

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – DEM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PGCEM**

MARCOS FERNANDO ODORCZYK

**UMA ESTRATÉGIA NUMÉRICA PARA ANÁLISE TERMOELÁSTICA
DE SÓLIDOS RECOBERTOS COM FILMES DE MATERIAL
FUNCIONALMENTE GRADADO (FGM)**

**JOINVILLE / SC
2011**

MARCOS FERNANDO ODORCZYK

**UMA ESTRATÉGIA NUMÉRICA PARA ANÁLISE TERMOELÁSTICA
DE SÓLIDOS RECOBERTOS COM FILMES DE MATERIAL
FUNCIONALMENTE GRADADO (FGM)**

Dissertação apresentada para a obtenção do título de mestre em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas – CCT.

Orientador: Pablo Andrés Muñoz-Rojas, Doutor.
Co-orientador: Eduardo Lenz Cardoso, Doutor.

**JOINVILLE / SC
2011**

**“UMA ESTRATÉGIA NUMÉRICA PARA ANÁLISE TERMOELÁSTICA
DE SÓLIDOS RECOBERTOS COM FILMES DE MATERIAL
FUNCIONALMENTE GRADADO (FGM)”**

por

MARCOS FERNANDO ODORCZYK

Essa dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

na área de concentração “Modelamento Numérico de Materiais e Simulação de
Processos”, e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA

Dr. Pablo Andrés Muñoz Rojas
CCT/UDESC (presidente/orientador)

Banca Examinadora

Dr. Eduardo Lenz Cardoso
CCT/UDESC (co-orientador)

Joinville, 29 de julho de 2011

Dr. Miguel Vaz Júnior
CCT/UDESC

Dr. Roberto Dalledone Machado
PUC-PR, UFPR-PR

FICHA CATALOGRÁFICA

O26u

Odorczyk, Marcos Fernando.

Uma estratégia numérica para análise termoelástica de sólidos recobertos com filmes de material funcionalmente gradado (fgm)/ Marcos Fernando Odorczyk;

Orientador: Pablo Andrés Muñoz-Rojas

132 f.: il ; 30cm

Incluem referências.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais, Joinville, 2011.

1. Simulação numérica 2. FGM. I. Muñoz-Rojas, Pablo Andrés.

CDD 620.11

Conhece-te a ti mesmo
Amar ao teu próximo como a ti mesmo
Amar a Deus acima de tudo

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Pablo Muñoz-Rojas, pelo seu empenho em orientar e balizar o andamento do trabalho, não medindo esforços para esclarecer minhas dúvidas, corrigir meus pontos falhos.
- Ao Prof. Dr. Eduardo Lenz Cardoso, pela sua prontidão em me orientar em aspectos de sua competência.
- Ao Prof. Dr. Miguel Vaz Junior, pela sua disponibilidade em me orientar em aspectos de sua competência.
- A todos professores do Curso de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, que de uma forma direta ou indireta contribuíram para a realização desse trabalho.
- À Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC e ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PGCEM pela realização do presente trabalho.
- Ao Centro de Ciências Tecnológicas e ao Departamento de Engenharia Mecânica pela infraestrutura oferecida.
- À CAPES, ao CNPQ e à UDESC pelo apoio financeiro ao trabalho.
- A meus pais, Antonio e Gilda, que nunca mediram esforços para proporcionar uma educação com bases sólidas, despendendo esforços desde minha formação primária até o presente trabalho.
- A todos os meus familiares e amigos pelo incentivo e apoio.

RESUMO

ODORCZYK, Marcos Fernando. **Uma estratégia numérica para análise termoelástica de sólidos recobertos com filmes de material funcionalmente gradado (FGM)**. 2011. 132f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais – Área: Modelamento Numérico de Materiais e Simulação de Processos – Universidade do Estado de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Joinville, 2011.

O método de elementos finitos tem sido tradicionalmente aplicado na solução de problemas de elasticidade e transferência de calor, sendo amplamente utilizado em casos com materiais homogêneos e isotrópicos. Com o advento de novas tecnologias tem sido mais freqüente a utilização de componentes com mais de um material, onde se procura obter o máximo proveito de cada fase. Um exemplo comum é a aplicação de filmes de revestimento com propriedades ótimas sobre um substrato. Estes filmes de revestimento podem ser homogêneos ou funcionalmente gradados (FGM), sendo que o último tem variação contínua de propriedades ao longo da geometria, permitindo atenuar diferenças na interface com o substrato. A análise do comportamento das tensões ao longo da interface entre filme e substrato é de suma importância, pois esta é uma região potencial para ocorrência de falhas. Dado que programas comerciais de elementos finitos atuais apresentam limitações para lidar com FGM's, principalmente na região de interface, uma das motivações desta dissertação é desenvolver um método de pós-processamento de tensões e fluxos capaz de trabalhar adequadamente com este tipo de material. O trabalho apresenta a análise de um componente de aço ou alumínio revestido com filme de nitreto de titânio (homogêneo ou funcionalmente gradado), sob carregamento termomecânico. A parte térmica do problema é descrita usando uma abordagem Euleriana, que resulta em condução de calor por convecção e condução no sólido. A parte mecânica (elasticidade) é descrita pela tradicional abordagem Lagrangeana. Um procedimento de solução termomecânica aninhada (staggered) é implementado e resultados promissores são obtidos.

Palavras-chave: Elementos Finitos. Materiais com Gradação Funcional. FGM .

ABSTRACT

ODORCZYK, Marcos Fernando. **A strategy for numerical thermoelastic analysis of solid film coated with functionally graded material (FGM)**. 2011. 132 f. Dissertation (Master in Science and Materials Engineering - Area: Numerical Modeling of Materials and Process Simulation) - State University of Santa Catarina, Post Graduation Program in Science and Materials Engineering, Joinville, 2011.

The finite element method has been traditionally applied in solving problems of elasticity and heat transfer, being widely used in cases with homogeneous isotropic materials. With the advent of new technologies, it has been more frequent to use components with more than one material, aiming to get the most out of each phase. A common example is the application of coating films, with optimal properties, on a substrate. These coating films may be homogeneous or functionally graded (FGM). The latter presents a continuous variation of properties through the geometry, allowing to reduce differences at the interface with the substrate. It is important to analyze the behavior of stresses along the interface between film and substrate, a region prone for the occurrence of failure. As current commercial finite element programs have limitations to handle FGM's, especially at the interfaces, one of the motivations of this dissertation is to develop a method for stress and flux nodal recovery, adequate to work with this type of material. The work presents the analysis of a component made of steel or aluminum coated with a titanium nitride film (homogeneous or FGM) under thermo-mechanical loading. The thermal part of the problem is set in an Eulerian description, leading to heat transfer by conduction and convection in the solid. The mechanical (elasticity) part is set in the usual Lagrangean description. A staggered thermo-mechanical approach is implemented and promising results are obtained.

Keywords: Finite Elements. Functionally graded materials. FGM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Exemplos de aplicação de barreira térmica em fuselagem de espaçonave. (a) <i>Space Shuttle</i> , (b) revestimento <i>RCG</i> , (c) revestimento <i>TUFI</i> , (d) resultado de testes após 3 vôos.....	21
Figura 2.1 - Corpo em equilíbrio.....	24
Figura 2.2 - Seção S.....	24
Figura 2.3 - Variação da propriedade funcionalmente gradada do material em duas direções.	36
Figura 4.1 - Exemplos de <i>patches</i> de elementos: (a) centrado nos nós, (b) centrado em elementos.....	53
Figura 5.1 - Chapa sujeita a um campo de temperatura.....	61
Figura 5.2 - (a) Padrões de deslocamento do nó central e vizinhos em x e y, (b) Padrões de deslocamento do nó central em x e y.....	62
Figura 5.3 - (a) Erro de distorção do fluxo (norma L_2) para malha de elementos de 4 nós com deslocamento do nó central na direção x, (b) Detalhe de (a).....	64
Figura 5.4 - (a) Erro de distorção do fluxo (norma L_2) para malha de elementos de 4 nós com deslocamento do nó central na direção y, (b) Detalhe de (a).....	65
Figura 5.5 - (a) Erro de distorção do fluxo (norma L_2) em malha de elementos de 8 nós com deslocamento do nó central na direção x, (b) Detalhe de (a).....	66
Figura 5.6 - (a) Erro de distorção de fluxo (norma L_2) em malha de 8 elementos com deslocamento do nó central e vizinhos na direção x, (b) Detalhe de (a).	67
Figura 5.7 - (a) Erro de distorção de fluxo (norma L_2) em malha com elementos de 9 nós com deslocamento do nó central na direção x, (b) Detalhe de (a).....	68
Figura 5.8 - (a) Erro de distorção de fluxo (norma L_2) em malha de 9 elementos com deslocamento do nó central e vizinhos na direção x, (b) Detalhe de (a).	69
Figura 5.9 - Chapa bidimensional com temperatura prescrita na fronteira.	70
Figura 5.10 - Taxa convergência do erro de fluxo medido na norma L_2 , (a) 4 nó de elemento, (b) elemento 9 nós.	72
Figura 5.11 - Chapa bidimensional sob campo de temperatura e fluxo de calor.	73

Figura 5.12 - (a) Avaliação de métodos de recuperação do fluxo na direção y para malha com elemento quadrilateral de 4 nós, malha 10x10, (b) Detalhe de (a).	75
Figura 5.13 - (a) Avaliação de métodos de recuperação do fluxo na direção y para malha com elemento quadrilateral de 4 nós, malha 20x20, (b) Detalhe de (a).	76
Figura 5.14 - Avaliação de métodos de recuperação do fluxo na direção y para malha com elemento quadrilateral, (a) de 8 nós, malha 10x10, (b) de 8 nós, malha 20x20.	77
Figura 5.15 - Avaliação de métodos de recuperação do fluxo na direção y para malha com elemento quadrilateral, (a) de 9 nós, malha 10x10, (b) de 9 nós, malha 20x20.	78
Figura 5.16 - Placa com material FGM.	79
Figura 5.17 - Malha com 81 elementos finitos isoparamétricos bilineares e carregamento de pressão unitário.	80
Figura 5.18 - Tensões σ_{yy} em $y = 0$ avaliadas pelos métodos de pós-processamento D, E e S.	81
Figura 5.19 - Tensões σ_{yy} em $y = 0$ avaliadas pelos métodos de pós-processamento D, SPRE e PD.	82
Figura 5.20 - Distribuição das tensões σ_{yy} e modelo ampliado das deformações da placa.	82
Figura 5.21 - Par tribológico composto por um carregamento mecânico em movimento sobre um substrato metálico revestido por um filme com gradação funcional (FGM).	84
Figura 5.22 - Perfil de variação da gradação funcional da Eq.(5.15) para o par TiN/Al, com $M_1 = 1$.	85
Figura 5.23 - Fluxo de calor q_p gerado devido ao atrito e ao carregamento mecânico sobre a superfície do par substrato metálico - revestimento de TiN, com o carregamento mecânico em movimento.	86
Figura 5.24 - Malha de elementos finitos do modelo completo.	93
Figura 5.25 - Malha de elementos finitos na região de maior interesse de análise.	93
Figura 5.26 - Temperatura adimensionalizada na superfície em função do número de Pe, (a) TiN/Al (HMG) e (FGM), (b) TiN/aço (HMG) e (FGM).	96
Figura 5.27 - Temperaturas máximas na superfície em função de y_1/a , (a) TiN/Al, (b) TiN/aço.	97
Figura 5.28 - Temperaturas máximas na superfície em função do Pe, (a) TiN/Al, (b) TiN/aço.	98

Figura 5.29 - Tensão cisalhante adimensionalizada na interface em função de $y1/a$ para $\mu_f = 0,5$ e $Pe = 0$, (a) TiN/Al, (b) TiN/aço.	100
Figura 5.30 - Tensão cisalhante adimensionalizada na interface em função de $y1/a$ para $\mu_f = 0,5$ e $Pe = 1$, (a) TiN/Al, (b) TiN/aço.	101
Figura 5.31 - Tensão cisalhante adimensionalizada na interface em função de $y1/a$ para $\mu_f = 0,5$ e $Pe = 10$, (a) TiN/Al, (b) TiN/aço.	102
Figura 5.32 - Tensão cisalhante adimensionalizada na interface em função de $y1/a$ para $\mu_f = 0,25$, (a) TiN/Al, (b) TiN/aço.	104
Figura 5.33 - Tensão cisalhante adimensionalizada na interface em função de $y1/a$ para $\mu_f = 0,05$, (a) TiN/Al, (b) TiN/aço.	105
Figura 5.34 - Tensão normal adimensionalizada na interface para $\mu_f = 0,5$ e $Pe = 0$, (a) TiN/Al, (b) TiN/aço.	107
Figura 5.35 - Tensão normal adimensionalizada na interface para $\mu_f = 0,5$ e $Pe = 1$, (a) TiN/Al, (b) TiN/aço.	108
Figura 5.36 - Tensão normal adimensionalizada na interface para $\mu_f = 0,5$ e $Pe = 10$, (a) TiN/Al, (b) TiN/aço.	109
Figura 5.37 - Tensão $\sigma_{xx(adim)}$ máxima na interface, TiN/Al, (a) $Pe = 0$, (b) $Pe = 1$	110
Figura 5.38 - Tensão $\sigma_{xx(adim)}$ máxima na interface, TiN/Al, $Pe = 10$	111
Figura 5.39 - Tensão $\sigma_{xx(adim)}$ máxima na interface, TiN/aço, $Pe = 0$	111
Figura 5.40 - Tensão $\sigma_{xx(adim)}$ máxima na interface, TiN/aço, (a) $Pe = 1$, (b) $Pe = 10$	112
Figura 5.41 - Tensão τ_{xy} adimensionalizada máxima, TiN/Al para $\mu_f = 0,5$	114
Figura 5.42 - Tensão cisalhante τ_{xy} máxima versus índice M_1 na Eq. (5.15) para $y1/a = 1$	115
Figura 5.43 - Tensão σ_{xx} normal máxima versus do índice M_1 , $y1/a = 1$	115
Figura 5.44 - Variação do índice $M_{1(dim)}$ versus $y1/a$, TiN/Al - FGM, $Pe = 1$	116
Figura 5.45 - Módulo de elasticidade longitudinal x M_1	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Erro dos fluxos de malha não distorcida para o elemento 4 nós (valores $\times 10^{-5}$).	63
Tabela 5.2 - Erros dos fluxos de malhas não distorcida para elementos de 8 e 9 nós (valores $\times 10^{-5}$).....	63
Tabela 5.3 - Taxa de convergência do erro de fluxo na norma L_2 , para elementos de 4 nós..	71
Tabela 5.4 - Taxa de convergência do erro de fluxo na norma L_2 , para elementos de 9 nós..	71
Tabela 5.5 - Propriedades dos materiais.....	91

LISTA DE SÍMBOLOS

- $(\cdot)_{\text{adim}}$ - Valor adimensionalizado de (\cdot) .
- $(\cdot)_0$ - Grandeza (\cdot) avaliada na superfície do filme de revestimento.
- $(\cdot)_c$ - Grandeza (\cdot) avaliada no filme de revestimento.
- $(\cdot)_s$ - Grandeza (\cdot) avaliada no substrato de aço ou alumínio.
- $\nabla(\cdot)$ - Gradiente de (\cdot) .
- $\nabla \cdot (\cdot)$ - Divergente de (\cdot) .
- $(\cdot)_e, (\cdot)^e$ - Grandeza (\cdot) avaliada no elemento.
- $(\cdot)_p$ - Grandeza (\cdot) prescrita.
- $(\cdot)^T$ - Transposto de (\cdot) .
- $(\cdot)_x$ - Grandeza (\cdot) avaliada na direção x
- $(\cdot)_y$ - Grandeza (\cdot) avaliada na direção y
- $|(\cdot)|$ - Módulo de (\cdot) .
- $\|(\cdot)\|_{L_2}$ - Norma L_2 de (\cdot) .
- α, β - Índices de variação exponencial do FGM.
- α_t - Coeficiente de dilatação térmica.
- β - Índice de variação exponencial do FGM.
- ε_{ij} - Tensor deformação infinitesimal.
- $\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$ - Componentes do tensor deformação na representação compacta.
- $\{\boldsymbol{\varepsilon}_t\}$ - Componentes do tensor deformação de origem térmica na representação compacta.
- ε_t - Deformação de origem térmica.
- γ, ϕ - Índices de variação linear do FGM.
- ρ - Massa específica.

- Ω - Domínio Ω .
- Ω^e - Domínio Ω do elemento.
- σ_{ij} - Tensor tensão.
- $[\sigma]$ - Matriz do tensor tensão.
- $\{\sigma\}$ - Componentes do tensor tensão na representação compacta.
- $\{\hat{\sigma}\}$ - Componentes do tensor tensão com campo não suavizado na representação compacta.
- $\{\bar{\sigma}\}$ - Valores nodais do tensor tensão com campo suavizado L_2 na representação compacta.
- $\{\phi\}$ - Erro entre os fluxos suavizados e os não suavizados.
- σ_i^* - Valores nodais da i -ésima componente de tensão do campo suavizado no *patch*, na representação compacta.
- $\sigma_{xx(\text{adim})}$ - Tensão normal máxima adimensionalizada, na interface entre o filme de revestimento e o substrato.
- ν - Coeficiente de Poisson.
- μ_f - Coeficiente de atrito na superfície do filme de revestimento.
- λ, μ - Constantes de Lamé.
- Π_p - Energia potencial total.
- a - Dimensão da região de contato do carregamento
- $A(x, y)$ - Propriedade do material na posição (x, y) .
- $[\mathbf{B}]$ - Matriz que contém as derivadas das funções de interpolação, assumindo uma forma diferente para o caso de elasticidade e para o caso térmico.
- C_p - Calor específico a pressão constante.
- dim_{el} - dimensão máxima do elemento para evitar oscilação dos resultados devido ao efeito convectivo da velocidade do carregamento.
- $[\mathbf{D}]$ - Matriz constitutiva elástica do material na forma compacta.
- $\{\mathbf{d}\}$ - Vetor de deslocamentos nodais globais.
- $\{\mathbf{d}_e\}$ - Vetor de deslocamentos nodais do elemento.
- d - Coeficiente de difusividade térmica.

- E - Módulo de elasticidade longitudinal.
 $\{\mathbf{E}_n\}$ - Módulo de elasticidade longitudinal nos nós.
 $\{\mathbf{f}_v\}$ - Vetor das forças de volume.
 $\{\mathbf{f}_s\}$ - Vetor das forças de superfície sem os carregamentos concentrados prescritos.
 $\{\mathbf{f}_s^*\}$ - Vetor das forças de superfície, incluídos os carregamentos concentrados prescritos.
 $\{\mathbf{f}_{t_c}\}$ - Vetor das forças de origem térmica no elemento.
 G - Módulo de elasticidade transversal.
 h - Coeficiente de transmissão de calor por convecção.
 H - Função Heaviside.
 $[\mathbf{I}]$ - Matriz identidade.
 J - Determinante da matriz Jacobiana.
 J_1, J_2, J_3 - Funções erro mecânico e térmico.
 k - Coeficiente de transmissão de calor por condução.
 $\{\mathbf{k}_n\}$ - Vetor do coeficiente de transmissão de calor por condução, nos nós.
 $[\mathbf{k}_t]$ - Matriz de condutância térmica dos elementos.
 $[\mathbf{k}]$ - Matriz constitutiva térmica.
 $[\mathbf{K}_d]$ - Termo condutivo da matriz de condutância térmica global.
 $[\mathbf{K}_c]$ - Termo convectivo da matriz de condutância térmica global.
 $[\overline{\mathbf{K}}_{d+c}]$ - Matriz de condutância térmica global, composta pelo termo condutivo somado ao termo convectivo.
 $[\overline{\mathbf{K}}]$ - Matriz de condutância térmica global.
 $[\mathbf{k}_e]$ - Matriz de rigidez dos elementos.
 $[\mathbf{K}]$ - Matriz de rigidez global.
 $[\mathbf{L}]$ - Operador diferencial para o caso mecânico e caso térmico.
 $[\mathbf{M}]$ - Matriz massa global.
 N_i - Funções de interpolação globais associadas ao grau de liberdade i .

- N_i^e - Funções de interpolação locais associadas ao grau de liberdade i .
- $[\mathbf{N}]$ - Matriz das funções de interpolação no elemento.
- p - Carregamento de pressão normal.
- p_0 - Carregamento de pressão normal em $x = 0$.
- p_{\tan} - Carregamento de pressão tangencial.
- $\{\mathbf{P}_i\}$ - i -ésimo vetor de pseudo-carga para pós-processamento de tensões ou fluxos.
- $[\mathbf{P}]$ - Matriz que contém os termos do polinômio do *patch*.
- Pe - Número de Peclet.
- Pem - Número de Peclet da malha.
- $\{\mathbf{P}_{pr}\}$ - Vetor de carregamentos concentrados nodais prescritos na superfície.
- q'' - Fluxo de calor normal à superfície externa.
- \mathbf{q}_{num} - Fluxo de calor nodal obtido por meio numérico.
- \mathbf{q}_{analit} - Fluxo de calor nodal calculado analiticamente.
- q_i^* - Valores nodais da i -ésima componente do fluxo de calor do campo suavizado no patch (representação compacta).
- $\{\mathbf{q}\}$ - Vetor de fluxo de calor.
- $\{\bar{\mathbf{q}}\}$ - Vetor de fluxo de calor nodal com campo suavizado L_2 .
- $\{\hat{\mathbf{q}}\}$ - Vetor de fluxo de calor nodal com campo não suavizado.
- $\{\mathbf{Q}_p\}$ - Vetor global do fluxo de calor prescrito.
- $\{\mathbf{r}_e\}$ - Vetor dos carregamentos mecânicos relativo às forças de volume e de superfície (exceto carregamentos prescritos), no elemento.
- $\{\mathbf{R}_{m+t}\}$ - Vetor global dos carregamento de origem mecânica somado aos de origem térmica.
- $\{\mathbf{R}\}$ - Vetor global dos carregamentos de origem mecânica.
- s - Coordenada local do superelemento do *patch*.
- S - Superfície.
- S_e - Superfície do elemento.
- S_T - Superfície com temperatura T prescrita.

- S_{q_p} - Superfície com fluxo de calor q prescrito.
- S_{q_c} - Superfície com fluxo de calor q por convecção prescrita.
- t - Coordenada local do superelemento do *patch*.
- T - Temperatura.
- T^∞ - Temperatura prescrita no infinito.
- τ - Espessura.
- T_{ref_i} - Temperatura de referência do nó i .
- $\{\mathbf{T}_e\}$ - Vetor de temperaturas nodais, do elemento.
- $\{\mathbf{T}\}$ - Vetor de temperaturas global.
- $\{\mathbf{u}\}$ - Vetor dos deslocamentos.
- $\{\mathbf{v}\}$ - Vetor das velocidades.
- V - Volume.
- V_e - Volume do elemento.
- x, y - Coordenadas globais, direções.
- x_{ll}, y_{ll} - Coordenadas do canto superior direito do superelemento do *patch*.
- x_{ur}, y_{ur} - Coordenadas do canto inferior esquerdo do superelemento do *patch*.
- y_i - Espessura do filme de revestimento na interface com o substrato.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO - FILMES DE REVESTIMENTO	20
1.1	OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO.....	23
1.2	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	23
2	MECÂNICA DO CONTÍNUO - EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO	24
2.1	INTRODUÇÃO.....	24
2.2	ELASTICIDADE 3D.....	24
2.2.1	Tensões.....	24
2.2.2	Deformações.....	25
2.2.3	Relação constitutiva.....	26
2.3	ELASTICIDADE 2D.....	28
2.3.1	Estado plano de tensões (EPT).....	28
2.3.2	Estado plano de deformações (EPD).....	29
2.3.3	Energia potencial total.....	30
2.4	TRANSFERÊNCIA DE CALOR 2D.....	31
2.5	ACOPLAMENTO TERMOMECÂNICO.....	32
2.6	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS GRADADOS FUNCIONALMENTE.....	35
3	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	37
3.1	TRANSFERÊNCIA DE CALOR 2D.....	37
3.2	ELASTICIDADE 2D - ACOPLAMENTO TERMOMECÂNICO.....	40
3.3	FGM – MATERIAL FUNCIONALMENTE GRADADO.....	42
4	MÉTODOS DE PÓS-PROCESSAMENTO DE TENSÕES E FLUXOS	45
4.1	INTRODUÇÃO.....	45
4.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	45
4.3	EXTRAÇÃO DE TENSÕES E FLUXOS.....	48
4.3.1	Método de avaliação direto nos nós.....	48
4.3.2	Método de extrapolação.....	49
4.3.3	Método de suavização de tensões.....	49
4.3.3.1	Método de suavização global (L_2).....	50
4.3.4	Método superconvergente baseado em <i>patch</i> de elementos (SPRE).....	52

4.3.5	Método <i>patch</i> de deslocamentos ou <i>patch</i> de temperaturas.....	56
4.3.6	Acoplamento termomecânico.....	59
5	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	60
5.1	VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE PÓS-PROCESSAMENTO DE FLUXOS VIA PATCH DE TEMPERATURA.....	60
5.1.1	Sensibilidade dos fluxos à distorção de malha.....	60
5.1.2	Taxa de convergência do erro do fluxo do calor global.....	70
5.1.3	Recuperação do fluxo na fronteira.....	73
5.1.4	Validação das rotinas relativas às propriedades dos materiais FGM.....	79
5.2	ESTUDO DE PAR TRIBOLÓGICO COM REVESTIMENTO FGM SOB CARREGAMENTO TERMOMECÂNICO.....	83
5.2.1	Descrição do modelo físico.....	83
5.2.2	Descrição do modelo matemático.....	87
5.2.3	Descrição do modelo de elementos finitos.....	90
5.2.4	Apresentação dos resultados analíticos e numéricos.....	94
5.2.4.1	Resultados do campo de temperaturas.....	95
5.2.4.2	Resultados de tensões cisalhantes.....	99
5.2.4.3	Resultados de tensões normais.....	106
5.3	ANÁLISE DO PAR TIN/AL - FGM VERSUS HMG.....	114
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	117
	REFERÊNCIAS BIBLOGRÁFICAS.....	120
	APÊNDICE A - IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	126