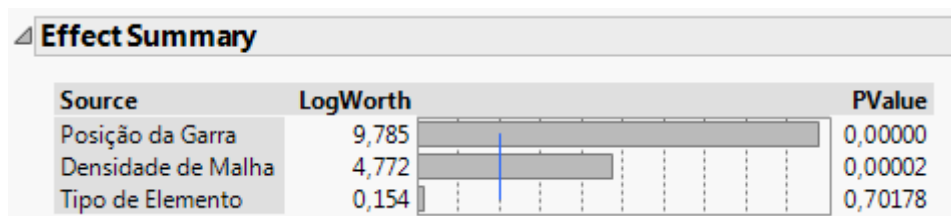


Figura 6. Significância estatística dos parâmetros em estudo

A Fig. 7 mostra o gráfico de Pareto para os “Estimates”, que são os coeficientes do modelo estatístico e representam o efeito de cada fator. Nota-se que os fatores que tem mais efeito sobre a deformação no comprimento útil do corpo de provas são posição de garra e densidade de malha, sendo que o tipo de elemento não apresentou efeito apreciável.

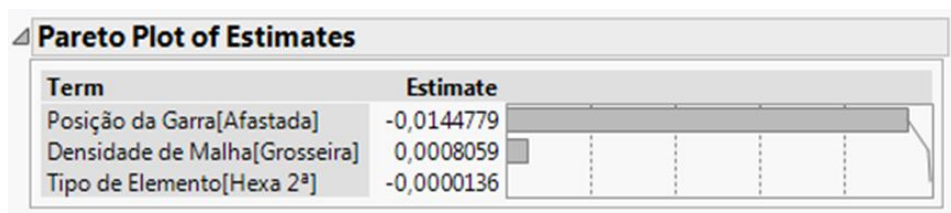


Figura 7. Efeito dos parâmetros em estudo na deformação no comprimento útil

## 4. CONCLUSÕES

Os parâmetros que apresentaram efeito sobre a deformação no comprimento útil do corpo de provas foram a posição da garra e a densidade da malha, sendo que a posição da garra foi o parâmetro preponderante. Estes dois parâmetros também apresentaram significância estatística.

Considerando os níveis utilizados para os parâmetros deste estudo, o tipo de elemento não apresentou efeito expressivo sobre a deformação no comprimento útil do corpo de provas. Ainda assim, é possível que para outros níveis de posicionamento de garras e densidade de malha o tipo de elemento tenha efeito.

Para um próximo estudo recomenda-se avaliar níveis mais abrangentes de densidade de malha e de tipos de elementos, sendo interessante avaliar menores densidades de malha e

elementos de primeira ordem.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) pela oportunidade dessa pesquisa, à Whirlpool S.A pelo fornecimento de materiais e financiamento dos corpos de prova, ao Laboratório de Mecânica Aplicada e Computacional do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos/USP pela disponibilização do software, infraestrutura computacional, licenças e normas para realização dos estudos e ao Laboratório de Tribologia e Compósitos do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos/USP pela colaboração com equipamentos de ensaio mecânico.

## 6. REFERÊNCIAS

- ANSYS, I. (2015). Release Documentation. *ANSYS 16.0 Release Documentation*. Washington.
- ASTM International. (2003). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (D 638 – 03). Montgomery County.
- Braskem. (2010). *Polipropileno Verde: Relatório Anual e de Sustentabilidade 2010*. Acesso em 30 de Março de 2015, disponível em Braskem: <http://www3.braskem.com.br/upload/rao/2010/pt/polipropileno-verde.html>
- Callister, W. D. (2002). *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. Rio de Janeiro: LTC.
- Canevarolo, S. V. (2002). *Ciência dos Polímeros: Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros*. São Paulo: Artliber.
- Canevarolo, S. V. (2003). *Técnicas de Caracterização de Polímeros*. São Paulo: Artliber.
- Ferreira, J. C., & Patino, C. M. (2015). O que realmente significa o valor-p? *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, p. 485.
- Filho, A. A. (2007). *Elementos finitos – a base da tecnologia CAE*. São Paulo: Érica.
- Hibbeler, R. C. (2010). *Resistência dos Materiais*. São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- Mano, E. B. (1991). *Polímeros como Materiais de Engenharia*. São Paulo: Edgard Blücher.
- Mano, E. B., & Mendes, L. C. (1999). *Introdução a Polímeros*. São Paulo: Edgard Blücher.
- Montgomery, D. C. (2013). *Design and Analysis of Experiments*. Arizona: Wiley.
- SAS Institute Inc. (2015). JMP® 12 Documentation Library. Cary: SAS Institute Inc.