



13º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS



NATAL - RN  
18 a 22 de outubro de 2015

## CORREÇÃO DE ENSAIO DE TRAÇÃO EXPERIMENTAL ATRAVÉS DE EXTENSÔMETRO VIRTUAL UTILIZANDO ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

Gabriel S. Silva<sup>1\*</sup> (M), Ernesto Massaroppi Jr.<sup>2</sup> e Carlos A. Fortulan<sup>2</sup>

1 – Whirlpool S.A. – Joinville/SC, [gabsropa@hotmail.com](mailto:gabsropa@hotmail.com)

2 - Universidade de São Paulo – USP, Campus de São Carlos, São Carlos/SP

**Resumo:** O polipropileno conta com uma grande versatilidade de aplicações, baixo custo, propriedades mecânicas moderadas e excelente resistência química. A determinação do comportamento e das propriedades de material é de importância vital para o projeto de estruturas e maquinários, sendo que a resistência mecânica é característica inerente ao material, devendo ser determinada de forma experimental. Neste trabalho foi caracterizado o polipropileno através do ensaio de tração e corrigido o módulo de elasticidade utilizando-se extensômetro virtual, criado via análise por elementos finitos, concluindo-se que a não utilização de extensômetro implica em perda significativa de acuracidade.

**Palavras-chave:** *Módulo de Elasticidade, Caracterização de Propriedades Mecânicas, Ensaio de Tração em Polipropileno, Extensômetro Virtual, Análise por Elementos Finitos.*

### **EXPERIMENTAL TENSILE TESTING ADJUSTMENT THROUGH VIRTUAL EXTENSOMETER BY FINITE ELEMENT ANALYSIS**

**Abstract:** The polypropylene has great versatility of applications, low cost, intermediary mechanical properties and excellent chemical strength. The behavior and material properties determination is of high importance for structures and machinery design, the mechanical strength is intrinsic characteristic of material, must be determined by experimental testing. This study perform the characterization for the polypropylene through tensile testing, and adjust of the Young's modulus using virtual extensometer made by finite element analysis, concluding that it is not used extensometer the accuracy is significantly impaired.

**Keywords:** *Young's Modulus, Mechanical Properties Characterization, Polypropylene Tensile Testing, Virtual Extensometer, Finite Element Analysis.*

### **Introdução**

Os polímeros naturais têm sido utilizados por muitos séculos, madeira, borracha e couro são alguns exemplos. Após a Segunda Guerra Mundial o campo dos materiais foi revolucionado pelos polímeros sintéticos, que podem ser produzidos com baixo custo e com propriedades administráveis, o que propiciou a substituição de peças metálicas e de madeira por polímeros com propriedades mecânicas equivalentes e custo inferior [1].

O polipropileno (PP) é o segundo polímero mais utilizado no mundo, contando com uma grande versatilidade de aplicações [2, 3]. Possui baixo custo, propriedades mecânicas moderadas e excelente resistência química. Entre as diversas aplicações estão: para-choques, material hospitalar, recipientes para fornos de micro-ondas, carcaças de eletrodomésticos, etc. [4, 5].

O projeto de qualquer estrutura ou máquina demanda a determinação dos esforços externos e internos atuando nos seus elementos. O comportamento do conjunto estrutural depende não somente da geometria dos seus componentes, mas também do comportamento do material que os compõem. Com isso, é de importância vital a determinação do comportamento e propriedades do material de forma precisa [6].

A resistência mecânica é uma característica inerente ao material, devendo ser determinada por métodos experimentais [6]. Existem ensaios mecânicos padronizados para a obtenção dos valores das propriedades, sendo um dos testes mais importantes o ensaio de tração. Os principais parâmetros que quantificam a resistência mecânica neste ensaio são: módulo de elasticidade ou Young ( $E$ ), tensão ( $\sigma_e$ ) e deformação ( $\epsilon_e$ ) no escoamento [6-8].

Este trabalho caracterizou o comportamento mecânico de polipropileno em ensaio de tração. Devido à indisponibilidade de extensômetro para realização do ensaio, equipamento necessário para se obter medidas acuradas de alongamento, buscou-se através de análises por elementos finitos construir um extensômetro virtual e possibilitar a correção do módulo de elasticidade experimental para a região onde deveria haver a colocação do extensômetro na seção estreita do corpo de prova (CP).

## Experimental

### *Materiais*

Os corpos de prova foram moldados por injeção em uma injetora da marca *Battenfeld*, modelo Plus 35, com um “grade” de polipropileno fabricado pela Braskem e fornecido pela Whirlpool S.A., foi adicionado ao material certa quantidade de concentrado de pigmento branco. O “grade” e a quantidade de concentrado não serão especificados por questão de sigilo industrial.

### *Métodos*

#### *Ensaio de Tração*

Foi realizada a pesagem do polipropileno e do concentrado de pigmento a fim de garantir a correta proporção dos componentes, foi realizada a mistura mecânica de ambos e posteriormente foi abastecida a injetora. Os parâmetros de injeção, temperatura de molde e refrigeração foram ajustados. Foram injetados corpos de prova do Tipo 1 de acordo com a norma ASTM D638 [9].

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina universal MTS modelo BIONIX, equipada com célula de carga de 15 kN e garras hidráulicas. Os corpos de prova foram devidamente posicionados nas garras, fixados com uma pressão hidráulica de 2 MPa e ensaiados sequencialmente sem interrupção do ensaio. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D638 [9], sendo a velocidade configurada para 5 mm/min. Foram monitorados e armazenados dados de tempo, alongamento, deformação, carga e tensão.

#### *Simulação por Elementos Finitos*

A curva tensão em função da deformação foi analisada e foi selecionado o ponto de tensão de 10.09 MPa para a determinação do módulo de elasticidade corrigido, esse trecho da curva está visivelmente dentro do regime linear elástico.

Foi então construído um modelo CAD do corpo de prova no software Creo Parametric 2.0<sup>®</sup>, usando as dimensões para o Tipo 1 citadas na norma ASTM D638 [9], este modelo foi salvo no formato “.stp” para exportação. No software Hypermesh 12<sup>®</sup> foi importada a geometria gerada anteriormente e construído o modelo de elementos finitos. O modelo foi construído em elementos tetraédricos de segunda ordem, denominados “solid 92” pelo software Ansys 13<sup>®</sup>, devido ao interesse futuro de utilização desse tipo de elemento em modelagem de componentes de geometria complexa e construídos do material do presente estudo. Foram consideradas condições de simetria, sendo gerada a malha em apenas 1/8 do modelo CAD, os elementos foram construídos de forma que houvesse o equivalente a 6 elementos na espessura do CP. Nas superfícies em contato com a garra móvel foi aplicado deslocamento no eixo  $x$  equivalente ao alongamento presente em cada corpo de prova no instante de tensão 10.09 MPa e restringidos os deslocamentos no eixos  $y$  e  $z$ . O material foi definido como homogêneo, isotrópico e dentro do regime linear elástico, com módulo de elasticidade de 1.49 GPa (obtido do experimento) e coeficiente de Poisson de 0.43 [10]. O modelo foi salvo e exportado ao software Ansys 13<sup>®</sup> em formato “.cdb” onde foi resolvido. A solução foi configurada para ocorrer em três “substeps”, adotando a hipótese de pequenos deslocamentos e utilizando o solver PCG na opção de máxima acuracidade.

Depois de resolvido o modelo, foi capturado o alongamento na região onde deveria haver a colocação do extensômetro na seção estreita do corpo de prova. Com isso foi calculada a deformação, possibilitando o cálculo do módulo de elasticidade corrigido para a região de colocação do extensômetro. A relação entre tensão, deformação e módulo de elasticidade é dada pela Eq. 1; onde:  $\sigma$  – tensão,  $E$  – módulo de elasticidade,  $\varepsilon$  – deformação.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

O cálculo do erro foi efetuado como mostrado na Eq. 2; onde:  $E_T$  – Módulo de Elasticidade entre garras,  $E_{Ext}$  – Módulo Elasticidade na região do extensômetro.

$$\text{Erro (\%)} = 100 \cdot (E_T - E_{Ext}) / E_T \quad (2)$$

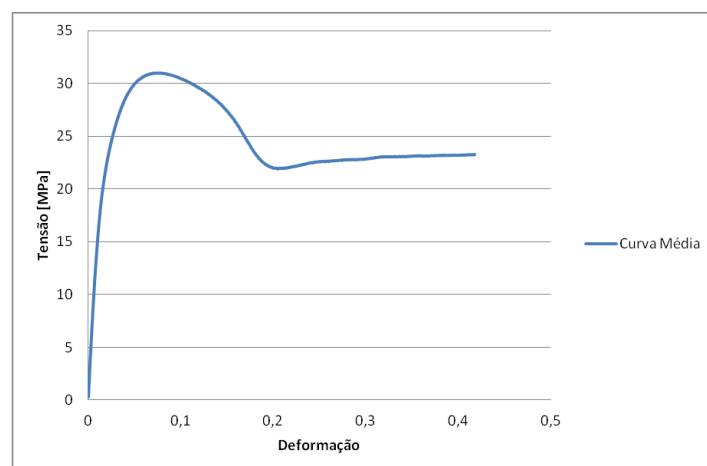
## Resultados e Discussão

O processo de injeção resultou em corpos de prova com bom acabamento superficial e adequação às dimensões e às tolerâncias especificadas na norma ASTM D638 [9]. O ensaio de tração teve duração aproximada de 10 minutos para cada CP, tendo sido ensaiados um total de cinco espécimes. O módulo de elasticidade médio ( $E_m$ ) obtido foi de 1.49 GPa com desvio padrão de 0.01 GPa, a tensão de escoamento média ( $\sigma_{em}$ ) foi de 31.04 MPa com desvio padrão de 0.05 MPa, os resultados obtidos para cada CP são mostrados na tabela 1.

**Tabela 1** – Resultados experimentais do ensaio de tração do Polipropileno

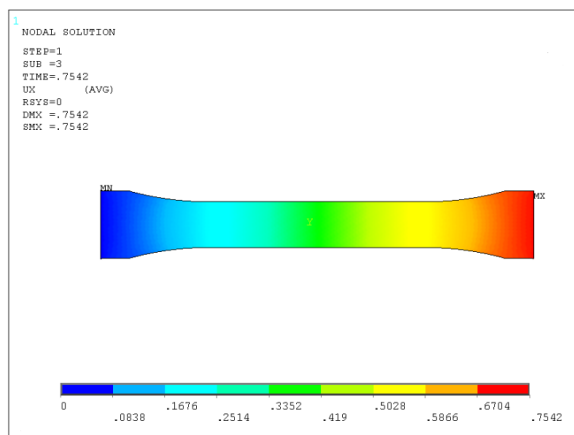
	<b>E [GPa]</b>	<b><math>\sigma_e</math> [MPa]</b>
<b>CP1</b>	1,50	31,01
<b>CP2</b>	1,50	31,12
<b>CP3</b>	1,47	31,04
<b>CP4</b>	1,49	31,07
<b>CP5</b>	1,49	30,98
<b>Média</b>	1,49	31,04
<b>Desv. Padrão</b>	0,01	0,05

A curva tensão em função da deformação média obtida do ensaio é mostrada na Fig. 1. É possível notar a linearidade do módulo de elasticidade até tensões próximas a 15 MPa. O material apresenta comportamento dúctil. Não foi possível conduzir o ensaio até a ruptura por limitações do curso útil da máquina de ensaio.



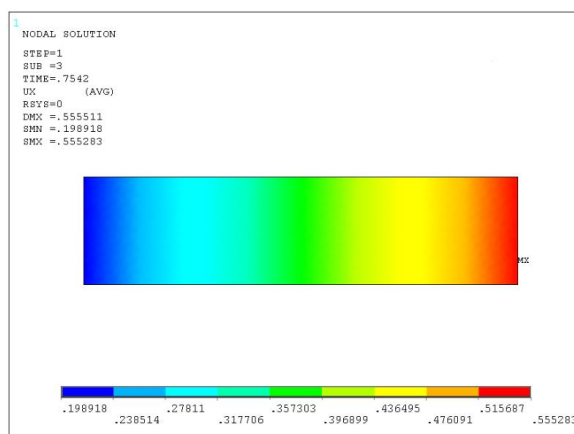
**Figura 1** – Curva Média Tensão vs Deformação Experimental para Polipropileno

Os resultados do modelo simétrico utilizando elementos finitos foram expandidos para visualização, os deslocamentos na direção de tração (eixo  $x$ ) obtidos para a região entre garras do corpo de prova são mostrados na Fig. 2. O alongamento nesta região é o mesmo deslocamento das garras da máquina de tração, calculado a partir da subtração entre o deslocamento menor e o deslocamento maior. O cálculo da deformação levou em conta a distância entre garras de 115 mm como sendo o comprimento inicial. Com isso, o módulo de elasticidade obtido para a região é de 1539 MPa.



**Figura 2** – Deslocamentos na direção de tração (eixo  $x$ ) no comprimento entre garras do CP, para deslocamento prescrito equivalente a 10.09 MPa.

O resultado para a região onde deveria haver a colocação do extensômetro foi isolado para facilidade de visualização e é mostrado na Fig. 3. O alongamento nesta região indicado pelo “extensômetro virtual” foi de 0.3564 mm, calculado a partir da subtração entre o deslocamento menor e o deslocamento maior. O cálculo da deformação levou em conta o comprimento do extensômetro de 50 mm como sendo o comprimento inicial. Com isso, o módulo de elasticidade obtido para a região é de 1416 MPa.



**Figura 3** – Deslocamentos na direção de tração (eixo  $x$ ) na região do extensômetro virtual no CP, para deslocamento prescrito equivalente a 10.09 MPa.

O erro calculado para o módulo de elasticidade indicado para medida entre garras e o módulo que seria indicado com o uso de extensômetro foi de 8%, ou seja, o módulo indicado para a região onde deveria haver a colocação do extensômetro na seção estreita é 8,0% menor em relação ao indicado pela máquina de ensaio. Na tabela 2 são comparados os resultados experimentais com os resultados corrigidos.

**Tabela 2** – Resultados Experimentais vs Resultados Corrigidos por Simulação Numérica

	Resultados Experimentais		Resultados Corrigidos		Erro [%]
	E [GPa]	$\sigma_e$ [MPa]	E [GPa]	$\sigma_e$ [MPa]	
<b>CP1</b>	1,50	31,01	1,38	31,01	8,0
<b>CP2</b>	1,50	31,12	1,38	31,12	8,0
<b>CP3</b>	1,47	31,04	1,35	31,04	8,0
<b>CP4</b>	1,49	31,07	1,37	31,07	8,0
<b>CP5</b>	1,49	30,98	1,37	30,98	8,0
<b>Média</b>	1,49	31,04	1,37	31,04	8,0
<b>Desv. Padrão</b>	0,01	0,05	0,01	0,05	-

### Conclusões

Os parâmetros e o processo de injeção dos corpos de prova se mostraram robustos, visto que produziram amostras com grande homogeneidade, demonstrada pela pequena variação de propriedades mecânicas entre os espécimes.

A realização de ensaios de tração sem a utilização de extensômetro, na seção estreita do corpo de prova, leva a perda considerável de acuracidade da medida. Com relação ao corpo de prova do tipo usado no presente estudo, o módulo de elasticidade para região estreita é 8% menor em relação ao medido para todo o material entre garras.

### Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP). A Whirlpool S.A pelo fornecimento de materiais e financiamento dos corpos de prova e, conjuntamente, ao Laboratório de Mecânica Aplicada e Computacional do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos/USP pela colaboração com *software*, *hardware*, licenças e normas para realização dos estudos. 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.

### Referências Bibliográficas

1. W. D. Callister Jr., *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*, LTC, Rio de Janeiro, 2002.
2. Braskem. Polipropileno Verde: Relatório Anual e de Sustentabilidade 2010. Disponível em: <<http://www3.braskem.com.br/upload/rao/2010/pt/polipropileno-verde.html>>. Acesso em: 30 mar. 2015.
3. BNDES. A Situação Atual e Futura da Indústria de Polipropileno. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/polipr2a.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/polipr2a.pdf)>. Acesso em: 29 mar. 2015.
4. E. B. Mano, *Polímeros como Materiais de Engenharia*, Edgard Blücher, São Paulo, 1991.
5. E. B. Mano; L. C. Mendes, *Introdução a Polímeros*, Edgard Blücher, São Paulo, 1999.
6. R. C. Hibbeler, *Resistência dos Materiais*, Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2010.
7. S. V. Canevarolo Jr., *Ciência dos Polímeros: Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros*, Artliber, São Paulo, 2002.
8. S. V. Canevarolo Jr., *Técnicas de Caracterização de Polímeros*, Artliber, São Paulo, 2003.
9. AMERICAN NATIONAL STANDARD. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, 2003, (ASTM D-638).
10. D. W. van Krevelen, *Properties of Polymers: Their Correlation with Chemical Structure: Their Numerical Estimation and Prediction from Additive Group Contributions*, K. te Nijenhuis, ed.; Elsevier, Amsterdam, 2009.