Arnaldo Freitas Camarão

**UM MODELO PARA PREVISÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM
CILINDROS DE AÇO TEMPERADOS POR INDUÇÃO.**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo, para obtenção
do título de Doutor em Engenharia**

**São Paulo
1998**

Arnaldo Freitas Camarão

**UM MODELO PARA PREVISÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM
CILINDROS DE AÇO TEMPERADOS POR INDUÇÃO.**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo, para obtenção
do título de Doutor em Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais**

**Orientador:
Paulo Sérgio C. Pereira da Silva**

1998

UM MODELO PARA PREVISÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM
CILINDROS DE AÇO TEMPERADOS POR INDUÇÃO

ERRATA DA TESE

AGRADECIMENTOS.

- Sétimo agradecimento de cima para baixo.

Onde se lê:

“À Metal Leve - José Ricardo Rebello, **Valentim** e ...”

Adicionar:

“À Metal Leve - José Ricardo Rebello, **José Valentim Saramanda** ...”

- Oitavo agradecimento de cima para baixo.

Onde se lê:

“À Krupp - Marissa Montalban, pelas inúmeras medições de tensão residual...”

Adicionar:

“À Krupp - Marissa Montalban, pelas inúmeras medições de **tensões residuais**...”

(Incluir) ⇒ LISTA DE FIGURAS

FIG.1 - Diagrama de interações temperatura-mudança de fase - tensão/deformação.....	5
FIG.2 - Curva de Transformação Isotérmica Típica	6
FIG.3 - PIT ("Transformation Plasticity") x Tensão Aplicada.Aço 60NCD11(Colette)	13
FIG. 4- TIP x quantidade de martensita transformada	13
FIG.5 - Perfil de Tensão Residual calculado x experimental. Modelos com e sem PIT (transformation plasticity).....	14
FIG.6 -Variação do Ms sob tensão externa	16
FIG.7 - Corpos de Prova (c.p.) - pino de aço SAE 4140.....	21
FIG.8 – Têmpera Progressiva por Indução.....	23
FIG.9 –Têmpera Progressiva por Indução. Esquema dos componentes	23
FIG.10 – Camadas induzidas nas amostras seccionadas.....	24
FIG.11 – Esquema de uma têmpera estacionária (Melander).	25
FIG.12 - Fluxograma da Análise Térmica Transiente Não-Linear	27
FIG.13 - Linhas do Modelo de Elementos Finitos da Têmpera Progressiva.....	30
FIG. 14 - Malha de Elementos Finitos da Têmpera Progressiva.....	31
FIG.15 - Curvas Tensão x deformação - Modelo Bilinear (BKIN).	31
FIG.16 -Fluxograma da Análise de Tensões Termoelastoplástica.	32
FIG.17 - Elipsóide de tensão e deformação.....	35
FIG.18 - Tensões na superfície de uma amostra plana	36
FIG.19 - Difração de feixe de raios X de acordo com lei de Bragg	39
FIG.20 - Dupla exposição do feixe de raios X.	40
FIG.21 - Variação linear de $\varepsilon_{\phi\psi}$ com $\sin^2\psi$ - método do $\sin^2\psi$	41
FIG.22 - Equipamento Rigaku Strainflex MSF-2M (Krupp).	45
FIG.23 - Equipamento JEOL – JDX-11PA (Metal Leve).	45
FIG.24 - Medição de tensão residual no JEOL – JDX-11PA.....	46
FIG. 25 - Curvas de Isotemperaturas (° C) após 60 s.....	48
FIG.26 - Temperatura (° C) x Tempo (s) para diferentes raios (mm).....	48
FIG.27 - Tensões Residuais Longitudinais (MPa).....	49
FIG.28 - Tensões Residuais Circunferenciais (MPa).....	49
FIG.29 - Tensões Residuais de Von Mises (MPa).....	50
FIG. 30 - Curvas de Isotemperaturas (° C) após 60 s.....	50
FIG. 31 - Temperatura (° C) x Tempo (s) para diferentes raios (mm).....	51
FIG. 32 - Tensões Residuais Longitudinais (MPa).....	51
FIG. 33 - Tensões Residuais Circunferenciais (MPa).....	52
FIG. 34 - Tensões Residuais de Von Mises (MPa).....	52
FIG. 35 - Curvas de Isotemperaturas (° C) após 60 s.....	53
FIG.36 - Temperatura (° C) x Tempo (s) para diferentes raios (mm).....	53
FIG. 37 - Tensões Residuais Longitudinais (MPa).....	54
FIG.38 - Tensões Residuais Circunferenciais (MPa).....	54
FIG.39 - Tensões Residuais de Von Mises (MPa).....	55

FIG.40 - Temperatura (° C) x Tempo (s) para diferentes raios (mm).....	55
FIG.41 - Curvas de Isotemperaturas (° C) após 16 s.....	56
FIG. 42 - Curvas de Isotemperaturas (° C) após 36 s.....	56
FIG. 43 - Curvas de Isotemperaturas (° C) após 50 s.....	57
FIG.44 - Tensões Residuais Longitudinais após 5 s (MPa).	57
FIG.45 - Tensões Residuais Circunferenciais após 5 s (MPa).	58
FIG.46 - Tensões Residuais de Von Mises após 5 s (MPa).	58
FIG.47- Variação típica de dureza e tensão residual com a profundidade de camada induzida, em corpos de prova cilíndricos	59
FIG.48- Tensão longitudinal na superfície em função da profundidade de camada induzida em barras de 4 tipos de aço	60
FIG.49 - Pontos de medição de tensão residual na amostra seccionada - Rigaku Strainflex.....	62
FIG.50 - Intensidade de picos de difração X $\text{Sen}^2 \psi$ JEOL JDX-11PA.....	63
FIG. 51 – Tensão axial na amostra de camada 11.0 mm . JEOL JDX-11PA.....	63
FIG.52 – Distribuição de temperaturas para diferentes velocidades longitudinais de deslocamento do cilindro. (Mikael Melander) [25].....	68
FIG.53 – Têmpera progressiva - espectro de distribuição de temperatura.....	69

(Incluir) ⇒ LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos para quantificação da PIT.....	10
Tabela 2 - Valores de K (MPa ⁻¹)	10
Tabela 3 - Características do Corpo de Prova.	12
Tabela 4 – Aço SAE4140H – Composição Química	21
Tabela - 5 - Camada efetiva x camada 100% Martensita.....	22
Tabela 6 - Características de medição do equipamento	44
Tabela 7 - Características de medição do equipamento JEOL – JDX-11PA (Metal Leve).....	44
Tabela 8 - Resumo dos resultados obtidos x FIGS, em função da camada induzida.....	47
Tabela 9 - Resumo dos Resultados obtidos x FIGS.....	47
Tabela 10 - Tensões residuais circunferenciais na superfície (MPa)	60
Tabela 11 - Tensões residuais longitudinais na superfície (MPa).....	61
Tabela 12 - Tensões residuais radiais (MPa) X distância radial da superfície....	61
Tabela 13 - Tensões residuais radiais e circunferenciais (MPa) x distância radial da superfície, para as camadas induzidas 3.5, 8.0 e 11.0 mm .(Rigaku Strainflex)	62
Tabela-14 – Comparação entre as tensões circunferenciais e longitudinais numéricas x difração de raios X, em função da camada induzida.....	66

1 - INTRODUÇÃO.

Onde se lê:

(PAG.1) 1.2 - Justificativa.

(PAG.3) 1.3 – Passos para a solução do Problema.

(PAG.4) 1.4 – Características originais.

Substituir por:

(PAG.1) 1.1 - Justificativa.

(PAG.3) 1.2 – Passos para a solução do Problema.

(PAG.4) 1.3 – Características originais.

2 -REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

PAG. 5 (FIG.1) ,onde se lê:

TENSÃO/DEFORMAÇÃO

Substituir por:

MECÂNICO

PAG. 6 (FIG.2), adicionar:

$M_l = M_s$ = temperatura de início da transformação martensítica.

PAG. 7 (1º parágrafo, 4ª linha) , onde se lê:

“equação (2) abaixo. Alguns autores consideram esta interação essencial...”

Adicionar :

“equação de energia para coordenadas cilíndricas (2) abaixo. Alguns autores consideram esta interação essencial...”

PAG. 7 (item 2.3, 3ª linha) , onde se lê:

“representa o calor gerado devido a **expansão térmica** é em geral desprezada...,”

Substituir por:

“representa o calor gerado devido ao **trabalho mecânico**, é em geral desprezada...”

PAG. 8 (3º parágrafo, 6ª linha) , onde se lê:

“fraca (Austenita) [7-9]. A **Influência desta interação no perfil das tensões residuais** foi constatada por diversos autores e será portanto estudada neste trabalho.”

Substituir por:

“fraca (Austenita) [7-9], **cuja influência no perfil das tensões residuais** foi constatada por vários autores.”

PAG. 10 (3ª linha) , onde se lê:

“K = **constante** proporcional a variação volumétrica ($\Delta V/V$) e inversamente...”

Substituir por:

“K = **coeficiente** proporcional à variação volumétrica ($\Delta V/V$) e inversamente...”

PAG. 11 (equação (4)) , onde se lê:

$$\varepsilon_{ij}^{pt} = K \sigma f(m) \quad (4) \text{ onde,}$$

Substituir por:

$$\varepsilon_{ij}^{pt} = K \sigma_{ij} f(m) \quad (4) \text{ onde,}$$

PAG. 16 (item 2.6 - 2ª linha) , onde se lê:

“processo de têmpera é apresentada na forma **incremental** como:”

Substituir por:

“processo de têmpera é apresentada na forma **tensorial** como:”

PAG. 17 , onde se lê:

$$\varepsilon_{ij}^{pt} = K \sigma f(m)$$

Substituir por:

$$\varepsilon_{ij}^{pt} = K \sigma_{ij} f(m)$$

PAG. 19 (item 2.7) , onde se lê:

“2.7 - Conclusão.”

Substituir por:

“2.7- Dados experimentais necessários para o trabalho.”

4 - MATERIAIS E MÉTODOS.

PAG. 25 (1ª linha) , onde se lê:

“...refinamentos , visando a obtenção de resultados correspondentes aos experimentais.”

Substituir por:

“...refinamentos , visando a obtenção de resultados consistentes.”

PAG. 25 (2º parágrafo, 3ª linha) , onde se lê:

“Anexos A, B e C e D, constam os arquivos de entrada do ANSYS5.3 (.LOG),...”

Substituir por:

“Anexos A, B e C, constam os arquivos de entrada do ANSYS5.3 (.LOG),...”

PAG. 26 (5º tópico) , onde se lê:

“- Definição de intervalos pequenos de **sub-espacos** de carregamento”

Substituir por:

“- Definição de intervalos pequenos **subespaços** de carregamento”

PAG. 26 (6º tópico) , onde se lê:

“- Criação de rotina macro (sequência de comandos do ANSYS) para definição dos passos de carregamento (“LOADSTEPS”- **Anexos B e C**)”

Substituir por:

“- Criação de rotina macro (sequência de comandos do ANSYS) para definição dos passos de carregamento (“LOADSTEPS”- **Anexo B**)”

PAG. 28 (item 4.5.2) , onde se lê:

“(Inclusão da rotina “SWELLING” (**Anexo D**) ...”

Substituir por:

“(Inclusão da rotina “SWELLING” (**Anexo C**) ...”

PAG. 28 (item II) , onde se lê:

“Curvas (Tensão x Deformação) X Temperatura, considerando modelo bilinear de encruamento **isotrópico.**”

Substituir por:

“Curvas (Tensão x Deformação) X Temperatura, considerando modelo bilinear de encruamento **cinemático**.”

PAG. 28 (item III, 5ª linha) , onde se lê:

(Rotina Swelling - Anexo D)

Substituir por:

(Rotina Swelling - Anexo C)

PAG. 28 (item III, 5ª linha) , onde se lê:

“*neutrons* (ANSYS) [35] ...”

Substituir por:

“*neutrons* (ANSYS)) [35] ...”

PAG. 28 (item III, 6ª linha) , onde se lê:

“usuário, onde apenas sua interface com o programa encontra-se pronta. Após a **customização** desta rotina pelo usuário, com a inclusão da lei de geração da deformação de “SWELLING”, procedimento de “**linkagem**” ao ANSYS5.3”

Substituir por:

“usuário, onde apenas sua interface com o programa encontra-se pronta. Após a **adaptação** (“**customização**”) desta rotina pelo usuário, com a inclusão da lei de geração da deformação de “SWELLING”, procedimento de **acoplamento** (“**linkagem**”) ao ANSYS5.3”

PAG. 30 (item IV) , onde se lê:

IV - Definição dos LOAD STEPS (Anexos B e C) via rotina macro e solução.

Substituir por:

IV - Definição dos LOAD STEPS (Anexo B) via rotina macro e solução.

PAG. 39 (4^a linha), onde se lê:

“ângulos de rotação ψ (FIG.4), geralmente perpendicular à superfície e”

Substituir por:

“ângulos de rotação ψ (FIG.20), geralmente perpendicular à superfície e”

PAG. 40 (3^a linha), onde se lê:

“Combinando as equações (24) e (22) chega-se a expressão de em função...”

Adicionar:

“Combinando as equações (24) e (22) chega-se a expressão de σ_ϕ em função...”

PAG. 44 (Tabelas 6 e 7) Suprimir:

Linhas referentes ao coeficiente de Poisson (ν) e Módulo de Elasticidade (E).

5 - RESULTADOS.**PAG. 47 – (Item 5.1), incluir:**

As tabelas 8 e 9 agrupam respectivamente as figuras correspondentes aos resultados da análise por tmpera estacionria e progressiva.

PAG. 47 – (tabelas 8 e 9): Substituir FIGS. por figuras.

PAG. 47 – (tabela 9):

Substituir as 3 últimas linhas por,

Tensões Longitudinais (MPa) após 5s	44
Tensões Circunferenciais (MPa) após 5s	45
Tensões de Von Mises (MPa) após 5s	46

PAG. 47 – (Item 5.1.1), incluir após a tabela 8:

Para a tmpera estacionria, observa-se que devido s condies de contorno impostas, ou seja, sem fluxo de calor na direo axial, a distribuio de temperaturas s varia na direo radial e o aquecimento praticamente instantneo. A velocidade de resfriamento diminui sensivelmente com o aumento da espessura de camada induzida, chegando alguns ns do centro temperaturas de 250 C no modelo com 11 mm de camada. As tenses residuais apresentaram perturbaes nas bordas do modelo, nota-se um aumento de volume na regio da camada e portanto, foram analisadas ao longo do raio, para os ns com coordenada Y=0 (Eixo Y = direo axial). Para as camadas de 3.5 e 8.0 mm , as tenses residuais circunferenciais foram sempre compressivas na superfcie, com inverso de compressiva trativa dentro da camada induzida, voltando compressiva no ncleo, porm com baixa magnitude, prximo 200 MPa. Estes resultados podem ser melhor visualizados nas figuras V.1 e V.2 seguintes:

FIG. V.1 – Tensões Longitudinais x Camada Induzida.
(Tmpera Estacionria.)

FIG. V.2 – Tensões Circunferenciais x Camada Induzida.
(Têmpera Estacionária.)

Os resultados da camada de 11.0 mm foram semelhantes à de 8.0 mm, acentuando-se às variações, com tensões trativas no núcleo em torno de 250 MPa.

PAG. 47 – (Item 5.1.2), incluir após a tabela 9:

Para a têmpera progressiva, observou-se que o ciclo de aquecimento e resfriamento, FIG.40, manteve-se o mesmo, para diferentes posições ao longo da direção axial. Isto indica que a simplificação da modelagem do problema real como têmpera estacionária, mostrou-se uma boa aproximação, pois apesar de o indutor se mover, todos os pontos da seção transversal do cilindro, foram submetidos ao mesmo ciclo térmico. O efeito da velocidade do indutor é observado pelo espectro de temperaturas, semelhante ao rastro deixado por um corpo sólido ao se deslocar em meio fluido. As tensões residuais para a camada de 3.5 mm, após 5 s, são compressivas na superfície e trativas no núcleo, em torno de 250 MPa. Em função da limitação de recursos computacionais, conforme será discutido no capítulo seguinte, esta análise não pôde ser concluída e os resultados das tensões residuais apresentados servem apenas como referência, por serem parciais.

PAG. 59 (item 5.2)- substituir as constatações por:

Dos resultados apresentados, pode-se extrair as seguintes observações:

Têmpera Estacionária:

- Tensões Circunferenciais sempre compressivas na superfície, com magnitudes muito próximas das experimentais.
- Dentro da camada induzida as tensões residuais circunferenciais e longitudinais inverteram de compressivas à trativas.
- Quanto maior a espessura de camada, esta inversão mais se aproxima da transição.
- Tensão compressiva aumenta com espessura de camada, decaindo para as camadas mais profundas.
- Dentro da camada de 11.0 mm o perfil de tensões varia de compressivo na superfície, trativo à cerca de 3.0 mm abaixo, compressivo até à transição e trativo da transição até o núcleo.
- Tensão longitudinal menor que a circunferencial

Têmpera Progressiva:

- Tensões residuais longitudinais e circunferenciais são compressivas na superfície e trativas no núcleo, após 5 s de têmpera, para a camada de 3.5 mm.
- Velocidade influencia no perfil de temperaturas.
- Condução na direção axial torna o resfriamento mais lento (FIG.26 X FIG. 40)

PAG. 66 - incluir após linha 2:

Devido à grande dispersão das medidas de tensões ao longo do raio, muito provavelmente devido ao efeito do corte transversal, são comparados na Tabela 14 apenas os resultados na superfície.

PAG.66- (5ª linha de baixo para cima), onde se lê:

“convergência houve a necessidade de se empregar elementos de interpolação parabólica de 8 nós PLANE 82 (ANSYS5.3) e vários...”

Adicionar:

“convergência houve a necessidade de se empregar elementos de interpolação quadrática de 8 nós, tanto na análise térmica (PLANE 77), como na estrutural (PLANE 82) (ANSYS5.3) e vários...”

PAG. 66 (incluir novo parágrafo, no final do texto).

A descontinuidade observada para as camadas de 8.0 mm (figuras V.1 e V.2) e 11.0 mm (figuras 37 e 38), exatamente na camada induzida, deve-se provavelmente a um erro numérico. Possivelmente um refinamento de malha nesta região, ou atenuação da transição entre camada induzida x não induzida, via rotina “swelling”, possa eliminar este efeito.

Os resultados das tensões longitudinais (figura 37, camada de 11.0 mm) estão muito similares ao da figura 5 (pag.14), para a condição onde o PIT (plasticidade induzida por transformação) foi considerado, numa análise de têmpera completa em cilindro de Aço 60NCD11 de 35 mm de diâmetro. Isto sugere que o PIT talvez não seja importante para têmperas profundas. Já para camadas rasas, o mesmo não se observa. Portanto, a inclusão deste efeito, mesmo que de forma isotrópica, deve ser investigada.

PAG.66 - Tabela 14 - , onde se lê:

Tabela-14 – Comparação entre as tensões circunferenciais e longitudinais numéricas x difração de raios X, em função da camada induzida.

	SY (Long.)			SZ (Cir.)		
	EXP.	NUM.		EXP.	NUM.	
CAMADA (mm)		estac.	progr.		estac.	progr.
3.5	-505	-493	-450	-830	-561	-478
8.0	-486	-		-752	-754	
11.0	-440	-272		-636	-663	

Substituir por:

Tabela-14 – Comparação entre as tensões circunferenciais e longitudinais numéricas x difração de raios X, em função da camada induzida, na superfície.

	SY (Long.)			SZ (Cir.)		
	EXP.	NUM.		EXP.	NUM.	
CAMADA (mm)		estac.	progr.		estac.	progr.
3.5	-505	+ 200	-450	-830	-561	-478
8.0	-486	-400		-752	-754	
11.0	-440	8		-636	-663	

PAG.67- (item 6.2, 8ª linha de baixo para cima), onde se lê:

“A rotina macro desenvolvida ...”

Adicionar:

“A rotina macro desenvolvida (ANEXO B.3) ...”

PAG. 69 (incluir após a figura 53)

As análises tiveram caráter qualitativo por não se dispor de dados experimentais referentes ao coeficiente de filme x temperatura do fluido de refrigeração UCON E 2.8%, bem como o efeito da pressão do jato deste fluido refrigerante na troca de calor por convecção. O coeficiente de filme mostrou-se ser um parâmetro muito importante na definição da distribuição de temperaturas. Este fato é evidenciado nos primeiros resultados obtidos na simulação da temperatura progressiva (figura VI.1 abaixo), onde os resultados são totalmente inconsistentes com o esperado (ver figura 40 - pág. 55). A utilização de valores próximos ao UCON E 2.8% retirados da literatura [30] conduziu aos resultados da figura 40, muito mais razoáveis.

FIG.VI.1 - Perfil de temperaturas x Raio para a têmpera progressiva.

(fluido refrigerante - óleo)

PAG.70 - Substituir por:

7 - Conclusões.

Quanto ao modelo computacional:

- Coeficiente de filme e curvas tensão x deformação, em função da temperatura, possuem extrema importância na magnitude e perfil das temperaturas e tensões residuais.
- Elementos quadráticos são altamente recomendados, devido às altas não linearidades presentes, oriundas do acoplamento de diversos fenômenos como plasticidade, transformação de fase e transferência de calor não linear.
- Conhecimento do fenômeno físico é fundamental na definição dos passos de carregamento, que influenciam fortemente na convergência.

Quanto às tensões residuais desenvolvidas num cilindro temperado por indução.

- A medida das tensões circunferenciais na superfície apresentam boa concordância com os valores previstos pelo modelo computacional.
- A técnica empregada de medição de tensão residual ao longo da espessura, em seções seccionadas, não conduziu a resultados consistentes.

À Teresa e Paula minhas queridas esposa e
filha, pelo grande apoio e incentivo. A vocês
todo carinho e amor de meu coração.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Paulo Sérgio C. P. da Silva pela orientação, incentivo e valorização deste trabalho.

Ao Profs. Pedro Manuel e Paulo Pimenta pelas sugestões e análise crítica da parte numérica.

Aos Profs. Marcos Venicius e Fathi Darwish pelo incentivo constante.

À Meritor do Brasil Ltda (antiga Rockwell Braseixos) pela proposta e apoio ao desenvolvimento deste trabalho

Especial agradecimento ao Eng. José Luiz Albertin, diretor da Rockwell Braseixos, responsável pelo início deste trabalho.

A todos os amigos da Meritor que direta ou indiretamente contribuíram para conclusão deste trabalho.

À Metal Leve - José Ricardo Rebello, Valentin e Antônio Joaquim por ter cedido suas instalações para a medida de tensões residuais por difração de raios X.

À Krupp - Marissa Montalban, pelas inúmeras medições de tensão residual por difração de raios X efetuadas. Aos Engs. Valter Medeiros e Luis Fernando Palma pelo suporte e disponibilização do equipamento de difração de Raios X.

À EATON - Eng. João Vicente Faria, pelo empréstimo de padrões de difração de raios X.

SUMÁRIO DA TESE.

RESUMO

“ABSTRACT”

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Justificativa.....	1
1.2 - Passos para a solução do Problema.....	3
1.3 - Características Originais.....	4
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 – Modelo para previsão de tensões residuais.....	5
2.2 – Interações Temperatura – Mudança de Fase.....	6
2.3 - Interações Temperatura – Tensão/Deformação.....	7
2.4 - Interações Mudança de Fase – Tensão/Deformação.....	8
2.5 – Modelos Quantitativos.....	9
2.5.1 –Interação Mecânica (PIT).....	9
2.5.2 - Interação Metalúrgica (Efeito Cinético).....	14
2.6 – Equação Constitutiva.....	16
2.7 – Conclusão.....	19
3 - OBJETIVO.....	20
4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
4.1 - Composição química do material utilizado.....	21.
4.2 - Geometria e dimensões dos corpos de prova.....	21
4.3 - Características da Têmpera por Indução empregada.....	22
4.4 - Metodologia da Análise.....	24
4.5 - O Modelo Numérico.....	25
4.5.1 - Parte Térmica.....	25
4.5.2 - Parte Estrutural.....	28
4.6 - Técnica e equipamento para medição de tensão residual.....	33
4.6.1 – Teoria de medição de tensão residual por difração de raios X.....	33
4.6.2 – Equipamentos utilizados.....	44

5 - RESULTADOS.....	47
5.1 - Resultados Numéricos.	47
5.2 - Resultados Numéricos.	59
6 - DISCUSSÃO.....	65
7 - CONCLUSÕES.	70
Anexo A - Propriedades de Material	71
Anexo B - Arquivos de entrada do ANSYS.	74
Anexo C - Rotina de “Swelling”	100
Referências Bibliográficas	105

RESUMO

A previsão e entendimento da formação de tensões residuais oriundas da têmpera plena ou superficial nos aços tem sido objeto de estudo por um número considerável de pesquisadores, devido ao seu grande interesse tecnológico. Neste trabalho o objetivo principal consistiu no desenvolvimento de um modelo numérico para a previsão das tensões residuais em peças cilíndricas temperadas por indução. A têmpera por indução executada num componente previamente "beneficiado", isto é, temperado e revenido, é capaz de produzir uma camada superficial de alta dureza e tensões compressivas num núcleo resistente e tenaz. É esperado, entretanto, que o aumento da camada endurecida possa gerar tensões trativas indesejáveis abaixo da superfície, comprometendo a integridade estrutural do componente e levando a falhas prematuras. Portanto, neste trabalho ênfase foi dada no estudo da influência da profundidade de camada induzida no perfil e magnitude das tensões residuais em corpos de prova cilíndricos (c.ps.) de aço. O método de elementos finitos foi adotado para a solução do problema térmico (distribuição de temperatura) e estrutural (cálculo das tensões) com o emprego do programa ANSYS 5.3. Os efeitos metalúrgicos da mudança de fase Austenita - Martensita, responsável pelas altas tensões compressivas residuais na superfície, como resultado da expansão volumétrica inerente a esta transformação, foi modelado através de uma rotina FORTRAN especialmente desenvolvida neste trabalho e acoplada ao programa ANSYS 5.3. A criação da geometria do modelo e passos da solução foram automatizadas através do uso da linguagem paramétrica APDL(ANSYS Parametric Design Language) do programa ANSYS5.3. Trata-se de um problema termo-elasto-plástico onde as propriedades termo-físicas e mecânicas necessárias para o cálculo foram consideradas dependente da temperatura. Verificação e calibração do modelo computacional foi efetuada através da medição das tensões residuais em c.ps. cilíndricos de aço com o emprego da técnica de difração de raios X. Finalmente, são discutidos aspectos de precisão e principais fontes de erro, como também proposta de melhorias e futuras aplicações deste modelo.

ABSTRACT

Large efforts have been made to predict and understand the residual stresses formation in through hardening and case hardening of steel. In the present work the objective was to develop a model to predict the residual stresses in induction hardening of cylindrical steel bars. Induction hardening, i. e. electromagnetic heating and subsequent quenching, is a surface heat treatment of great use in industry because it is suitable to improve locally mechanical properties of the high stressed regions of the part. A hard surface layer with high compressive residual stress is normally obtained, while retaining ductility and toughness in the core. Applied to components that undergo severe duty cycles, such as gears, shafts axles and bearings, it is also clean, fast and suitable for on-line applications. It is expected however, that increasing the hardening depth leads to undesirable high subsurface tensile stress, which can cause premature failure of the component. Emphasis has been on investigating the influence of case depth on the residual stress distribution of the cylindrical steel specimens. A finite element model was developed to compute the temperature history, phase transformation and residual stress for the induction hardening process. The Austenite to Martensite phase transformation during quenching, responsible for the high surface compressive stress, as a result of volume expansion, was evaluated by a custom FORTRAN routine linked to the ANSYS5.3 FEA code. The model geometry and solution process were automated by the use of ANSYS Parametric Design Language (APDL). The thermoelastoplastic behavior of the material was studied, considering material properties temperature dependent. The results of the calculations have been compared to experimental measurements of the residual stresses at the surface, using X Ray diffraction technique. Finally, accuracy and main source of errors are discussed. Future improvements and applications of this model are proposed.

1 - INTRODUÇÃO

1.2 - Justificativa.

A garantia da correta combinação de propriedades mecânicas de um componente mecânico exige frequentemente a passagem por diferentes tratamentos térmicos.

Dentre estes destaca-se o de endurecimento por têmpera, cuja eficácia depende fundamentalmente do controle de seus parâmetros e eliminação de efeitos indesejáveis, como empenamento, trincas e falhas prematuras. Problemas desta natureza estão associados à tensões internas que surgem como resultado de altos gradientes térmicos e da expansão volumétrica devido à mudança de fase, gerando tensões residuais ao término do resfriamento, sempre que deformações plásticas participam do processo. As técnicas tradicionais para o controle destes parâmetros tem sido empíricas, como por exemplo:

- emprego de diagramas de transformação isotérmica (ITT) e resfriamento contínuo (CCT).
- variações nos meios de têmpera.
- medições das tensões residuais.

O método puramente experimental além de oneroso e demorado possui as seguintes limitações:

- fornece previsões qualitativas.
- não permite um acompanhamento do histórico da transformação.

O Desenvolvimento de um modelo computacional, para previsão das alterações macroscópicas que ocorrem em peças de aço, sujeitas a têmpera, contribuirá para avanços significativos nas áreas científica e tecnológica, como:

- previsão da formação de tensões térmicas.
- estudo da evolução da transformação martensítica e deformações plásticas resultantes.
- análise da influência de parâmetros importantes da têmpera, ou seja, meio de têmpera, temperatura do banho e grau de agitação.
- análise da influência do perfil e magnitude das tensões residuais em função do teor de carbono da camada cementada e da profundidade de camada induzida
- minimizar as distorções, empenamentos ou falhas oriundas do tratamento térmico, propondo geometrias favoráveis.
- tirar proveito dos efeitos benéficos das tensões residuais, como tensões superficiais compressivas, de modo a melhoria na vida à FADIGA de componentes.

Obviamente como qualquer modelo computacional que se proponha a investigar um problema físico, dependerá da entrada de dados experimentais como:

- propriedades físicas e mecânicas.
- equações fenomenológicas dos processos estudados, no caso particular os efeitos metalúrgicos e mecânicos da transformação Austenita-Martensita.

É Importante destacar que no processo de têmpera nos Aços vários tipos de transformações podem ocorrer, como as de nucleação e crescimento governadas por difusão, que são as “*controladas por difusão*”, ou seja, ferrítica, perlítica e bainítica e as “*não controlada por difusão*” chamada **Martensítica**.

Neste trabalho apenas a transformação **Austenita-Martensita** será abordada, muito embora a metodologia utilizada se aplique para ambas as transformações. A abrangência no estudo destas transformações aumenta com a disponibilidade dos dados experimentais acima citados.

1.3 – Passos para a solução do Problema.

Resumindo, os seguintes passos serão necessários para simulação do processo de têmpera.

I - Dados Experimentais.

- curvas resfriamento contínuo (CCT).
- propriedades termofísicas.
- coeficientes de transmissão de calor em função da temperatura.
- coeficientes das equações do efeito cinético e mecânico.
- propriedades mecânicas em função da temperatura e estrutura

(Curvas tensão x deformação)

II - Reprodução do transiente no modelo de elementos finitos.

II.1 - Parte Térmica

- cálculo das temperaturas nodais durante o processo.

II.2 - Parte Estrutural Acoplada aos efeitos e interações da têmpera

(Transformação martensítica).

- Leitura e aplicação do carregamento térmico durante o resfriamento.
- Considerar o aumento de volume quando houver transformação martensítica.
- Cálculo das tensões oriundas do processo, considerando efeitos plásticos.
- Estudo das tensões residuais.

III - Medição de tensões residuais por difração de raios X.

IV - Comparação dos resultados experimentais x numéricos.

1.4 – Características originais.

- Consideração dos efeitos da transformação martensítica através do acoplamento de rotina de usuário ao programa ANSYS5.3
- Desenvolvimento de rotina automatizada para determinação da distribuição de temperaturas resultante de têmpera por indução progressiva.
- Estudo quantitativo do efeito da espessura da camada induzida nas tensões residuais.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Modelo para previsão de tensões residuais.

O Desenvolvimento de um modelo para previsão de tensões residuais num espécime sujeito ao processo de têmpera deverá considerar os diferentes fenômenos e interações que fazem parte do processo (FIG.1) [1]. Estas interações não podem ser modeladas separadamente pois implicará numa distorção dos resultados. É verdade que algumas interações tem maior participação na formação das tensões residuais que as outras conforme será mostrado ao longo desta revisão. Discussão sobre as interações existentes e sua importância no modelo é apresentada a seguir.

FIG.1 - Diagrama de interações temperatura-mudança de fase-tensão/deformação

2.2 - Interações TEMPERATURA - MUDANÇA DE FASE.

A mudança de fase nos aços é governada principalmente pela temperatura ou pelo histórico de temperatura dentro de um intervalo de tempo. Esta dependência corresponde a interação 1 da FIG.1 e pode ser ilustrada por um diagrama ITT como o da FIG.2.

FIG.2 - Curva de Transformação Isotérmica Típica.

No caso da transformação martensítica a equação cinética que tem sido usada é a proposta por Koistinen e Marburger [2], ou seja:

$$m = 1 - \exp [-k (M_s - T)] \quad (1)$$

onde,

m = volume de martensita transformada (%).

M_s = temperatura de início da transformação martensítica.

T = temperatura instantânea.

$k = 0.011 \text{ K}^{-1}$ para maioria dos aços.

Existe também uma interação de MUDANÇA DE FASE para TEMPERATURA, interação 2 da FIG.1. Durante a mudança de fase o calor latente da transformação contribui para o aumento de temperatura, termo $\partial q / \partial t$ da equação (2) abaixo. Alguns autores consideram esta interação essencial [3,4].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial q}{\partial t} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

onde,

T = temperatura.

r = raio.

$\partial q / \partial t$ = calor latente da transformação de fase.

λ = condutividade térmica.

ρ = densidade.

C = calor específico.

t = tempo

2.3 - Interações TEMPERATURA - TENSÃO/ DEFORMAÇÃO.

A **Interação 3**, representa a origem de deformação devido a expansão térmica, comumente usada em problemas termomecânicos. Já a **interação 5**, que representa o calor gerado devido a expansão térmica é em geral desprezada [1], por ser inferior a 1% dos termos de geração de calor e taxa de variação de temperatura da equação de energia (2), base para o cálculo do histórico de temperatura.

2.4 - Interações MUDANÇA DE FASE - TENSÃO/ DEFORMAÇÃO.

Dois Mecanismos ocorrem durante a mudança de fase acompanhada de tensão nos aços, ou seja:

- Metalúrgico (Interação 6) - Efeito Cinético.
- Mecânico. (Interação 4) - (PIT)

A **Interação 6** relaciona-se com a cinética da transformação martensítica, promovendo uma alteração na temperatura M_s e o consequente deslocamento das curvas ITT, na presença de um estado de tensão. Esta influência na transformação martensítica depende do estado de tensão (trativo, compressivo ou hidrostático) [5,6], conforme será visto a seguir.

A **Interação 4** consiste na influência da deformação oriunda da mudança de fase no comportamento mecânico do material, comumente chamada de “**transformation induced plasticity**” ou plasticidade induzida por transformação (PIT). É a deformação plástica observada quando um espécime se transforma sob tensão mesmo para tensões abaixo da tensão de escoamento da fase mais fraca (Austenita) [7-9]. A Influência desta interação no perfil das tensões residuais foi constatada por diversos autores e será portanto estudada neste trabalho.

Das interações citadas as que fundamentalmente dependem de equações fenomenológicas para sua quantificação são as interações MUDANÇA DE FASE - TENSÃO/ DEFORMAÇÃO. Discussão sobre as diferentes propostas para se quantificar estes efeitos será abordado a seguir.

2.5 - Modelos Quantitativos.

2.5.1 - Interação Mecânica (PIT).

Vários modelos foram propostos para descrever o fenômeno PIT [10,11]. Entretanto poucos foram os modelos matemáticos ou fenomenológicos capazes de quantificar com relativa precisão este fenômeno. Dentre estes destacam-se os trabalhos de Greenwood-Johnson [12], inspirado em De Jong, M & Rathenau [13] e mais recentemente os de Abrassart [14] e Denis et al [15]. Estes modelos consideram que a variação volumétrica específica observada durante a transformação de fase resulta na criação de tensões internas na interface entre matriz e a fase transformada. Se o limite de escoamento da matriz é atingido, deformação plástica localizada se desenvolve nesta região. Por outro lado, se tensões externas são aplicadas, estas facilitam a movimentação das discordâncias geradas pelas tensões internas, acarretando em deformação plástica na direção da tensão aplicada, mesmo para tensões inferiores ao escoamento da fase mais fraca. De uma forma geral estes modelos admitem que a PIT é na verdade uma manifestação em escala microscópica da teoria clássica da deformação plástica dentro da fase mais fraca [16]. Breve descrição sobre cada um destes modelos quantitativos será apresentada a seguir.

Os modelos teóricos baseados na mecânica geralmente usam a teoria clássica da plasticidade na escala das fases (Matriz e Nova fase formada). Eles levam a uma expressão da PIT para baixas tensões aplicadas da seguinte forma:

$$\epsilon^{pt} = K \cdot \sigma \cdot f(x) \quad (3)$$

σ = tensão uniaxial aplicada.

$f(x)$ = função da quantidade da nova fase formada.

K = constante proporcional a variação volumétrica ($\Delta V/V$) e inversamente proporcional a tensão de escoamento da fase mais fraca (σ_E)

TABELA 1 - Modelos para quantificação da PIT.

	K	f(x)
Greenwood and Johnson [12]	$\frac{5}{6} \frac{1}{\sigma_E} \frac{\Delta V}{V}$	1
Abrassart [14]	$\frac{3}{4} \frac{1}{\sigma_E} \frac{\Delta V}{V}$	$\left(x - \frac{2}{3}x^{3/2}\right)$
Leblond [16]	$\frac{2}{3} \frac{1}{\sigma_E} \frac{\Delta V}{V}$	$x(1 - \ln x)$

Estes modelos tem sido usados essencialmente para descrever experimentos onde a transformação ocorre para uma tensão constante e no caso da transformação martensítica. Comparações entre valores de K para diferentes aços e modelos, considerando 100% de transformação, é apresentada na tabela 2.

Tabela 2 - Valores de K (MPa⁻¹) [17]

Aço	Valores Experimentais	Greenwood Johnson	Abrassart	Leblond
60NCD11	5×10^{-5}	9×10^{-5}	2.7×10^{-5}	7.2×10^{-5}
Fe Ni C	$10 - 12 \times 10^{-5}$	12×10^{-5}	3×10^{-5}	9.6×10^{-5}
Fe Ni C Cr	$10 - 12 \times 10^{-5}$	12×10^{-5}	3×10^{-5}	9.6×10^{-5}

O Modelo de Abrassart fornece valores de K bem menores que os experimentais. Isto é ilustrado na **FIG.3** para o Aço 60NCD11. Já os modelos de Greenwood-Johnson e Leblond fornecem valores similares e bem próximos dos experimentais, exceto no caso do aço 60NCD11. A **FIG.4** mostra curvas experimentais e calculadas da PIT x percentual de martensita transformada para uma liga Fe Ni C. A forma das curvas calculadas são similares às medidas. Entretanto, a variação da PIT é sempre muito inferior aos valores medidos. Isto sugere que o modelo de Greenwood-Johnson, embora mais simples, fornece resultados mais próximos dos experimentais e será a princípio adotado neste trabalho. Existem modelos mais precisos e sofisticados para quantificar a PIT como o de Denis et al [18], que empregou um modelo proposto por Guisti [19] e utilizado por vários autores (pg 811 de [18]). Este modelo consiste na equação clássica da deformação plástica (Mendelson -cap2 de [20]) acrescida de termos experimentais, que para estado triaxial de tensões, apresenta-se como:

$$\varepsilon_{ij}^{pt} = \text{"transformation plasticity" (interação mecânica PIT)}$$

$$\varepsilon_{ij}^{pt} = K \sigma f(m) \quad (4) \text{ onde,}$$

$$K = \text{constante experimental (MPa}^{-1}\text{)} \quad (5.2 \times 10^{-5} \text{ Aço 60 NCD 11)}$$

$$\text{Aço 60NCD11} \quad \% (0.57\text{C}, 0.31\text{Si}, 0.65\text{Mn}, 0.41\text{Mo}, 2.35\text{Ni})$$

$$M_s = 247 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\sigma = \text{tensão externa aplicada (MPa)}$$

$f(m)$ = função relacionada ao avanço da transformação martensítica

$f(m) = (2-m)m$ para o aço 60 NCD 11

Denis et al [18] utilizaram esta formulação para o cálculo de tensões internas e residuais, devido a têmpera em água, em espécimes cilíndricos.

Tabela 3 - Características do Corpo de Prova.

CORPO DE PROVA	PROCESSO
Aço 60NCD11	- têmpera em água (20 °C)
diâmetro = 35 mm	- austenitização (900 °C) por 15 min.
comprimento = 105 mm	- $M_s = 247$ ° C.

Os resultados deste estudo, mostrando a importância da inclusão da interação mecânica (PIT) no cálculo das tensões internas e residuais é mostrado na FIG.5. As tensões axiais em um plano médio longitudinal do cilindro, variando radialmente do núcleo para superfície são comparadas com resultados experimentais. Observa-se que os modelos que consideram o efeito da PIT possuem uma excelente concordância com resultados experimentais.

FIG.3 - PIT ("Transformation Plasticity") Tensão Aplicada. Aço 60NCD11(Colette) [21]

Resultados Experimentais para uma liga Fe -Ni -C. —————

Calculado com o Modelo de Abrassart

Calculado com o Modelo de Leblond. - - - - -

FIG. 4- TIP x quantidade de martensita transformada [22]

FIG.5 - Perfil de Tensão Residual calculado x experimental. Modelos com e sem PIT (transformation plasticity) [18].

2.5.2 - Interação Metalúrgica (Efeito Cinético).

Patel & Cohen [5] propuseram um critério termodinâmico para quantificar a influência das componentes normais e de cisalhamento das tensões no M_s durante uma transformação martensítica, chegando às seguintes conclusões :

- tensão de cisalhamento sempre aumenta o M_s .
- tensão normal trativa aumenta o M_s
- tensão normal compressiva aumenta o M_s , porém em menor escala que a trativa (ver eq. (5)), onde por exemplo ($\gamma = 0.19$, $\varepsilon = 0.03$ para o aço 60NCD11 [18]).
- componente hidrostática sempre abaixa o M_s .

Este fenômeno é devido a efeitos relativos cisalhamento e dilatação na transformação martensítica. A expressão proposta é a seguinte :

$$\frac{dM_s}{d\sigma} = \frac{1}{2} \left[\frac{\gamma_0 \sin 2\theta \pm \varepsilon_0 (1 + \cos 2\theta)}{d(\Delta G) / dT} \right] \quad (5)$$

onde :

γ = deformação de cisalhamento na transformação

ε = componente normal de deformação

θ = orientação entre o eixo da tensão e o plano de hábito normal

ΔG = variação de energia livre de Gibbs

- = compressão ; + = tração

$d(\Delta G) / dT = \Delta H / T_0$ (pressão hidrostática)

Este modelo entretanto somente se aplica a tensões dentro do limite elástico e portanto um modelo mais completo necessita ser empregado. A FIG. 6 mostra o emprego do critério de Patel e Cohen para um aço 60NCD11 por Colette [21]. Os valores calculados variam mais rápido que os medidos. Inoue [6] propôs um modelo baseado em resultados experimentais para poder calcular o efeito no M_s em estado complexo de tensões e considerando o critério de de Von Mises para o cálculo das tensões equivalentes externas. [Ver (10)].

Apesar da existência deste EFEITO CINÉTICO (Variação do M_s), sua influência na magnitude e perfil das tensões residuais não tem se mostrado significativa (FIG.5) e portanto não será considerada neste trabalho.

FIG.6 -Variação do M_s sob tensão externa [21].

2.6 - Equação Constitutiva.

A equação constitutiva que governa o comportamento termoelastoplástico de um processo de têmpera é apresentada na forma incremental como:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^{TT} + \varepsilon_{ij}^p \quad (6)$$

ε_{ij} = tensor de deformação total ; ε_{ij} = tensor de deformação elástica.

ε_{ij}^{TT} = deformação resultante dos efeitos térmicos (ε^{th}) e

de transformação $\varepsilon^{tr} + \varepsilon^{pt}$

$$\varepsilon_{ij}^{TT} = \varepsilon_{ij}^{th} + \varepsilon_{ij}^{tr} + \varepsilon_{ij}^{pt} \quad (7)$$

Onde ε_{ij}^{th} e ε_{ij}^{tr} obedecem a regra linear das misturas, ou seja:

$$\varepsilon_{ij}^{th} = \sum_{k=1}^6 y_k \int_0^T \alpha_k(T) dT \quad (8)$$

$$\varepsilon_{ij}^{tr} = \sum_{k=2}^6 y_k \varepsilon_{k,0^\circ C}^{tr} \quad (9)$$

$$y_5 = (1 - y_2 - y_3 - y_4 - y_6) [1 - \exp(-0.01 (M_s - T))] \quad (10)$$

y_k = fração volumétrica da fase k .

$k = 1$, austenita.

$k = 2$, ferrita.

$k = 3$, perlita.

$k = 4$, bainita.

$k = 5$, martensita.

$k = 6$, cementita.

$$\varepsilon_{ij}^{pt} = K \sigma f(m)$$

O efeito metalúrgico (cinético) da aplicação de tensão externa durante a transformação martensítica consiste basicamente no aumento do M_s , que para um estado complexo de tensões pode ser quantificado como:

$$\Delta M_s = A \sigma_m + B \sigma_e \quad (11)$$

$$M_s = M_{s0} + \Delta M_s$$

A e B ($K \text{ MPa}^{-1}$) são função do Aço.

$$\sigma_m = \text{tensão média} = 1/3 (\sigma_{\text{radial}} + \sigma_{\text{circunfe.}} + \sigma_{\text{longitu.}})$$

σ_e = tensão equivalente de Von Mises

Da equação (6) pode-se notar que os dados necessários dependem de dois fatores, ou seja:

I - Caracterização experimental do comportamento termomecânico do material ao longo do resfriamento (Parâmetros metalúrgicos e mecânicos).

- Comportamento dimensional do metal com a ausência de tensão externa (emprego da técnica de dilatométrica).
- Comportamento mecânico. Propriedades Mecânicas em função da temperatura e estrutura, medidas por ensaio de tração em corpos de prova para diferentes temperaturas ao longo do resfriamento.

II - Efeito das Interações entre tensão externa e a mudança de fase.

- Efeito cinético (Aumento do M_s).
- Efeito mecânico ("transformation plasticity"). Deformação adicional oriunda da transformação de fase sob tensão.

As equações fenomenológicas de ϵ^{tr} e ϵ^{pt} surgiram basicamente do ajuste de dados experimentais. A de ϵ^{tr} baseada no modelo cinético de Koistinen e Marburger e de ϵ^{pt} na combinação da teoria de plasticidade e critério de escoamento de Von Mises.

2.7 - Conclusão.

Resumindo, os seguintes dados experimentais serão necessários para utilização das equações fenomenológicas que descrevem a têmpera nos aços.

- curvas CCT.
- propriedades termofísicas.
- coeficientes de transmissão de calor em função da temperatura.
- coeficientes das equações do efeito cinético e mecânico.
- propriedades mecânicas em função da temperatura e estrutura

(Curvas tensão x deformação)

3 - OBJETIVO.

Desenvolvimento de modelo computacional, capaz de prever a formação de tensões internas e residuais, em peças cilíndricas de aço, sujeitas ao tratamento térmico de têmpera por indução. Será estudado a influência da profundidade de camada induzida no perfil e magnitude das tensões residuais. A têmpera nos aços envolve fenômenos térmicos, mecânicos, estruturais e suas interações. Neste modelo serão consideradas não somente as tensões puramente térmicas devido ao transiente mas as de transformação, juntamente com suas interações. Trata-se de um problema termo-elasto-plástico onde as propriedades termo-físicas e mecânicas necessárias para o cálculo serão consideradas dependente da temperatura. O método de elementos finitos será adotado para a solução do problema térmico (distribuição de temperatura) e estrutural (cálculo das tensões) com o emprego do programa ANSYS 5.3 [23]. Os efeitos metalúrgicos e mecânicos da transformação Austenita - Martensita, única considerada nesta análise, estarão embutidos em rotina desenvolvida pelo usuário e acoplada ao programa ANSYS. Verificação e calibração do modelo computacional será efetuada através da medição das tensões residuais em espécimes cilíndricos de aço com o emprego da técnica de difração de raios X.

4 - MATERIAIS E MÉTODOS.

4.1 – Composição química e caracterização microestrutural.

4.1.1 – Materia prima.

Material: Aço SAE 4140H

Origem: Aços Finos Piratini

Forma: barra laminada redonda

Diâmetro= 50.8 mm

Tabela 4 – Aço SAE4140H – Composição Química

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Sn	Cu
0,41	0,24	0,85	0,020	0,012	1,06	0,15	0,23	0,018	0,015	0,13

4.1.2 – Beneficiamento.

Têmpera: Poliglicol 15%

Revenido: 269-321 HB

4.2 - Geometria e dimensões dos corpos de prova (c.p.)

FIG.7 - Corpos de Prova (c.p.) - pino de aço SAE 4140

ϕ = diâmetro = 45 mm

$L = 4 \times \phi$; $L = 180$ mm

4.3 - Características da Têmpera por Indução empregada.

Têmpera progressiva com as seguintes características (FIG.8 e FIG.9):

- Aquecimento: 850° C
- Ducha de Resfriamento (Ucon E 2.8%) [24]: 21 °C
- Velocidade de Deslocamento da peça: 3.6 mm/s
- Profundidade efetiva de camada induzida à 40 HRC
- Camadas Induzidas (mm): 3.5, 8.0 e 11.0 (FIG.10)

Análise microestrutural das camadas induzidas mostrou que a camada de 100% de martensita transformada é menor que a camada efetiva (Tabela 5).

Tabela - 5 - Camada efetiva x camada 100% Martensita.

Camada Efetiva à 40 HRC (mm)	100% Martensita (mm)
3.5	2.3
8.0	5.4
11.0	7.0

As simulações deste trabalho basearam-se na camada efetiva.

FIG.8 – Têmpera Progressiva por Indução.

FIG.9 – Têmpera Progressiva por Indução. Esquema dos componentes .

**FIG.10 – Camadas induzidas nas amostras seccionadas.
(diâmetro da peça = 45 mm)**

4.4 - Metodologia.

O trabalho foi dividido em duas etapas, EXPERIMENTAL e NUMÉRICA, que foram desenvolvidas simultâneamente. A etapa experimental consistiu da confecção de corpos de prova, tratamento térmico e medição de tensão residual por difração de raios X. A numérica utilizou duas abordagens para se modelar a têmpera por indução, a primeira considerando uma têmpera estacionária, onde o indutor possui praticamente o comprimento do cilindro e toda a camada induzida é endurecida de uma só vez. Indutor e peça não possuem movimentos relativos e portanto a velocidade não faz parte da análise. Na segunda, chamada de têmpera progressiva, a velocidade de deslocamento da peça influencia no perfil de temperaturas durante o processo de aquecimento e resfriamento, cujo efeito nas tensões residuais foi investigado para a camada de 3.5 mm. A análise completa foi efetuada com a abordagem de têmpera estacionária que conduziu mais rapidamente aos resultados procurados. Por fim os resultados experimentais foram comparados com os do modelo numérico, que foi submetido à sucessivos

FIG.11 – Esquema de uma têmpera estacionária [25]Melander.

refinamentos , visando a obtenção de resultados correspondentes aos experimentais.

A análise numérica, tanto para a abordagem considerando *têmpera estacionária* ou *têmpera progressiva*, foi dividida em uma parte térmica e outra estrutural. Nos Anexos A, B, C e D, constam os arquivos de entrada do ANSYS5.3 (.LOG), resultantes dos passos descritos a seguir.

4.5 - O modelo numérico.

4.5.1 - Parte Térmica - Determinação da distribuição de Temperaturas ao longo do transiente.

I - Definição do material e ciclo de indução.

- Material SAE 4140H (Dados Experimentais disponíveis) [Hildenwall][26]
- Têmpera Estacionária e Progressiva [Melander] [25]

II - Construção do modelo de elementos finitos e definição da análise.

- Elementos Térmicos Axissimétricos PLANE55 de 4 nós (têmpera progressiva) e PLANE 77 de 8 nós têmpera progressiva). [27-28]
- Geração da malha de elementos finitos com refinamento na camada induzida.
- Propriedades termofísicas X temperatura. (Anexo A)
 - . coeficiente de filme (HF) [29-30] x Temperatura (Ar, óleo e água).
 - . calor específico (C), densidade (DENS) e condutividade térmica (KXX)

Metodologia para estimativa do coeficiente de filme é disponível em [31-33].

- Análise Transiente Não Linear
- Definição de intervalos pequenos de sub-espacos de carregamento
 (“SUBSTEPS”) no início do resfriamento para boa captura do transiente.
- Criação de rotina macro (sequência de comandos do ANSYS) para definição dos passos de carregamento (“LOADSTEPS”- Anexos B e C)

Estes passos são resumidos no fluxograma da análise (FIG.12).

FIG.12 - Fluxograma da Análise Térmica Transiente Não-Linear.

4.5.2 - Parte Estrutural - Determinação das Tensões e deformações (Inclusão da rotina “SWELLING” (Anexo D) para computar a deformação resultante da transformação martensítica).

I - Troca de elementos térmicos por estruturais. [34]

I.1 - Têmpera progressiva.

Troca dos elementos axissimétricos PLANE55 (térmicos) por PLANE42 (estruturais)

Detalhe de parte do modelo e malha de elementos finitos são mostrados respectivamente nas **FIGS. 13 e 14.**

I.2 - Têmpera estacionária.

Troca dos elementos axissimétricos PLANE77 (térmicos) por PLANE82 (estruturais)

II - Propriedades Estruturais [Hildenwall] [26] (FIG. 15)

- . Curvas (Tensão x Deformação) X Temperatura, considerando modelo bilinear de encruamento isotrópico.
- . Coeficiente de Poisson (NUXY) e Coeficiente de Dilatação Linear (ALPX) X temperatura.

III - Desenvolvimento de rotina FORTRAN acoplada ao ANSYS para computar os efeitos mecânicos da transformação martensítica]
(Rotina Swelling - Anexo D)

A única forma de se modelar a imposição de uma deformação num elemento sólido no ANSYS é através do acoplamento de uma rotina FORTRAN, denominada de “SWELLING” (*a palavra Swelling é usada para se descrever o aumento de volume de material devido ao bombardeamento de um feixe de neutrons* (ANSYS) [35] . Trata-se de uma rotina que deve ser desenvolvida pelo usuário, onde apenas sua interface com o programa encontra-se pronta. Após a customização desta rotina pelo usuário, com a inclusão da lei de geração da deformação de “SWELLING”, procedimento de “linkagem” ao ANSYS5.3 através dos compiladores MS FORTRAN e C (4.0) precisa ser efetuado para

geração de um novo arquivo executável, que considera os efeitos de “swelling”.

Vale salientar que esta deformação é necessariamente isotrópica.

- O efeito cinético da variação do M_s não foi incluído, devido a sua pequena influência no perfil e magnitude das tensões residuais, conforme apresentado no capítulo 2.
- A restrição de que a deformação de *swelling* precisa ser isotrópica não permitiu a inclusão da plasticidade induzida por deformação (“transformation induced plasticity” - PIT), que depende da direção de atuação da tensão. Entretanto, nas situações onde a PIT possa ser assumida isotrópica, a rotina desenvolvida neste trabalho permite a inclusão desta deformação.

O conceito do fenômeno de “SWELLING” é a forma mais direta e precisa para se modelar o aumento de volume do material, resultante da transformação martensítica que ocorre numa têmpera por indução, utilizando-se:

- Equação de *Koistinen e Marburger*
- Deformação total devido à transformação de fase.
- Regra linear das misturas .

pode-se construir uma rotina que determine a deformação da transformação de fase em função da temperatura. Esta rotina é apresentada no Anexo D

IV - Definição dos LOAD STEPS (Anexos B e C) via rotina macro e solução.

V - Fluxograma da Análise (FIG.16)

FIG.13 - Linhas do Modelo de Elementos Finitos da Têmpera Progressiva.

FIG. 14 - Malha de Elementos Finitos da Têmpera Progressiva.

FIG.15 - Curvas Tensão x deformação - Modelo Bilinear. (BKIN)

FIG.16 -Fluxograma da Análise de Tensões Termoelastoplástica.

4.6 - Técnica e equipamento para medição de tensão residual.

4.6.1 - Teoria de medição de tensão residual por difração de Raios X.

I – Introdução.

Materiais Cristalinos quando submetidos a um estado de tensão (aplicado ou residual) promovem uma variação no espaçamento "d" de seus planos atômicos. A deformação resultante desta alteração em "d" pode ser calculada e relacionada com a tensão. Isto é conseguido por meio da medida da mudança de posição angular de um feixe de raios X difratado, após sua incidência na amostra analisada. Resumo dos principais passos para o equacionamento deste problema será apresentado a seguir

II - Princípios do método.

A relação das deformações de um reticulado cristalino com tensões baseia-se na teoria clássica da elasticidade e no fenômeno da difração de raios X. Assunto descrito e discutido em diversas publicações [36-38]. Admitindo que sob a ação de tensões, um elemento esférico de volume, em um corpo isotrópico, se distorce na forma de um elipsóide, tem-se da teoria da elasticidade que os vetores normais de deformação $\varepsilon_{\phi\psi}$ e tensão $\sigma_{\phi\psi}$ deste elipsóide são dados por:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \varepsilon_1 \alpha_1^2 + \varepsilon_2 \alpha_2^2 + \varepsilon_3 \alpha_3^2 \quad (12)$$

$$\sigma_{\phi\psi} = \sigma_1 \alpha_1^2 + \sigma_2 \alpha_2^2 + \sigma_3 \alpha_3^2 \quad (13)$$

$$\alpha_1 = \cos \phi \sin \psi$$

$$\alpha_2 = \text{sen } \phi \text{ sen } \psi$$

$$\alpha_3 = \cos \psi = (1 - \text{sen}^2 \psi)^{1/2}$$

onde, α_1 , α_2 e α_3 são os cossenos diretores do vetor deformação $\varepsilon_{\phi\psi}$ e tensão

$\sigma_{\phi\psi}$ em relação aos eixos das deformações e tensões principais respectivamente.

Como tensões não podem ser medidas diretamente e sim calculadas a partir da medida de deformações, o elipsóide de deformações de (12) é utilizado para o cálculo das tensões. Substituindo os valores das deformações principais (14)

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (14)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1)]$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)]$$

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{(1+\nu)}{E} (\sigma_1 \alpha_1^2 + \sigma_2 \alpha_2^2 + \sigma_3 \alpha_3^2) - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (15)$$

que relaciona as deformações em qualquer direção ϕ , ψ dentro de um corpo com as tensões principais atuantes (FIG.17).

FIG.17 - Elipsóide de tensão e deformação.

III - Relação da equação de deformação com análise de tensões por difração de raios X.

Devido a baixa penetração dos raios X, tipicamente da ordem de 0.015 mm [39], assume-se nesta profundidade estado plano de tensões. Portanto, existem apenas duas tensões principais σ_1 e σ_2 atuando sobre o plano da superfície, uma vez que σ_3 , normal à superfície, é considerada nula ou desprezível. Entretanto, conforme observado em (15), existe um estado triaxial de deformações devido ao efeito de Poisson ($\epsilon_3 \neq 0$). Isto pode ser ilustrado na FIG.18

**FIG.18 - Tensões na superfície de uma amostra plana
(estado plano de tensões)**

Para estado plano de tensões na superfície da amostra e substituindo os valores dos cosenos diretores α_1 e α_2 na expressão geral de deformação (15), chega-se

a:

$$\epsilon_{\phi\psi} = \frac{(1+\nu)}{E}(\sigma_1\alpha_1^2 + \sigma_2\alpha_2^2) - \frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (16)$$

onde de (2) e para $\psi = 90$ tem-se,

$$\sigma_\phi = \sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \sin^2 \phi \quad (17)$$

que substituindo-se em (16) chega-se a:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{(1+\nu)}{E}(\sigma_{\phi} \sin^2 \psi) - \frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (18)$$

Esta é a equação básica necessária para relacionar os princípios da difração de raios X com as relações de tensão e deformação da teoria da elasticidade, podendo ser utilizada para determinar a tensão σ_{ϕ} em qualquer direção sobre a superfície da amostra. A direção da tensão superficial σ_{ϕ} pode ser tal que coincida com a direção longitudinal, transversal ou qualquer outra.

Considerando-se a medida do espaçamento interplanar de um espécime tensionado ($d_{\perp}$) numa direção aproximadamente igual a da normal à superfície e d_0 o espaçamento interplanar correspondente ao estado não tensionado, tem-se:

$$\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_{\phi 0} = \frac{d_{\perp} - d_0}{d_0} = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (19)$$

onde $\varepsilon_{\perp}$ = deformação normal à superfície da amostra e $\psi = 0$.

Substituindo-se (8) em (7) chega-se a:

$$\sigma_{\phi} = (\varepsilon_{\phi\psi} - \varepsilon_{\perp}) \frac{E}{(1+\nu)} \left(\frac{1}{\sin^2 \psi} \right) \quad (20)$$

Admitindo $d_0 = d_{\perp}$ tem-se

$$(\varepsilon_{\phi\psi} - \varepsilon_{\perp}) = \frac{d_{\psi} - d_{\perp}}{d_{\perp}} \quad (21)$$

Substituindo (21) em (20), uma forma mais conveniente da equação da tensão σ_{ϕ} em função da variação do espaçamento interplanar é obtida, ou seja:

$$\sigma_{\phi} = \frac{d_{\psi} - d_{\perp}}{d_{\perp}} K^* \quad (11) \quad (22)$$

$$K^* = \frac{E}{(1 + \nu)} \left(\frac{1}{\sin^2 \psi} \right)$$

K^* = constante de tensão.

IV - Equação de tensão em função do ângulo de difração (2θ).

Uma vez que nos difratômetros de raios-X a posição dos feixes difratados é obtida diretamente em termos do ângulo de difração, e a maioria das medidas de tensões residuais é realizada nestes equipamentos, torna-se mais conveniente apresentar a equação de tensão em função da posição angular 2θ .

A difração de raios X num cristal (**FIG.19**) ocorre quando a lei de Bragg é satisfeita, ou seja:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (23)$$

n = inteiro

λ = comprimento de onda de um feixe monocromático (1 a 2 Å)

d = espaçamento entre planos (h k l) da rede.

θ = ângulo de incidência do feixe com os planos atômicos.

FIG.19 - Difração de feixe de raios X de acordo com lei de Bragg.

Uma mudança no ângulo θ ou 2θ é diretamente relacionada com a deformação da rede e a partir da diferenciação da equação de Bragg (23), ou seja:

$$\frac{\Delta d}{d_{(hkl)}} = -\cot \theta_{(hkl)} \Delta \theta \quad \text{que é equivalente a} \quad \frac{\Delta d}{d} = -\cot \theta \left(\frac{\Delta 2\theta}{2} \right) \quad (24)$$

O feixe de raios X é usualmente direcionado para superfície em pelo menos dois ângulos de rotação ψ (FIG.4), geralmente perpendicular à superfície e rotacionado de 45 graus. Se o material estiver submetido à tração, o feixe de raios X normal à superfície será difratado de 2θ , correspondente à pequena redução no espaçamento interplanar. Para $\psi = 45^\circ$ o feixe será difratado por um ângulo ligeiramente diferente, correspondendo ao aumento do espaçamento na

direção da tensão de tração. A medida da tensão será função da variação dos dois espaçamentos interplanares com relação ao estado não tensionado.

FIG.20 - Dupla exposição do feixe de raios X.

Combinando as equações (24) e (22) chega-se a expressão de σ_ϕ em função de 2θ , ou seja :

$$\sigma_\phi = K(2\theta_\perp - 2\theta_\psi) = K(\Delta 2\theta) \quad (25)$$

$$K = \frac{\cot \theta}{2} \left(\frac{E}{1+\nu} \right) \frac{1}{\sin^2 \psi} \left(\frac{\pi}{180} \right)$$

V - Equação de tensão em função de $\sin^2 \psi$.

A equação (18) que relaciona a deformação da rede com tensão mostra que para qualquer ângulo ϕ , no qual a deformação da rede é medida, a deformação $\epsilon_{\phi\psi}$ é linearmente dependente com $\sin^2 \psi$, conforme observado graficamente na FIG.21.

FIG.21 - Variação linear de $\epsilon_{\phi\psi}$ com $\sin^2 \psi$ - método do $\sin^2 \psi$.

Esta forma gráfica de relacionar $\epsilon_{\phi\psi}$ com $\sin^2 \psi$ é utilizada na técnica de múltiplas exposições para se determinar as deformações de uma família de planos cristalinos (h k l). Envolve a medida de vários valores de deformações de reticulado em múltiplas direções ψ .

Esta técnica , embora mais demorada, é empregada quando medidas mais precisas de tensões são necessárias e/ ou orientações preferenciais (textura) são detectadas na amostra e será portanto adotada neste trabalho.

VI - Limitações e fontes de erro [40-41].

VI.1 - Limitações.

Algumas das principais limitações são:

- Restrito a materiais cristalinos com tamanho de grão pequeno e randomicamente orientado. A maioria dos metais enquadram-se nesta categoria. Técnicas especiais devem ser aplicadas para materiais com textura e tamanho de grão elevado.
- Acesso do feixe. Como por exemplo, cantos vivos, interior de furos profundos e entre dentes de engrenagens. Torna-se destrutivo o método.
- Baixa penetração (< 0.025 mm)
- Para determinação de gradientes ao longo da espessura (> 0.025 mm), recomenda-se o polimento eletrolítico, visando não induzir tensões residuais devido a remoção de material.
- Precisão é função do controle de um número razoável de parâmetros. .

VI.2 - Fontes de erro.

As fontes de erro estão relacionadas basicamente com os fatores que irão influir na precisão do ângulo 2θ , na determinação da constante K (eq. 25) e consequentemente na obtenção da tensão residual σ_ϕ . Estes fatores encontram-se distribuídos nas seguintes fontes:

• Equipamento.

- Sensibilidade do detector.
- Alinhamento da amostra.
- Estabilidade eletrônica.

• Técnica experimental.

- Seleção da radiação.
- Método de correção de pico (fator de correção geométrica e de absorção - LPA)
- Método de localização de máximo pico.
- Preparação da amostra.

• Material.

- Tipo de material
- Seleção correta do plano cristalino ($h k l$).
- Geometria da amostra.
- Determinação das constantes elásticas (Anisotropia).
- Tamanho de Grão.
- Textura.

4.6.2 - Equipamentos utilizados.

Tabela 6 - Características de medição do equipamento

Rigaku Strainflex MSF-2M (Krupp). (FIG.22)

Equipamento	Rigaku Strainflex MSF-2M.
Sistema de Medida	$\text{sen}^2\psi$ (Múltiplas Exposições)
Ângulo de pico 2θ (Sem tensão) (Graus)	156.08
Radiação	$K\alpha 1$
Fonte geradora de Raios X ("target")	Cr
Voltagem (kV)	30
Corrente (mA)	10
Ângulo 2θ Máximo (Graus)	170
Ângulo 2θ Mínimo (Graus)	140
Intervalo de Ângulo 2θ por degrau (Graus)	0.69
Tempo de contagem do degrau (s)	1
Ângulos de exposição Ψ (Graus)	0, 15, 30 e 45
Coeficiente de Poisson (ν)	0.28
Módulo de Elasticidade (E) (MPa)	205800

Tabela 7 - Características de medição do equipamento JEOL – JDX-11PA
(Metal Leve). (FIG.23-24)

Equipamento	JEOL – JDX-11PA
Sistema de Medida	$\text{sen}^2\psi$
Ângulo de pico 2θ (Sem tensão) (Graus)	156.08
Radiação Característica	$K\alpha 1$
Fonte geradora de Raios X ("target")	Cr
Plano (h k l)	(211)
Parâmetro cristalino "a" (Å)	2.866
Voltagem (kV)	40
Corrente (mA)	20
Ângulo 2θ Máximo (Graus)	163.0
Ângulo 2θ Mínimo (Graus)	146.8
Intervalo de Ângulo 2θ por degrau (Graus)	0.2
Tempo de contagem do degrau (s)	10
Ângulos de exposição Ψ (Graus)	0, 24.1, 35.2, 45.0
Coeficiente de Poisson (ν)	0.28
Módulo de Elasticidade (E) (MPa)	206010

obs.: Eixo 2θ do goniômetro e ψ (amostra) são independentes.

*A versatile analyzer which can be
a laboratory system and in the*
Strainflex MSF-2M

FIG.22 - Equipamento Rigaku Strainflex MSF-2M (Krupp).

JDX 11PA (hard disk, recorder, printer - optional)

FIG.23 - Equipamento JEOL – JDX-11PA (Metal Leve).

**FIG.24 - Medição de tensão residual no JEOL – JDX-11PA.
(METAL LEVE).**

5 – RESULTADOS.

5.1 – Resultados Numéricos.

5.1.1 – Têmpera Estacionária.

Tabela 8 - Resumo dos resultados obtidos x FIGS, em função da camada induzida.

Resultado	CAMADA INDUZIDA (mm)		
	3.5	8.0	11.0
Isotemperaturas (° C)	25	30	35
Temperatura x Tempo	26	31	36
Tensões Longitudinais (MPa)	27	32	37
Tensões Circunferenciais (MPa)	28	33	38
Tensões de Von Mises (MPa)	29	34	39

5.1.2 – Têmpera Progressiva.

Tabela 9 - Resumo dos Resultados obtidos x FIGS.

Resultado	CAMADA (mm)
	3.5
Temperatura x Tempo (s)	40
Isotemperaturas (° C) após 16 s	41
Isotemperaturas (° C) após 36 s	42
Isotemperaturas (° C) após 50 s	43
Tensões Longitudinais. após 5 s (MPa)	44
Tensões Circunferenciais 5 s (MPa)	45
Tensões de Von Mises 5 s (MPa)	46

FIG. 25 - Curvas de Isotemperaturas ($^{\circ}$ C) após 60 s.

FIG.26 - Temperatura ($^{\circ}$ C) x Tempo (s) para diferentes raios (mm).

FIG.27 - Tensões Residuais Longitudinais (MPa).

FIG.28 - Tensões Residuais Circunferenciais (MPa).

FIG.29 - Tensões Residuais de Von Mises (MPa).

FIG. 30 - Curvas de Isotemperaturas (° C) após 60 s.

FIG. 31 - Temperatura ($^{\circ}$ C) x Tempo (s) para diferentes raios (mm).

FIG. 32 - Tensões Residuais Longitudinais (MPa).

FIG. 33 - Tensões Residuais Circunferenciais (MPa).

FIG. 34 - Tensões Residuais de Von Mises (MPa).

FIG. 35 - Curvas de Isotemperaturas ($^{\circ}$ C) após 60 s.

FIG. 36 - Temperatura ($^{\circ}$ C) x Tempo (s) para diferentes raios (mm).

FIG. 37 - Tensões Residuais Longitudinais (MPa).

FIG.38 - Tensões Residuais Circunferenciais (MPa).

FIG.39 - Tensões Residuais de Von Mises (MPa).

FIG. 40 - Temperatura (° C) x Tempo (s) para diferentes raios (mm).

**FIG.41 - Curvas de Isotemperaturas ($^{\circ}$ C) após 16 s.
 (velocidade do cilindro = 3.6 mm/s)**

**FIG. 42 - Curvas de Isotemperaturas ($^{\circ}$ C) após 36 s.
 (velocidade do cilindro = 3.6 mm/s)**

**FIG. 43 - Curvas de Isotemperaturas ($^{\circ}$ C) após 50 s.
 (velocidade do cilindro = 3.6 mm/s)**

FIG.44 - Tensões Residuais Longitudinais após 5 s (MPa).

FIG.45 - Tensões Residuais Circunferenciais após 5 s (MPa).

FIG.46 - Tensões Residuais de Von Mises após 5 s (MPa).

5.2 - Principais Constatações dos Resultados Numéricos.

- tensão compressiva abrange praticamente toda a camada induzida. Similar ao observado na FIG.47.
- tensão trativa na transição da camada induzida/não induzida.
- tensão compressiva aumenta com a profundidade de camada induzida , decaindo para as camadas mais profundas. Similar ao observado na FIG.48,
- tensão trativa aumenta com profundidade de camada induzida.
- dentro da camada de 11.0 mm o perfil de tensões varia de compressivo na superfície, trativo à cerca de 3.0 mm abaixo, compressivo até à transição e trativa da transição até o núcleo.
- tensão longitudinal menor que circunferencial

FIG.47- Variação típica de dureza e tensão residual com a profundidade de camada induzida, em corpos de prova cilíndricos [42].

- 1 - 0.44C - 0.24Si - 0.73Mn
- △ 2 - 0.12C- 0.20Si- 0.45Mn- 1.3Cr 4.45Ni-0.85W
- 3 - 0.39 C - 0.26Si- 0.65Mn -0.68Cr-1.58Ni -0.16Mo
- ▲ 4 - 0.38C - 0.28Si- 0.99Mn-1.33Cr-0.36Mo.

FIG.48- Tensão longitudinal na superfície em função da profundidade de camada induzida em barras de 4 tipos de aço [43,44].

5.3 - Resultados Experimentais.

5.3.1 – Resumo das Medições por Difração de Raios X.

Tabela 10 - Tensões residuais circunferenciais na superfície (MPa).

CAMADA INDUZIDA (mm)	(11.0)	(8.0)	(3.5)
ORIGINAL* Rigaku Strainflex. (média 3 pontos)	-----	-----	-880
JEOL JDX-11PA			
ORIGINAL*	-636	-752	-782
SECCIONADA	-351	-715	
SECCIONADA + POLIDA	-454	-730	

Tabela 11 - Tensões residuais longitudinais na superfície (MPa).

CAMADA INDUZIDA (mm)	(11.0)	8.0)	(3.5)
ORIGINAL* Rigaku Strainflex. (média 3 pontos)	-----	-----	-487
JEOL JDX-11PA ORIGINAL*	-440	-486	-522
SECCIONADA (média 2 pontos)	-270	-574	
SECCIONADA + POLIDA (média 2 pontos)	-322	-408	

ORIGINAL* = pino sem corte.

Tabela 12 - Tensões residuais radiais (MPa) X distância radial da superfície.
(JEOL JDX-11PA)

DISTANCIA RADIAL DA SUPERFÍCIE (mm)	CAMADA INDUZIDA (mm)		
	(11.0)	(11.0) (POLIDO)	(8.0)
4	-608	+ 35	-550
8	-434	+ 93	-239
10	-341	+ 48	-----
12	-222	+ 79	-217
16	-173	-----	-----
22.5	-168	+ 68	-219

**Tabela 13 - Tensões residuais radiais e circunferenciais (MPa) x distância radial da superfície, para as camadas induzidas 3.5, 8.0 e 11.0 mm .
Rigaku Strainflex.**

PONTO (FIG.49)	CAMADA INDUZIDA (mm)								
	(11.0)			(8.0)			(3.5)		
	DIST. SUPERF. (mm)	CIR.	RAD.	DIST. SUPERF. (mm)	CIR.	RAD.	DIST. SUPERF. (mm)	CIR.	RAD.
1	5.5	-365	-94	4.0	-544	-120	1.9	-435	-233
2	11.0	-248	-29	8.0	-370	-63	3.7	-447	-109
3	16.8	-237	-32	15.3	-207	-92	13.1	-207	-22

CIR. = CIRCUNFERENCIAL
RAD. = RADIAL

**FIG.49 - Pontos de medição de tensão residual na amostra seccionada -
Rigaku Strainflex.**

**FIG.50 - Intensidade de picos de difração X $\text{Sen}^2 \psi$
JEOL JDX-11PA**

**FIG. 51 - Tensão axial na amostra de camada 11.0 mm .
JEOL JDX-11PA**

5.3.2 – Principais Constatações das Medições de Tensão Residual por Difração de Raios X.

I - As Medidas na seção transversal das amostras seccionadas não foram consideradas, devido à grande dispersão. Atribui-se esta dispersão às tensões Induzidas pelo corte.

II - As tensões radiais após o polimento eletrolítico foram muita baixas, situando-se em torno de 100 MPa.

III - O equipamento JEOL JDX-11PA não é próprio para medição de tensões residuais Circunferenciais ao longo do raio, devido aos seguintes fatores:

- Detetor com janela retangular e não pontual.
- Maior dimensão da janela fica na direção do raio e portanto as leituras seriam uma média da variação da tensão circunferencial ao longo do raio.

IV - O polimento eletrolítico praticamente não alterou as tensões na superfície das amostras seccionadas.

V - Portanto apenas as medidas efetuadas na superfície foram consideradas, por apresentarem resultados mais consistentes e repetitivos.

VI - Para a determinação de perfis de tensão residual ao longo do raio de peças cilíndricas, recomenda-se fortemente o método de Sachs (“Boring out method”) [43], não adotado devido a falta de recursos experimentais.

6 – DISCUSSÃO.

6.1 – Têmpera Estacionária.

O perfil e magnitude da distribuição de temperaturas e tensões foram bastante consistentes. Como era de se esperar, devido às condições de contorno impostas, a variação de temperatura somente ocorreu na direção radial, ou seja, independentemente do comprimento do cilindro, a distribuição de temperaturas foi a mesma. Isto não se observou na análise estrutural, onde somente para comprimentos maiores que aproximadamente $0.5 \times$ diâmetro a distribuição de tensões mostrou-se independente do comprimento, muito embora sempre ocorrendo perturbações na borda do cilindro que efetivamente se observa ocorrem na prática. As tensões residuais na superfície foram sempre compressivas, com magnitudes bastante próximas das obtidas experimentalmente. Os resultados numéricos apresentaram um comportamento similar ao da curva 4 da FIG.48. Entretanto, para a camada 3.5 mm as tensões experimentais circunferenciais foram consideravelmente superiores às numéricas, fato que precisa ser investigado. Considerando que para as camadas mais finas o gradiente de tensões é mais elevado, possivelmente um refinamento da malha de elementos finitos nesta região possa conduzir a resultados mais próximos dos experimentais. Dentro da camada induzida as tensões foram predominantemente compressivas, invertendo para positiva exatamente na transição com a região não induzida. Para o cilindro de 11.0 mm de camada induzida, houve uma inversão no sinal das tensões dentro da camada,

ou seja, o perfil de tensões varia de compressivo na superfície, trativo à cerca de 3.0 mm abaixo, compressivo até à transição e trativo da transição ao núcleo.

Tabela-14 – Comparação entre as tensões circunferenciais e longitudinais numéricas x difração de raios X, em função da camada induzida.

CAMADA (mm)	SY (Long.)			SZ (Cir.)		
	EXP.	NUM.		EXP.	NUM.	
		estac.	progr.		estac.	progr.
3.5	-505	-493	-450	-830	-561	-478
8.0	-486	-		-752	-754	
11.0	-440	-272		-636	-663	

A análise tornou-se mais demorada e complexa com o aumento da camada induzida, devido às deformações plásticas se estenderem por um volume maior de material, acarretando em altas não-linearidades. Visando garantir convergência houve a necessidade de se empregar elementos de interpolação parabólica de 8 nós **PLANE 82** (ANSYS5.3) e vários passos de carregamento com intervalos de tempo bastante reduzidos, consumindo bastante tempo de processamento. Este refinamento se fez necessário principalmente durante à transformação martensítica.

6.2 – Têmpera Progressiva.

A têmpera por indução efetuada no trabalho experimental foi progressiva., ou seja, existe um deslocamento axial relativo entre o indutor e o cilindro induzido. Isto torna a análise bem mais complexa pois a distribuição de temperaturas depende da posição do indutor e velocidade da peça. A modelagem completa deste problema foi efetuada neste trabalho. Entretanto, devido à limitações de recursos computacionais, não se chegou aos resultados finais da análise estrutural, que praticamente estagnava a partir do tempo da análise= 30 s, o que correspondia a aproximadamente 5 dias de processamento em uma plataforma Pentium 200 MHz e 64 Mb de memória RAM. Observou-se também que a técnica utilizada na análise estrutural precisaria ser melhorada, de forma a se viabilizar o estudo comparativo do efeito das camadas induzidas na magnitude e perfil das tensões residuais, que pode ser uma etapa seguinte da continuidade deste trabalho. Por outro lado, a análise térmica apresentou resultados excelentes. A rotina macro desenvolvida facilitou bastante a automatização da análise, com alta flexibilidade para modelagem de diferentes geometrias de cilindros, velocidades de deslocamento da peça e ciclos de tratamento térmico. O tempo de processamento foi bem menor, inerente ao tipo de análise (térmica) , apesar de ser também uma análise não- linear devido à variação das propriedades termo-físicas com a temperatura. O perfil e distribuição de temperaturas foram bastantes consistentes., apresentando um espectro sensível à velocidade da peça, similar ao obtido por Mikael Melander **FIG.52** . Nota-se a formação de uma

rastros de temperatura na retaguarda da região aquecida, que diminui à medida que se afasta desta região. Lembra muito a perturbação (arraste) promovida por um corpo sólido deslocando-se em trajetória retilínea em meio fluido. Observou-se que o ciclo de temperatura em diferentes seções ao longo do comprimento manteve-se o mesmo, apenas defasados no tempo, evidenciando uma ótima reprodução do ocorre na prática. A modelagem da têmpera progressiva, uma vez aprimorada a parte estrutural, tem forte potencial para gerar excelentes resultados.

Fig. 11: Isotherms for PI-hardening for different travel speeds. 18 mm diameter specimen. (a) $v=0$ m/s. (b) $v=0.001$ m/s. (c) $v=0.01$ m/s.

FIG.52 – Distribuição de temperaturas para diferentes velocidades longitudinais de deslocamento do cilindro. (Mikael Melander) [25].

FIG.53 – Têmpera progressiva - espectro de distribuição de temperatura.
 (velocidade do cilindro = 3.6 mm/s)

7 - CONCLUSÕES.

A inclusão dos efeitos da transformação Martensítica , através do acoplamento da rotina de “SWELLING” levou a resultados bastantes consistentes com os experimentais. Fato que estimula o desenvolvimento de novos trabalhos, considerando outros efeitos importantes, como a plasticidade induzida por transformação (PIT).

Das propriedades térmicas/estruturais as de maior importância são o coeficiente de filme e as curvas tensão x deformação em função da temperatura.

Devido as altas deformações plásticas como resultado da transformação martensíticas, a análise torna-se altamente não-linear. Estudo criterioso dos tipos de elementos e passos de carregamento é fundamental para eficácia da análise.

A técnica de medição de tensão residual deve ser aprimorada, visando obter o perfil de tensões dentro da superfície ao núcleo do corpo de prova.

Anexo A - Propriedades de Material.

A . 1 - Termofísicas X temperatura.

- . coeficiente de filme (HF) ($\text{W}/(\text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$) x temperatura (Ar, óleo e água).
- . calor específico (C) ($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$), densidade (DENS) (kg/mm^3) e condutividade térmica (KXX) ($\text{W}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$)

TEMPERATURE DATA TEMPERATURE DATA TEMPERATURE DATA

.00000 .85790E-05

PROPERTY TABLE KXX MAT= 1 NUM. POINTS= 2

TEMPERATURE DATA TEMPERATURE DATA TEMPERATURE DATA

21.000 .91000E-02 900.00 .24700E-01

PROPERTY TABLE C MAT= 1 NUM. POINTS= 2

TEMPERATURE DATA TEMPERATURE DATA TEMPERATURE DATA

21.000 377.00 900.00 1025.0

PROPERTY TABLE HF MAT= 2 NUM. POINTS= 7

TEMPERATURE DATA TEMPERATURE DATA TEMPERATURE DATA

21.000 .35300E-05 121.00 .66500E-05 260.00 .83000E-05

538.00 .10040E-04 816.00 .11180E-04 927.00 .11570E-04

1038.0 .11890E-04

PROPERTY TABLE HF MAT= 3 NUM. POINTS= 7

TEMPERATURE DATA TEMPERATURE DATA TEMPERATURE DATA

21.000 .35300E-05 121.00 .66500E-05 260.00 .83000E-05

538.00 .10040E-04 816.00 .11180E-04 927.00 .11570E-04

1038.0 .11890E-04

PROPERTY TABLE HF MAT= 4 NUM. POINTS= 7

TEMPERATURE	DATA	TEMPERATURE	DATA	TEMPERATURE	DATA
21.000	.41500E-05	121.00	.85300E-05	260.00	.10590E-04
538.00	.12900E-04	816.00	.14300E-04	927.00	.14800E-04
1038.0	.11890E-04				

PROPERTY TABLE HF MAT= 5 NUM. POINTS= 12

TEMPERATURE	DATA	TEMPERATURE	DATA	TEMPERATURE	DATA
54.000	.36800E-03	131.00	.36800E-03	181.00	.50000E-03
231.00	.10000E-02	281.00	.25670E-02	331.00	.22700E-02
381.00	.18110E-02	431.00	.13000E-02	481.00	.83800E-03
531.00	.65000E-03	621.00	.65000E-03	1150.0	.65000E-03

PROPERTY TABLE HF MAT= 6 NUM. POINTS= 12

TEMPERATURE	DATA	TEMPERATURE	DATA	TEMPERATURE	DATA
54.000	.36800E-03	131.00	.36800E-03	181.00	.50000E-03
231.00	.10000E-02	281.00	.25670E-02	331.00	.22700E-02
381.00	.18110E-02	431.00	.13000E-02	481.00	.83800E-03
531.00	.65000E-03	621.00	.65000E-03	1150.0	.65000E-03

PROPERTY TABLE HF MAT= 7 NUM. POINTS= 12

TEMPERATURE	DATA	TEMPERATURE	DATA	TEMPERATURE	DATA
54.000	.69600E-02	131.00	.69600E-02	181.00	.93400E-02
231.00	.18000E-01	281.00	.45500E-01	331.00	.40740E-01
381.00	.32540E-01	431.00	.23240E-01	481.00	.15240E-01
531.00	.12100E-01	621.00	.12100E-01	1150.0	.12100E-01

Anexo B - Arquivos de entrada do ANSYS.

B.1 Térmico Estacionário.

```
/TITLE,TEMPERA POR INDUCAO EM CILINDRO DE ACO (DIAM. = 45 mm)
/PREP7
! ANALISE TERMICA
!*
! ELEMENTO PLANE77 (8 NOS). 1 DOF
! ANALISE TERMICA
! PLANE77 TERMICO = PLANE 82 ESTRUT.
!
!*
ET,1,PLANE77
!*
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,1
!
! PROPRIEDADES DE MATERIAL
! MAT 1 = TODOS OS ELEMENTOS DA MALHA
! MAT 2 = BORY_AR = HF DO AR NA BORDA Y=4*(CAMA1/7.)=2.0 mm
! MAT 3 = BOR0_AR = HF DO AR NA BORDA Y=0.
! MAT 4 = SCIL_AR = HF DO AR NA SUPERFICIE CILINDRICA.
! MAT 5 = BORY_OL = HF DO OLEO NA BORDA Y=4*(CAMA1/7.)=2.0 mm
! MAT 6 = BOR0_OL = HF DO OLEO NA BORDA Y=0.
! MAT 7 = SCIL_OL = HF DO OLEO NA SUPERFICIE CILINDRICA.
!
! PROPRIEDADES TERMICAS DO MAT=1 (MALHA) (C,DENS E KXX)
!
MALHA=1
BORY_AR=2
BOR0_AR=3
SCIL_AR=4
BORY_OL=5
BOR0_OL=6
SCIL_OL=7
! ENTRADA DAS PROPRIEDADES DE MATERIAL VIA COMANDO "MP".
MP,DENS,MALHA,.8579E-5,
!
!
! TABELA DE TEMPERATURAS MPTEMP.
! C e KXX.
MPTEMP,1,21.0,900.0, , , ,
!*
!*
MPDATA,C,MALHA,1,377.0,1025.0, , , ,
MPDATA,KXX,MALHA,1,9.1E-3,24.7E-3, , , ,
! FIM DAS PROPRIEDADES TERMICAS DO CILINDRO MAT=1=MALHA.
!
! TABELA DE TEMPERATURAS PARA HF DO AR .
MPTEMP
! TABELA DE TEMPERATURAS ANTERIOR APAGADA.
MPTEMP,1,21.0,121.0,260.0,538.0,816.0,927.0,
MPTEMP,7,1038. , , , ,
!*
! HF DO AR NA BORDA Y=4*(CAMA1/7.)=2.0 mm .
MPDATA,HF,BORY_AR,1,3.53E-6,6.65E-6,8.30E-6,10.04E-6,11.18E-6,11.57E-6,
MPDATA,HF,BORY_AR,7,11.89E-6, , , , ,
!
! HF DO AR NA BORDA Y=0.
MPDATA,HF,BOR0_AR,1,3.53E-6,6.65E-6,8.30E-6,10.04E-6,11.18E-6,11.57E-6,
MPDATA,HF,BOR0_AR,7,11.89E-6, , , , ,
!
! HF DO AR NA SUPERFICIE CILINDRICA - SCIL_AR.
MPDATA,HF,SCIL_AR,1,4.15E-6,8.53E-6,10.59E-6,12.9E-6,14.3E-6,14.8E-6,
MPDATA,HF,SCIL_AR,7,11.89E-6, , , , ,
! APAGAR TABELA DE TEMPERATURAS DO AR
!
MPTEMP
! TABELA DE TEMPERATURAS PARA HF DO OLEO.
MPTEMP,1,54.0,131.0,181.0,231.0,281.0,331.0,
MPTEMP,7,381.0,431.0,481.0,531.0,621.0,1150.0,
```

```

MPDATA,HF,BORY_OL,1,3.68E-4,3.68E-4,5.00E-4,10.0E-4,25.67E-4,22.7E-4,
MPDATA,HF,BORY_OL,7,18.11E-4,13.0E-4,8.38E-4,6.50E-4,6.50E-4,6.50E-4,
MPDATA,HF,BORO_OL,1,3.68E-4,3.68E-4,5.00E-4,10.0E-4,25.67E-4,22.70E-4,
MPDATA,HF,BORO_OL,7,18.11E-4,13.00E-4,8.38E-4,6.50E-4,6.50E-4,6.50E-4,
!*
! HF DO OLEO PARA SUPERFICIE CILINDRICA (SCIL_OL).
MPDATA,HF,SCIL_OL,1,2*3.48E-3,2*3.48E-3,2*4.67E-3,2*9.0E-3,2*22.75E-3,2*20.37E-3,
MPDATA,HF,SCIL_OL,7,2*16.27E-3,2*11.62E-3,2*7.62E-3,2*6.05E-3,2*6.05E-3,2*6.05E-3
! CRIACAO DO MODELO
! PARAMETROS DO MODELO.
DIAM=45.0
RAIO=0.5*DIAM
!
!***** CAMADA INDUZIDA *****
CAMA=11.0
!*****
CAMA1=3.5
CAMA2=8.0
CAMA3=11.0
!
! COMPRIMENTO DO CILINDRO
COMP=RAIO
! DEFINICAO DOS KEYPOINTS
K,1,0.0,0.0.,
K,2,0.0,COMP.,
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,1
/PNUM,AREA,0
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,SVAL,0
/NUM,0
!*
/PNUM,ELEM,0
/REPLOT
!*
L, 1, 2
CM, _Y, LINE
LSEL, , , 1
CM, _Y1, LINE
CMSEL, S, _Y
!*
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,1
LESIZE,P51X, , .0.5*COMP,1,
FLST,3,1,4,ORDE,1
FITEM,3,1
LGEN,2,P51X, , ,RAIO-CAMA3, , ,0
FLST,3,1,4,ORDE,1
FITEM,3,1
LGEN,2,P51X, , ,RAIO-CAMA2, , ,0
FLST,3,1,4,ORDE,1
FITEM,3,1
LGEN,2,P51X, , ,RAIO-CAMA1, , ,0
FLST,3,1,4,ORDE,1
FITEM,3,1
LGEN,2,P51X, , ,RAIO, , ,0
L, 1, 3
L, 3, 5
L, 5, 7
L, 7, 9
L, 2, 4
L, 4, 6
L, 6, 8
L, 8, 10
!*****
! LESIZE
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,6
FITEM,2,10
LESIZE,P51X, , ,8,1,

```

```

FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,7
FITEM,2,11
LESIZE,P51X,,3,1,
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,8
FITEM,2,12
LESIZE,P51X,,4,1,
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,9
FITEM,2,13
LESIZE,P51X,,3,1,
LPLLOT
SAVE
!*****
FLST,2,4,4
FITEM,2,9
FITEM,2,5
FITEM,2,13
FITEM,2,4
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,8
FITEM,2,4
FITEM,2,12
FITEM,2,3
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,7
FITEM,2,3
FITEM,2,11
FITEM,2,2
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,6
FITEM,2,2
FITEM,2,10
FITEM,2,1
AL,P51X
/COLOR,NUM,RED,1
/COLOR,NUM,BMAG,2
/COLOR,NUM,RED,3
/COLOR,NUM,CBLU,4
/COLOR,NUM,MRED,5
/COLOR,NUM,GREE,6
/COLOR,NUM,ORAN,7
/COLOR,NUM,MAGE,8
/COLOR,NUM,YGRE,9
/COLOR,NUM,BLUE,10
/COLOR,NUM,GCYA,11
/REPLOT
!*
AMESH,ALL
SAVE
FINISH
/SOLU
!*****
! PRIMEIRO LSTEP - TUNIF=21
!
! COND. CONTORNO -SCIL_AR (T=21) TODAS FACES.
!
! SELECAO SUPERF. CILINDRICA
LSEL,S,LINE,,6,9,,1
!*
SFL,ALL,CONV,-SCIL_AR,,21
LPLLOT
!*
LSEL,S,LINE,,10,13,,1
SFL,ALL,CONV,-SCIL_AR,,21
!*
LPLLOT

```

```

LSEL,S,LINE,,5,5,,1
SFL,ALL,CONV,-SCIL_AR,21
!*
LPLOT
ALLSEL,ALL
EPLOT
SAVE
ANTYPE,4
TIMINT,OFF,THERM
AUTOTS,OFF
CNVTOL,TEMP
KBC,1
NSUBST,20
TIME,1.
TUNIF,21
LSWRITE,1
SAVE
!*****
! LSTEP,2
! AQUECIMENTO DA SUPERFICIE ATE 850.
! NUCLEO=21 C
TIMINT,OFF,THERM
NSEL,S,LOC,X,RAIO-CAMA-.1,RAIO+.1
NPLLOT
D,ALL,TEMP,100
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,-.1,RAIO-CAMA-.5
NPLLOT
D,ALL,TEMP,21
ALLSEL,ALL
TIME,1.5
LSWRITE,2
!*****
NSEL,S,LOC,X,RAIO-CAMA-.1,RAIO+.1
NPLLOT
D,ALL,TEMP,200
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,-.1,RAIO-CAMA-.5
NPLLOT
D,ALL,TEMP,21
ALLSEL,ALL
TIME,2.0
LSWRITE,3
!*****
NSEL,S,LOC,X,RAIO-CAMA-.1,RAIO+.1
NPLLOT
D,ALL,TEMP,300
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,-.1,RAIO-CAMA-.5
NPLLOT
D,ALL,TEMP,21
ALLSEL,ALL
TIME,2.5
LSWRITE,4
!*****
NSEL,S,LOC,X,RAIO-CAMA-.1,RAIO+.1
NPLLOT
D,ALL,TEMP,400
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,-.1,RAIO-CAMA-.5
NPLLOT
D,ALL,TEMP,21
ALLSEL,ALL
TIME,3.0
LSWRITE,5
!*****
NSEL,S,LOC,X,RAIO-CAMA-.1,RAIO+.1
NPLLOT
D,ALL,TEMP,500
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,-.1,RAIO-CAMA-.5

```

```

NPLLOT
D,ALL,TEMP,21
ALLSEL,ALL
TIME,3.5
LSWRITE,6
!*****
NSEL,S,LOC,X,RAIO-CAMA-.1,RAIO+.1
NPLLOT
D,ALL,TEMP,600
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,-.1,RAIO-CAMA-.5
NPLLOT
D,ALL,TEMP,21
ALLSEL,ALL
TIME,4.0
LSWRITE,7
!*****
NSEL,S,LOC,X,RAIO-CAMA-.1,RAIO+.1
NPLLOT
D,ALL,TEMP,700
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,-.1,RAIO-CAMA-.5
NPLLOT
D,ALL,TEMP,21
ALLSEL,ALL
TIME,4.5
LSWRITE,8
!*****
NSEL,S,LOC,X,RAIO-CAMA-.1,RAIO+.1
NPLLOT
D,ALL,TEMP,850
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,-.1,RAIO-CAMA-.5
NPLLOT
D,ALL,TEMP,21
ALLSEL,ALL
TIME,5.0
LSWRITE,9
!*****
! RESFRIAMENTO EM UCON POR 10 SEG.
!*****
DDEL,ALL,TEMP
TIMINT,ON,THERM
LSEL,S,LINE,,5,.,1
SFL,ALL,CONV,-SCIL_OL,,21
LPLLOT
ALLSEL
! FIM DA TEMPERA EM UCON POR 10 SEGUNDOS
/pmacro
!*****
! CRIACAO MACRO PARA GERACAO LSTEPS.
!
*CREATE,LDTER
TIME,ARG1
NSUBST,ARG2
LSWRITE
*END
!*****
! STEPPED BOUNDARY CONDITION (KBC.1)
!*****
SUBS=100
*DO,TEMPO,6,8,1
*USE,LDTER,TEMPO,SUBS
*ENDDO
! FIM DO LSTEP 4
SUBS=200
*DO,TEMPO,9,11,1
*USE,LDTER,TEMPO,SUBS
*ENDDO
! FIM DO LSTEP 7
SUBS=100

```

```

*DO,TEMPO,12,14,1
*USE,LDTER,TEMPO,SUBS
*ENDDO
! FIM DO LSTEP
! FIM DA TEMPERA EM AGUA
!*****
LSEL,S,LINE,,5,5,,1
SFL,ALL,CONV,-SCIL_OL,,21
ALLSEL
! RESFRIAMENTO AO AR POR 15 SEGUNDOS
SUBS=150
*DO,TEMPO,15,60,5
*USE,LDTER,TEMPO,SUBS
*ENDDO
/OUTPUT,SAIDA.OUT

```

B.2 _ Estrutural Estacionário.

/TITLE,TEMPERA POR INDUCAO EM CILINDRO DE ACO (DIAM. = 45 mm)

```

!*
/PREP7
!*
ET,1,PLANE82
!*
KEYOPT,1,3,1
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0
!
! PARAMETROS DO MODELO.
DIAM=45.0
RAIO=0.5*DIAM
!
!***** CAMADA INDUZIDA *****
CAMA=11.0
!*****
CAMA1=3.5
CAMA2=8.0
CAMA3=11.0
!
! COMPRIMENTO DO CILINDRO
COMP=RAIO
! DEFINICAO DOS KEYPOINTS
K,1,0.0,0.0,,
K,2,0.0,COMP,,
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,1
/PNUM,AREA,0
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,SVAL,0
/NUM,0
!*
/PNUM,ELEM,0
/REPLOT
!*
L, 1, 2
CM,_Y,LINE
LSEL,,, 1
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
!*
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,1
LESIZE,P51X,,.05*COMP,1,
FLST,3,1,4,ORDE,1
FITEM,3,1
LGEN,2,P51X,,.RAIO-CAMA3,,,0
FLST,3,1,4,ORDE,1
FITEM,3,1
LGEN,2,P51X,,.RAIO-CAMA2,,,0

```

```

FLST,3,1,4,ORDE,1
FITEM,3,1
LGEN,2,P51X,,RAIO-CAMA1,,,0
FLST,3,1,4,ORDE,1
FITEM,3,1
LGEN,2,P51X,,RAIO,,,0
L, 1, 3
L, 3, 5
L, 5, 7
L, 7, 9
L, 2, 4
L, 4, 6
L, 6, 8
L, 8, 10
! LESIZE
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,6
FITEM,2,10
LESIZE,P51X,,,8,1,
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,7
FITEM,2,11
LESIZE,P51X,,,3,1,
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,8
FITEM,2,12
LESIZE,P51X,,,4,1,
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,9
FITEM,2,13
LESIZE,P51X,,,3,1,
LPLOT
SAVE
!*****
FLST,2,4,4
FITEM,2,9
FITEM,2,5
FITEM,2,13
FITEM,2,4
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,8
FITEM,2,4
FITEM,2,12
FITEM,2,3
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,7
FITEM,2,3
FITEM,2,11
FITEM,2,2
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,6
FITEM,2,2
FITEM,2,10
FITEM,2,1
AL,P51X
/COLOR,NUM,RED,1
/COLOR,NUM,BMAG,2
/COLOR,NUM,RED,3
/COLOR,NUM,CBLU,4
/COLOR,NUM,MRED,5
/COLOR,NUM,GREE,6
/COLOR,NUM,ORAN,7
/COLOR,NUM,MAGE,8
/COLOR,NUM,YGRE,9
/COLOR,NUM,BLUE,10
/COLOR,NUM,GCYA,11
/REPLOT
!*

```

```

AMESH.ALL
! ANALISE ESTRUTURAL
! ELEMENTOS PLANE82 AXISSIMETRICOS.
! TENSOES TERMICAS + COM PLASTICIDADE. - TRANSFORMACAO(SWELLING) ***
!
MALHA=1
!*
! TABELA DE TEMPERATURAS
!*****
MPTEMP,1,20.,200.,300.,475.,800.,1000.
!
MPDATA,EX,1,1,213695,203695.,193933.,156576.,103574.,60921
MPDATA,NUXY,1,1.,3.,3.,3.,28.,28.,28
MPDATA,ALPX,1,1,1.1499E-5,1.31E-5,1.45E-5,.0000223,.0000223 .0000223
! FIM PROP MAT EX. NUXY e ALPX
!
TB,BKIN,1,6
TBLE
STAT,TABLE
TBTEM, 20.000000 , 1
TBDAT, 1, 770.0 , 8470.0,
TBTEM, 200.000000 , 2
TBDAT, 1, 730.0 , 10600.0,
TBTEM, 300.000000 , 3
TBDAT, 1, 610.0 , 9840.0,
TBTEM, 475.000000 , 4
TBDAT, 1, 78.38 , 2368.6,
TBTEM, 800.000000 , 5
TBDAT, 1, 40.50 , 1400.0,
TBTEM, 1000.00000 , 6
TBDAT, 1, 21.3000000 , 522.1,
!*****
TB,SWELL,1,, ,
!*
tbdata,72,10
tbdata,67,0.011
tbdata,68,475
tbdata,69,100
tbdata,70,0.0133
tbdata,71,110
! E110 = CAMA 11
!*****
TBPLOT,BKIN
MPLIST,ALL
!*
! CRIACAO DO MODELO
! PARAMETROS DO MODELO.
! CRIACAO DO MODELO
! PARAMETROS DO MODELO.
SAVE
FINISH
/SOLU
!*****
!
! CRIACAO DOS LSTEPS.
!
! TEMPERA EM AGUA POR 10 SEGUNDOS
!*****
! CRIACAO MACRO PARA GERACAO LSTEPS.
/PMACRO
! TEMPERATURA DE REFERENCIA
NLGEOM,1
AUTOTS,OFF
NSEL,S,LOC,Y,-.1,.1
D,ALL,UY,0.0
ALLSEL
TREF,21
TUNIF,21
!
KBC,1
TIME,1.

```



```

NSUBST,10
LDREAD,TEMP,,,1,,,RTH
BFE,ALL,FLUE,1,1.
LSWRITE,1
! LEITURA TEMPERATURAS INICIAIS.
!
/PMACRO
! ***** MACRO.LEITURA DAS TEMPERATURAS E APLIC. BFE *****
*CREATE,LDSTRU
TIME,ARG1
NSUBST,ARG2
LDREAD,TEMP,,,ARG1,,,RTH
BFE,ALL,FLUE,1,ARG1
LSWRITE
*END
!*****
! STEPPED BOUNDARY CONDITION (KBC,1)
!*****
SUBS=20
*DO,TEMPO,1.0,5.0,1.0
*USE,LDSTRU,TEMPO.SUBS
*ENDDO
! FIM DO LSTEP 9
SUBS=200
*DO,TEMPO,6.15,1
*USE,LDSTRU,TEMPO.SUBS
*ENDDO
!*****
! RESFRIAMENTO AO UCON POR + 20 SEGUNDOS
SUBS=200
*DO,TEMPO,16,25.1
*USE,LDSTRU,TEMPO.SUBS
*ENDDO
! FIM DO LSTEP
SUBS=150
*DO,TEMPO,26,60.2
*USE,LDSTRU,TEMPO.SUBS
*ENDDO
! FIM DO LSTEP
!
! FIM DO RESFRIAMENTO NO UCON POR + 20 SEGUNDOS
/OUTPUT,SAIDA.OUT

```

B.3 _ Térmico Progressivo.

```

/TITLE,TEMPERA POR INDUCAO EM CILINDRO DE ACO (DIAM. = 45 mm)
! ANALISE TERMICA
/PREP7
!***** PARAMETROS DO MODELO *****
DIAM=45.0
RAIO=0.5*DIAM
COMP=4.5*DIAM
CAMA1=3.5
CAMA2=8.0
CAMA3=11.0
!
! CAMADA INDUZIDA "CAMA"
CAMA=CAMA1
!
! ***** DEFINICAO DE PARAMETROS DA ANALISE *****
NDIV=100
LBOB= 18
LJATO= 2*LBOB
LCONJ=LBOB+LJATO
VCONJ=3.6
LELEM=COMP/NDIV
NE_AV=2.0
DELTAS=(NE_AV)*(LELEM)

```

```

DTEMPO=DELTAS/VCONJ
!
! ***** ELEMENTO TERMICO PLANE 55 AXISSIMETRICO *****
!*
ET,1,PLANE55
!*
KEYOPT,1,1,2
KEYOPT,1,3,1
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,8,0
KEYOPT,1,9,0
!*
!*****
!*
! PROPRIEDADES DE MATERIAL
! MAT 1 = TODOS OS ELEMENTOS DA MALHA
! MAT 2 = BORY_AR = HF DO AR NA BORDA Y= 4*DIA
! MAT 3 = BOR0_AR = HF DO AR NA BORDA Y= 0.
! MAT 4 = SCIL_AR = HF DO AR NA SUPERFICIE CILINDRICA.
! MAT 5 = BORY_OL = HF DO OLEO NA BORDA Y= 4*DIA.
! MAT 6 = BOR0_OL = HF DO OLEO NA BORDA Y= 0.
! MAT 7 = SCIL_OL = HF DO OLEO NA SUPERFICIE CILINDRICA.
!
! PROPRIEDADES TERMICAS DO MAT=1 (MALHA) (C,DENS E KXX)
!
MALHA =1
BORY_AR=2
BOR0_AR=3
SCIL_AR=4
BORY_OL=5
BOR0_OL=6
SCIL_OL=7
! ENTRADA DAS PROPRIEDADES DE MATERIAL VIA COMANDO "MP".
MP,DENS,MALHA,8579E-5,
!
!
! TABELA DE TEMPERATURAS MPTEMP.
! C e KXX.
MPTEMP,1,21.0,900.0, , , ,
!*
!*
MPDATA,C,MALHA,1,377.0,1025.0, , , ,
MPDATA,KXX,MALHA,1,9.1E-3,24.7E-3, , , ,
! FIM DAS PROPRIEDADES TERMICAS DO CILINDRO MAT=1=MALHA.
!
! TABELA DE TEMPERATURAS PARA HF DO AR .
MPTEMP
! TABELA DE TEMPERATURAS ANTERIOR APAGADA.
MPTEMP,1,21.0,121.0,260.0,538.0,816.0,927.0,
MPTEMP,7,1038, , , , ,
!*
! HF DO AR NA BORDA Y=4*DIAM.
MPDATA,HF,BORY_AR,1,3.53E-6,6.65E-6,8.30E-6,10.04E-6,11.18E-6,11.57E-6,
MPDATA,HF,BORY_AR,7,11.89E-6, , , , ,
!
! HF DO AR NA BORDA Y=0.
MPDATA,HF,BOR0_AR,1,3.53E-6,6.65E-6,8.30E-6,10.04E-6,11.18E-6,11.57E-6,
MPDATA,HF,BOR0_AR,7,11.89E-6, , , , ,
!
! HF DO AR NA SUPERFICIE CILINDRICA - SCIL_AR.
MPDATA,HF,SCIL_AR,1,4.15E-6,8.53E-6,10.59E-6,12.9E-6,14.3E-6,14.8E-6,
MPDATA,HF,SCIL_AR,7,11.89E-6, , , , ,
! APAGAR TABELA DE TEMPERATURAS DO AR
!
MPTEMP
! TABELA DE TEMPERATURAS PARA HF DO OLEO.
MPTEMP,1,54.0,131.0,181.0,231.0,281.0,331.0,
MPTEMP,7,381.0,431.0,481.0,531.0,621.0,1150.0,
MPDATA,HF,BORY_OL,1,3.68E-4,3.68E-4,5.00E-4,10.0E-4,25.67E-4,22.7E-4,
MPDATA,HF,BORY_OL,7,18.11E-4,13.0E-4,8.38E-4,6.50E-4,6.50E-4,6.50E-4,
MPDATA,HF,BOR0_OL,1,3.68E-4,3.68E-4,5.00E-4,10.0E-4,25.67E-4,22.70E-4,

```

```

MPDATA,HF,BOR0_OL,7,18.11E-4,13.00E-4,8.38E-4,6.50E-4,6.50E-4,6.50E-4.
!*
! HF DO OLEO PARA SUPERFICIE CILINDRICA (SCIL_OL).
MPDATA,HF,SCIL_OL,1,2*3.48E-3,2*3.48E-3,2*4.67E-3,2*9.0E-3,2*22.75E-3,2*20.37E-3,
MPDATA,HF,SCIL_OL,7,2*16.27E-3,2*11.62E-3,2*7.62E-3,2*6.05E-3,2*6.05E-3,2*6.05E-3
!
! DEFINICAO DOS KEYPOINTS
K,1,RAIO,,
K,2,RAIO,COMP.,
PNUM,KP,1
PNUM,LINE,0
PNUM,AREA,0
PNUM,VOLU,0
PNUM,NODE,0
PNUM,SVAL,0
NUM,0
!*
PNUM,ELEM,0
RELOT
!*
LSTR, 1, 2
!*
LDIV,1,,10,0
!*
KLIST, 3,,COORD
!
! LESIZE DAS LINHAS DA SUPERFICIE CIL.
FLST,2,10,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-10
LESIZE,P51X,,12,1,
FLST,2,10,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-10
LESIZE,P51X,,10,1,
FLST,3,10,4,ORDE,2
FITEM,3,1
FITEM,3,-10
LGEN,2,P51X,,,-CAMA1,,0
FLST,5,10,4,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-10
LSEL,S,,P51X
LPLOT
FLST,3,10,4,ORDE,2
FITEM,3,1
FITEM,3,-10
LGEN,2,P51X,,,-CAMA2,,0
FLST,5,10,4,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-10
LSEL,S,,P51X
LPLOT
FLST,3,10,4,ORDE,2
FITEM,3,1
FITEM,3,-10
LGEN,2,P51X,,,-CAMA3,,0
FLST,5,10,4,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-10
LSEL,S,,P51X
LPLOT
FLST,3,10,4,ORDE,2
FITEM,3,1
FITEM,3,-10
LGEN,2,P51X,,,-RAIO,,0
ALLSEL,ALL
! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY THE ALLSEL COMMAND
VSEL,ALL
ASEL,ALL
LSEL,ALL

```

[illegible]

```

ESEL,ALL
NSEL,ALL
! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY THE ALLSEL COMMAND
VSEL,ALL
ASEL,ALL
LSEL,ALL
KSEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL
LPLT
! DEFINICAO DAS LINHAS DA BASE
/ZOOM,1,SCRN,0.021609,-0.832317,0.038687,-0.981707
L, 45, 34
L, 34, 23
L, 23, 12
L, 12, 1
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,51
LESIZE,P51X,, ,4,1,
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,52
LESIZE,P51X,, ,2,1,
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,53
LESIZE,P51X,, ,2,1,
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,54
LESIZE,P51X,, ,3,1,
FLST,3,4,4,ORDE,2
FITEM,3,51
FITEM,3,-54
LGEN,2,P51X,,,COMP,..0
/DIST, 1,1.371742,1
/REP
/DIST, 1,1.371742,1
/REP
/DIST, 1,2.867972,1
/REP
/DIST, 1,2.867972,1
/REP
/ZOOM,1,SCRN,0.013071,0.781098,0.047226,0.682927
! **** MEGE keypoints *****
NUMMRG,KP,.1,,
NUMCMP,KP
NUMCMP,LINE
LPLT
/DIST, 1,2.867972,1
/REP
SAVE
/VIEW, 1
/FOC, 1,AUTO
/DIST, 1
/ANG, 1
/LIG, 1,1
/REP
FLST,2,22,4
FITEM,2,54
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,3
FITEM,2,4
FITEM,2,5
FITEM,2,6
FITEM,2,7
FITEM,2,8
FITEM,2,9
FITEM,2,10
FITEM,2,58
FITEM,2,20
FITEM,2,19
FITEM,2,18

```

FITEM,2,17
FITEM,2,16
FITEM,2,15
FITEM,2,14
FITEM,2,13
FITEM,2,12
FITEM,2,11
AL,P51X
FLST,2,22,4
FITEM,2,53
FITEM,2,11
FITEM,2,12
FITEM,2,13
FITEM,2,14
FITEM,2,15
FITEM,2,16
FITEM,2,17
FITEM,2,18
FITEM,2,19
FITEM,2,20
FITEM,2,57
FITEM,2,30
FITEM,2,29
FITEM,2,28
FITEM,2,27
FITEM,2,26
FITEM,2,25
FITEM,2,24
FITEM,2,23
FITEM,2,22
FITEM,2,21
AL,P51X
FLST,2,22,4
FITEM,2,52
FITEM,2,21
FITEM,2,22
FITEM,2,23
FITEM,2,24
FITEM,2,25
FITEM,2,26
FITEM,2,27
FITEM,2,28
FITEM,2,29
FITEM,2,30
FITEM,2,56
FITEM,2,40
FITEM,2,39
FITEM,2,38
FITEM,2,37
FITEM,2,36
FITEM,2,35
FITEM,2,34
FITEM,2,33
FITEM,2,32
FITEM,2,31
AL,P51X
FLST,2,22,4
FITEM,2,51
FITEM,2,31
FITEM,2,32
FITEM,2,33
FITEM,2,34
FITEM,2,35
FITEM,2,36
FITEM,2,37
FITEM,2,38
FITEM,2,39
FITEM,2,40
FITEM,2,55
FITEM,2,50
FITEM,2,49

```

FITEM,2,48
FITEM,2,47
FITEM,2,46
FITEM,2,45
FITEM,2,44
FITEM,2,43
FITEM,2,42
FITEM,2,41
AL,P51X
COLOR,NUM,RED,1
COLOR,NUM,BMAG,2
COLOR,NUM,RED,3
COLOR,NUM,CBLU,4
COLOR,NUM,MRED,5
COLOR,NUM,GREE,6
COLOR,NUM,ORAN,7
COLOR,NUM,MAGE,8
COLOR,NUM,YGRE,9
COLOR,NUM,BLUE,10
COLOR,NUM,GCYA,11
/REPLOT
!*
APLOT
! ***** GERACAO DA MALHA *****
!*
AMAP,1,12,1,2,22
!*
!*
AMAP,2,23,12,22,33
!*
!*
AMAP,3,34,23,33,44
!*
!*
AMAP,4,45,34,44,55
!*
SAVE
NUMMRG.NODE,,1,,
/STAT,GLOBAL
! ***** SOLUTION *****
/SOLU
! ANALISE TRANSIENTE
ANTYPE,TRAN
! ***** CONDICAOES DO TRANSIENTE *****
! STEPPED BOUNDARY COND.
KBC,1
! *****
CNVTOL,TEMP
AUTOTS,ON
TIMINT,OFF,THERM
SBCTRAN
! *****
! CONDICAOES DE CONTORNO LSTEP 1
! *****
! CONV AR NA BORDA Y.
LSEL,S,LINE,,55,58,,1
LPLOT
SFL,ALL,CONV,-SCIL_AR,,21
ALLSEL,ALL
! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY THE ALLSEL COMMAND
VSEL,ALL
ASEL,ALL
LSEL,ALL
KSEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL
! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY THE ALLSEL COMMAND
VSEL,ALL
ASEL,ALL
LSEL,ALL
KSEL,ALL

```

```

ESEL,ALL
NSEL,ALL
! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY THE ALLSEL COMMAND
VSEL,ALL
ASEL,ALL
LSEL,ALL
KSEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL
! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY THE ALLSEL COMMAND
VSEL,ALL
ASEL,ALL
LSEL,ALL
KSEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL
! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY THE ALLSEL COMMAND
VSEL,ALL
ASEL,ALL
LSEL,ALL
KSEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL
NPLOT
NSEL,S,LOC,X,(RAIO-(1/3)*CAMA),RAIO+.1
NPLOT
ESLN,R,1
EPLOT
!*
!*
/PSF,CONV,HCOE,2
/PBF,DEFA,,1
/PSYMB,CS,0
/PSYMB,NDIR,0
/PSYMB,ESYS,0
/PSYMB,LDIR,0
/PSYMB,ECON,0
/PSYMB,PCONV.
/PSYMB,LAYR,0
!*
/PBC,ALL,,0
/REP
!*
FLST,5,100,2,ORDE,100
FITEM,5,3
FITEM,5,6
FITEM,5,9
FITEM,5,12
FITEM,5,15
FITEM,5,18
FITEM,5,21
FITEM,5,24
FITEM,5,27
FITEM,5,30
FITEM,5,33
FITEM,5,36
FITEM,5,39
FITEM,5,42
FITEM,5,45
FITEM,5,48
FITEM,5,51
FITEM,5,54
FITEM,5,57
FITEM,5,60
FITEM,5,63
FITEM,5,66
FITEM,5,69
FITEM,5,72
FITEM,5,75
FITEM,5,78
FITEM,5,81

```


FITEM,5,84
FITEM,5,87
FITEM,5,90
FITEM,5,93
FITEM,5,96
FITEM,5,99
FITEM,5,102
FITEM,5,105
FITEM,5,108
FITEM,5,111
FITEM,5,114
FITEM,5,117
FITEM,5,120
FITEM,5,123
FITEM,5,126
FITEM,5,129
FITEM,5,132
FITEM,5,135
FITEM,5,138
FITEM,5,141
FITEM,5,144
FITEM,5,147
FITEM,5,150
FITEM,5,153
FITEM,5,156
FITEM,5,159
FITEM,5,162
FITEM,5,165
FITEM,5,168
FITEM,5,171
FITEM,5,174
FITEM,5,177
FITEM,5,180
FITEM,5,183
FITEM,5,186
FITEM,5,189
FITEM,5,192
FITEM,5,195
FITEM,5,198
FITEM,5,201
FITEM,5,204
FITEM,5,207
FITEM,5,210
FITEM,5,213
FITEM,5,216
FITEM,5,219
FITEM,5,222
FITEM,5,225
FITEM,5,228
FITEM,5,231
FITEM,5,234
FITEM,5,237
FITEM,5,240
FITEM,5,243
FITEM,5,246
FITEM,5,249
FITEM,5,252
FITEM,5,255
FITEM,5,258
FITEM,5,261
FITEM,5,264
FITEM,5,267
FITEM,5,270
FITEM,5,273
FITEM,5,276
FITEM,5,279
FITEM,5,282
FITEM,5,285
FITEM,5,288
FITEM,5,291
FITEM,5,294

```

FITEM,5,297
FITEM,5,300
CM,_Y,ELEM
ESEL,,,P51X
CM,_Y1,ELEM
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
!*
!*
SFE,_Y1,2,CONV,0,-SCIL_AR
SFE,_Y1,2,CONV,2,21
!*
EPLOT
ALLSEL,ALL
! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY THE ALLSEL COMMAND
VSEL,ALL
ASEL,ALL
LSEL,ALL
KSEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL
LPLOT
EPLOT
SBCTAN
TUNIF,21
TIME,1E-6
NSUBST,10
LSWRITE,1
SAVE
! ***** FIM DO LSTEP 1 *****
!
!
! CRIACAO DA MACRO "LDTEMP" PARA DEF. LSTEPS TERMICOS *****
!
/PMACRO
*CREATE,LDTEMP
!
*DO,CARGAT,2,65
TIMINT,ON,THERM
TEMPO=(CARGAT-1)*DTEMPO
DDEL,ALL,TEMP
YBOB=VCONJ*TEMPO
! IF PARA LOCALIZACAO DA BOBINA.
!
! ***** YBOB<=LBOB *****
*IF,YBOB,LE,LBOB,THEN
NSEL,S,LOC,X,(RAIO-CAMA-.1),RAIO+.1
NSEL,R,LOC,Y,-.1,YBOB+.1
NPLOT
D,ALL,TEMP,850
NSEL,S,LOC,X,(RAIO-CAMA*1/3),RAIO+.1
NSEL,R,LOC,Y,-.1,YBOB+.1
NPLOT
! DELETA CONV AR NA SUPERF. DA BOBINA
!
ESLN,R,1
EPLOT
SFEDELE,ALL,2,CONV
SAVE
ALLSEL,ALL
NPLOT
TIME,TEMPO
NSUBST,100
LSWRITE,CARGAT
! ***** YBOB<=LCONJ *****
!
*ELSEIF,YBOB,LE,LCONJ
YBFIM=YBOB-LBOB
NSEL,S,LOC,X,(RAIO-CAMA-.1),RAIO+.1
NSEL,R,LOC,Y,YBFIM-.1,YBOB+.1
D,ALL,TEMP,850

```

```

! DELETA CONV AR NA SUPERF. DA BOBINA
NSEL,S,LOC,X,(RAIO-CAMA*1/3),RAIO+.1
NSEL,R,LOC,Y,YBFIM-.1,YBOB+.1
ESLN,R,1
SFEDELE,ALL,2,CONV
!
! *** APLICA CONV. AGUA (21 C) NO JATO ****
!
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,(RAIO-CAMA*1/3),RAIO+.1
NSEL,R,LOC,Y,-.1,YBFIM
ESLN,R,1
SFE,ALL,2,CONV,0,-SCIL_OL
SFE,ALL,2,CONV,2,21
ALLSEL,ALL
TIME,TEMPO
NSUBST,100
LSWRITE,CARGAT
!
!
!
! **** YBOB<=COMP *****
!
*ELSEIF,YBOB,LE,COMP
YBFIM=YBOB-LBOB
YJFIM=YBFIM-LJATO
NSEL,S,LOC,X,(RAIO-CAMA-.1),RAIO+.1
NSEL,R,LOC,Y,YBFIM-.1,YBOB+.1
D,ALL,TEMP,850
! DELETA CONV AR NA SUPERF. DA BOBINA
NSEL,S,LOC,X,(RAIO-CAMA*1/3),RAIO+.1
NSEL,R,LOC,Y,YBFIM-.1,YBOB+.1
ESLN,R,1
SFEDELE,ALL,2,CONV
!
! ***** APLICA CONV. AGUA (21 C) NO JATO. *****
!
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,(RAIO-CAMA*1/3),RAIO+.1
NSEL,R,LOC,Y,YJFIM-.1,YBFIM
ESLN,R,1
SFE,ALL,2,CONV,0,-SCIL_OL
SFE,ALL,2,CONV,2,21
ALLSEL,ALL
!
! ***** APLICA CONV. AGUA (21 C) NA SUPERF. ABAIXO JATO.***
!
NSEL,S,LOC,X,(RAIO-CAMA*1/3),RAIO+.1
NSEL,R,LOC,Y,-.1,YJFIM
ESLN,R,1
SFE,ALL,2,CONV,0,-SCIL_OL
SFE,ALL,2,CONV,2,21
ALLSEL,ALL
TIME,TEMPO
NSUBST,100
LSWRITE,CARGAT
!
!
! **** YBOB > COMP *****
!
*ELSEIF,YBOB,GT,COMP
YBFIM=YBOB-LBOB
YJFIM=YBFIM-LJATO
!
! **** APLICA CONV AGUA (21 C) NA REGIAO DO JATO *****
!
NSEL,S,LOC,X,(RAIO-CAMA*1/3),RAIO+.1
NSEL,R,LOC,Y,YJFIM-.1,COMP
ESLN,R,1
SFE,ALL,2,CONV,0,-SCIL_OL
SFE,ALL,2,CONV,2,21
!

```

```

! ***** APLICA CONV. AGUA (21 C) NA SUPERF. ABAIXO JATO *****
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,(RAIO-CAMA*1/3),RAIO+.1
NSEL,R,LOC,Y,-.1,YJFIM
ESLN,R,1
SFE,ALL,2,CONV,0,-SCIL_OL
SFE,ALL,2,CONV,2,21
ALLSEL,ALL
TIME,TEMPO
NSUBST,100
LSWRITE,CARGAT
!
*ENDIF
*ENDDO
*END
!
! ***** FIM DA MACRO *****
!
!
*USE,LDTEMP
!***** loadstep 66 *****
!
!***** APLICA CONV. UCON (21 C) NA SUPERF.LIVRE *****
DDEL,ALL,TEMP
NSEL,S,LOC,X,(RAIO-CAMA*1/3),RAIO+.1
NSEL,R,LOC,Y,-.1,COMP
ESLN,R,1
SFE,ALL,2,CONV,0,-SCIL_OL
SFE,ALL,2,CONV,2,21
ALLSEL,ALL
! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY THE ALLSEL COMMAND
VSEL,ALL
ASEL,ALL
LSEL,ALL
KSEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL
TEMPO=(CARGAT)*DTEMPO
TIME,(TEMPO + 30)
NSUBST,100
LSWRITE,CARGAT+1
!
! **** FIM DO LSTEP 66 *****
NPLT
SAVE
/OUTPUT,SAIDA,OUT
!
!

```

B.4 - Estrutural Progressivo.

```

/TITLE,TEMPERA Progressiva. POR INDUCAO EM CIL.DE ACO 45 mm DIAM.
/PREP7
! ELEMENTOS PLANE42 AXISSIMETRICOS.
! ANALISE ESTRUTURAL
! TENSOES TERMICAS + COM PLASTICIDADE. + TRANSFORMACAO(SWELLING) ***
!
MALHA=1
!*
ET,MALHA,PLANE42
!*
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,3,1
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0
!*
! TABELA DE TEMPERATURAS
!*****
MPTEMP,1,20.,200.,300.,475.,800.,1000.
!

```

```

MPDATA,EX,1,1,213695.203695.,193933.,156576.,103574.,60921
MPDATA,NUXY,1,1,,3,,3,,28.,28.,28
MPDATA,ALPX,1,1,1.1499E-5,1.31E-5,1.45E-5,.0000223,.0000223,.0000223
! FIM PROP MAT EX, NUXY e ALPX
!
TB,BKIN,1,6
TBLE
STAT,TABLE
TBTEM, 20.000000 , 1
TBDAT, 1, 770.0 , 8470.0.
TBTEM, 200.000000 , 2
TBDAT, 1, 730.0 , 10600.0.
TBTEM, 300.000000 , 3
TBDAT, 1, 610.0 , 9840.0,
TBTEM, 475.000000 , 4
TBDAT, 1, 78.38 , 2368.6.
TBTEM, 800.000000 , 5
TBDAT, 1, 40.50 , 1400.0.
TBTEM, 1000.00000 , 6
TBDAT, 1, 21.3000000 , 522.1.
!*****
TB,SWELL,1,, ,
!*
tbdata,72,10
tbdata,67,0.011
tbdata,68,475
tbdata,69,300
tbdata,70,0.0133
tbdata,71,300
!*****
TBPLOT,BKIN
MPLIST,ALL
! CRIACAO DO MODELO
!***** PARAMETROS DO MODELO *****
DIAM=45.0
RAIO=0.5*DIAM
COMP=4.5*DIAM
CAMA1=3.5
CAMA2=8.0
CAMA3=11.0
!
! CAMADA INDUZIDA "CAMA"
CAMA=CAMA1
! DEFINICAO DOS KEYPOINTS
K,1,RAIO,,
K,2,RAIO.COMP,,
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,0
/PNUM,AREA,0
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,SVAL,0
/NUM,0
!*
/PNUM,ELEM,0
/REPLOT
!*
LSTR, 1, 2
!*
LDIV,1,, ,10,0
!*
KLIST, 3,, ,COORD
!
! LESIZE DAS LINHAS DA SUPERFICIE CIL.
FLST,2,10,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-10
LESIZE,P51X,, ,12,1,
FLST,2,10,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-10

```



```

LSEL,ALL
KSEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL
! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY THE ALLSEL COMMAND
VSEL,ALL
ASEL,ALL
LSEL,ALL
KSEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL
! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY THE ALLSEL COMMAND
VSEL,ALL
ASEL,ALL
LSEL,ALL
KSEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL
! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY THE ALLSEL COMMAND
VSEL,ALL
ASEL,ALL
LSEL,ALL
KSEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL
! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY THE ALLSEL COMMAND
VSEL,ALL
ASEL,ALL
LSEL,ALL
KSEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL
! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY THE ALLSEL COMMAND
VSEL,ALL
ASEL,ALL
LSEL,ALL
KSEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL
! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY THE ALLSEL COMMAND
VSEL,ALL
ASEL,ALL
LSEL,ALL
KSEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL
LPLLOT
! DEFINICAO DAS LINHAS DA BASE
/ZOOM,1,SCRN,0.021609,-0.832317,0.038687,-0.981707
L, 45, 34
L, 34, 23
L, 23, 12
L, 12, 1
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,51
LESIZE,P51X,,4,1,
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,52
LESIZE,P51X,,2,1,
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,53
LESIZE,P51X,,2,1,
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,54
LESIZE,P51X,,3,1,
FLST,3,4,4,ORDE,2
FITEM,3,51
FITEM,3,-54
LGEN,2,P51X,,,COMP,,,0
/DIST,1,1.371742,1
/REP

```

```

/DIST, 1, 1.371742, 1
/REP
/DIST, 1, 2.867972, 1
/REP
/DIST, 1, 2.867972, 1
/REP
/ZOOM, 1, SCRN, 0.013071, 0.781098, 0.047226, 0.682927
! **** MEGE keypoints *****
NUMMRG.KP, 1, ,
NUMCMP.KP
NUMCMP.LINE
LPLOT
/DIST, 1, 2.867972, 1
/REP
SAVE
/VIEW, 1
/FOC, 1, AUTO
/DIST, 1
/ANG, 1
/LIG, 1, 1
/REP
FLST, 2, 22, 4
FITEM, 2, 54
FITEM, 2, 1
FITEM, 2, 2
FITEM, 2, 3
FITEM, 2, 4
FITEM, 2, 5
FITEM, 2, 6
FITEM, 2, 7
FITEM, 2, 8
FITEM, 2, 9
FITEM, 2, 10
FITEM, 2, 58
FITEM, 2, 20
FITEM, 2, 19
FITEM, 2, 18
FITEM, 2, 17
FITEM, 2, 16
FITEM, 2, 15
FITEM, 2, 14
FITEM, 2, 13
FITEM, 2, 12
FITEM, 2, 11
AL, P51X
FLST, 2, 22, 4
FITEM, 2, 53
FITEM, 2, 11
FITEM, 2, 12
FITEM, 2, 13
FITEM, 2, 14
FITEM, 2, 15
FITEM, 2, 16
FITEM, 2, 17
FITEM, 2, 18
FITEM, 2, 19
FITEM, 2, 20
FITEM, 2, 57
FITEM, 2, 30
FITEM, 2, 29
FITEM, 2, 28
FITEM, 2, 27
FITEM, 2, 26
FITEM, 2, 25
FITEM, 2, 24
FITEM, 2, 23
FITEM, 2, 22
FITEM, 2, 21
AL, P51X
FLST, 2, 22, 4
FITEM, 2, 52

```



```

FITEM,2,21
FITEM,2,22
FITEM,2,23
FITEM,2,24
FITEM,2,25
FITEM,2,26
FITEM,2,27
FITEM,2,28
FITEM,2,29
FITEM,2,30
FITEM,2,56
FITEM,2,40
FITEM,2,39
FITEM,2,38
FITEM,2,37
FITEM,2,36
FITEM,2,35
FITEM,2,34
FITEM,2,33
FITEM,2,32
FITEM,2,31
AL,P51X
FLST,2,22,4
FITEM,2,51
FITEM,2,31
FITEM,2,32
FITEM,2,33
FITEM,2,34
FITEM,2,35
FITEM,2,36
FITEM,2,37
FITEM,2,38
FITEM,2,39
FITEM,2,40
FITEM,2,55
FITEM,2,50
FITEM,2,49
FITEM,2,48
FITEM,2,47
FITEM,2,46
FITEM,2,45
FITEM,2,44
FITEM,2,43
FITEM,2,42
FITEM,2,41
AL,P51X
RELOT
!*
APLOT
! ***** GERACAO DA MALHA *****
!*
AMAP,1,12,1,2,22
!*
!*
AMAP,2,23,12,22,33
!*
!*
AMAP,3,34,23,33,44
!*
!*
AMAP,4,45,34,44,55
!*
SAVE
NUMMRG,NODE,1, ,
!*****
SOLU
VIEW, 1
FOC, 1 ,AUTO
DIST, 1
ANG, 1
LIG, 1 ,1

```

```

/REP
/PNUM.KP,1
/PNUM.LINE,1
/PNUM.AREA,0
/PNUM.VOLU,0
/PNUM.NODE,0
/PNUM.SVAL,0
/NUM,0
!*
/PNUM.ELEM,0
/RELOT
!*
! TEMPERA EM AGUA POR 10 SEGUNDOS
!*****
! CRIACAO MACRO PARA GERACAO LSTEPS.
/PMACRO
! TEMPERATURA DE REFERENCIA
AUTOTS,ON
nse1s,loc,y,-,1,1
d,all,uy,0.0
allsel
TREF,21
!
KBC,1
TIME,1.
NSUBST,10
LDREAD,TEMP,,,1,,,RTH
LSWRITE,1
! ***** MACRO LEITURA DAS TEMPERATURAS E APLIC. BFE ****
*CREATE,LDSTRU
TIME,ARG1
NSUBST,ARG2
LDREAD,TEMP,,,ARG1,,,RTH
BFE,ALL,FLUE,1,ARG1
LSWRITE
*END
!*****
! STEPPED BOUNDARY CONDITION (KBC,1)
!*****
SUBS=100
*DO,TEMPO,2,4,1
*USE,LDSTRU,TEMPO,SUBS
*ENDDO
! FIM DO LSTEP 4
SUBS=50
*DO,TEMPO,5,7,1
*USE,LDSTRU,TEMPO,SUBS
*ENDDO
! FIM DO LSTEP 7
SUBS=25
*DO,TEMPO,8,10,1
*USE,LDSTRU,TEMPO,SUBS
*ENDDO
! FIM DO LSTEP 10
! FIM DA TEMPERA EM AGUA
!*****
! RESFRIAMENTO AO AR POR 20 SEGUNDOS
SUBS=10
*DO,TEMPO,12,60,2
*USE,LDSTRU,TEMPO,SUBS
*ENDDO
!
! FIM DO RESFRIAMENTO AO AR POR 20 SEGUNDOS

```

Anexo C - Rotina Swelling.

```

*deck,usersw          parallel          user
pck dc
      subroutine usersw (option,elem,intpt,mat,proptb,ncomp,epswel,
      x epel,e,nuxy,fluen,dfluen,tem,dtem,tofst,timvll,timvnc,usvr)
c
c *** primary function:    allow users to write their own swelling
c laws.
c
c                               this logic is accessed with c72 = 10
c *** secondary function:  demonstrate the use of user-written
c swelling laws
c
c
c      *** ansys(r) copyright(c) 1971,78,82,83,85,87,89,92,94,95
c      *** ansys, inc.
c *** notice- this routine contains sasi confidential information ***
c

#include "impcdm.inc"
#include "stepcm.inc"
#include "elecom.inc"

c
c  input arguments:
c  -----
c
c      option      (int,sc,in)      swelling option
c      elem        (int,sc,in)      element number (label)
c      intpt       (int,sc,in)      element integration point number
c      mat         (int,sc,in)      material reference number
c      proptb      (dp,ar(*),in)    nonlinear material table (tb
c commands)
c      ncomp       (int,sc,in)      number of strain components (=1, 4,
c or 6)
c                               1 - truss or beam elements
c                               4 - 2-d solids and pipe elements
c                               6 - 3-d solids and most shells
c      epswel      (dp,sc,inout)    total accumulated swelling strain
c                               before this substep
c      epel        (dp,ar(ncomp),inout) elastic strain
c      e           (dp,sc,in)      elastic modulus
c      nuxy        (dp,sc,in)      poisson'S RATIO
c      fluen       (dp,sc,in)      total fluence (bf or bfe commands)
c      dfluen      (dp,sc,in)      increment in fluence for this substep
c      tem         (dp,sc,in)      temperature (bf or bfe commands)
c      dtem        (dp,sc,in)      increment in temperature for this
c substep
c      tofst       (dp,sc,in)      offset of temperature scale from
c absolute zero
c                               (tofst command)
c      timvll      (dp,sc,in)      time at the end of this substep
c      timvnc      (dp,sc,in)      the increment of time this substep
c      usvr        (dp,ar(*),inout) user-defined state
c variables (optional)
c
c  output arguments:
c  -----
c
c      epswel      (dp,sc,inout)    total accumulated swelling strain
c                               after this substep

```

```

c      epel      (dp,ar(ncomp),inout) elastic strain adjusted
c                                     for swelling
increment
c      usvr      (dp,ar(*),inout)  updated user-defined state variables
c
c      internal variables:
c      -----
c
c      eptot (dp,ar(3))  equivalent total strain: elastic + swelling +
ept
c
c      stress (dp,sc)    current stress state for this iteration
c
c      marte (dp,sc)    percentual de martensita transformada
c
c      ept (dp,sc)      transformation plasticity strain
c
c      variable inputed by elecom.inc:
c      -----
c
c      kfstit - key indicating 1st eq iter of a substep (formation
pass)
c
c
c      subroutines-----
c
c      external anserr,maxv
c
c      functions-----
c
c      external wrinqr
c
c      integer wrinqr
c      integer option,elem,intpt,mat,ncomp,iott
c      double precision proptb(*),epswel,epel(ncomp),e,nuxy,
x      fluen,dfluen,tem,dtem,tofst,timvll,timvnc,usvr(*),
x      delswl,dmat(ncomp,ncomp),stress(ncomp),eptot(ncomp),
x      kl,marte,seqv,sx,sy,sz,sxy,syz,szx
c
c
c      funcao: wrinqr(1) retorna a porta associada a tela
c              wrinqr(2) retorna a porta associada ao arquivo .OUT
c
c
c      iott=wrinqr(2)
c
c      the following condition aborts epswel calculations
c      if the iteration isn't the first in the substep
c
c      if(kfstit.ne.1.) then
c              write(iott,*) 'iteracao de equilibrio N-
Raphson'
c              return
c      end if
c
c
c      *** definicao da deform.total ***
c
c      eptot(1)=epel(1)+epswel
c      if (ncomp.gt.1) then
c      eptot(2)=epel(2)+epswel
c      eptot(3)=epel(3)+epswel
c      endif

```

```

c
c
c      compute the stress-strain constitutive matrix
c      dependent of the number of components to the problem
c      1 - truss or beam elements
c      4 - 2-d solids and pipe elements
c      6 - 3-d solids and most shells
c

      goto(1,1,1,4,4,6),ncomp

c
c      *** uniaxial stress-strain relations ***
c      stress={sx}
c      strain={ex}

1      dmat(1,1)=e
      goto 100

c
c      *** axisymmetric stress-strain relations ***
c      stress={sx sy sz sxy}
c      strain={ex ey ez exy}

4      k1=e*(1.-nuxy)/((1.+nuxy)*(1.-2.*nuxy))
      dmat(1,1)=k1
      dmat(1,2)=k1*(nuxy/(1.-nuxy))
      dmat(1,3)=k1*(nuxy/(1.-nuxy))
      dmat(1,4)=0.0d0
      dmat(2,1)=k1*(nuxy/(1.-nuxy))
      dmat(2,2)=k1
      dmat(2,3)=k1*(nuxy/(1.-nuxy))
      dmat(2,4)=0.0d0
      dmat(3,1)=k1*(nuxy/(1.-nuxy))
      dmat(3,2)=k1*(nuxy/(1.-nuxy))
      dmat(3,3)=k1
      dmat(3,4)=0.0d0
      dmat(4,1)=0.0d0
      dmat(4,2)=0.0d0
      dmat(4,3)=0.0d0
      dmat(4,4)=(1.-2.*nuxy)/(2.*(1.-nuxy))
      goto 100

c
c      *** three-dimensional stress-strain relations ***
c      stress={sx sy sz sxy syz szx}
c      strain={ex ey ez exy eyz ezx}

6      k1=e*(1.-nuxy)/((1.+nuxy)*(1.-2.*nuxy))
      dmat(1,1)=k1
      dmat(1,2)=k1*(nuxy/(1.-nuxy))
      dmat(1,3)=k1*(nuxy/(1.-nuxy))
      dmat(1,4)=0.0d0
      dmat(1,5)=0.0d0
      dmat(1,6)=0.0d0
      dmat(2,1)=k1*(nuxy/(1.-nuxy))
      dmat(2,2)=k1
      dmat(2,3)=k1*(nuxy/(1.-nuxy))
      dmat(2,4)=0.0d0
      dmat(2,5)=0.0d0
      dmat(2,6)=0.0d0

```

```

dmat(3,1)=k1*(nuxy/(1.-nuxy))
dmat(3,2)=k1*(nuxy/(1.-nuxy))
dmat(3,3)=k1
dmat(3,4)=0.0d0
dmat(3,5)=0.0d0
dmat(3,6)=0.0d0
dmat(4,1)=0.0d0
dmat(4,2)=0.0d0
dmat(4,3)=0.0d0
dmat(4,4)=(1.-2.*nuxy)/(2.*(1.-nuxy))
dmat(4,5)=0.0d0
dmat(4,6)=0.0d0
dmat(5,1)=0.0d0
dmat(5,2)=0.0d0
dmat(5,3)=0.0d0
dmat(5,4)=0.0d0
dmat(5,5)=(1.-2.*nuxy)/(2.*(1.-nuxy))
dmat(5,6)=0.0d0
dmat(6,1)=0.0d0
dmat(6,2)=0.0d0
dmat(6,3)=0.0d0
dmat(6,4)=0.0d0
dmat(6,5)=0.0d0
dmat(6,6)=(1.-2.*nuxy)/(2.*(1.-nuxy))
100 continue

c
c   recover the stress(ncomp) = dmat(n,n) x epel(n)
c
c   call maxv(dmat,epel,stress,ncomp,ncomp)

c
c   Compute the von mises stress from computed stress
c
c

goto(10,10,10,40,40,60),ncomp

10   seqv=stress(1)
    goto 200
C*****
40   sx=stress(1)
    sy=stress(2)
    sz=stress(3)
    sxy=stress(4)
    seqv=(0.5*((sx-sy)**2.+(sy-sz)**2.+(sz-sx)**2.)+3*(sxy**2))**0.5
    goto 200

C
*****
60   sx=stress(1)
    sy=stress(2)
    sz=stress(3)
    sxy=stress(4)
    syz=stress(5)
    szx=stress(6)
    seqv=(0.5*((sx-sy)**2.+(sy-sz)**2.+(sz-
sx)**2.)+3*(sxy**2+syz**2+
$szx**2))**0.5
200 continue
C*****
**
c
c   Output control file

```

```

c
#include "control1.inc"

C*****
**
c   Based on swelling strain rate
c   -----
c   delm=-proptb(67)*exp(-proptb(67)*(proptb(68)-(tem-dtem)))
c   delswl=delm*proptb(69)
c   else
c   delswl=0.0e+0
c   endif
c
c   epswel = epswel + delswl*dtem
c
c   Where: (tem-dtem) temperature at the start of this substep
c   Based on swelling strain increment
c   -----
c
c   proptb(67)=0.011
c   proptb(68)=Ms : start martensite transformation temperature
c   proptb(69)=Mf : final martensite transformation temperature
c   proptb(70)= 100% transformation strain
c   proptb(71)= Higher Element Label inside of case hardening
c   proptb(**)= K (transformation plasticity coefficient)
c               ept = K*stress(n)*(2-marte)*marte
c               (Denis et al - Mat.Sc.Tech - voll 1985, pg 811)
c
c   tem: temperature at the end of this substep
c
if(elem.le.proptb(71).and.dtem.lt.0.and.tem.lt.proptb(68).and.tem.
    $ge.proptb(69)) then
    marte=1-exp(-proptb(67)*(proptb(68)-tem))
    epswel=marte*proptb(70)
else
    marte=0.0e+0
    epswel=0.0e+0
endif

c
c *** atualizacao das deform. elasticas ***
c
c   epel(1)=eptot(1)-(epswel-(delswl*timvnc))
c   if (ncomp.gt.1) then
c   epel(2)=eptot(2)-epswel
c   epel(3)=eptot(3)-epswel
c   endif
c
c
c
c   Output control file
#include "control2.inc"

return
end

```

Referências Bibliográficas

- [1] Sjöstrom, S, Mats. Sci & Tech, 1, 1985, 823.
- [2] Koistinen, D.P. and R.E., Marburger, Acta Metal 7, 1959.
- [3] Yuan Fa-rong, Wu Shang-li, Mats. Sci Tech, 1, 1985, 851.
- [4] T.Inoue et al:Ing. Arch,1981,50,315.
- [5] J.R. Patel and Cohen: Acta Metall., 1953,1, 531.
- [6] T.Inoue & Z. Wang, Mats. Sci Tech, 1, 1985, 845.
- [7] Fischer,F.D., TRIP in Steels, an Overview, ICRS3, 1992, PP169-176.
- [8] Leblond , J.B., Devaux J., Devaux J.C., Mathematical Modeling of Transformation Plasticity in Steels, Int. J. Plasticity,5, 1989, 551-572.
- [9] Sjöstrom, S., Ganghoffer J.F., Denis S., Gautier, Simon, FEM calculation of Pearlite transformation plasticity, ICRS3,1992, 1209-1214.
- [10] G.Wassermann: Arch. Eisenhüttenwes,1937,10 ,321.
- [11] Scheil, E. & Anog., Z., Al. Chem., 207, 1932 , 21.
- [12] G.W Greenwood and R.M. Johnson: Proc. R. S.,1965, 283A, 403.
- [13] M. de Jong and G.W. Ratheneau:Acta Metall.,1961, 9, 714.
- [14] Abrassart, "Influence des Transformations Martensitiques sur les Proprietes Mecaniques des Alliages du Systeme Fe-Ni-Cr-C.", Thèse de Doctorat, Université de Nancy I, 1972.
- [15] Denis, Sabine Judlin, " Modelisation des Interaction Contrainte-Transformatioin de Phase et Calcul par Elements Finis de La Genese des Contraintes Internes au cours de la Trempe des Aciers", Phd Thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 1987.
- [16] Leblond , J.B., et al, Mats. Sci Tech,1, 1985, 815.
- [17] Denis, Gautier and Simon, Modelling of the Mechanical Behaviour of steels during Phase Transformation: A Review, ICRS2, 1989, PP393-98.

- [18] Denis, S., Gautier, E., Simon, A. & Beck, G., "Stress-Phase transformation interactions- basic principles, modeling, and calculation of stresses", *Mats. Sci. Tech.*, 1, 1985, 805.
- [19] J. Giusti: Thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 1981.
- [20] Fletcher, A. J., Price, R.F., "Generation of thermal stress and strain during quenching of low-alloy steel plates", *Metals Technology*, pp. 427-446, Nov, 1981.
- [21] G. Colette: Phd thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 1980.
- [22] Gautier, Elisabeth Aeby, "Transformations Perlitique et Martensitique sous Contrainte de Traction Dans les Aciers ", Phd Thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, Nancy, 1985.
- [23] ANSYS Analysis Guide Release 5.3, 1996.
- [24] Union Carbide do Brasil Ltda, "UCON Quenchant E, A Solução Segura para tratamento térmico de metais", 1986.
- [25] M. Melander: Dissertation 14, Linköping University, Sweden, 1985.
- [26] Hildenwall, Bengt, " Prediction of the Residual stresses created during quenching", Phd Thesis 39, Linköping University, 1979.
- [27] ANSYS Elements Guide Release 5.3, 1996.
- [28] Thermal Analysis Tutorial ANSYS 5.0 ,1993.
- [29] Thermal Analysis Tutorial ANSYS 4.4 - DN-T039.44 ,1991
- [30] Canale, Lauralice de Campos F., Canale, Antônio Carlos, Crnkovic, Ovídio Richard, Groessler, Jony B., "Processo de têmpera: Controle informatizado dos meios de resfriamento", IV-CEM-NNE, pg.207-211, 1996.
- [31] Araújo, Celso, "Transmissão de Calor ", Livros Técnicos e Científicos, 1978.
- [32] Schneider, P.J., "Temperature Response Charts", John Wiley & Sons, N.Y, 1963.
- [33] Holman, J.P., "Transferência de Calor", Mc Graw Hill, 1983.
- [34] ANSYS Procedures Guide Release 5.3, 1996.

- [35] ANSYS Theory Guide Release 5.3, 1996.
- [36] B.D. Cullity, "Elements of X-Ray diffraction" Addison-Wesley, 2a ed, 1978.
- [37] SAE J784a "Residual Stress Measurements by X-Ray diffraction, SAE Information, SAE, 1980
- [38] L.C Noyan and J. B Cohen, "Residual Stress: Measurements by diffraction and Interpretation.", Springer-Verlag, 1987.
- [39] Fatigue Design Handbook - AE-10, SAE, pp153-156, 1988.
- [40] Jatczak, C.F., "Equipment and Methods of X-Ray Stress Analysis", SAE 720242, 1972.
- [41] Guimarães, Luciana R., "Estudo de parâmetros experimentais envolvidos na determinação de macro tensões residuais, em tubos de aço inox, pelo método da difração de raios X", Dissertação de Mestrado, IPEN, 1990.
- [42] E.D. Walker: "In Residual Stress for Designers and Metallurgists, ed. L.J Vande Walle - ASM Metals Park, OH. p41,1981
- [43] Horger, J. O "Handbook of Experimental Stress Analysis, ed. Hetenyi, Willey, New York, pg.459,1963.
- [44] Semiatin, S.L. and D.E., Stutz, "Induction Heat Treatment of Steel", ASM, pg167,1 986.