

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo de um modelo para material compósito hiperelástico a partir das propriedades dos materiais-bases, suas frações volumétricas e orientações de suas fibras

por

Lucas Batista Kaiser

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2016

Análise de um modelo hiperelástico para um material compósito a partir das propriedades de seus materiais bases, suas frações volumétricas e orientações de suas fibras

por

Lucas Batista Kaiser

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Rogério José Marczak

Comissão de Avaliação:

Prof. Herbert Martins Gomes

Prof. Ignácio Iturrioz

Prof. Rodrigo Rossi

Porto Alegre, junho de 2016.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Marlise, por toda uma vida de incentivo, amor e carinho.

Ao meu pai Eduardo, à Andreza, e aos meus irmãos que, tirando a Duda, sempre confiaram e acreditaram em mim.

Aos meus avós maternos e paternos, que a 7 anos me perguntam quando vai ser minha formatura. Vai ser daqui a pouco, prometo!! Hahaha.

À minha namorada Vitória, porque se eu não faço este agradecimento à ela provavelmente ficaria solteiro. Brincadeira, eu te agradeço pois nesses últimos 5 meses, foi a minha bisca quem mais me incentivou, cobrou e me forçou a acabar este TCC.

Agradeceria ao meu colega Knak, mas ele provavelmente estará muito cansado e nem lerá esses agradecimentos.

Agradeço ao meu orientador Rato, por acreditar na ideia, e por me guiar nas horas em que eu estava perdido durante as fases deste trabalho.

Ao técnico do GMAP Rodrigo, pelas várias ajudas durante as fases iniciais deste trabalho.

Por fim, agradeço ao Leonardo, Igor, Ricardo, e a todo mundo que de alguma forma me ajudou a concluir este trabalho.

KAISER, L. B., **Estudo de um modelo para material compósito hiperelástico a partir das propriedades dos materiais-bases, suas frações volumétricas e orientações de suas fibras**. 2016. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

Utilizando-se um material encontrado na indústria, formado por uma matriz elastomérica com dupla orientação de fibras de náilon, foi feito um estudo de seu comportamento mecânico, bem como de seus constituintes para avaliar se a teoria de misturas poderia ser aplicada ao compósito. Foram realizados ensaios mecânicos de tração em corpos de prova do compósito nos ângulos de fibra de -33° , 0° e 57° , bem como individualmente no elastômero e nas fibras de náilon. Também foi feito um estudo em sua anisotropia e proposto um modo de relacionar as constantes das equações de energia de deformação com as constantes dos ensaios nas diferentes orientações do compósito. Os resultados apontam para a impossibilidade do uso da fração volumétrica para caracterizar o compósito estudado. O modelo de Yeoh modificado para acomodar anisotropia mostrou bons resultados, mas o de Ogden não.

PALAVRAS-CHAVE: Compósito, hiperelasticidade, anisotropia, frações de volume, teoria de misturas.

KAISER, L. B., **Study of a model for hyperelastic composite material from the base-material properties, their volume fraction and orientation of fibers**. 2016. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

Departing from a material used in industry, formed by an elastomeric matrix reinforced with nylon fibers, a study of the mechanical behavior of the composite was carried out to check if the rule of mixtures could be used to characterize the material. Tensile testing were carried out for the matrix material, the fiber material, as well as the composite material at -33°, 0° and 57°. An attempt to relate the constitutive constants of the strain energy function to the anisotropy of the composite was made. Results showed that the rule of mixtures cannot be used for the intended purpose. The constitutive model of Yeoh was successfully modified to capture the anisotropy, but the Odgen model modified in the same way failed.

KEYWORDS: Composite materials, hyperelasticity, anisotropy, volume fraction, rule of mixtures.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	2
3	METODOLOGIA	2
3.1	Testes experimentais.....	2
3.2	Fração de Volume.....	4
3.3	Obtenção das curvas e constantes.....	4
3.4	Regra da Mistura.....	6
3.4.1	Yeoh 2 termos.....	6
3.4.2	Ogden 2 termos.....	7
3.5	Anisotropia.....	7
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	8
4.1	REGRA DA MISTURA.....	8
4.2	ANISOTROPIA.....	8
4.3	FALHA DOS CORPOS DE PROVA DE -33° E 57°.....	9
5.	CONCLUSÕES	10
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	11
	Apêndice I	12

1. INTRODUÇÃO

A indústria está cada vez mais buscando respostas de problemas em materiais compósitos, já que é possível combinar diferentes propriedades de materiais homogêneos em um único componente estrutural (Pascon, 2012).

Dentre os compósitos, existem os conhecidos como os reforçados com fibras, que, segundo Callister 2005, são os mais importantes tecnologicamente, já que possuem inúmeras aplicações em diversas áreas da indústria.

Com as diversas composições, propriedades, e formas que um compósito pode assumir, é de grande importância se ter alguma forma de quantificar suas propriedades finais de acordo com seus materiais bases e suas frações volumétricas, e é isso que a teoria de mistura propõe. Conhecer o comportamento mecânico dos constituintes do compósito é essencial para a compreensão de estruturas reforçadas por fibras (Jones, 1999).

Este trabalho estuda as propriedades de um material compósito usado na fabricação de molas pneumáticas Figura 1.1. As molas pneumáticas são muito utilizadas na indústria como isoladores de vibração e choques, e nos meios de transportes, sendo os veículos pesados, como ônibus e caminhões, seu maior mercado (Paez, 2009).



Figura 1.1 – Mola pneumática em uma cabine de caminhão

O material é composto por uma matriz elastomérica reforçada por uma dupla orientação de fibras de náilon como mostra a Figuras 1.2, então para o estudo deste compósito, é necessário tratar de hiperelasticidade e anisotropia.

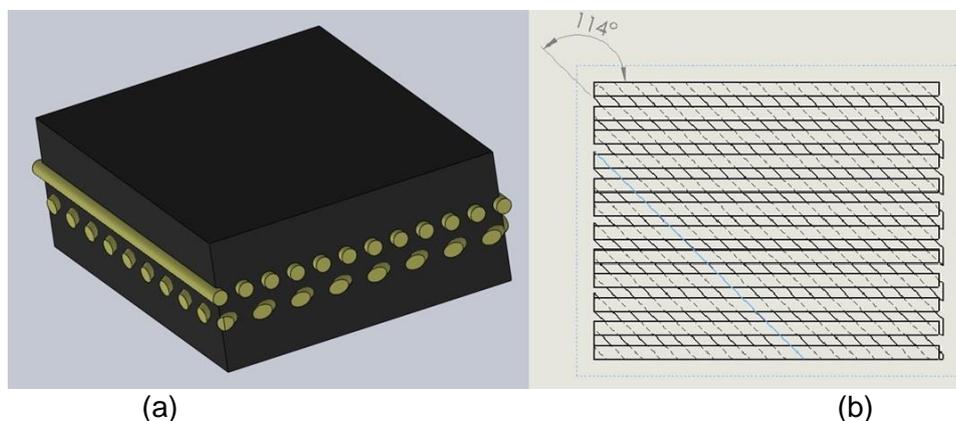


Figura 1.2 – Ilustração do compósito feito em CAD. Em (a) uma vista em 3D do compósito, e em (b) a vista superior de suas fibras.

2. OBJETIVOS

Esse trabalho pode ser dividido em dois objetivos principais, um envolvendo a regra da mistura, e outro o problema de anisotropia do compósito.

Em relação à regra da mistura, o objetivo é mostrar se é possível utilizar as frações volumétricas dos constituintes de um compósito para compor uma energia de deformação que possa ser usada para o material em questão. Assim, será feito o cálculo de suas frações volumétricas, ensaios de tração no compósito e em seus materiais base, a calibração das constantes dos modelos hiperelásticos e finalmente a aplicação da regra da mistura.

Em relação a anisotropia do compósito, será proposto uma forma de equacionar os modelos de hiperelasticidade, levando em conta a anisotropia causada pela orientação das fibra. Para isso, será proposto substituir as constantes dos modelos hiperelásticos por polinômios de segundo grau dependentes da orientação da fibra e então testar sua funcionalidade.

3. METODOLOGIA

3.1 Testes experimentais

Todos os ensaios de tração foram realizados nas dependências do Grupo de Mecânica Aplicada (GMAP) da UFRGS, à uma temperatura ambiente de 23°, na máquina de ensaios WDW 100 – Time Group, equipada com uma célula de carga de 100kN. Os corpos de prova foram feitos manualmente utilizando um estilete como mostra a Figura 3.1, e suas geometrias foram medidas utilizando um paquímetro universal. O valor utilizado para os cálculos são as médias das medidas.

Os corpos de provas foram divididos em 5 categorias, que são: cordonéis de náilon (fibra), borracha vulcanizada, compósito alinhado à fibra, compósito à -33° da fibra e compósito à 57° da fibra. A escolha dos ângulos das fibras para os ensaios se deve ao ângulo médio entre fibras de acordo com a geometria das fibras no compósito. Para cada categoria foram feitos 3 corpos de prova, logo, 3 ensaios mecânicos. Por se ter uma limitação de materia prima para confecção dos corpos de prova, e sendo sua confecção de modo manual, a geometria dos mesmos não seguiu a rigor nenhuma norma existente, porém foi utilizado o formato dos corpos de prova comumente usados.



Figura 3.1 – Corpos de prova feitos e ensaiados no GMAP. Da esquerda pra direita se encontram os 3 corpos de prova da categoria 0°, os 3 do meio são os da categoria -33° e os 3 últimos os da categoria 57°.

Para o teste dos cordonéis de náilon, foram utilizados dois cilindros onde foram enrolados e colados os cordonéis, e os cilindros fixados nas garras da maquina de tração. Todos os ensaios foram realizados até a ruptura do corpo de prova. Para os ensaios foi aplicado uma velocidade constante de 50 mm/s, e os dados coletados foram o deslocamento e força. Os gráficos da Figura 3.2 ilustram os diagramas tensão e deformação obtidos. Observa-

se nos ensaios dos cordonéis de náilon pequenos escorregamentos do cordonél, obrigado à realização de uma filtragem dos dados a fim de remover esse efeito.

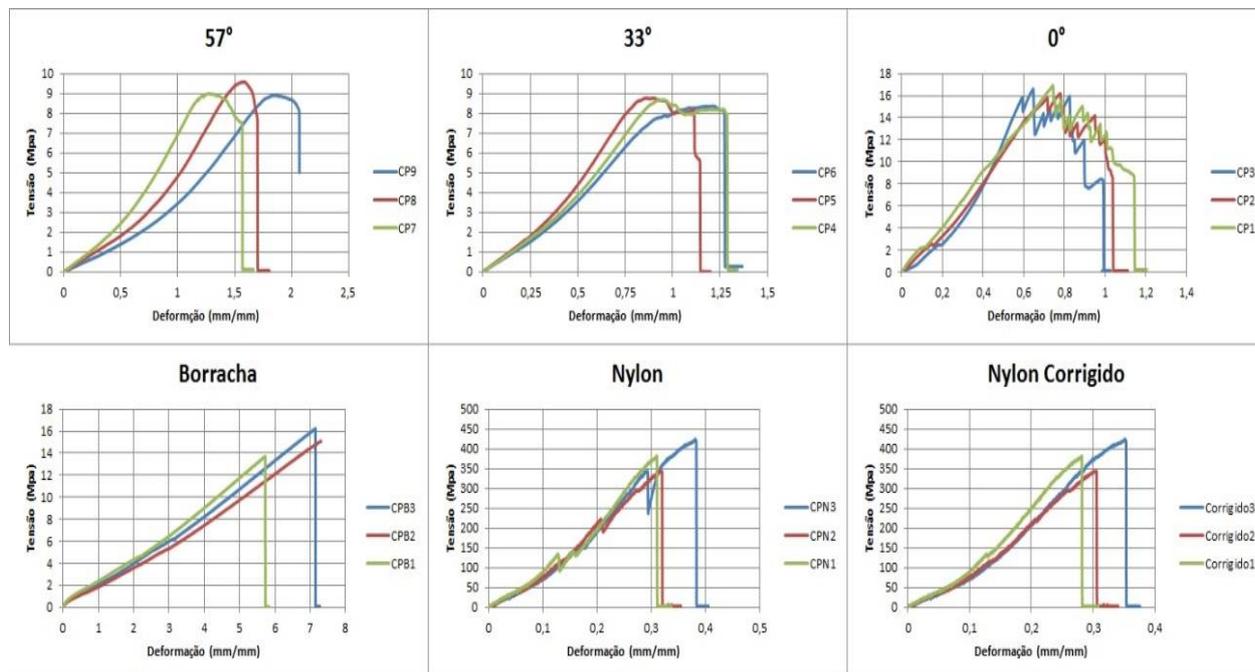


Figura 3.2 – Curvas de tensão por deformação de todos os corpos de prova ensaiados, e ainda a correção dos ensaios do náilon.

3.2 Fração de volume

Para o cálculo da fração de volume utilizou-se uma foto real do compósito em um plano perpendicular às fibras, como plano de fundo em um software CAD, e com o recurso de linhas poligonais foi traçado o perímetro do compósito e das fibras. Em seguida, utilizou-se o comando de cálculo de área para as fibras, e depois para toda a seção de compósito como mostra a Figura 3.3

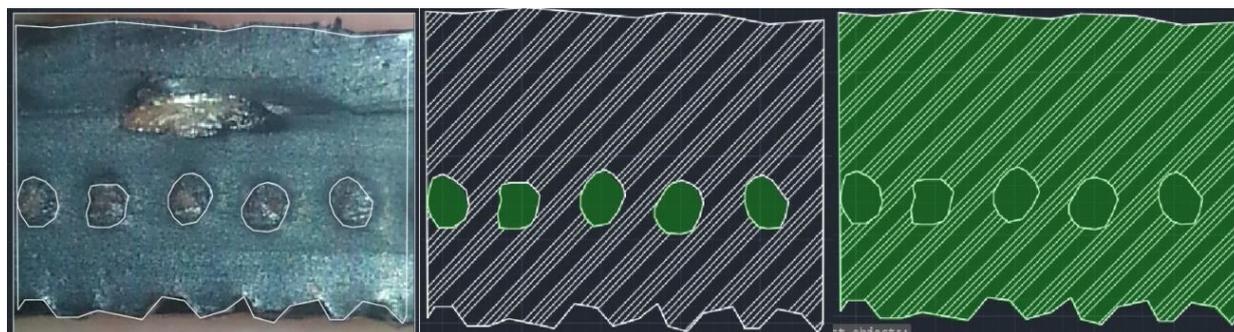


Figura 3.3 – A primeira imagem é a foto da espessura do compósito com uma camada de fibras perpendicular ao plano, no centro o cálculo da área de uma camada de fibra, e a esquerda o cálculo da área de toda a espessura.

Assim, calculou-se as frações de volumes para as fibras e para a matriz elastomérica usando:

$$v_f = \frac{2A_f}{A_t} \quad (3.1)$$

$$v_m = 1 - v_f \quad (3.2)$$

onde v_f é a fração volumétrica da fibra, v_m é a fração volumétrica da matriz (borracha), A_f é a área da seção transversal de uma camada de fibra, A_t é a área total da seção transversal. Não se utilizou valores em escala no desenho por se necessitar apenas das frações volumétricas dos constituintes. Para o cálculo de v_f utilizou-se duas vezes o valor da área transversal da fibra pelo fato do compósito ter duas camadas de fibra.

Os valores encontrados para área da fibra e para a área total foram de 3293 mm² e 45416 mm² respectivamente, encontrando assim as frações volumétricas de 0,145 para as fibras e 0,855 para a matriz.

3.3 Obtenção das curvas e constantes

Após uma análise visual, os resultados dos corpos de prova da Figura 3.2 se mostraram coerentes, então para cada categoria (náilon, borracha, 0°, -33° e 57°) foram adotados os dados de um corpo de prova como padrão, o qual melhor representaria uma média entre eles, e destes dados foram feitas todos os demais estudos do trabalho. Os dados escolhidos para cada categoria foram Cp₁ para 0°, Cp₄ para -33°, Cp₈ para 57°, Cpb₂ para borracha e Cpn₂ para o náilon que são mostrados em mesma escala na figura 3.4. Se observa ainda na Figura 3.2, no gráfico dos corpos de prova à 0° os vários picos e quedas de tensão com o aumento da deformação. Cada queda representa a falha de uma fibra alinhada ao esforço. Para Cp₁, foram utilizados todos os dados até a falha da primeira fibra. Para o Cp₄ e Cp₈ foram utilizados os dados até seus máximos valores de tensão. Para o Cpn₂ foram utilizados os dados corrigidos do escorregamento e para o Cpb₂ foram utilizados todos os pontos.



Figura 3.4 – Curvas de tensão x deformação dos corpos de prova escolhidos como padrão.

Por se tratarem de materiais hiperelásticos, foi usado o programa HyperFit 2.12, desenvolvido no GMAP/UFRGS para encontrar as constantes dos modelos, bem como os gráficos das curvas de tensão por deformação para o caso de tração uniaxial, e também a predição para os casos de cisalhamento puro e tração biaxial. Para esse trabalho foram escolhidos diversos modelos hiperelásticos para, assim, poder escolher os modelos que melhor representariam o problema real.

Na escolha dos modelos, se decidiu utilizar alguns dos conceituados e conhecidos modelos de hiperelasticidade no âmbito acadêmico. Os modelos escolhidos foram: Mooney-Rivlin de 2, 3 e 5 termos (Rivlin e Saunders, 1951), Ogden de 2 e 3 termos (Ogden, 1972),

polinomial, Yeoh de 2, 3 e 5 termos (Yeoh, 1990) e Hoss-Marczak (Hoss, 2009). Para todos os cálculos utilizou-se a hipótese de material isotrópico e incompressível.

O critério de escolha dos melhores modelos foi os que melhor representavam os dados experimentais, e também os que tinham uma predição das curvas de cisalhamento puro e tração biaxial condizentes com o esperado e já observados na literatura, pois não se dispunha desses resultados para o composto em questão. Espera-se encontrar um ajuste onde a curva de tração biaxial se encontre acima da curva de cisalhamento puro e esta, por sua vez, ligeiramente acima da curva de tração uniaxial (Marczak, 2006).

Os modelos que melhor representaram o problema foram o modelo de Ogden de 2 termos e o modelo de Yeoh de 2 termos, como pode ser visto na Figura 3.5 e Figura 3.6. Suas constantes são mostradas na Tabelas 3.1 e Tabela 3.2.

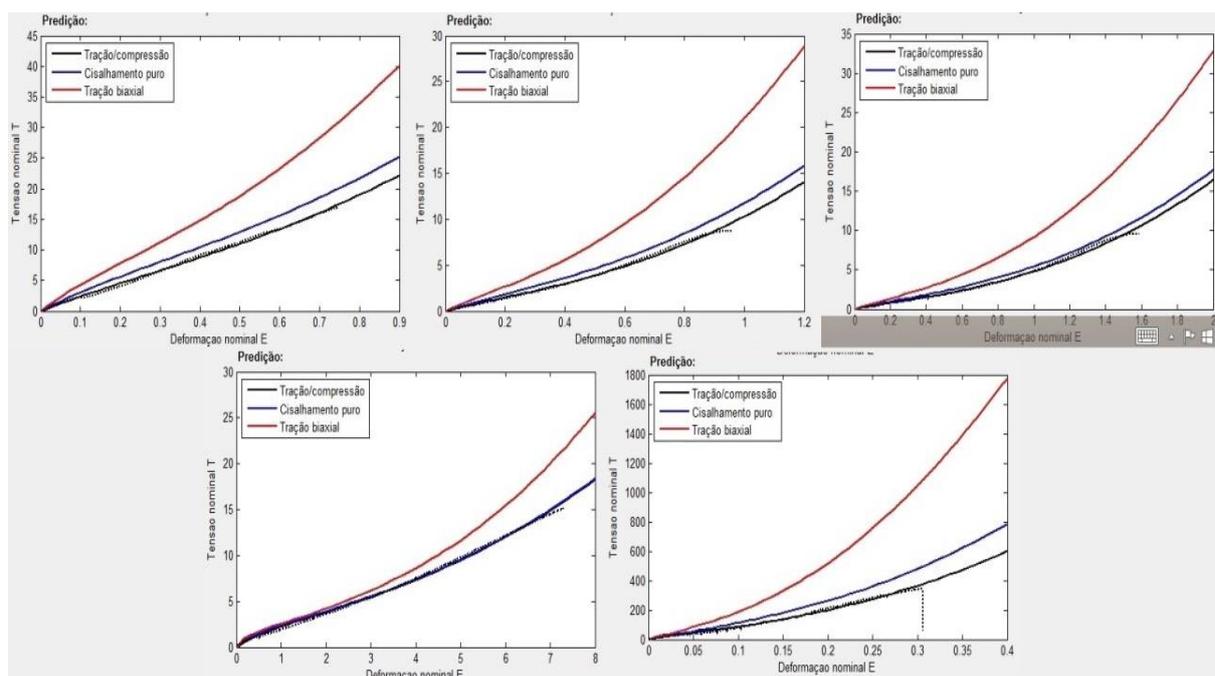


Figura 3.5 – Modelo de Yeoh de 2 termos. Da esquerda para a direita. C_{p1} , C_{p4} , C_{p8} , borracha e náilon, onde a curva vermelha, azul e preta são as predições para tração biaxial, cisalhamento puro e tração uniaxial respectivamente. Os pontilhados são os dados reais.

Tabela 3.1 – Constantes dos modelos de Yeoh e Ogden

Yeoh 2 termos					
	C_{p1} (0°)	C_{p4} (-33°)	C_{p8} (57°)	C_{pb2}	C_{pn2}
C_{10}	4,335784E+00	1,387484E+00	7,394567E-01	6,259670E-01	1,437830E+02
C_{20}	7,505765E-01	3,895351E-01	1,580450E-01	2,496500E-03	2,495217E+02
Ogden 2 termos					
	C_{p1}	C_{p4}	C_{p8}	C_{pb2}	C_{pn2}
μ_1	2,461740E+02	2,312917E+02	3,842997E+02	1,131383E-03	3,380141E-03
α_1	4,904152E+00	3,674730E-03	1,941440E-03	1,302865E+02	9,656219E+04
μ_2	-2,424932E+02	9,827891E-01	4,871401E-01	2,434292E+00	1,168559E+01
α_2	4,916644E+00	4,344902E+00	4,193346E+00	7,368412E-01	1,772959E+01

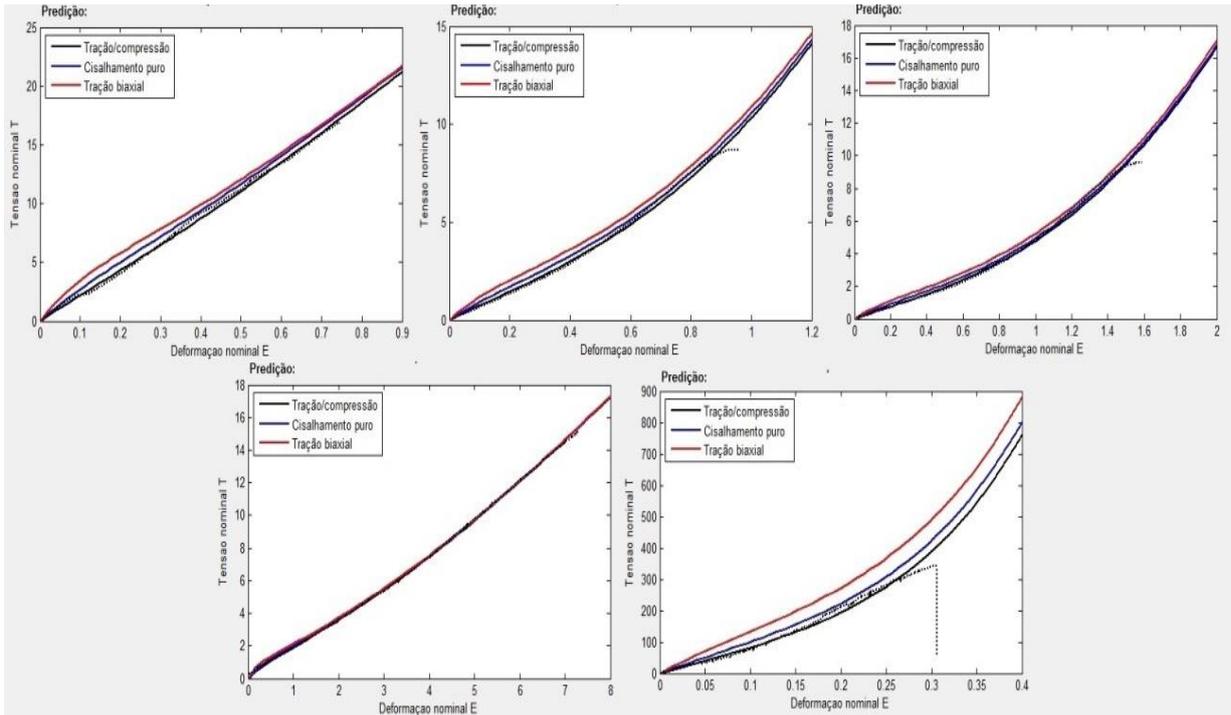


Figura 3.6 - Modelo de Ogden de 2 termos. Da esquerda para a direita. Cp_1 , Cp_4 , Cp_8 , borracha e náilon, onde a curva vermelha, azul e preta são as previsões para tração biaxial, cisalhamento puro e tração uniaxial respectivamente. Os pontilhados são os dados reais.

3.4 Fração de volume

Pela teoria da regra da mistura, pode-se relacionar propriedades mecânicas do compósito com as propriedades dos seus constituintes e suas frações de volume [Agarwal e Broutman (1990)]. Neste trabalho, usou-se as frações de volume nas equações de energia de deformações dos modelos escolhidos (Ogden 2 termos e Yeoh 2 termos), e comparou-se com a curva real do compósito na configuração de fibras à 0° , para assim, testar a funcionalidade desta teoria para este compósito em estudo.

3.4.1 Yeoh 2 termos

O modelo de Yeoh é baseado apenas no 1° invariante de deformação e sua equação da energia de deformação no caso incompressível é dada por:

$$W = \sum_{i=1}^2 [C_{i0}(I_1 - 3)^i] \quad (3.3)$$

onde W é a energia de deformação do corpo, I_1 é o primeiro invariante de deformação, C_{10} e C_{20} as constantes do modelo.

Adicionando as frações volumétricas à energia de deformação de Yeoh obtém-se a seguinte equação:

$$W = v_m \left[\sum_{i=1}^2 [C_{i0m}(I_1 - 3)^i] \right] + v_f \left[\sum_{i=1}^2 [C_{i0f}(I_1 - 3)^i] \right] \quad (3.4)$$

sendo v_m e v_f as frações volumétricas da matriz e das fibras respectivamente, C_{10m} e C_{20m} as constantes da borracha e C_{10f} e C_{20f} as constantes do náilon.

3.4.2 Ogden 2 termos

O modelo de Ogden é baseado nas deformações principais e sua equação da energia de deformação no caso incompressível é dada por:

$$W = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + (\lambda_1 \lambda_2)^{-\alpha_i} - 3) \right) \quad (3.5)$$

e simplificando-a para o caso de tração uniaxial:

$$W = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda^{\alpha_i} + 2\lambda^{-\frac{\alpha_i}{2}} - 3) \right) \quad (3.6)$$

onde λ é o alongamento, e $\mu_1, \alpha_1, \mu_2, \alpha_2$, são as constantes do modelo.

Adicionando as frações volumétricas à energia de deformação de Ogden obtém-se a seguinte equação:

$$W = v_m \left[\sum_{i=1}^2 \left(\frac{\mu_{im}}{\alpha_{im}} (\lambda^{\alpha_{im}} + 2\lambda^{-\frac{\alpha_{im}}{2}} - 3) \right) \right] + v_f \left[\sum_{i=1}^2 \left(\frac{\mu_{if}}{\alpha_{if}} (\lambda^{\alpha_{if}} + 2\lambda^{-\frac{\alpha_{if}}{2}} - 3) \right) \right] \quad (3.7)$$

sendo v_m e v_f as frações volumétricas da matriz e das fibras respectivamente, $\mu_{1m}, \alpha_{1m}, \mu_{2m}, \alpha_{2m}$ as constantes da borracha e $\mu_{1f}, \alpha_{1f}, \mu_{2f}, \alpha_{2f}$ as constantes do náilon.

3.5 Anisotropia

A orientação das fibras de náilon do material em estudo causa uma anisotropia muito marcante e seu cálculo é extremamente complicado. Neste trabalho, foi proposto substituir as constantes dos modelos hiperelásticos por uma equação de segundo grau em função do ângulo de orientação da fibra. Para isso, pegou-se as constantes encontradas para o compósito (C_{p1} , C_{p4} e C_{p8}) e plotou-se um gráfico em função de seus ângulos com a fibra, para então se obter a equação de segundo grau que passa por esses três pontos. Com isso, espera-se encontrar uma possível forma de calcular as tensões e deformações do compósito levando em conta a anisotropia do material usando apenas as constantes dos modelos de hiperelasticidade. Assim, é obtida uma energia de deformação que é função do ângulo da fibra e do 1º invariante para o modelo Yeoh ou alongamento no modelo Ogden.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Fração de volume

Utilizando as equações 3.4 e 3.7, substituindo o valor das frações volumétricas calculadas em 3.3 e 3.4, e substituindo as constantes de índice "m" pelas constantes de C_{pb2} e as constantes de índice "f" pelas constantes de C_{pn2} na Tabela 3.1, são obtidos os resultados ilustrados na Figura 4.1.

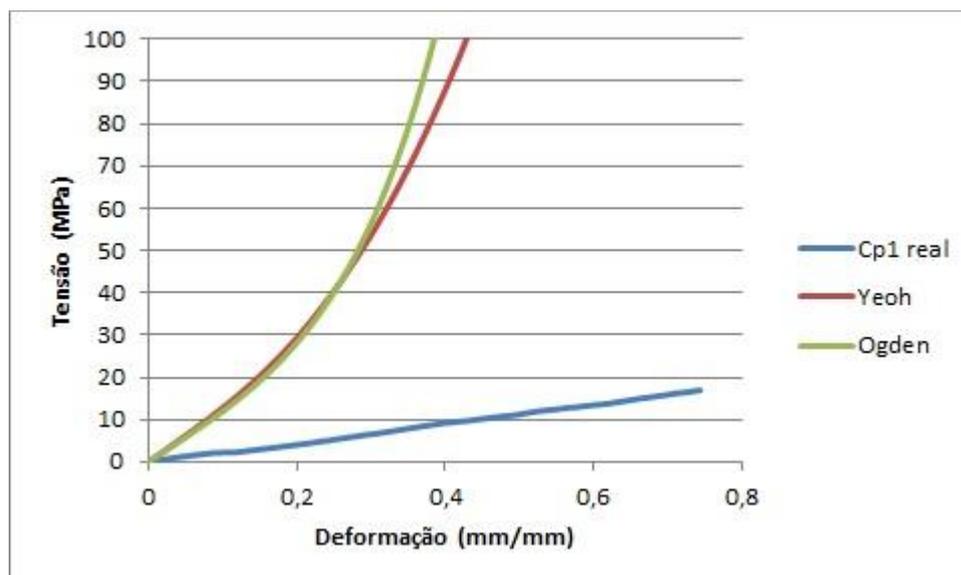


Figura 4.1 – Gráfico tensão x deformação de C_{p1} e das curvas teóricas calculadas com as frações de volume da borracha e do náilon.

Nota-se que em ambos os modelos, os valores obtidos fogem e muito dos valores encontrados experimentalmente de C_{p1} . Para buscar uma explicação, normalizamos todas as constantes de C_{pn2} pelo seu respectivo par de C_{pb2} , gerando os dados da Tabela 4.1

Tabela 4.1 – Razão das constantes do náilon pelas constantes da borracha.

	C_{10}	C_{20}	α_1	μ_1	α_2	μ_2
C_{pn2}/C_{pb2}	230	99949	2,99	741	4,80	24,1

Percebe-se que as constantes da fibra superam muito as constantes da matriz, em alguns casos supera com uma alta ordem de grandeza, sendo assim, mesmo com uma fração de volume pequena as altas constantes da fibra se sobrepuseram no cálculo da energia de deformação fazendo com que os valores encontrados extrapolassem os valores reais medidos do compósito.

4.2 Anisotropia

Para o cálculo das equações de segundo grau que substituirão as constantes dos modelos empregou-se as constantes de C_{p1} , C_{p4} , C_{p8} , e seus respectivos ângulos em relação a orientação da fibra, em radianos, obtendo-se assim, as equações listadas na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Equações de segundo grau para as constantes.

Equações das constantes em função do ângulo θ (rad)

$$C_{10}(\theta) = -5,5602\theta^2 + 1,9165\theta + 4,3358$$

$$C_{20}(\theta) = -0,7782\theta^2 + 0,1786\theta + 0,7586$$

$$\alpha_1(\theta) = -8,5537\theta^2 + 3,5818\theta + 4,9042$$

$$\mu_1(\theta) = 71,94\theta^2 + 67,274\theta + 246,17$$

$$\alpha_2(\theta) = -1,0948\theta^2 + 0,3621\theta + 4,9166$$

$$\mu_2(\theta) = 424,61\theta^2 - 178,18\theta - 242,49$$

Usando as equações da Tabela 4.2, calculou-se as constantes para os ângulos $-16,5^\circ$ e $28,5^\circ$ (valores escolhidos por serem a média entre -33° e 0° , e 0° e 57° , respectivamente), e gerando-se os gráficos de tensão x deformação da Figura 4.2:

Tabela 4.3 – Valores das constantes usando as equações de segundo grau

	C10	C20	$\alpha 1$	$\mu 1$	$\alpha 2$	$\mu 2$
-0,576 rad(-33°)	1,387	0,389	0,0037	231,29	4,345	0,983
-0,288 rad(-16,5°)	3,323	0,635	3,163	232,76	4,721	-155,96
0 rad(0°)	4,336	0,750	4,904	246,17	4,917	-242,49
0,497 rad(28,5°)	3,913	0,647	4,569	297,43	4,826	-226,06
0,995 rad(57°)	0,739	0,158	0,002	384,30	4,193	0,487

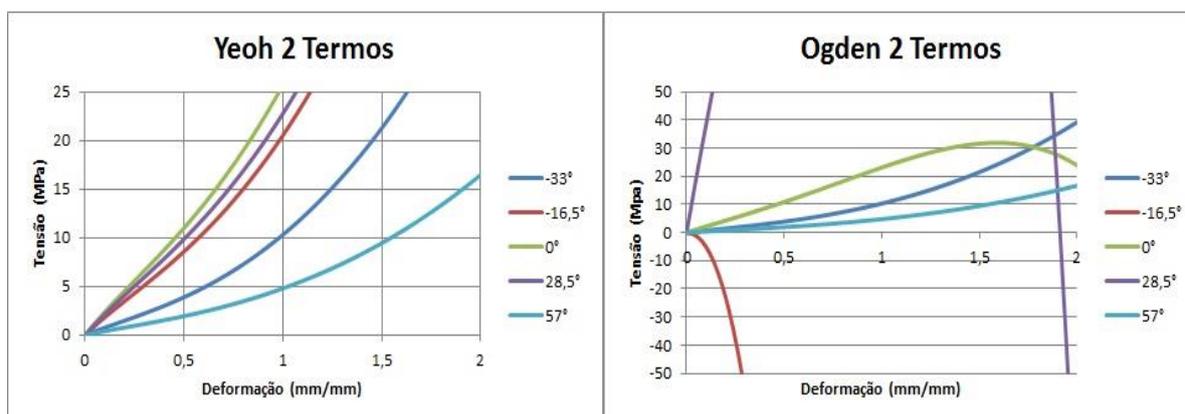


Figura 4.2 – Gráficos de tensão por deformação de Yeoh e Ogden usando as equações de segundo grau no lugar das constantes.

Percebe-se que as curvas encontradas para o modelo de Yeoh se encontraram na região esperada, que seria abaixo da curva de 0° e acima das curvas de -33° e 57°. Já para Ogden, percebe-se que essa teoria não funciona para nenhum dos dois ângulos testados, diferindo e muito das curvas esperadas. Isso provavelmente se deve ao fato de no modelo de Ogden existirem constantes em expoentes, causando uma excessiva sensibilidade das equações às constantes.

4.3 Falha dos Corpos de Prova de -33° e 57°

O princípio básico de um compósito é a união de dois materiais diferentes, criando assim, um terceiro material com propriedades mecânicas e químicas superiores às comparadas de seus materiais de origem. Porém, observa-se nos ensaios dos corpos de prova das categorias -33° e 57° uma tensão máxima menor que a tensão máxima da matriz elastômera. Para explicar tal fenômeno, como pode se observar na Figura 4.3, a falha de todos os corpos de prova nesses ângulos apresentaram a mesma forma em V, com ângulos de 66° na categoria de -33° e 114° para a categoria de 57°. Isto ocorre porque nestas configurações de fibras, elas acabam prejudicando a resistência do compósito e, por terem um pequeno diâmetro, as fibras acabam aplicando grandes pressões na matriz elastômera, cisalhando-as e provocando sua ruptura. Isto é, o reforço acaba atuando como uma aresta de corte dentro da borracha, o que explica sua resistência menor que a própria borracha.



Figura 4.3 – Foto da forma da falha dos corpos de prova das categorias -33° e 57° após o ensaio de tração.

5. CONCLUSÕES

O uso das frações volumétricas diretamente nos modelos de energia de deformação dos constituintes do compósito mostrou-se um método ineficaz para se obter a resposta de tensão. Isto se deve provavelmente à grande diferença entre as propriedades mecânicas da matriz e da fibra, ou ainda por sua diferente geometria de fibras.

O uso das equações quadráticas para interpolar o ângulo de orientação do reforço nas constantes constitutivas apresentou bons resultados para o modelo de Yeoh, porém sua aplicação é muito restrita por apresentar grandes simplificações e funcionaria apenas para a faixa de estudo analisada, que vai de -33° até 57° . Porém, para o modelo de Ogden, as equações quadráticas divergiram muito do resultado esperado. Isto se deve ao fato de nele existirem constantes em expoentes, tornando as equações instáveis para certas faixas de valores dessas constantes. Interpolações de constantes hiperelásticas em função de outras variáveis (temperatura, ângulo de anisotropia, etc) já se mostrou eficiente em algumas aplicações. O método tem potencial para ser mais investigado no caso de anisotropia também.

Uma possível melhoria desta metodologia seria aumentar o número de testes experimentais para diferentes ângulos, assim como aumentar o grau do polinômio das constantes para aumentar sua flexibilidade, bem como aumentar seu alcance angular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, B. D., BROUTMAN, L. J., CHANDRASHEKHARA, K. **“Analysis and Performance of Fiber Composites”**, third ed., Wiley Publicarion 2006.

CALLISTER, W. D., **“Fundamentals of Materials Science and Engineering: An integrate Approach.”** Second edition, 2005.

HOSS, L. **“Modelos Constitutivos Hiperelásticos para Elastômeros Imcompressíveis.”** PROMEC. Rio Grande do Sul 2009

JONES, R., **“Mechanics of Composite Materials”**, second edition, 1999

MARCZAK, R., HOSS, L., GHELLER, J. J., **“Caracterização de Elastômeros para Simulação Numérica.”** Centro Tecnológico de Polímeros SENAI, São Leopoldo – RS 2006

OGDEN, R. W. **“Large deformation isotropic elasticity – on the correlation of theory and experiment for compressible rubberlike solids.”** 1972

PAEZ, L. A. D., **“Aplicabilidade de molas pneumáticas na indústria e projeto básico de um acoplador pneumático.”** São Paulo, 2009

PASCON, J. P., **“Sobre modelos constitutivos não lineares para materiais com gradação funcional exibindo grandes deformações: implementação numérica em formulação não linear geométrica.”** Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

RIVLIN, R.S, SAUNDERS, D.W., **“Large Elastic Deformation of Isotropic Materials. Part 7: Experiments of the Deformation of Rubber.”** 1951

YEOH, O.H. **“Characterization of properties of Carbon-Black-Filled Rubber Vulcanizates.”** 1990

APÊNDICE I

Esse apêndice contém as previsões para análise visual das curvas de cisalhamento puro e tração biaxial realizados no Hyperfit 2.12 dos modelos que não alcançaram os pré-requisitos para continuação do trabalho.

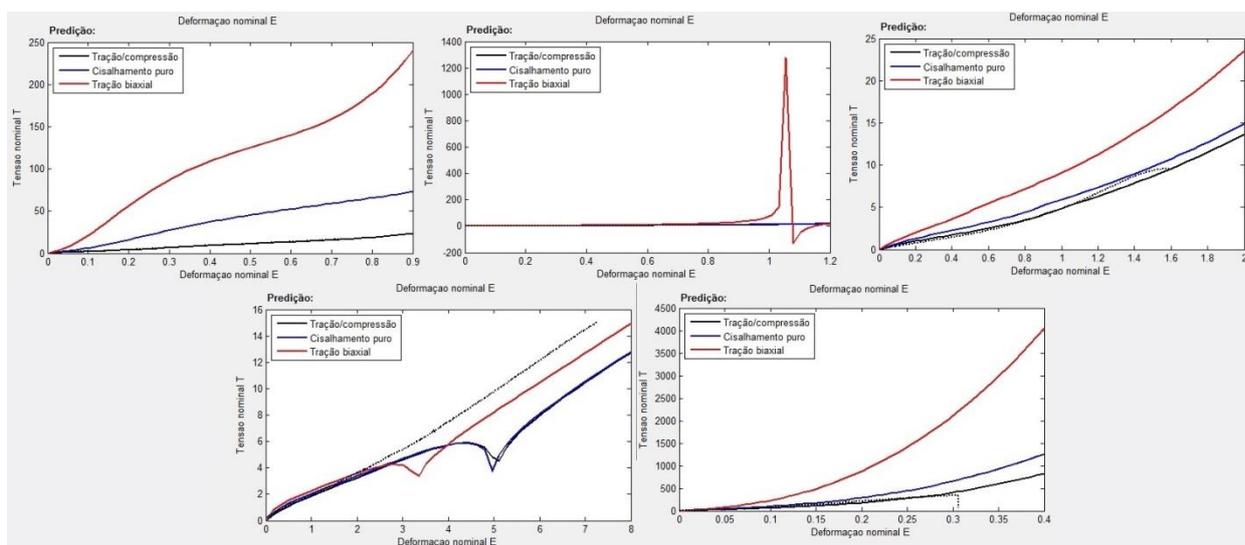


Figura I.1 – Predição do modelo Hoss-Marczak

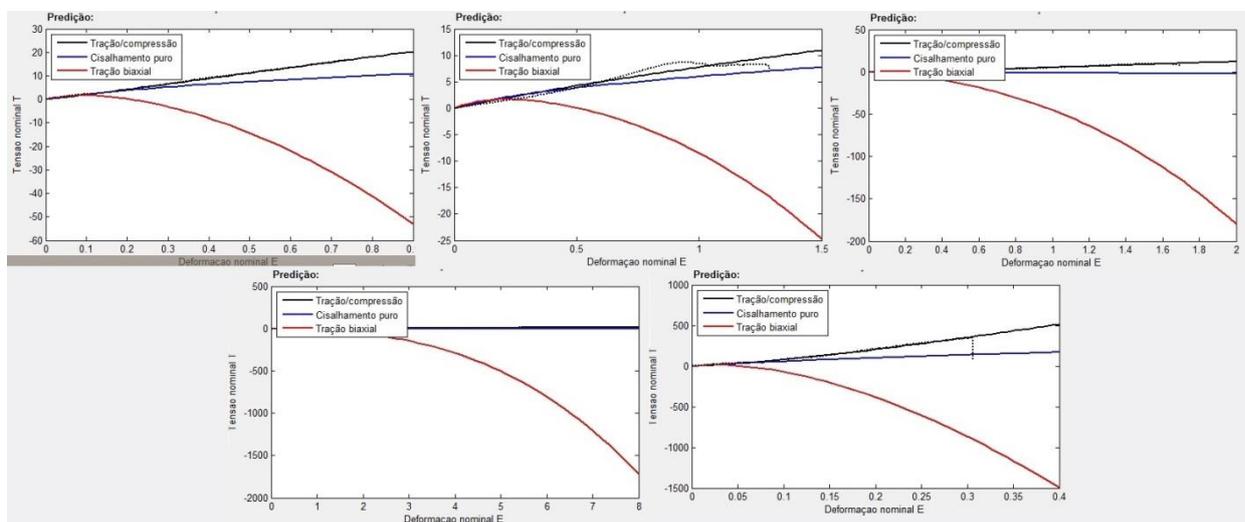


Figura I.2 – Predição do modelo Mooney-Rivlin 2 termos

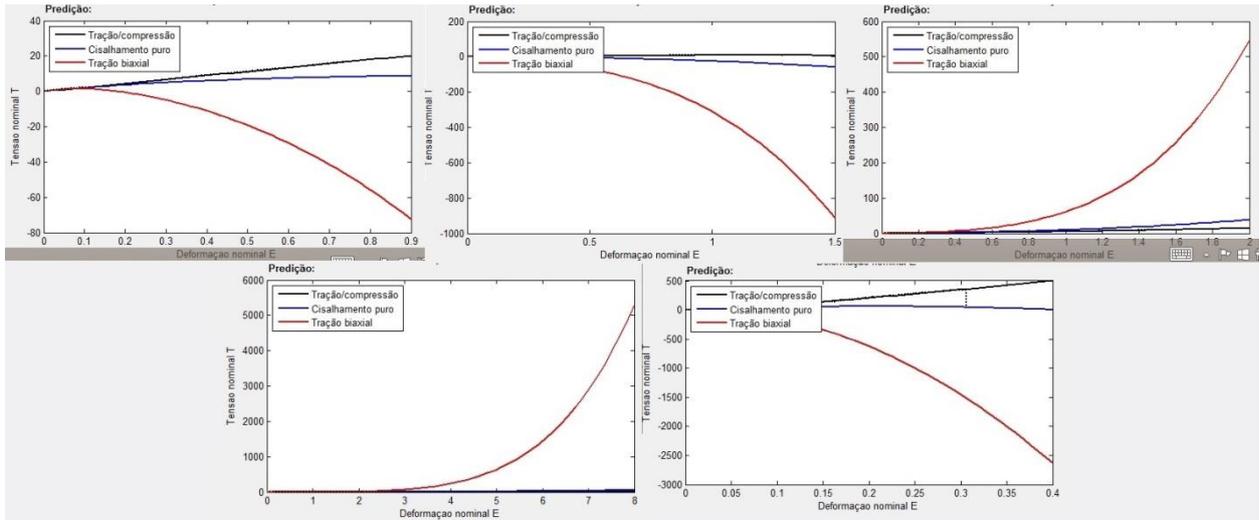


Figura I.3 – Predição do modelo Mooney-Rivlin 3 termos

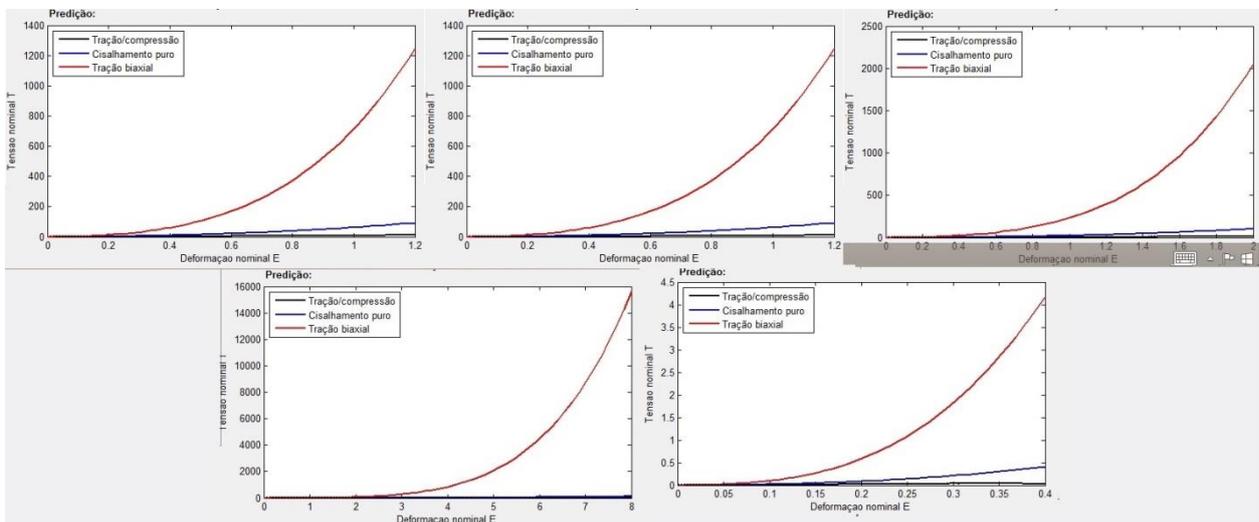


Figura I.4 – Predição do modelo Mooney-Rivlin 5 termos

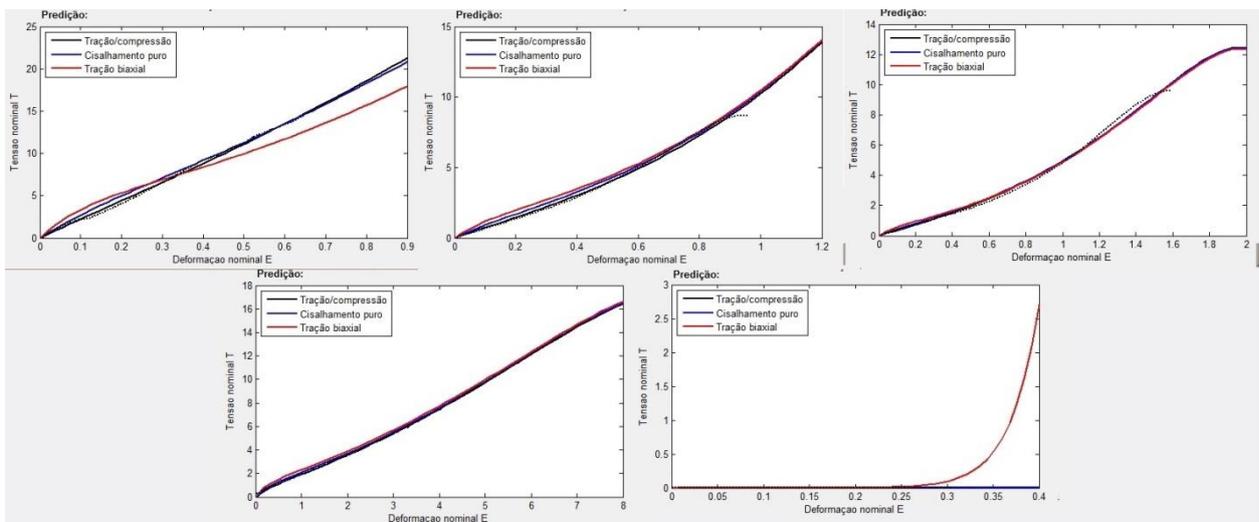


Figura I.5 – Predição do modelo Ogden 3 termos

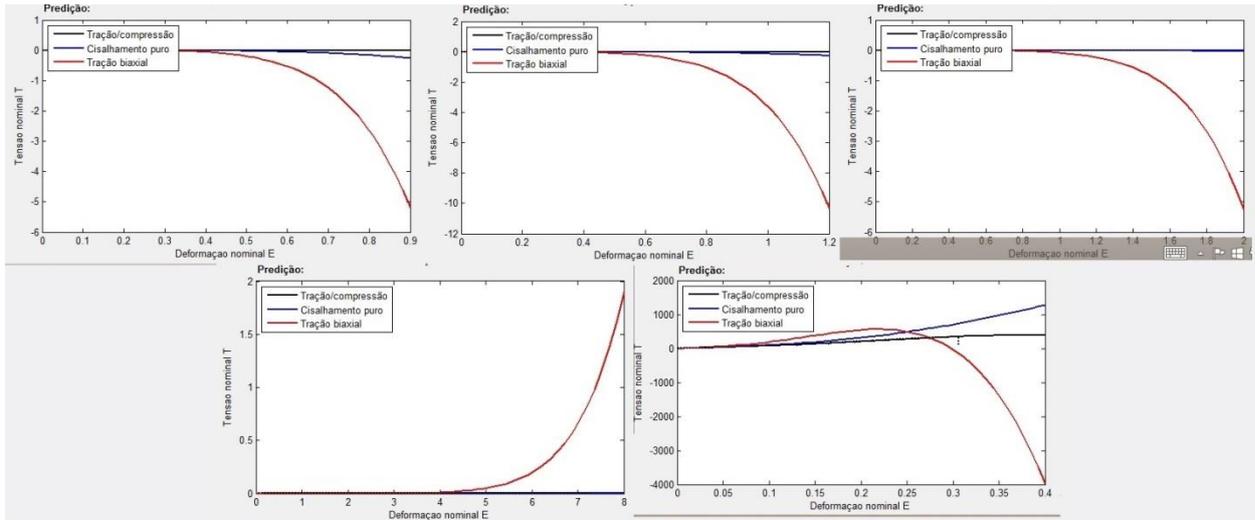


Figura I.6 – Predição do modelo polinomial

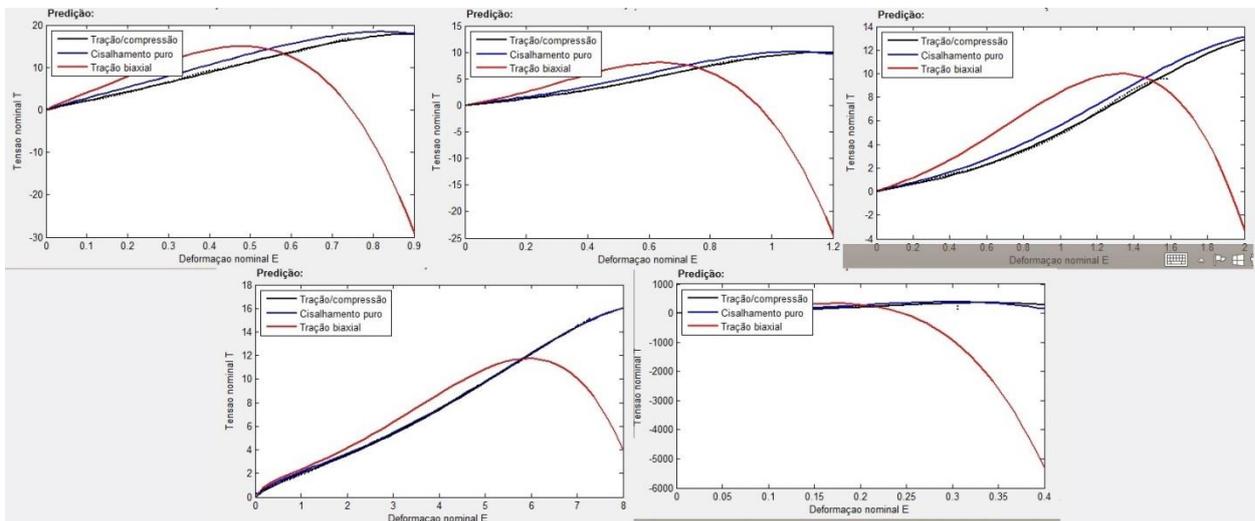


Figura I.7 – Predição do modelo Yeoh 3 termos

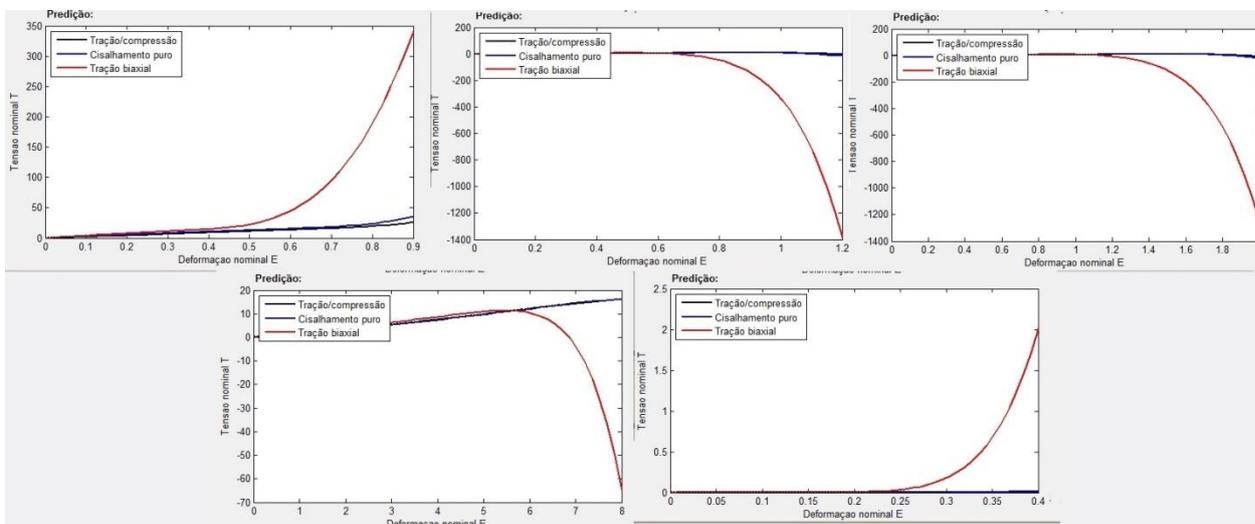


Figura I.3 – Predição do modelo Yeoh 5 termos