



ESTUDO COMPARATIVO DAS METODOLOGIAS DE ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE UM MATERIAL CLADEADO

Bruna C. do Nascimento

Priscila M. Godinho

José Rubens G. Carneiro

Pedro P. Brito

Pedro A. A. M. Junior

brunacnascimento@outlook.com

priscila.m.godinho@gmail.com

joserub@pucminas.br

pbrito@pucminas.br

pamerico@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas

Avenida Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, 30535-901, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Resumo. Atualmente, com a necessidade de se aliar diferentes propriedades mecânicas que não são possíveis em um mesmo material, a indústria vem investindo no desenvolvimento de materiais compósitos, que consiste em dois materiais diferentes, sob os quais as propriedades mecânicas são projetadas para otimizar determinadas aplicações, diferentes daquelas de cada fase (material) agindo independentemente (BEIM, 2008). Dentre esta classe de compósito, destaca-se o material cladeado que tem sido utilizado nas indústrias petroquímicas a fim de aliar resistência à corrosão a melhoria da resistência mecânica (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1983). Assim, é de extrema importância a garantia que estes materiais não falhem em serviço e uma das ferramentas de análise estrutural que auxilia a assegurar que os parâmetros estruturais sejam atendidos é a simulação pelo MEF. Este trabalho simulou um ensaio de tração de um material cladeado modelado por duas metodologias diferentes e comparou os resultados obtidos nas simulações com as curvas reais obtidas nos ensaios físicos para determinação da melhor metodologia de modelagem destes materiais. No primeiro caso, os corpos de prova foram modelados utilizando-se elementos de casca para representar o revestimento e aplicando-se propriedade de materiais compósitos; no segundo, foram utilizados elementos de membrana para representação do revestimento do cladeado.

Keywords: Método dos Elementos Finitos (MEF), Cladeado, Revestimentos.

1 INTRODUÇÃO

Como alternativa à construção por aço inoxidável, que é oneroso à indústria, muitos equipamentos são construídos com materiais compósitos. Materiais compósitos são resultados da combinação de dois ou mais materiais distintos para formar um material de engenharia útil, conferindo novas propriedades que não se encontrariam nos materiais de forma isolada. O desenvolvimento dos materiais compósitos é motivado pela crescente severidade das condições de operação, especialmente no que se refere à necessidade de combinar propriedades incompatíveis entre si como, por exemplo, resistência mecânica e tenacidade. Uma classe de material compósito bastante utilizada é a dos compósitos bimetálicos, os quais são feitos, em sua maioria, com aço carbono ou aços de baixa liga, também chamados de metal base e o material de proteção, *clad*, em um ou em ambos os lados do metal base, resultando num revestimento de alta qualidade que oferece resistência mecânica exigida para material estrutural e resistência à corrosão do material de proteção (PEREIRA, 2005).

O objetivo de um projeto e fabricação adequado é assegurar que tais equipamentos possam exercer suas funções, sem risco considerável, submetidos aos carregamentos, temperaturas e pressões previstas. Para tanto, a análise de tensões pelo método dos elementos finitos é uma metodologia de alta tecnologia que auxilia no dimensionamento adequado de equipamentos, avaliando os pontos de tensão, tornando o projetista capaz de alterar o projeto, a fim de atender os requisitos especificados por normas.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta muito poderosa que deve ser aliada a uma modelagem criteriosa. Uma análise de qualidade exige que seja escolhida a metodologia adequada, tanto de condições de contorno (aplicações de cargas e restrições), quanto de preparação do modelo (escolha do material, simplificações geométricas coerentes, dentre outros) para que se tenha resultados mais próximos da realidade física.

Geralmente, existe mais de uma abordagem de modelagem para uma mesma situação em MEF, cabendo ao engenheiro analista realizar testes e identificar aquela que apresenta melhor resultado. Desta forma, este trabalho tem como objetivo principal apresentar modelos baseados no Método dos Elementos Finitos para estudo e simulação da influência de revestimentos em material cladeado para aplicações diversas. O trabalho foi realizado em duas etapas, sendo a primeira etapa experimental, em que foram ensaiados corpos de prova para levantamento de dados de propriedades mecânicas do material. Na segunda etapa, foram construídos modelos virtuais para simulação das mesmas condições dos ensaios a fim de confrontar resultados e validar as metodologias.

Tal estudo se mostra relevante para o conhecimento de modelagem por elementos finitos de componentes com material cladeado, a fim de se conhecer mais sobre as propriedades mecânicas deste tipo de revestimento e ampliar a sua utilização na indústria.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico será apresentada uma breve revisão dos principais assuntos constituintes deste trabalho. Inicialmente, será abordado o material cladeado, objeto principal deste trabalho, em seguida, serão expostos os principais pontos a serem considerados em se tratando de análises e simulações virtuais pelo Método dos Elementos Finitos, bem como o método numérico

utilizado para convergência das análises e, por fim, será explicitado o ensaio de tração como um dos principais métodos para determinação de propriedade mecânicas de materiais diversos.

2.1 Cladeado

O material compósito é formado pela combinação de dois ou mais materiais que se diferem em composição química e forma e que são insolúveis entre si (SMITH, 1999). Os materiais compósitos têm suas propriedades mecânicas projetadas a fim de otimizar determinadas aplicações, diferentes daquelas de cada material constituinte, ou fase, em separado (BEIM, 2008).

Em se tratando de materiais compósitos, destacam-se os cladeados. O cladeamento é um processo de deposição de um material dissimilar na superfície de um material base, chamado de substrato, obtendo-se uma forte ligação metalúrgica na interface entre eles. Os dois materiais unidos passam a ter propriedades mecânicas diferentes, tais como módulo de elasticidade, ductilidade, tenacidade, entre outras, de quando estavam separados. O material depositado sobre o substrato exerce a função de um revestimento, o qual confere algumas características ao material cladeado que não seriam possíveis utilizando somente o material base.

Dentre as aplicações mais comuns do cladeamento na indústria, destacam-se aquelas que aumentam a resistência à corrosão dos componentes e a melhoria na dureza superficial dos componentes (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1983).

2.2 Método dos Elementos Finitos (MEF)

Os grandes avanços tecnológicos envolvendo os processos de projeto e fabricação de peças e componentes fez com que as técnicas de modelagem e validação virtual fossem aprimoradas e ainda mais aplicadas na indústria em geral. Assim, o Método de Elementos Finitos (MEF) se destacou como uma técnica essencial e de grande utilidade na etapa de simulação e análise de componentes e sistemas.

Conforme Segerlind (1984), o método dos elementos finitos é um procedimento numérico adequado a analisar sistemas complexos de engenharia em que soluções analíticas comuns se tornam muito complexas. Este método utiliza o sistema de discretização do sistema e este sistema é avaliado como um conjunto de vários pequenos elementos constituintes de uma estrutura contínua e mais simples.

O Método de Elementos Finitos (MEF) é um método de análise no qual uma variável de campo é aproximada pela conexão de funções de interpolação simples, cada qual definida sobre uma pequena região. A formulação do problema resulta em um sistema de equações diferenciais simultâneas. Este processo se dá pela modelagem de um corpo através de sua divisão em um sistema equivalente de corpos menores ou unidades (elementos), interconectados a pontos comuns (pontos nodais ou nós), linhas divisórias e superfícies, formando a chamada malha. (SORIANO, 2009).

Uma análise pelo Métodos dos Elementos Finitos possui três etapas bem definidas, a saber:

- Pré-processamento: fase em que o problema é idealizado, em que se define a malha de elementos finitos a ser aplicada na geometria do componente ou sistema, as propriedades mecânicas do material constituinte e as condições de montagem e contorno do modelo;

- Processamento: fase altamente automatizada, em que são estabelecidas as matrizes de rigidez dos elementos para e a solução de suas equações globais;
- Pós-processamento: última fase da simulação, em que ocorre a análise dos resultados obtidos na fase de processamento.

Os resultados obtidos com as simulações são diretamente influenciados pela metodologia de modelagem. Uma simplificação ou uma consideração feita de maneira incorreta pode levar a um resultado errado, comprometendo a análise.

É válido observar que, na prática, o modelo de elementos finitos tem diversas limitações e imprime condições próximas às ideais, o que não ocorre na realidade. Assim, um modelo pode não representar de forma exata a análise demandada, fazendo com os resultados sejam aproximados à real solução do problema, de forma a se obter uma correlação com resultados de testes e ensaios.

2.3 Método de Newton-Raphson para solução aproximada

O método matemático utilizado na etapa de processamento dos modelos em Elementos Finitos é o método de solução aproximada de Newton-Raphson. Conforme citam Polyanin e Manzhirov (2007), funções contínuas da forma

$$f(x) = 0, \quad (1)$$

não possuem modos exatos para cálculo de suas raízes. Desta forma, o método de Newton-Raphson indica que, sendo x_n a aproximação de uma raiz deste tipo de função, pode-se traçar uma reta tangente a partir do ponto $[x_n, f(x_n)]$. O ponto de intersecção entre esta reta tangente e o eixo das abcissas representa a melhor aproximação da real raiz desta função. De forma matemática, o método é representado pela Eq. 2:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, n = 0, 1, \dots \quad (2)$$

Quando a aproximação de raízes atinge a precisão que se deseja, o método de Newton-Raphson apresenta a convergência conforme a Eq. 3:

$$|x_{n+1} - c| \leq \frac{M}{2m} |x_n - c|^2 \quad (3)$$

em que M é o valor máximo absoluto de $f''(x)$, m é o valor mínimo absoluto de $f'(x)$ e c é a raiz desejada para a função em questão.

2.4 Ensaio de tração

Através dos ensaios e testes que é possível a determinação de propriedades dos materiais para que sejam aplicados das mais diversas formas. Assim, o ensaio de tração consiste em aplicar-se uma carga crescente de forma uniaxial em um corpo de prova até que aconteça a sua

ruptura. Durante o ensaio, são medidas as variações de comprimento do corpo de prova em função da carga aplicada.

Para realização do ensaio de tração, utiliza-se uma máquina de tração, podendo ela ser hidráulica ou eletromecânica, a qual é ligada a uma célula de carga que mede a força aplicada sobre o corpo de prova. Um computador é ligado a esta máquina e registra a força aplicada em função do deslocamento do corpo de prova, gerando a curva tensão x deformação do material constituinte do corpo de prova.

Importante ressaltar que o corpo de prova é normalizado quanto à sua forma e dimensões, a fim de que seu uso esteja adequado à máquina de tração. Os corpos de prova são retirados do produto acabado do qual se necessita conhecer as propriedades, e podem ser construídos com seção retangular ou circular.

O ensaio de tração é um teste amplamente utilizado na indústria e centros de pesquisa, por se tratar de uma modalidade de experimento bem conhecida e que fornece dados preciso quanto ao comportamento mecânico do material testado (NORTON, 2013).

3 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS EM ELEMENTOS FINITOS

Foram simulados numericamente os testes de tração dos materiais isolados (aço inoxidável e aço carbono) e, também, na condição de cladeado, através do software ABAQUS, a fim de se validar a metodologia de modelagem do material compósito comparando o resultado obtido numericamente com a curva de tensão por deformação obtida no ensaio físico.

Para modelagem do corpo de prova de tração foi utilizado o software SOLIDWORKS®. O modelo do corpo de prova foi baseado nas dimensões da norma do ensaio (Fig. 1).

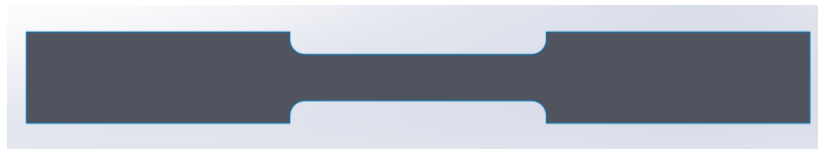


Figura1. Modelo do corpo de prova feito no SOLIDWORKS®

Então, os modelos tridimensionais foram exportados para o software ABAQUS, onde foi realizada a análise por elementos finitos. Os aços na condição de isolado foram modelados utilizando casca e o revestimento seguiu duas metodologias de modelagem: utilizando elementos de casca e elementos de membrana.

Para os elementos de casca foi utilizado o elemento axissimétrico linear quadrático S4R, este elemento possui 4 nós, 6 graus de liberdade para cada nó e pequenas deformações. Para os elementos de membrana, foi utilizado o elemento axissimétrico linear quadrático M3D4R, este elemento possui 4 nós, 6 graus de liberdade para cada nó e é indicado para pequenas espessuras no próprio manual de usuário do software.

Para todos os modelos foi feita uma análise de segunda ordem, em que foram consideradas as não linearidades geométricas, conforme recomendado pelo método de análise de tensões elasto-plásticas da norma ASME.

A fidelidade dos resultados retornados pelo modelo tridimensional, em relação aos dados obtidos experimentalmente é sensível ao tamanho e formato da malha. Sob este panorama, estudos sobre a influência da malha nos resultados retornados pelo software de simulação são necessários, objetivando balancear esforço computacional e precisão.

Os resultados tendem a uma maior precisão quanto mais refinada for a malha, se aproximando do experimental, desde que seja utilizado um modelo que descreva os fenômenos envolvidos na problemática abordada. Porém, quanto maior este refino, maior o esforço computacional e tempo para que o computador resolva o sistema linear de equações.

Para checar este balanceamento, foram feitos testes de sensibilidade de malha onde se variou o tamanho e a quantidade dos elementos até chegar num patamar onde os resultados se repetiam mesmo aumentando o refino, mostrando que a quantidade de elemento do início do patamar era suficiente para abordagem do problema numérico em questão.

A malha gerada para o modelo do corpo de prova apresentou 694 elementos.

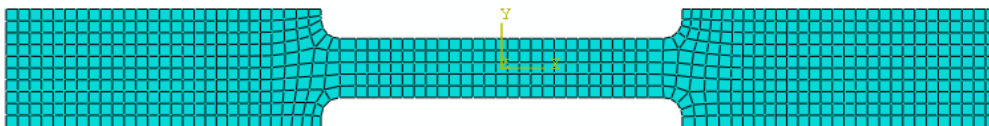


Figura 2. Malha gerada para o modelo do corpo de prova de tração

Os parâmetros adotados para análise foram importados diretamente das curvas de tensão por deformação reais dos aços carbono e inoxidável, na condição de isolados, obtidas no ensaio de tração físico. Foi feita a análise numérica para condição isolada e, posteriormente, foi feita a modelagem de um corpo de prova do compósito bimetálico, aplicando-se também as propriedades reais dos aços carbono e inoxidável e comparadas as curvas resultantes.

Para a simulação do ensaio de tração, aplicou-se uma condição de contorno que representasse as condições reais do ensaio: a parte inferior do modelo foi engastada restringindo-se todos os graus de liberdade (assim como a garra da máquina de ensaio) e do lado oposto foi aplicado um deslocamento prescrito.

4 ENSAIOS DE TRAÇÃO REALIZADOS

A chapa de aço cladeado para retirada das amostras dos ensaios, com dimensão de 16x750x1000mm, foi recebida do fornecedor na condição de laminada a quente. Esta chapa foi cortada na direção de laminação através de serra de fita, marca Franho.

Desta chapa, foram cortadas as tiras. Estas foram fresadas para as dimensões dos corpos de prova segundo a norma ASTM E-8M de 1995. Foram retirados 3 corpos de prova para cada configuração de variação de espessura, conforme fig. 3.

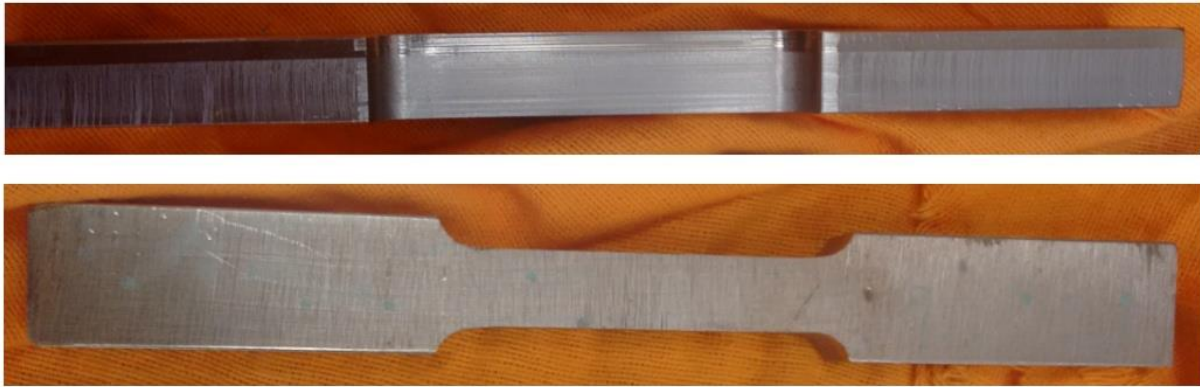


Figura 3. Corpos de prova para o ensaio de tração

Para obtenção das amostras, foi utilizada uma matriz de aço cladeado por laminação com espessura de 12mm de aço carbono e 4mm de aço inoxidável tipo 316L. Foi utilizado o fresamento da matriz para obtenção das amostras de aço carbono com aço inoxidável 316L nas seguintes relações: 3mm TP-316L x 6mm SA-516; 3mm TP-316L x 9mm SA-516; 3mm TP-316L x 12mm SA-516; 1mm TP-316L x 9mm SA-516; 2mm TP-316L x 9mm SA-516; 3mm TP-316L x 9mm SA-516. De cada peça foram obtidas 3 amostras.

O equipamento utilizado para realização do ensaio de tração foi uma máquina universal Instron, modelo 4487, com acionamento servo-hidráulico e células de carga de 300kN. Para medição de deformação foram utilizados dois *strain-gage* instalados ao longo da largura e espessura da chapa. Os sinais de força na direção do comprimento do corpo de prova e deslocamento nas direções da largura e espessura foram, respectivamente, enviados ao computador, e, posteriormente, disponibilizados através de um arquivo de texto.

No procedimento do ensaio, foram medidos o comprimento inicial dos corpos de prova (base de medida) e largura com auxílio de um paquímetro, marca Mitutoyo, com sensibilidade de 0,1mm. A base de medida foi utilizada para cálculo da deformação convencional através da Eq. 4:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4)$$

onde Δl é a variação da base de medida e l_0 é a base de medida. Os valores de tensão convencional σ_c foram calculados através da Eq. 5:

$$\sigma_c = \frac{F}{S_0} \quad (5)$$

onde F é a força axial e S_0 é a área inicial do corpo de prova.

O valor do limite de escoamento σ_{esc} foi obtido a partir do gráfico tensão convencional versus deformação para a deformação de 0,2%. A tensão de escoamento foi obtida pela Eq. 6:

$$\sigma_{esc} = \frac{F_{esc}}{S_0} \quad (6)$$

onde F_{esc} é a força de escoamento e S_0 é a área inicial do corpo de prova.

O valor do limite de resistência σ_r foi obtido a partir do gráfico tensão convencional versus deformação para a deformação correspondente à carga máxima. O limite de resistência à tração foi obtida pela Eq. 7:

$$\sigma_r = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (7)$$

onde F_{max} é a força máxima e S_0 é a área inicial do corpo de prova.

A partir da curva tensão convencional (σ_C) por deformação convencional (ϵ_C), que são os dados retirados diretamente do ensaio de tração, calculou-se a curva de tensão verdadeira (σ_V) por deformação verdadeira (ϵ_V) através das Eq. 8 e 9.

$$\sigma_V = \sigma_C(1+\epsilon_C) \quad (8)$$

$$\epsilon_V = \ln(1+\epsilon_C) \quad (9)$$

5 RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Resultados dos ensaios de tração

A tabela 1 resume os resultados encontrados para o ensaio de tração dos aços, na condição de isolados, e para os conjugados com 6 mm de espessura de aço carbono por 3 mm de espessura de aço inoxidável, 9 mm de aço carbono por 3 mm de aço inoxidável e com 12 mm de aço carbono por 3 mm de aço inoxidável.

Tabela 1. Resumo dos resultados do ensaio de tração

	ASTM-516	TP-316L	6 x 3	9 x 3	12 x 3
Limite de Escoamento $\sigma_{0,2}$ (MPa)	328,26 ± 6,47	377,05 ± 7,84	342,62 ± 1,51	329,07 ± 3,55	335,55 ± 2,06
Limite de Resistência σ_u (MPa)	516,19 ± 2,38	588,45 ± 1,97	536,82 ± 2,69	531,39 ± 4,13	526,17 ± 1,21
Alongamento (%)	29,33 ± 0,19	38,20 ± 2,14	33,93 ± 0,09	35,13 ± 0,25	35,47 ± 0,19

Como pode-se observar, os valores encontrados para os limites de escoamento e resistência dos materiais isolados foram maiores que os valores de referência (retirados da norma ASME seção II, parte D), sendo a diferença ainda maior para o aço inoxidável.

Tabela 2. Valores de referência

	ASTM-516	TP-316L
Limite de Escoamento σ_y (MPa)	260	170
Limite de Resistência σ_u (MPa)	485	480

Observa-se pelas tabelas anteriores que o aço inoxidável foi o material que teve maior incremento no limite de escoamento, em comparação com a norma (122,06%) e também apresentou maior alongamento percentual ($38,20 \pm 2,14\%$), mostrando que apresenta maior taxa de encruamento em comparação ao aço carbono estudado.

Nota-se também que o conjugado que apresentou maiores valores de limites de resistência e escoamento foi o cladeado com menor espessura de carbono (6 mm de carbono por 3 mm de aço inoxidável). Este resultado aponta que o aço inoxidável, na condição de pós processado, exerceu maior influência sobre as propriedades mecânicas do conjugado, ao contrário do esperado, uma vez que o aço carbono seria o responsável por fornecer resistência mecânica ao material compósito, devido às suas propriedades de resistência mecânica serem maiores, na condição de recozido.

Como observado, o comportamento plástico dos materiais cladeados se aproximam do comportamento do aço carbono ASTM-516 Gr.70 que, na condição de pós processado, é o que apresenta menores valores de resistência mecânica.

Foram simulados os ensaios de tração equivalentes aos ensaios físicos realizados, conforme descrito na metodologia. A figura 4 mostra o resultado da distribuição de tensões de Von Mises em um dos corpos de provas.

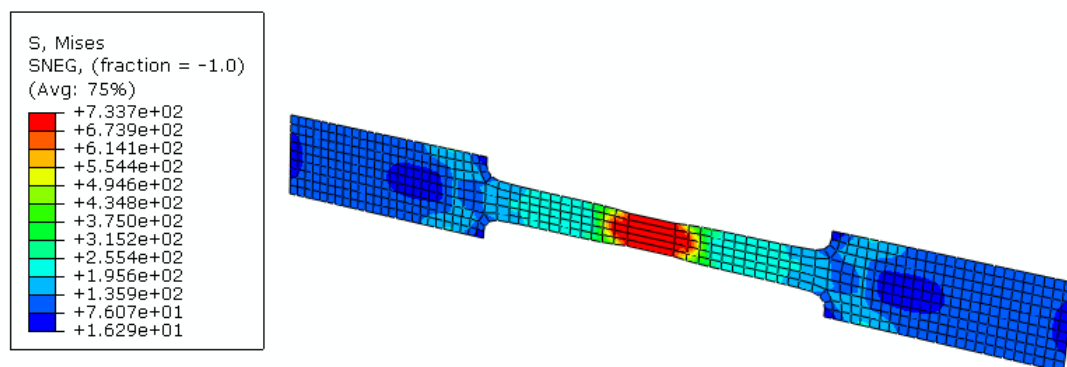


Figura 4. Avaliação da distribuição da tensão de Von Mises do ensaio de tração no corpo de prova de aço inoxidável TP-316L pelo método dos elementos finitos

A linearização das tensões verdadeiras obtidas durante o ensaio físico e as simulações são apresentadas nas fig. 5 a 9, com os valores compreendidos entre a tensão de escoamento e a tensão de resistência, ou seja, a região plástica, para comparação entre os resultados obtidos pelos métodos utilizando elementos de casca, elementos de membrana (para o revestimento) e pelo ensaio físico.

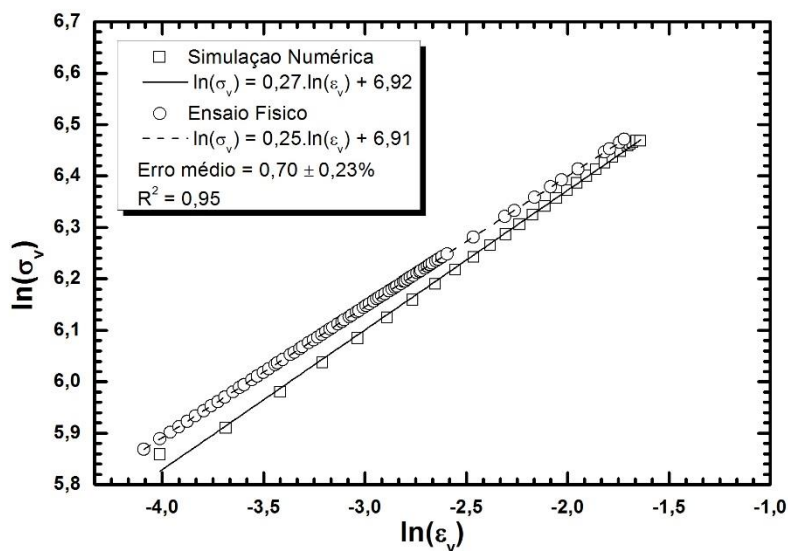


Figura 5. Resultados dos ensaios de tração físico e numérico do aço carbono ASTM-516 Gr.70

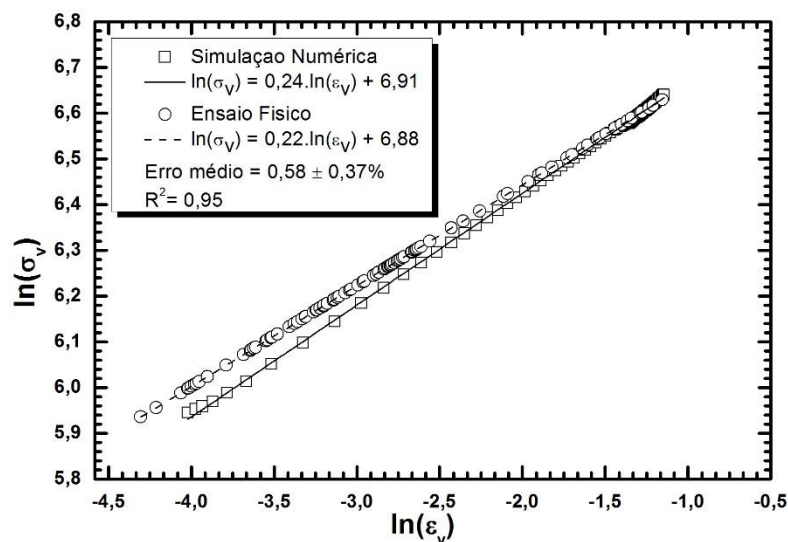


Figura 6. Resultados dos ensaios de tração físico e numérico do aço inoxidável TP-316L

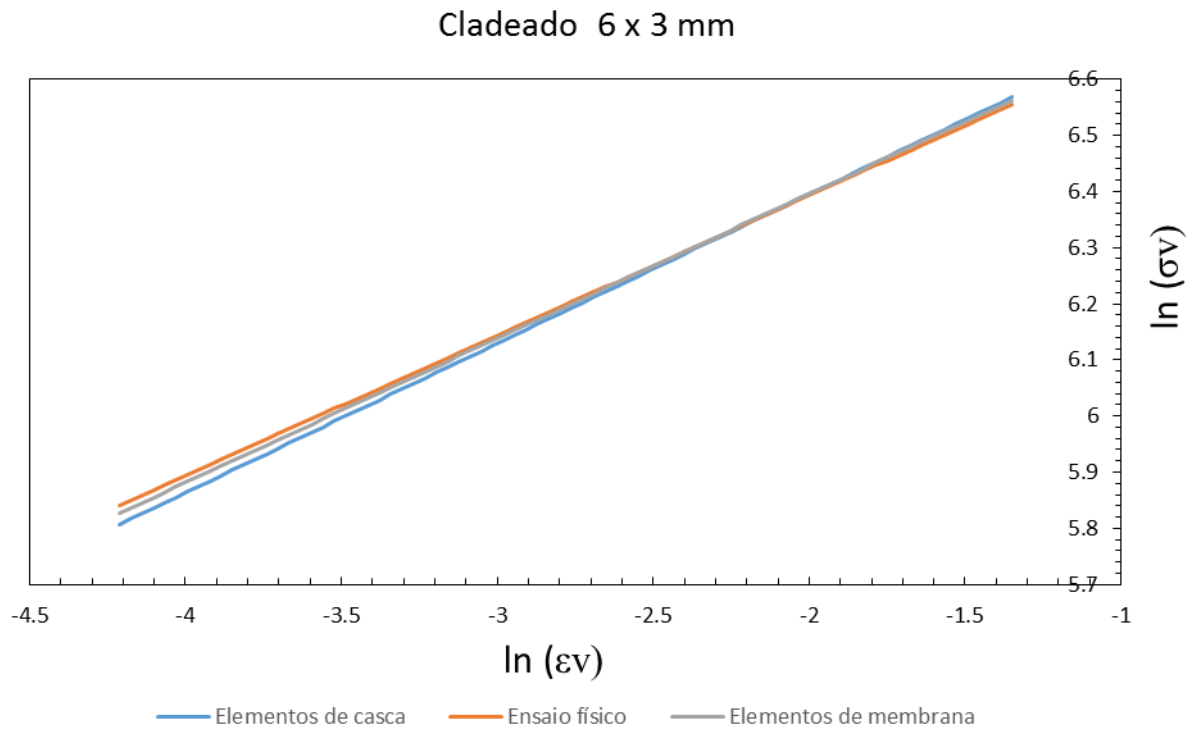


Figura 7. Resultados dos ensaios de tração físico e numéricos da chapa cladeada com 6mm de espessura de aço carbono e 3mm de espessura de aço inoxidável

Tabela 3. Cálculo do erro médio entre os métodos avaliados, configuração 6mm de espessura de aço carbono e 3mm de espessura de aço inoxidável

	Elementos de casca	Elementos de Membrana	Ensaio Físico
Equação	$\ln(\sigma_v) = 0,27 \cdot \ln(\epsilon_v) + 6,93$	$\ln(\sigma_v) = 0,26 \cdot \ln(\epsilon_v) + 6,91$	$\ln(\sigma_v) = 0,25 \cdot \ln(\epsilon_v) + 6,89$
Erro médio (em relação ao ensaio físico)	$0,23 \pm 0,17\%$	$0,10 \pm 0,07\%$	-

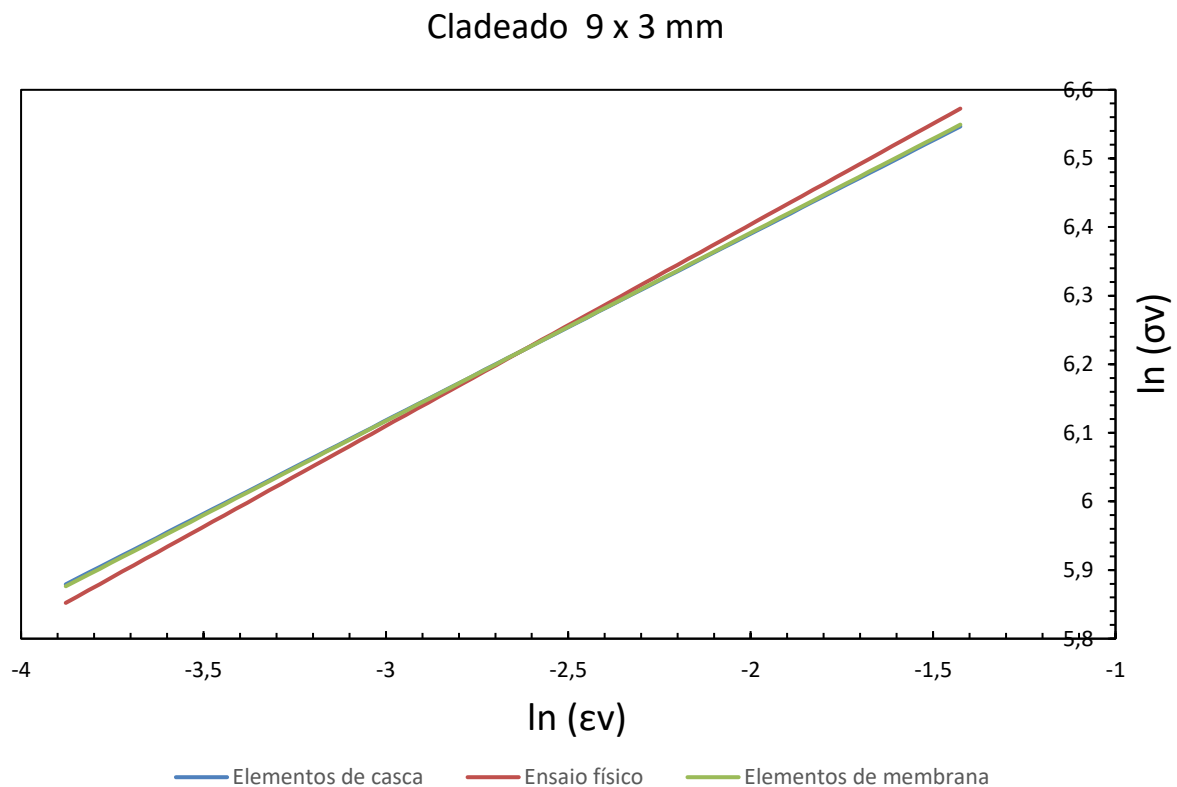


Figura 8. Resultados dos ensaios de tração físico e numéricos da chapa cladeada com 9mm de espessura de aço carbono e 3mm de espessura de aço inoxidável

Tabela 4. Cálculo do erro médio entre os métodos avaliados, configuração 9mm de espessura de aço carbono e 3mm de espessura de aço inoxidável

	Elementos de casca	Elementos de Membrana	Ensaio Físico
Equação	$\ln(\sigma_v) = 0,27 \cdot \ln(\epsilon_v) + 6,94$	$\ln(\sigma_v) = 0,27 \cdot \ln(\epsilon_v) + 6,94$	$\ln(\sigma_v) = 0,29 \cdot \ln(\epsilon_v) + 6,99$
Erro médio (em relação ao ensaio físico)	$0,22 \pm 0,13\%$	$0,19 \pm 0,11\%$	-

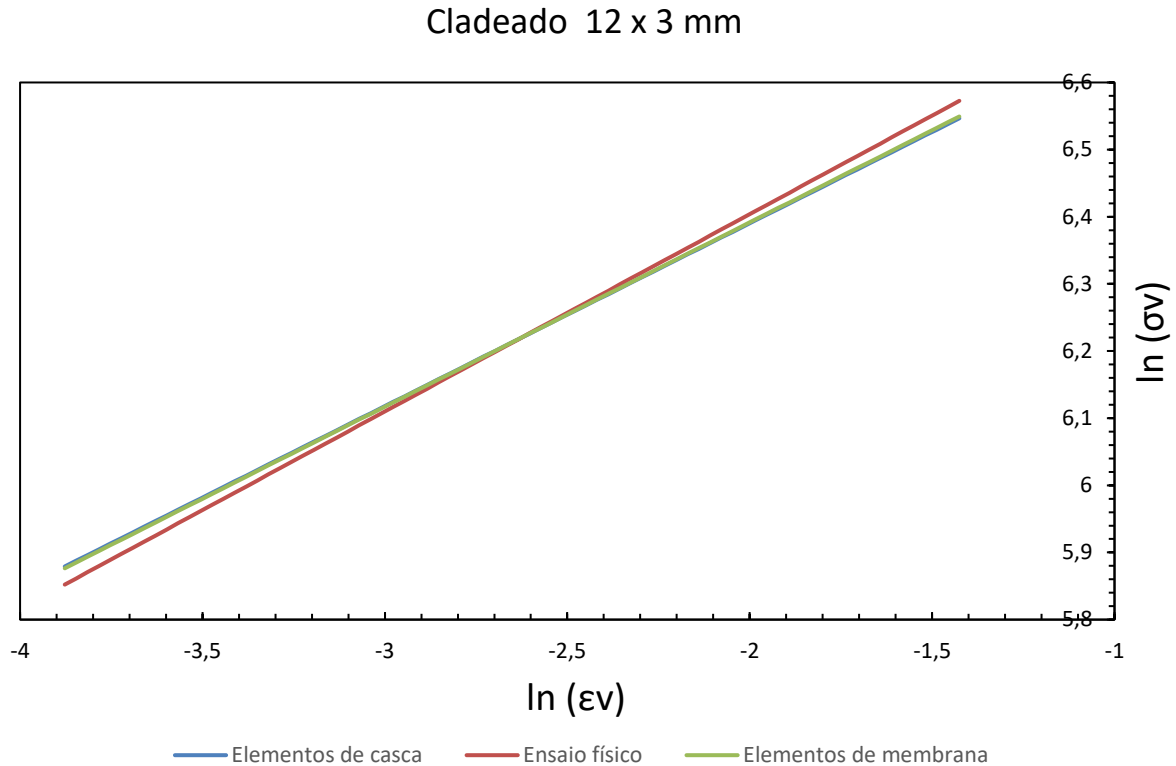


Figura 9. Resultados dos ensaios de tração físico e numéricos da chapa cladeada com 12mm de espessura de aço carbono e 3mm de espessura de aço inoxidável

Tabela 5. Cálculo do erro médio entre os métodos avaliados, configuração 12mm de espessura de aço carbono e 3mm de espessura de aço inoxidável

	Elementos de casca	Elementos de Membrana	Ensaio Físico
Equação	$\ln(\sigma_v) = 0,27 \cdot \ln(\epsilon_v) + 6,93$	$\ln(\sigma_v) = 0,27 \cdot \ln(\epsilon_v) + 6,95$	$\ln(\sigma_v) = 0,26 \cdot \ln(\epsilon_v) + 6,90$
Erro médio (em relação ao ensaio físico)	$0,092 \pm 0,054\%$	$0,17 \pm 0,10\%$	-

Como indicado nas figuras, os erros médios entre as curvas foram baixos, sendo o maior erro igual a $0,70 \pm 0,23\%$ para o aço carbono na condição isolada e o menor erro igual a $0,092 \pm 0,0054\%$ para o cladeado com 12 mm de espessura de aço carbono e 3 mm de espessura de aço inoxidável, o que valida a metodologia utilizada para análise.

Este resultado é importante pois, como descrito anteriormente, os materiais, apesar de processados a quente, apresentam propriedades e comportamento mecânico diferente dos mesmos na condição de recozido, provavelmente proveniente de um encruamento do processo de laminação, portanto, uma simulação numérica de confiança do equipamento é de extrema importância que seja feita utilizando o material adequado, com mesmas propriedades e respostas do material real, minimizando erros.

Sendo assim, os erros médios comparando-se as metodologias, tanto em casca quanto em membrana com o ensaio físico foram baixos, o que valida ambas metodologias para utilizar em análise desta classe de material compósito.

Nota-se que, aumentando a espessura do aço carbono, tem-se o comportamento inverso do erro obtido entre as metodologias: enquanto o erro comparando a modelagem em casca diminui, o erro da metodologia que utilizou elemento de membrana aumenta. Isto pode ocorrer devido à acomodação das tensões atuantes, uma vez que tanto o material quanto a análise permitem não linearidades geométricas. Embora o ensaio de tração exerça sobre o corpo de prova uma força axial trativa, as deformações localizadas no início da plastificação são distribuídas e acomodadas ao longo da espessura do material, gerando pequenas regiões de tensões compostas (por exemplo, flexão). Esta acomodação é tanto maior quanto maior for a espessura do corpo de prova. Uma vez que elementos de membrana não resistem à flexão, estes esforços não são transmitidos ao mesmo, diminuindo a proporção da área efetiva de acomodação de deformações.

Estes resultados são importantes pois, como descrito anteriormente, os materiais, apesar de processados a quente, apresentam propriedades e comportamento mecânico diferentes dos mesmos na condição de recozido, provavelmente proveniente de um encruamento do processo de laminação. Portanto, uma simulação numérica de confiança do equipamento é de extrema importância, e que seja feita utilizando o material adequado, com mesmas propriedades e respostas do material real, minimizando erros.

6 CONCLUSÃO

Sob o ponto de vista estrutural, os materiais após cladeamento apresentaram limites de resistência e escoamento maiores que os mesmos na condição de recozidos, indicando um possível encruamento durante o processo de cladeamento.

O aço inoxidável ASME SA-240 TP. 316L apresentou limite de resistência e ruptura maiores que do aço carbono SA-516 Gr.70, diferente do que se esperava, e exerceu maior influência na resistência mecânica dos compósitos cladeados.

A correlação obtida entre os resultados da simulação virtual e dos ensaios de tração demonstra que o modelo virtual apresentado para análise do cladeado é válido e corresponde com a real aplicação do revestimento.

O modelo utilizando membrana se mostrou mais eficiente quanto menor a espessura do revestimento, ou quanto menor a relação entre metal base e revestimento.

A análise pelo Método dos Elementos Finitos é uma metodologia que proporciona melhor entendimento do comportamento do material, antes que sejam realizados ensaios e testes experimentais. Outra vantagem é a redução de custos de projeto na etapa de testes, já que delimita a testes mais específicos e mais conclusivos.

Este estudo pode ser complementado considerando a possibilidade de realização de cálculos e testes para projeção da vida em fadiga do material cladeado.

Agradecimentos

Agradecemos à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela disponibilização de recursos para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABAQUS/Standard *User Manual*, 2014, Version 6.12.

Alves Filho, Avelino, 2006. *Elementos finitos: a base da tecnologia CAE: análise matricial*. 4ª ed. Érica.

ASM Handbook, 1983. *Welding, Brazing and Soldering*. Vol 6, ASM International, Ohio, USA.

Beim, K. F., 2008. *Estudo Comparativo das Tensões Cisalhantes na Interface entre Camadas de um Compósito Polimérico de Fibra de Carbono pelos Métodos Numérico e Experimental*. Dissertação, Universidade de São Paulo.

Cook, Robert D., Malkus, David S., Plesha, Michael E., Witt, Robert J., 2002. *Concepts and applications of finite element analysis*. 4th ed. John Wiley & Sons.

Norton, Robert L, 2013. *Projeto de máquinas: uma abordagem integrada*. 4. ed., Bookman.

Pereira, G. A. R. *Desenvolvimento de Procedimento para Recuperação de Pites em Reatores de Polimerização de PVC, Cladeados com 304L, Usando Processos de Soldagem TIG e MIG Pulsados e Convencionais*. 2005. Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina.

Polyanin, Andrei D., Manzhirov, Alexander V., 2007. *Handbook of Mathematics for Engineers and Scientists*. Chapman & Hall/CRC.

Segerlind, L. J., 1984. *Applied Finite Element Analysis*. 2ª ed. John Wiley & Sons, Inc.

Soriano, H. L., 2009. *Elementos Finitos – Formulação e Aplicação na Estatística e Dinâmica das Estruturas*. Editora Ciência Moderna Ltda.

Smith, F. W., 1998. *Princípios de Ciências e Engenharia dos Materiais*. 3 ed. Editora McGraw-Hill.