

# ANÁLISE VIRTUAL DE COMPONENTE AUTOMOTIVO DE MATERIAL POLIMÉRICO<sup>1</sup>

Mauro Moraes de Souza<sup>2</sup>  
Juliano Savoy<sup>3</sup>  
Marcelo Adriano do Carmo Silva<sup>4</sup>  
Felipe Moura Fontes Novo<sup>4</sup>

## Resumo

As exigências atuais de mobilidade sustentável devem-se à necessidade quase que imperativa de redução de peso em veículos, forçando os segmentos de autopeças e montadoras a adotarem materiais substitutos às ligas metálicas convencionais de seus componentes. Uma solução encontrada pela indústria automobilística para redução de peso são os materiais poliméricos. Todavia, o seu uso depara-se com desafios outros; haja visto seu comportamento mecânico de difícil modelamento em contrapartida às ligas metálicas, a sua maior dependência com o processo de fabricação e a baixa garantia de repetibilidade das propriedades mecânicas de um fabricante para outro, além das condições de meio ambiente sob os quais atuam. Tais desafios tornam-se maiores quando do desenvolvimento virtual de componentes automotivos modelados por meio dos métodos de elementos finitos. Esse trabalho apresenta um procedimento para ser utilizado em análises virtuais de materiais poliméricos através do método dos elementos finitos considerando o estudo do comportamento de um componente automotivo.

**Palavras-chave:** Elementos finitos; Polímeros; Termoplásticos.

## VIRTUAL ANALYSIS OF POLYMERIC AUTOMOTIVE COMPONENT

### Abstract

Nowadays, the sustainable mobility demands the necessity of weight reduction in passengers' cars, leading auto-parts manufacturers and vehicle manufacturers to substitute steel alloy parts for parts made of lighter materials. A solution found by those companies was to make use of polymeric materials. Nevertheless, the use of polymeric materials runs into other challenges due to their mechanical properties very hard to be modeled when compared with metallic parts, their high sensibility to the manufacturing process, which can change drastically their mechanical properties, and their low guarantee for repeatability of mechanical properties from one supplier to another. Besides that, polymers are very sensitive to environmental conditions. Those challenges are very difficult to go through when analyzed from the FEM point of view. This work presents a procedure to be used for polymeric materials in FEM analyses considering the behavior of an automotive component.

**Key words:** Finite elements; Polymers; Thermoplastics.

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

<sup>2</sup> Eng. metalurgista; Mestre em ciências dos materiais pelo IME, RJ; Dr. em Eng. com ênfase em conformação mecânica de metais pela RWTH Aachen, Alemanha. Diretor de Engenharia, Pesquisa e Desenvolvimento da Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda.

<sup>3</sup> Engenheiro mecânico. Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento da Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda.

<sup>4</sup> Engenheiro mecânico. Engenheiro de Produto da Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda.

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente os materiais plásticos, aqui focando-se os termoplásticos de engenharia, vêm ganhando grande destaque no desenvolvimento de novos produtos na indústria automobilística devido a um conjunto de características que estão de encontro às necessidades desse mercado, tais como *design* complexo, fácil manufacturabilidade, estabilidade dimensional, baixa massa específica, alta rigidez, resistência térmica e resistência química.

O material, que antes era usado somente em itens de acabamento, hoje vem ganhando seu espaço também em peças estruturais; por esse motivo há necessidade cada vez maior de métodos capazes de calcular seu comportamento quando solicitado mecanicamente.

O trabalho aqui proposto tem o objetivo criar um método de análise estrutural para materiais poliméricos utilizando-se ensaios mecânicos e simulação por elementos finitos que permita engenheiros avaliarem o comportamento de peças poliméricas.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Para realizar esse trabalho faz-se necessária a utilização de testes em laboratório, esses testes têm o objetivo de gerar dados que posteriormente serão comparados com os resultados em simulações virtuais.

Como objeto de estudo para os testes de laboratório, utilizou-se uma junta de transmissão de aplicação automobilística. Essa junta compõe o eixo de propulsão de automóveis movidos à tração traseira e têm a finalidade de atenuar os esforços de torção e vibrações nos sistemas de driveline.

A junta é composta por 3 componentes. A vista explodida da junta pode ser observada na Figura 1. O componente motriz e o componente movido são fabricados em aço e o acoplamento é fabricado em material polimérico. O Polímero utilizado no estudo é um POM (polioxidometileno) de código Ultraform<sup>®</sup> N2640-Z4 fabricado pela BASF<sup>®</sup>.<sup>(1)</sup>

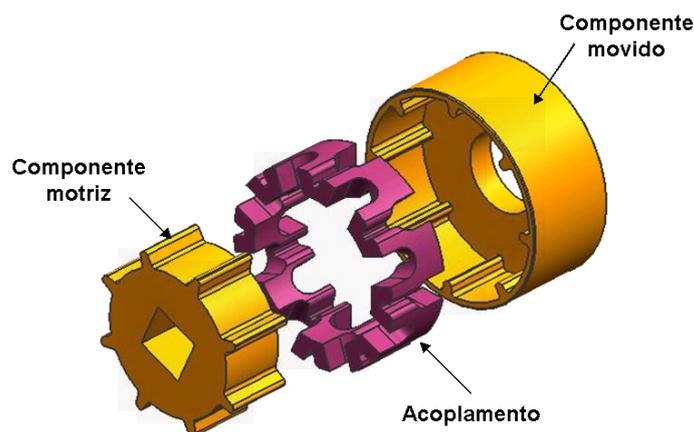


Figura 1. Componentes da junta de transmissão.

Como o material polimérico possui comportamento não-linear, é necessário obter-se a sua curva tensão-deformação, pois essa curva será utilizada como dado de entrada no programa de elementos finitos. As curvas de tensão-deformação são aceitas como dados de entrada pela maioria dos programas de elementos finitos, que realizam análise não-linear e a discretização correta dessas curvas é essencial para a realização de simulações que envolvem materiais com esse comportamento.

Diante dessa necessidade, foram realizados ensaios de tração e de compressão para aquisição das curvas tensão-deformação do POM. Os corpos de prova utilizados para esses ensaios foram obtidos a partir do *blank* bruto injetado do acoplamento (Figura 2). Optou-se por utilizar esse *blank* bruto com o intuito de manter as características de propriedades provenientes do processo de injeção. Também foi realizado um teste de aplicação de torque na junta estudada para obterem-se resultados de deslocamento angular. Os resultados procedentes do teste com a junta foram utilizados como critério de validação das simulações virtuais.



Figura 2. Blank bruto injetado do acoplamento.

## 2.1 Metodologia Experimental

### 2.1.1 Ensaio de tração

Para a realização do ensaio de tração foram utilizados 05 corpos de prova usinados a partir de um blank bruto injetado do acoplamento polimérico. O ensaio de tração foi realizado no laboratório do CCDM/ UFSCAR de acordo com a norma ASTM D638-10,<sup>(2)</sup> considerando-se o corpo de prova tipo IV cujas dimensões podem ser observadas na Figura 3. O corpo de prova do tipo IV foi escolhido devido às limitações dimensionais provenientes do tamanho do blank injetado.

O equipamento utilizado nesse ensaio foi uma máquina universal de ensaios modelo 5569, marca Instron, tendo como dispositivo adicional o extensômetro de vídeo sem contato para a medição da deformação do material. A temperatura de ensaio foi de 23°C, pois essa será a temperatura de trabalho da junta na maior parte do tempo.

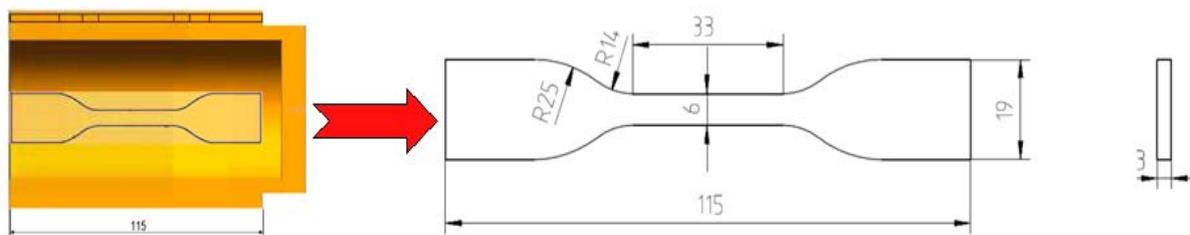


Figura 3. Limites dimensionais do blank bruto injetado.

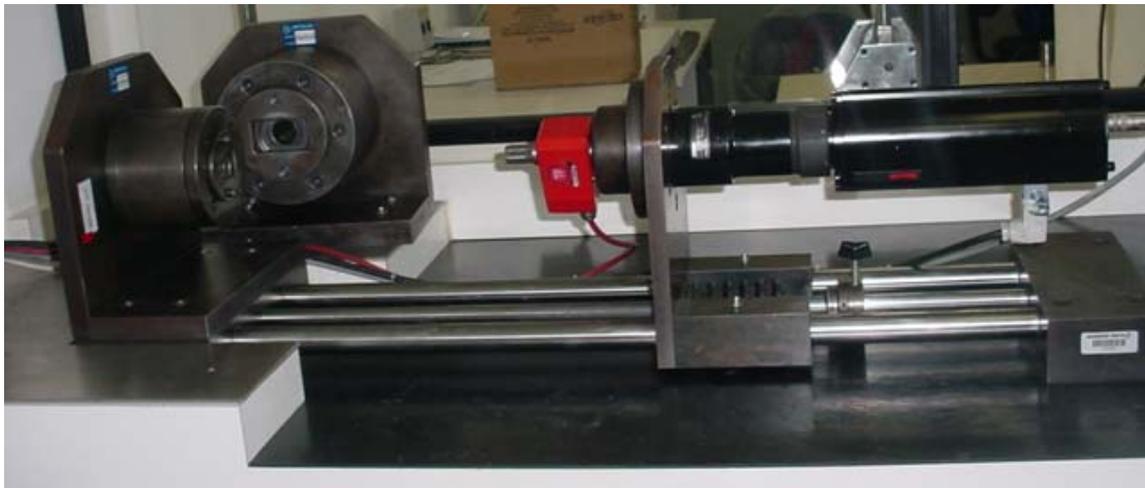
### 2.1.2 Ensaio de compressão

Assim como no ensaio de tração, os corpos de prova foram usinados a partir do blank bruto injetado do acoplamento. O ensaio de compressão foi realizado no mesmo laboratório e na mesma máquina onde foram realizados os ensaios de tração e foram ensaiados 05 corpos de prova conforme norma ASTM D695-10<sup>(3)</sup> também à 23°C, considerando-se um corpo de prova prismático com as seguintes dimensões: 12,7 mm x 12,7 mm x 25,4 mm.

### 2.1.3 Ensaio de bancada

Para o ensaio da junta estudada, foi utilizado um aparelho determinador de torque e tensão, doravante denominado “DTT” (Figura 4). Esse aparelho é originalmente

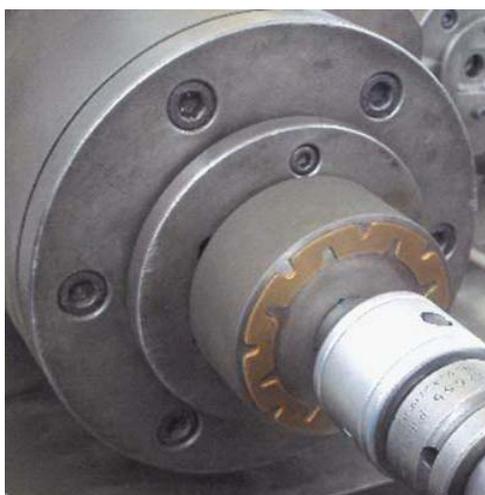
utilizado para realizar medições em elementos de fixação como parafusos e porcas. O aparelho é composto basicamente de uma célula de carga própria para medições de torque e um motor elétrico, responsável em aplicar o torque.



**Figura 4.** Aparelho determinador de torque e tensão.

Para o teste em questão, o aparelho DTT foi utilizado como instrumento de aplicação de torque e coleta de dados, porém esse aparelho não foi projetado para testes que exijam alta precisão de deslocamento angular, sendo assim sua rigidez torsional não foi suficiente para realizar os testes com a precisão exigida. Por esse motivo, algumas correções tiveram que ser feitas nos resultados, possibilitando assim obterem-se os valores de ângulo de torção somente da junta.

Visando essa correção o primeiro ensaio de torção foi realizado com um acoplamento feito em material metálico. Esse ensaio tem a função de verificar a torção do aparelho DTT, quando submetido ao torque exigido pelo teste a ser realizado com acoplamento polimérico. Na Figura 5 é possível observar o conjunto com o acoplamento metálico, feito em cobre para preservar os componentes da junta, montado no equipamento.



**Figura 5.** Montagem com acoplamento de cobre.

Após coletar os dados de torque e ângulo com o acoplamento metálico o mesmo procedimento foi realizado utilizando-se o acoplamento polimérico (Figura 6).



Figura 6. Montagem com acoplamento polimérico.

A fim de minimizar-se o efeito das folgas do sistema nos resultados, tomou-se o cuidado de antes de cada teste rotacionar-se o sistema manualmente para que as folgas ficassem sempre na mesma posição.

## 2.2 Modelo em Elementos Finitos

O método por elementos finitos é frequentemente utilizado para simulações virtuais em materiais lineares, como é o caso, por exemplo, de materiais metálicos. Nesses casos as propriedades desses materiais são descritos pela lei de Hooke.

Infelizmente, o modelo elástico linear apresentado pela lei de Hooke não pode ser utilizado para análises virtuais de peças fabricadas com materiais poliméricos, pois polímeros apresentam comportamento não-linear. Sendo assim, é necessário adotarem-se outros modelos matemáticos, que possibilitem descrever com mais precisão o comportamento desse tipo de material.

Os diversos programas de elementos finitos disponíveis no mercado possuem modelos matemáticos específicos para o cálculo de materiais não-lineares, tais como modelo não-linear elástico, modelo visco-plástico, modelo de fluência e modelo de plasticidade considerando alguns critérios de escoamento como por exemplo: von Mises, Tresca, Drucker-Prager, linear Mohr-Coloumb e pressão modificada de von Mises. A escolha do modelo matemático bem como a escolha do critério de escoamento são condições a serem aplicadas nessas análises a fim de se obter resultados de deslocamento e tensão mais próximos de uma aplicação real.

Para o modelo em elementos finitos utilizou-se o *software* PERMAS<sup>®</sup>, da empresa Intes. Esse solver possibilita o uso de modelos matemáticos para materiais não-lineares em conjunto com critérios de escoamentos descritos anteriormente.

Em materiais poliméricos, a dependência da pressão sobre o escoamento tem sido observada<sup>(4,5)</sup> e conforme, citado em Caddell, Raghava e Atkins,<sup>(6)</sup> a pressão modificada de von Mises fornece a melhor aceitação geral observada no comportamento dos polímeros. Diante dessas citações, optou-se por utilizar o modelo matemático não-linear com o critério de escoamento de pressão modificada de von Mises no programa de elementos finitos.

Para o modelamento da junta em elementos finitos, a peça interna e externa, representadas pela cor cinza na Figura 7, são modeladas em aço e o acoplamento, representado pela cor vermelha (Figura 7), modelado em POM Ultraform<sup>®</sup> N2640-Z4. As três peças são unidas por elementos de contato.

A aplicação do torque no modelo de elementos finitos é feita através de um elemento rígido (RBE2) conectado ao centro do componente motriz. O torque aplicado foi de 300 N.m e está representado em amarelo na Figura 7. O componente

movido da junta foi engastado com o auxílio de SPC representados em verde (Figura 7).

Para o critério de escoamento escolhido fez-se necessária a utilização das curvas de tensão x deformação dos ensaios de tração e compressão na análise virtual, pois como poderá ser visto na seção 3, o comportamento do polímero em estudo é diferente em carregamento trativo e em carregamento compressivo. O critério de escoamento de pressão modificada de von Mises considera tais diferenças no cálculo da tensão do material.

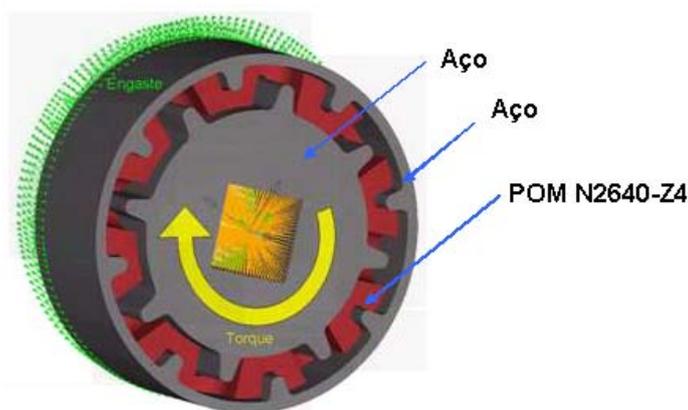


Figura 7. Ilustração das condições de contorno da análise.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Ensaio de Tração

As curvas tensão x deformação dos 5 corpos de prova, testados conforme 2.1.1, podem ser observadas na Figura 8.

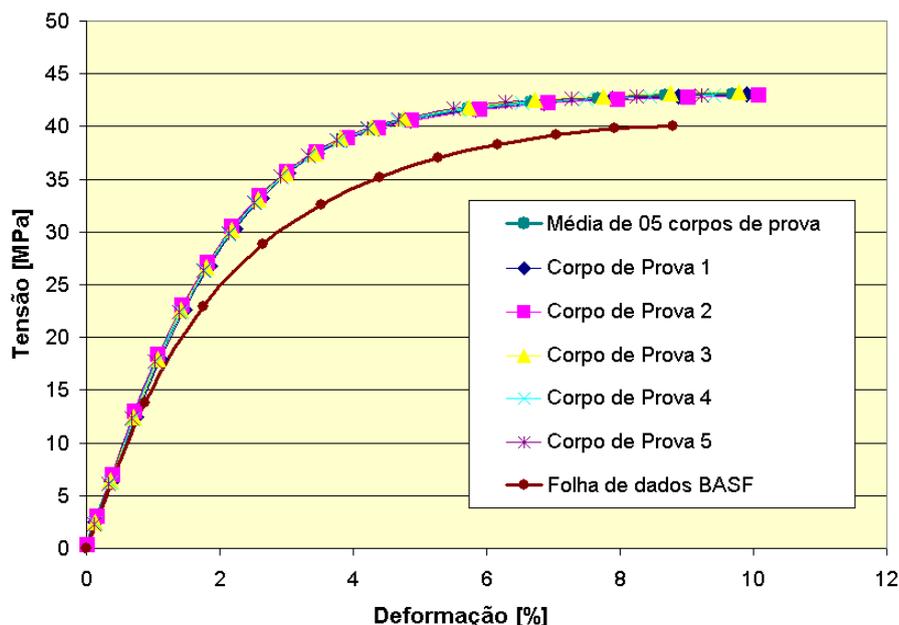


Figura 8. Gráfico com as curvas de tração tensão-deformação do POM.

Os resultados dos ensaios de tração apresentaram diferença máxima de 15% em relação à curva tensão-deformação retirada da folha de dados da BASF® (Figura 8).

Essa diferença foi considerada coerente e não descaracteriza as informações do fabricante, pois esses dados são apresentados mediante testes normalizados, porém, como citado anteriormente, os polímeros podem apresentar propriedades diferentes dependendo do tipo de carregamento e variáveis na aplicação e processamento.

Os valores obtidos para o módulo de elasticidade e tensão de escoamento podem ser vistos na Tabela 1.

**Tabela 1.** Propriedades adquiridas no ensaio de tração

Corpo de prova	Módulo de elasticidade [MPa]	Tensão de escoamento [MPa]
1	1692,92	43,31
2	1768,65	43,05
3	1739,58	43,41
4	1715,12	43,05
5	1891,5	43,06
Média	1761,55	43,18
Desvio Padrão	77,92	0,17

O módulo de elasticidade foi calculado utilizando-se o início da curva tensão-deformação gerada no ensaio conforme Fórmula 1 e a tensão de escoamento foi calculada conforme Fórmula 2.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{F_{máx}}{A_i} \quad (2)$$

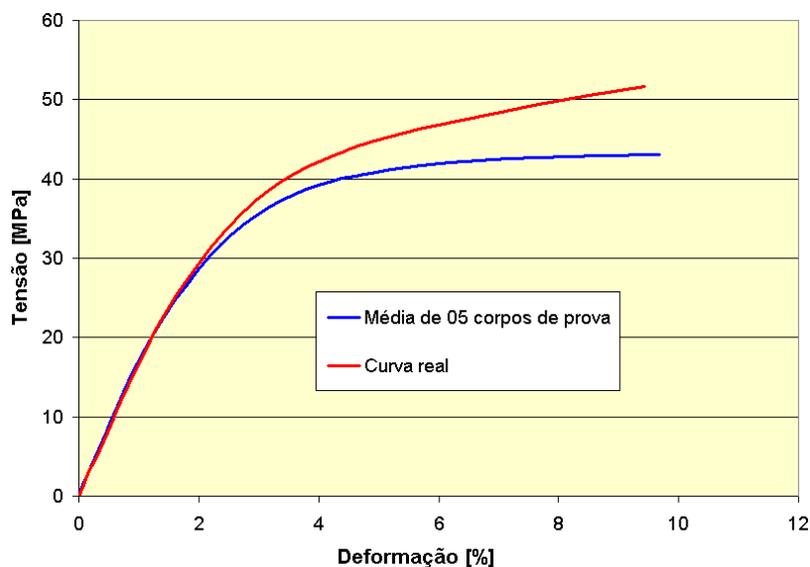
A curva tensão-deformação gerada no ensaio de tração é considerada uma curva de engenharia e deve ser convertida para uma curva real. Essa confirmação é feita por Arriaga et al.<sup>(7)</sup> que diz que devem-se realizar correções na curva ensaiada.

Essas conversões são feitas conforme as Fórmulas 3 e 4.

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (3)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (4)$$

A diferença entre a curva real e a curva de engenharia pode ser vista na Figura 9.



**Figura 9.** Gráfico com a curva real do material ensaiado.

A curva real de tração será a parte positiva da curva tensão-deformação inserida no programa de elementos finitos.

### 3.2 Ensaio de Compressão

Os resultados do ensaio de compressão foram utilizados para a caracterização das propriedades do POM N2640-Z4 sob compressão.

**Tabela 2.** Propriedades do material sob compressão

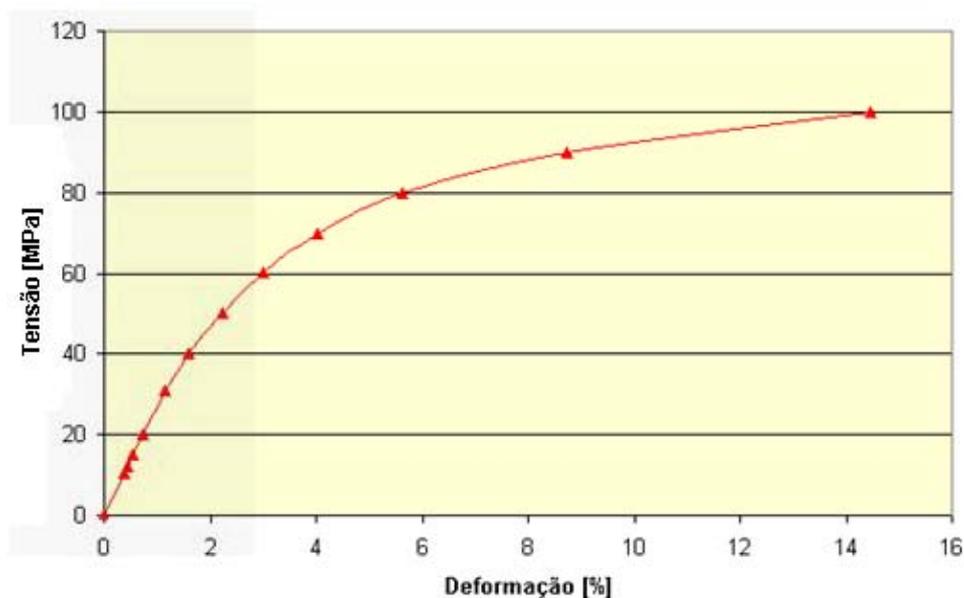
Corpo de prova	Módulo de elasticidade em compressão [MPa]	Resistência à compressão [MPa]
1	1344	58,9
2	1114	62
3	1462	59,3
4	827	63,5
5	816	63,4
Média	1113	61
Desvio Padrão	294	2

Pode ser observado na Tabela 2 um desvio padrão com valor superior ao apresentado nos ensaios de tração, isso pode ter ocorrido pela influência do atrito entre o corpo de prova e os dispositivos de compressão da máquina ensaio.

A resistência à compressão foi calculada através da Fórmula 5.

$$RC = \frac{F_{Máx}}{A_i} \quad (5)$$

Através dos dados gerados no ensaio de compressão e de um ajuste previsto na norma ASTM D695-10, onde o início da curva ensaiada é desconsiderado, foi possível traçar o gráfico de tensão-deformação para o ensaio de compressão (Figura 10).



**Figura 10.** Gráfico da curva tensão-deformação em compressão do POM.

Para a entrada da curva de compressão no programa de elementos finitos, tanto a tensão quanto a deformação devem ser multiplicados por -1, para que o programa entenda como comportamento compressivo.

### 3.3 Ensaio de Bancada

Os testes realizados com o acoplamento feito em cobre mostram que a máquina utilizada na medição movimentava-se aproximadamente  $5,2^\circ$  quando aplicado o torque de 300 N.m. Nessa mesma condição de ensaio a junta movimentava-se aproximadamente  $6,8^\circ$  com o acoplamento polimérico. Assim, para obter o valor de torção somente do acoplamento polimérico foi necessário subtrair a curva levantada com o acoplamento de cobre da curva levantada com o acoplamento polimérico. Na Figura 11 é possível observarem-se as curvas dos 2 ensaios realizados e também a resultante da subtração entre os acoplamentos metálico e polimérico.

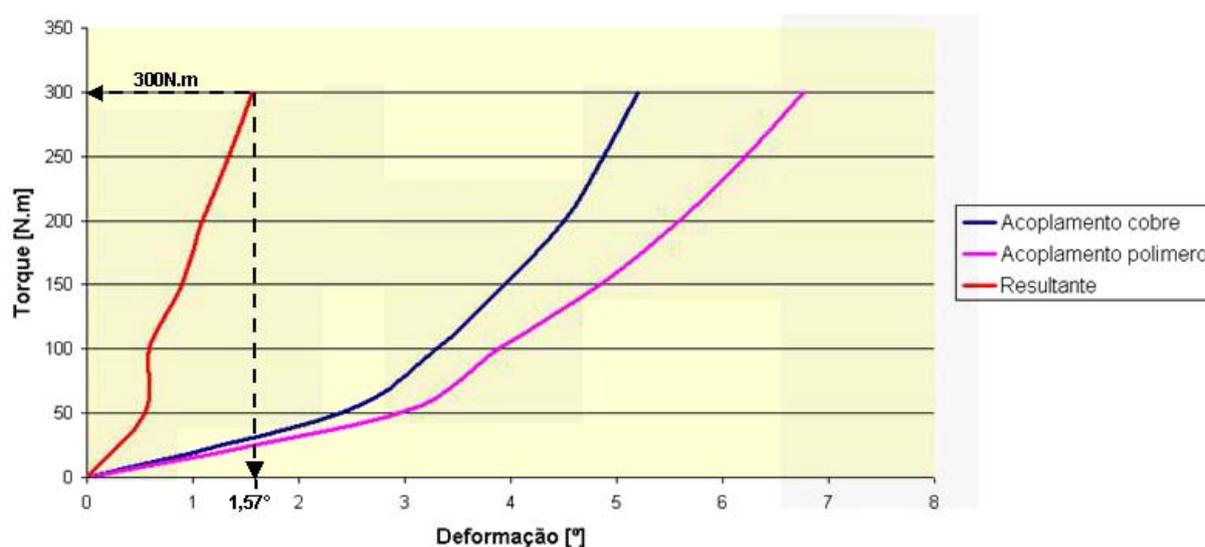


Figura 11. Gráfico com a curva tensão-deformação em compressão.

Observando-se a curva resultante, nota-se que com 300 N.m de torque o acoplamento polimérico desloca  $1,57^\circ$ . Este será o valor utilizado como referência para validação das simulações usando-se elementos finitos.

### 3.4 Elementos Finitos

Os resultados de deslocamento da análise de elementos finitos devem ser convertidos para valores angulares de deslocamento, possibilitando-se assim a comparação com os resultados dos testes feitos em bancada, pode-se observar na Figura 12 que o máximo deslocamento da junta quando solicitada a 300 N.m foi de 1,04 mm.

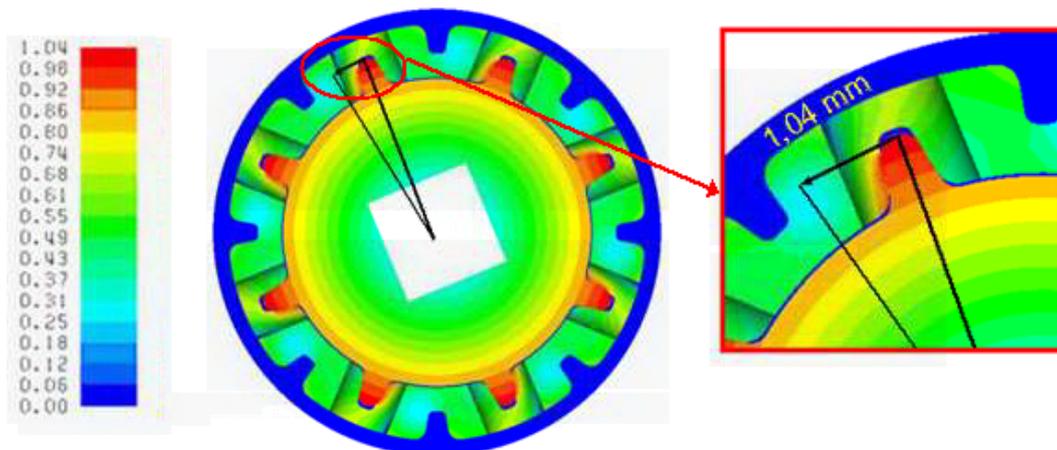


Figura 12. Resultado de deslocamento.

Para converter-se o deslocamento linear dos resultados obtidos para deslocamento angular utilizou-se a Fórmula 6.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{d}{r}\right) \quad (6)$$

Sendo, d = deslocamento linear máximo da peça motora; e r = raio referente ao deslocamento estudado.

Portanto:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{1,04}{33,5}\right) = 1,77^\circ$$

A tensão máxima de von Mises obtida na análise foi de 145,4 MPa, como pode ser visto na Figura 13.

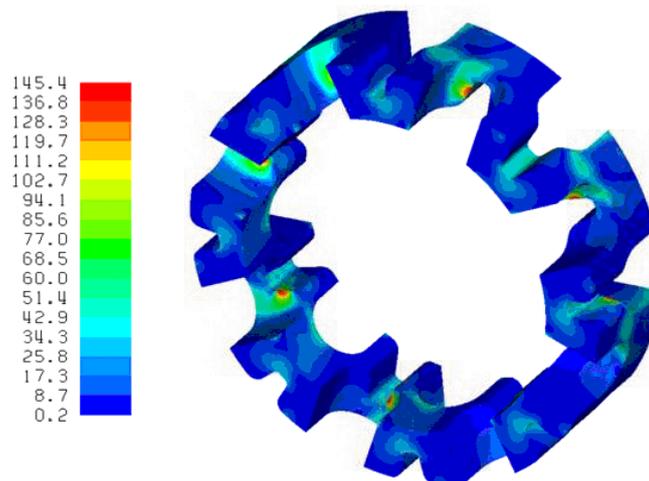


Figura 13. Resultado de tensão de von Mises.

Por esse material apresentar diferença de comportamento entre tração e compressão, devem-se analisar os resultados separando-se regiões com cargas predominantemente trativas de regiões com cargas predominantemente compressivas. Para auxiliar esse estudo, foi plotado o resultado com a tensão principal  $\sigma_1$ , que determina a tensão predominante em cada área da peça. O resultado de tensão  $\sigma_1$  pode ser observado na Figura 14.

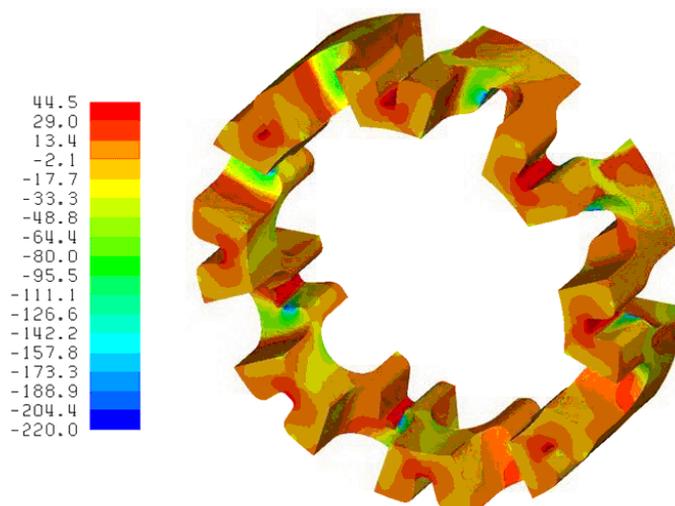


Figura 14. Resultado de sigma1.

Somente após definidas as regiões compressivas e trativas pode-se analisar com mais precisão os resultados de tensão de von Mises como será discutido no item 4.

#### 4 DISCUSSÃO

Os ensaios de tração e compressão mostraram, além das curvas características do material, os limites de escoamento de tração e de compressão, representados aqui pelo final da curva em ambos os gráficos (Figuras 9 e 10). Com essa informação pôde-se analisar na simulação as possíveis regiões de escoamento como, por exemplo, a região de contato entre o acoplamento e o componente movido onde nota-se uma tensão de von Mises de 145 MPa. Como o resultado de  $\sigma_1$  mostra que essa é uma região compressiva o limite de escoamento deveria ser de aproximadamente 61 MPa, portanto o material estaria trabalhando acima do limite de escoamento.

Essa mesma região quando observada no acoplamento testado em bancada apresenta uma pequena deformação que pode ser vista na Figura 15. Esse fato pode ser considerado como um sinal de que a análise está coerente com a realidade.



Figura 15. Imagem do acoplamento polimérico após ensaio de torção.

De qualquer forma, pôde-se observar um desvio de 13% no deslocamento quando comparados teste experimental e simulação virtual. Alguns fatores não controlados por esse método podem ter gerado esse desvio, um exemplo é o atrito gerado entre os componentes metálicos e o acoplamento polimérico ou pequenas diferenças de temperaturas, pois o programa de elementos finitos baseia seus cálculos pelas curvas geradas pelos testes de tração e compressão.

Uma alternativa para melhorar a qualidade dos resultados da simulação virtual é fazer um estudo para refinar a malha do modelo aqui em questão. Em materiais metálicos o refino da malha têm pouca influência sobre os resultados de deslocamento, pois esses apresentam uma rigidez constante durante toda a sua deformação, fato esse que não acontece na análise de materiais poliméricos. Erros de deformação nos elementos em materiais poliméricos têm influência direta sobre a rigidez do material podendo assim alterar os resultados de deslocamento da junta drasticamente.

## 5 CONCLUSÃO

O procedimento utilizado que consiste em se obter as curvas de tensão x deformação do material nas condições trativas e compressivas foi capaz de descrever o comportamento do POM Ultraform<sup>®</sup> N2640-Z4 com diferentes tipos de carregamentos para o caso de uma junta de aplicação automotiva.

Com os resultados obtidos nesses ensaios foi possível obter as propriedades mecânicas do material e usá-las como dados de entrada no programa de elementos finitos para análise da tensão e do deslocamento.

O critério de escoamento utilizado no programa de elementos finitos também foi positivo para a obtenção de resultados coerentes visto que esse critério utiliza as propriedades trativas e compressivas do material para o cálculo da tensão.

A metodologia apresentada mostrou-se de grande importância para o desenvolvimento de novos produtos automotivos complexos, leves e de alta performance utilizando-se a combinação de metais e materiais poliméricos.

## REFERÊNCIAS

- 1 Campusplastics disponível em: <<http://www.campusplastics.com/>> acesso em 02/09/2011
- 2 NORMA TÉCNICA – ASTM D638-10, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
- 3 NORMA TÉCNICA – ASTM D695-10, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics
- 4 PERMAS. Handbook of training. Material Nonlinear Analysis – Stuttgart, maio. 2011.
- 5 PERMAS – UM550\_V13 Example manuals – Chapter 5.2 Overview of Material Nonlinear Analysis – Stuttgart, 2010
- 6 CADDELL, R.M. , RAGHAVA, R.S., ATKINS, A.G. Pressure dependent yield criteria for polymers. In: Materials Science and Engineering, Volume 13, Issue 2, February 1974, Pages 113 - 120
- 7 ARRIAGA, A., LAZKANO, J.M., PAGALDAI, R., ZALDUA, A.M., HERNADEZ, R., ATXURRA, R., CHRYSOSTOMOU, A. Finite-element analysis of quasi-static characterisation tests in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with ANSYS. Polymer Testing (2006)  
doi:10.1016/j.polymeresting.2006.10.012