

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

Nota final
9.0 (max)
HAm

**ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS TÉRMICAS E DE
TRANSFORMAÇÃO DE FASE EM CILINDROS DE
LAMINAÇÃO**

Eleir Mundim Bortoleto

**São Paulo
2005**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

**ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS TÉRMICAS E DE
TRANSFORMAÇÃO DE FASE EM CILINDROS DE
LAMINAÇÃO**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para Graduação em Engenharia
Mecatrônica

Eleir Mundim Bortoleto

Orientador: Prof. Dr.
Roberto Martins de Souza

Área de concentração:
Engenharia Mecatrônica

São Paulo
2005

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600011859

1493059

FICHA CATALOGRÁFICA

Bortoleto, Eleir Mundim

Análise de tensões residuais térmicas e de transformação de fase em cilindros de laminação / E.M. Bortoleto. -- São Paulo, 2005.

54 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Tensão residual 2.Método dos elementos finitos 3.Mudança de fase I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

A minha mãe Izilda e meu pai Roberto,
pelo amor de toda a vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Roberto Martins de Souza, pelo incentivo, apoio e orientação nos últimos três anos, contribuindo diretamente e de forma incalculável para meu crescimento e desenvolvimento como universitário, engenheiro e pessoa, sempre de forma enriquecedora e paciente.

A toda a equipe do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) do Departamento de Engenharia Mecânica, onde encontrei valiosos amigos nesses anos de pesquisa e aprendizado, em especial aos amigos e colegas Pedro Caetano Utida Neves, Alexandre Martins e Cristiano Lagatta, pelas boas horas de conversa e pela contribuição neste trabalho.

Ao Prof. Titular Amilton Sinatora por permitir meu primeiro contato com o os projetos de iniciação científica do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS).

Ao Prof. Dr Edilson Hiroshi Tamai e demais membros do Programa de Educação Tutorial (PET-Mecânica).

À Villares-Sidenor – Unidade Cilindros, pelo suporte financeiro e bolsa de iniciação científica.

Aos meus amigos de CRUSP, Meire de Almeida e Marcos Angelim pelos ótimos momentos de convivência e as conversas animadas.

Aos meus pais, minhas irmãs Evelyny e Elaine e amigos que sempre abrilhantaram minha vida, com ensinamentos e momentos inesquecíveis.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações Gerais.....	1
1.2 Caracterização e Análise Física do Sistema.....	3
1.2.1 Tratamentos Térmicos e Geração de Tensões Residuais.....	3
1.2.2 Transferência de Calor no Cilindro.....	9
1.2.3 Transformações de Fase em Aços.....	11
1.2.4 Variação das Propriedades Físicas dos Aços na transformação de Fase.....	15
2. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1 Simulação por Elementos Finitos.....	20
3.1.1 Informações Gerais.....	20
3.1.2 Construção do Modelo Computacional.....	21
3.2 Teste do Modelo Computacional Construído.....	23
3.3 Análise dos Diferentes tipos de transformação de Fase.....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
5. CONCLUSÕES.....	37
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas de Resfriamento sobrepostas à curva TTT do aço H13, indicando as transformações de fase em cada região do cilindro.....	5
Figura 2 – Novas Curvas, com taxa de resfriamento menor, sobrepostas à curva TTT do aço H13, indicando as transformações de fase em cada região do cilindro.....	5
Figura 3 – Comportamento da tensão residual ao longo do diâmetro do cilindro, segundo o estudo de Ebert (1978), sem considerar a transformação de fase do material.....	7
Figura 4 – Comportamento da tensão residual ao longo do diâmetro do cilindro, segundo o estudo de Ebert (1978), considerando a transformação de fase do material.....	8
Figura 5 – Estrutura cristalina Cúbica de face centrada (CFC).....	11
Figura 6 – Estrutura cristalina Cúbica de Corpo centrada (CCC)	12
Figura 7 – Estrutura cristalina Tetragonal de Corpo Centrado (TCC)	12
Figuras 8 – Curvas de Temperaturas para 3 diferentes pontos do raio do cilindro de diâmetro 45 mm no tratamento térmico “Through Hardening”.....	13
Figura 9 – Variação do Módulo de Elasticidade em função da temperatura para um aço SAE 4140H.....	16
Figura 10 – Variação do valor da tensão de escoamento em função da temperatura.....	17
Figura 11 – Variação do valor do coeficiente de expansão térmica.....	17
Figura 12 – Comportamento da condutividade térmica em função da temperatura.....	18

Figura 13 – Malha construída para a simulação por Elementos Finitos.....	21
Figura 14 – Resultado térmico obtido. Comparação entre as curvas de temperaturas para 3 diferentes pontos do raio do cilindro em cada modelo. (A) MEF e (B) Dados obtidos no trabalho de Pacheco et al (2000).....	23
Figura 15 – Resultado do cálculo de tensões em função do raio do cilindro. Comparação entre as curvas de temperaturas para 3 diferentes pontos do raio do cilindro em cada modelo. (A) MEF e (B) Dados obtidos no trabalho de Pacheco et al (2000).....	24
Figura 16 – Novo comportamento para a variação do coeficiente de expansão térmica linear.....	25
Figura 17 – Modelo em MEF de uma barra que é livre para expandir e contrair quando resfriada, utilizando coeficiente de expansão linear negativo para a transformação de fase.....	26
Figura 18 –Deslocamento do nó 2 e sua variação da temperatura como teste para se utilizar o artifício de um coeficiente de expansão linear negativo para a transformação de fase.....	26
Figura 19 – Novo comportamento para a variação do coeficiente de expansão térmica linear para o caso da simulação C.....	29
Figura 20 – Novo comportamento para a variação do coeficiente de expansão térmica linear para o caso da simulação D.....	30
Figura 21 – Curvas de tensão ao longo do raio do cilindro para a simulação A – Casca e Núcleo se transformam em martensita mas não se considera a expansão da transformação de fase.....	32

Figura 22 – Curvas de tensão ao longo do raio do cilindro para a simulação B - Casca e Núcleo se transformam em martensita e é considerada a expansão da transformação de fase.....	32
Figura 23 – Curvas de tensão ao longo do raio do cilindro para a simulação C – Casca se transforma em martensita e núcleo em perlita.....	33
Figura 24 – Curvas de tensão ao longo do raio do cilindro para a simulação D - Casca se transforma em martensita e núcleo não transforma.....	33
Figura 25– Comparação entre as curvas de tensão radial e tangencial ao longo do raio do cilindro entre cada modelo. (A) MEF e (B) Dados obtidos no trabalho de Pacheco et al (2000).....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Expressões gerais da variação volumétrica em cada transformação de fase em função do teor de carbono da liga e valores calculados para o aço SAE 4140 (segundo Totten e Howes, 1997, apud Gozzi, 2005, p. 60).....	12
Tabela 2 – Valores utilizados como condição de contorno de temperatura para os nós da superfície do modelo em Elementos Finitos.....	22
Tabela 3 – Diferentes configurações analisadas em cada simulação quanto ao tipo de transformação de fase.....	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TTT – Tempo-Temperatura-Transformação

CFC – Cúbica de Face Centrada

CCC - Cúbica de Corpo Centrado

TCC – Tetragonal de Corpo Centrado

LISTA DE SÍMBOLOS

M_s	temperatura de término da formação martensítica
M_f	temperatura de término da formação martensítica
q	fluxo de calor
k	condutibilidade térmica
T	temperatura
h	coeficiente de película
H	parâmetro associado ao endurecimento cinemático
σ_Y	tensão de escoamento
α_T	coeficiente de expansão térmica linear
γ	coeficiente de expansão térmica volumétrico
c	calor específico
K	condutividade térmica
σ_r	tensão radial
σ_θ	tensão tangencial

RESUMO

A intenção deste trabalho é analisar a evolução das tensões residuais que surgem no processo de fabricação de componentes mecânicos com geometria cilíndrica, com especial atenção para os processos de tratamento térmico a que os mesmos são submetidos. Para isso, propõe-se a construção e validação de um modelo numérico representativo dos processos de tratamento térmico que forneça meios para um entendimento efetivo do mecanismo de geração de tensões residuais. A construção e a validação do modelo são realizadas utilizando-se modelos computacionais gerados pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) através do software ABAQUS. Os modelos representam a seção transversal do cilindro, considerando um estado plano de tensões.

No texto, é feito um estudo das variáveis que influenciam a distribuição de temperaturas e tensões residuais no cilindro, de modo que se possam compreender os conceitos físicos presentes no processo. Além disso, considera-se o fenômeno de transformação de fase do material e sua influência na formação do campo de tensões residuais. Para modelar esse fenômeno pensou-se num modo de se incluir no modelo a expansão volumétrica que ocorre com a transformação de fase. Isso é conseguido, introduzindo-se no modelo valores negativos para o coeficiente de expansão volumétrica no resfriamento.

Para cada modelo simulado são realizadas duas análises, sendo que na primeira, denominada térmica, obtém-se a distribuição de temperatura ao longo da seção transversal do cilindro, e na outra, dita “análise de tensões”, é calculada a distribuição de tensões no cilindro a partir do histórico térmico do processo obtido na primeira análise. Tomando como referência resultados da literatura relacionada ao tema de tensões residuais térmicas e por transformação de fase, são feitas a comparação e a análise dos resultados, tendo-se a base para validar o modelo proposto.

O modelo proposto e construído mostrou-se condizente com o esperado pela literatura, permitindo sua validação para análises futuras.

ABSTRACT

This work presents an analysis on the evolution of residual stresses during the heat treatment of cylindrical bodies. The Finite Element Method was used and the software ABAQUS was selected. A computational model was developed and evaluated in order to effectively understand the mechanism of stress generation during thermal processes. The phenomenon of phase transformation was included in the analysis, through the consideration of the volume expansion during the transformation. This expansion was introduced in the model by considering a negative coefficient of expansion during the cooling stage of the quenching process. The results obtained are in qualitative agreement with those found in the literature.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Em sua definição, tensão residual é toda a tensão a que um material ou corpo está submetido quando livre de carregamento, ou seja, são os esforços internos ao material, auto-equilibrados, decorrentes de algum gradiente de deformação plástica (Serantoni, 2003) a que este material foi submetido. Dessa forma, as tensões residuais atuam no corpo sem necessidade de uma aplicação de um esforço externo, tais como forças ou momentos (Thimoshenko, 1984; Rodeiro, 2005) e podem se originar de inúmeros processos.

No tratamento térmico de aços, vários processos são utilizados com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas do material, sendo que cada tratamento é destinado a uma determinada melhoria nas características do aço, como dureza, tenacidade, resistência, entre outras. Contudo, as variações de temperatura impostas ao material geram gradientes térmicos e, conseqüentemente, tensões residuais que podem, por sua vez, gerar trincas dependendo da sua concentração e orientação (Stevens et al, 1971). A tensão residual gerada nos tratamentos térmicos pode ser provocada por dois fenômenos:

- Num primeiro, a diferença de temperatura entre o centro e a superfície do componente gera tensões. Desse modo, considerando o aquecimento de um cilindro feito a partir de sua superfície, sabe-se que, no início, sua superfície tentará se expandir mais que o centro, mais frio, deixando esse último sob tensões trativas. No resfriamento ocorreria o contrário. A superfície, mais fria, se comprimiria enquanto o centro, ainda se aquecendo, tentaria se expandir. As tensões residuais, nesse caso exclusivamente térmicas, aparecem

quando, ao longo do processo de resfriamento, há diferenças de deformação plástica em diferentes pontos do cilindro.

- Variações no instante e na localização de transformações de fase, no caso dos aços e outros materiais com estados alotrópicos, igualmente podem resultar em tensões residuais no cilindro, devido às diferentes taxas de variação volumétrica de cada fase transformada.

Conforme a distribuição e concentração de tensões residuais em uma peça, após e durante um tratamento, trincas e quebras podem ser originadas, gerando elevadas perdas econômicas, de matéria prima, tempo, mão de obra e outros recursos de produção (Souza et al, 2000). Esse fator econômico, somado à busca por melhores tecnologias na produção de componentes cilíndricos em geral, motiva o estudo da geração de tensão residual em cilindros.

A idéia básica deste trabalho é propor um modelo computacional que simule a geração de tensões residuais no tratamento térmico de cilindros e que concorde com os modelos teóricos e experimentais já desenvolvidos e divulgados na literatura, considerando todos os mecanismos de geração de tensão. A metodologia usada no estudo do fenômeno de geração das tensões residuais térmicas no tratamento térmico e na transformação de fase dos aços consiste no modelamento computacional de um sistema que represente o processo de tratamento térmico de um cilindro através do Método dos Elementos Finitos (MEF), seguido pela comparação do modelo construído com resultados apresentados na literatura.

1.2 Caracterização e Análise Física do Sistema

Na intenção de entender o comportamento físico e metalúrgico do sistema estudado, faz-se necessário entender alguns conceitos e compreender fenômenos relacionados à transferência de calor, à transformação de fase dos aços, às propriedades térmicas e mecânicas dos aços e à teoria de evolução de tensões residuais, compreendendo o problema de geração de tensões residuais.

1.2.1 Tratamentos Térmicos e Geração de Tensões Residuais

Nas operações de tratamento térmico, utilizam-se vários tipos de processos, de acordo com as características que se quer obter para o material do cilindro. É comum o uso do processo de têmpera, que consiste num aquecimento do componente visando sua austenitização total (aços hipoeutetóides) ou parcial (aços hipereutetóides), ou seja, procede-se com o aquecimento do cilindro em forno até atingir a temperatura de austenitização do aço. O item 1.2.3 abordará a questão das transformações de fase de fase nos aços em maiores detalhes.

Tomando como exemplo o caso de aços hipoeutetóides, e considerando que o componente é mantido no processo de aquecimento até que se obtenha uma homogeneidade nos valores das temperaturas, acima da temperatura de austenitização, consegue-se fazer com que todo o material esteja austenítico. Segue-se, então, um arrefecimento, de tal forma que se consiga evitar a transformação da austenita nos seus produtos de decomposição de mais alta

temperatura (ferrita ou cementita + perlita), dando lugar preferencialmente à transformação em martensita. Dependendo da velocidade de resfriamento a que é submetido o cilindro, obtêm-se uma determinada proporção entre as diferentes estruturas cristalinas do material, o que determinará as características físicas e mecânicas para o material, entre as quais pode-se citar dureza, tenacidade, ductilidade, entre outras (American Society for Metals, 1990).

Desse modo, a principal transformação de fase que ocorre no processo de têmpera é a transformação da austenita em martensita. Como exemplo, em um aço genérico, para temperaturas superiores à temperatura M_s , que é conhecida como a temperatura para a qual tem início a transformação em martensita, todo o aço apresenta-se sob a fase austenítica, que é uma estrutura cúbica de face centrada (CFC). Quando ocorre seu resfriamento a temperaturas inferiores a M_s , inicia-se a transformação em martensita, que é uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC). Porém, em alguns casos, nem todo o material se transforma em martensita, e outras fases são atingidas conforme a taxa de resfriamento e a curva TTT do material. Nas Figuras 1 e 2 são mostradas curvas de resfriamento genéricas, sobrepostas a curvas TTT de um aço H13 (American Society for Metals, 1990), indicando diferentes taxas de resfriamento e, conseqüentemente, transformações da austenita em diferentes fases. A curva TTT do aço H13 é mostrada apenas em caráter explicativo, uma vez que o material analisado neste trabalho é o aço SAE 4140H, que tem curva TTT diferente da mostrada nas Figuras 1 e 2. Em amarelo as curvas de resfriamento podem representar o centro de um cilindro, e em vermelho, a superfície.

Na Figura 1, a maior taxa de resfriamento faz com que a transformação martensítica aconteça para quase todo o cilindro, enquanto que, na Figura 2, a formação de martensita está limitada aos pontos mais próximos à superfície, uma vez que o resfriamento rápido só é atingido nas áreas próximas à superfície.

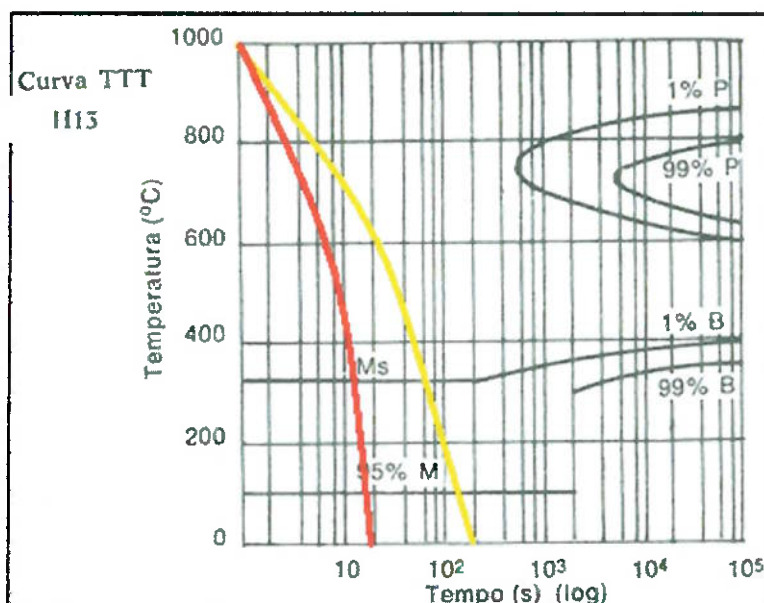


Figura 1 – Curvas de Resfriamento sobrepostas à curva TTT do aço H13, indicando as transformações de fase em cada região do cilindro (American Society for Metals, 1990).

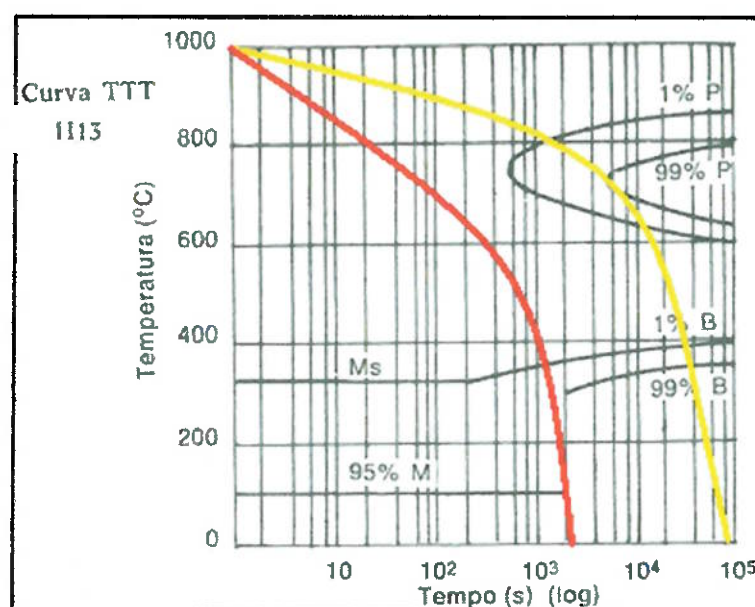


Figura 2 – Novas Curvas, com taxa de resfriamento menor, sobrepostas à curva TTT do aço H13, indicando as transformações de fase em cada região do cilindro (American Society for Metals, 1990).

Como ocorrem diferentes transformações de fase em diferentes regiões do cilindro e em diferentes instantes de tempo, tensões residuais são originadas e resultam em uma variação no comportamento das propriedades térmicas e mecânicas do material, de acordo com o produto de cada transformação (Camarão, Pacheco e Savi, 2000). Segundo Gozzi

(2005), durante o resfriamento de um cilindro, o material da superfície, que se resfria primeiramente, pode sofrer transformação de fase, necessariamente acompanhada de uma expansão volumétrica. O centro, que ainda está a uma temperatura ainda elevada, apresenta baixo limite de escoamento e se deforma plasticamente aliviando, ao menos em parte, as tensões oriundas da transformação.

Essas tensões originadas na transformação de fase devem ser analisadas conjuntamente com as tensões causadas pela diferença entre as taxas de resfriamento do centro e da superfície do cilindro. No processo de resfriamento do cilindro, a superfície se resfria mais rapidamente que o centro, o que pode causar diferentes deformações plásticas em diferentes regiões do cilindro e com isso surgem as tensões residuais adicionais (Melander, 1985).

Oliveira, Zoby e Souza (2001) e Sen (2000) trazem estudos sobre tensões em cilindros, sem considerar a transformação de fase do material, e também abordaram o problema através da construção de modelos matemáticos e computacionais. A partir do artigo de Pacheco et al (2000) pode-se conhecer resultados já obtidos a respeito dos comportamentos teórico e modelado das tensões residuais térmicas e por transformação de fase. Melander (1985) traz uma série de trabalhos que analisam a geração de tensões nos processos de endurecimento de aços, analisando equações que regem as tensões desenvolvidas num corpo cilíndrico.

Assim como Pacheco et al (2000) e Melander (1985), Ebert (1978) apresenta um estudo sobre o comportamento das tensões residuais em processos de têmpera de aços cementados e considera separadamente as fontes de geração de tensão residual térmica por resfriamento e por transformação de fase. A Figura 3 traz um esquema ilustrativo do comportamento das tensões ao longo do diâmetro de um cilindro, sem considerar a transformação de fase.

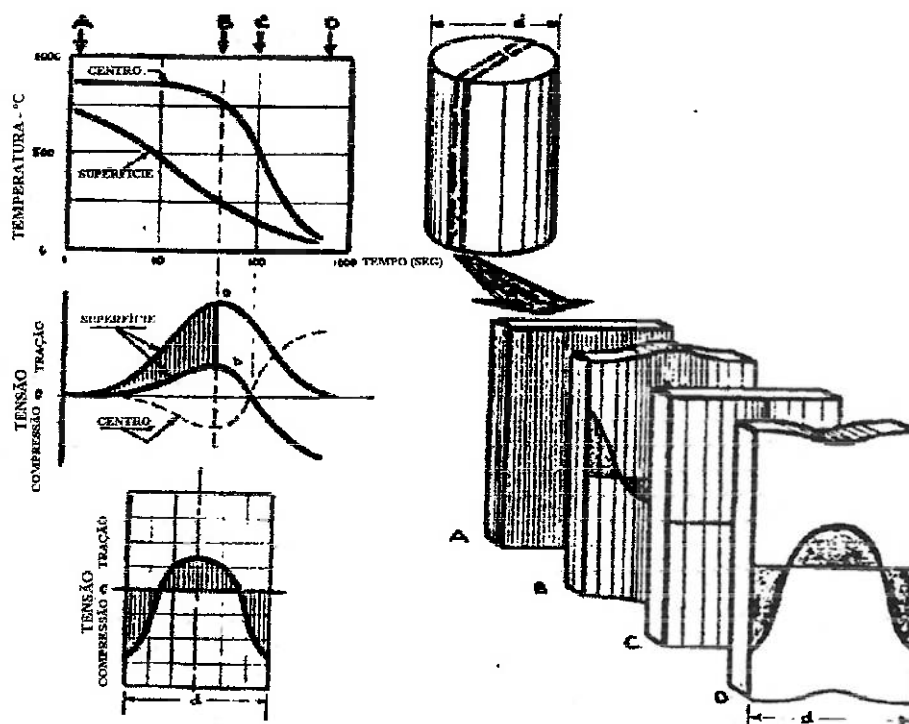


Figura 3 – Comportamento da tensão residual ao longo do diâmetro do cilindro, segundo o estudo de Ebert (1978), sem considerar a transformação de fase do material.

Pode-se observar que, no final do processo de resfriamento, a região superficial do cilindro pode encontrar-se sob ação de tensões compressivas, enquanto que o centro pode ficar submetido a tensões trativas na direção axial, como visto nos cantos inferior esquerdo e direito da Figura 3. No canto superior esquerdo, pode-se notar, também, a evolução do comportamento das tensões residuais no tempo, para centro e superfície, em função da temperatura, segundo os instantes A, B, C e D.

A Figura 4, também obtida a partir de Ebert (1978), traz o comportamento das tensões quando se considera o fenômeno de transformação de fase em um cilindro de raio d , que é resfriado por têmpera a partir de sua superfície. Na parte superior esquerda da Figura 4 pode-se observar que a curva de resfriamento da superfície intercepta a curva TTT do aço na linha M_s , havendo formação de martensita. Ao contrário, a curva de resfriamento para o centro atinge o cotovelo da curva TTT para uma outra transformação, não chegando à linha M_s , e

com isso o centro pode se transformar em outras estruturas que não a martensita, ou ainda, ficar sob a forma de austenita, sem transformação.

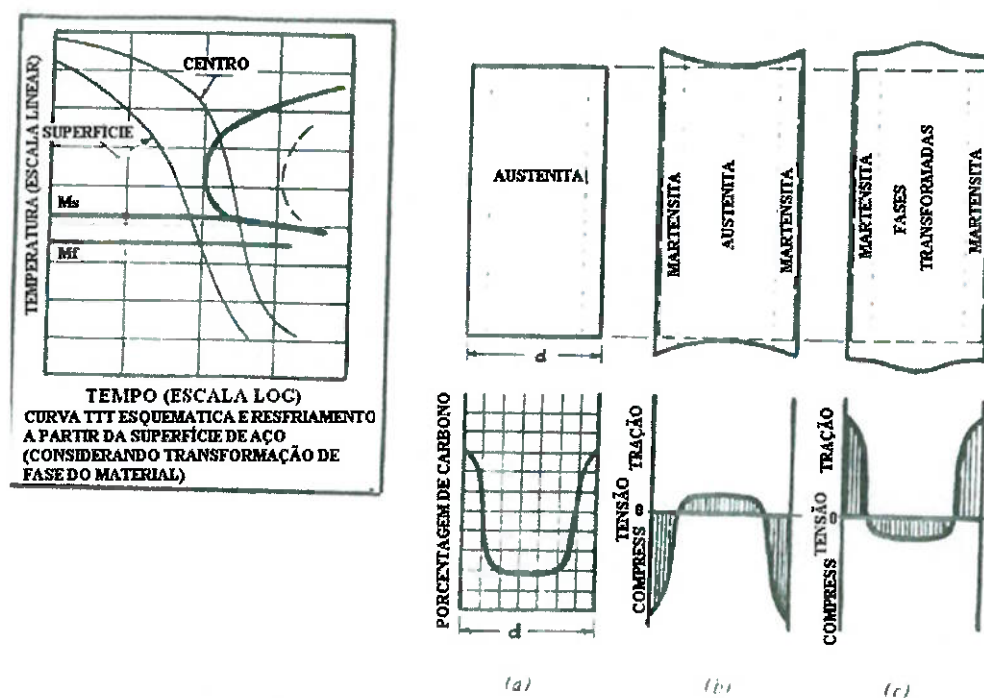


Figura 4 – Comportamento da tensão residual ao longo do diâmetro do cilindro, segundo o estudo de Ebert (1978), considerando a transformação de fase do material.

Assim, os comportamentos previstos teoricamente para as tensões num cilindro são diferentes para cada caso considerado. Quando se considera a transformação de fase do material, a superfície pode ficar sob tração e o centro sob compressão, contrariamente ao que ocorre quando não se examina a influência da transformação de fase.

1.2.2 Transferência de Calor no Cilindro

No processo de têmpera, realiza-se o resfriamento brusco do material a fim de se obter uma estrutura totalmente martensítica, conforme esquematizado na Figura 1. Como o resfriamento se dá pela superfície, existem gradientes de temperatura ao longo do raio do cilindro. A relação entre temperaturas dos diferentes pontos ao longo do raio do cilindro pode ser obtida a partir de equações referentes à transferência de calor no sistema. McAdams (1964) fornece os conceitos necessários para a compreensão do sistema de transferência de calor, a partir de um modelo matemático simples para a seção de cilindro infinito. Adicionalmente, traz modelos para cilindros e geometrias finitas, apresentando a teoria clássica sobre os fenômenos de condução de calor ao longo do cilindro e de convecção em sua superfície, os quais podem ser descritos pelas equações a seguir.

$$q = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{1ª Lei de Fourier} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \nabla^2 T \quad \text{2ª Lei de Fourier} \quad (2)$$

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad \text{Lei de Newton} \quad (3)$$

$$q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot \Delta T^4 \quad \text{Lei de Stefan-Boltzmann} \quad (4)$$

As Equações (1) e (2) representam o fenômeno de condução, onde q é o fluxo de calor, k a condutibilidade térmica do material e α a difusidade térmica. A Equação (3) indica o fenômeno de convecção na superfície, onde h é o coeficiente de película (ou coeficiente de convecção), T_s é a temperatura da superfície do cilindro e T_∞ a temperatura do fluido que

refrigera a superfície do cilindro. Descrevendo a radiação, a Equação (4) traz a constante de Stefan-Boltzmann (σ) e a emissividade ε .

No modelo proposto neste trabalho, todos os fenômenos de troca de calor são representados por condições de contorno aplicadas como informação de entrada.

1.2.3 Transformações de Fase em Aços

As Figuras 5 e 6 ilustram as estruturas cristalinas CFC e CCC, respectivamente, enquanto a Figura 7 traz o esquema da célula unitária da estrutura TCC. Na transformação de fase de austenita (estrutura CFC) para martensita (estrutura TCC), ocorre um rearranjo da estrutura cristalina, de forma que há uma expansão no volume ocupado pelo material. Ademais, a estrutura TCC na martensita apresenta um carbono deslocado, o que causa uma expansão na mudança de fase.

Em outros tipos de transformações fase, ocorre uma alteração da estrutura CFC para a estrutura CCC, de forma que também há uma alteração no volume ocupado pela estrutura.

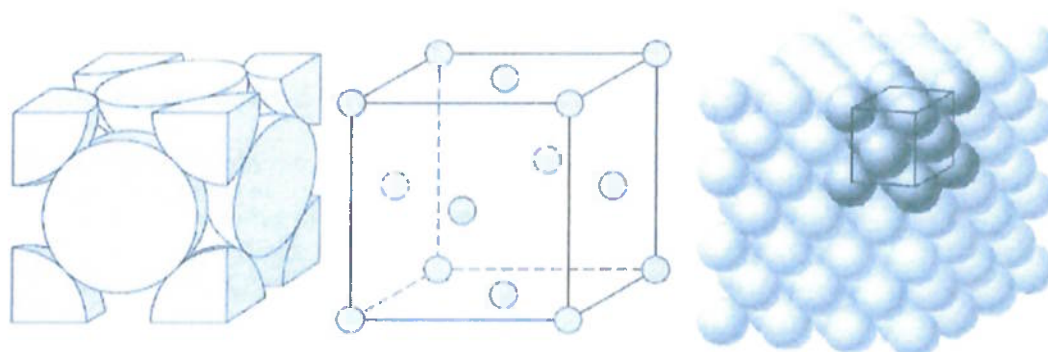


Figura 5 – Estrutura cristalina Cúbica de face centrada (CFC)

Essa variação na estrutura cristalina do material provoca, além de mudanças nas propriedades térmicas e mecânicas, alterações volumétricas e variações na taxa de expansão volumétrica ao longo do material, causando diferenças de deformações plásticas, gerando as tensões residuais por transformação de fase.

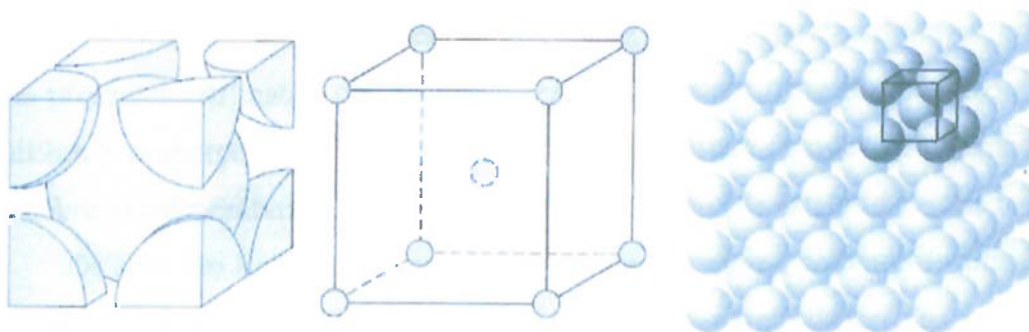


Figura 6 – Estrutura cristalina Cúbica de Corpo centrada (CCC)

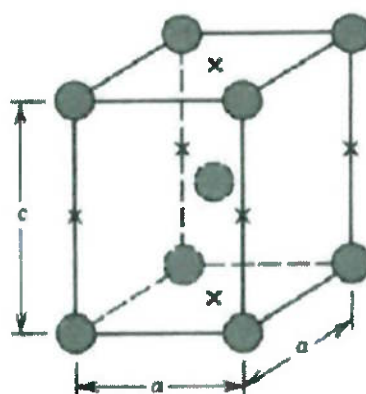


Figura 7 – Estrutura cristalina Tetragonal de Corpo Centrado (TCC)

Transformação	Mudança de Volume	Aço SAE 4140
Perlita esferoidizada → Austenita	$-4,64 + 2,21.(\%C)$	-3,7565
Austenita → Martensita	$4,64 + 0,53.(\%C)$	4,428%
Perlita esferoidizada → Martensita	$1,68.(\%C)$	0,672%
Austenita → Bainita inferior	$4,64 - 1,43.(\%C)$	4,068%
Perlita esferoidizada → Bainita inferior	$0,78.(\%C)$	0,312%
Austenita → Bainita superior	$4,64 - 2,21.(\%C)$	3,7556%
Perlita esferoidizada → Bainita superior	0	0%

Tabela 1 – Expressões gerais da variação volumétrica em cada transformação de fase em função do teor de carbono da liga e valores calculados para o aço SAE 4140 (segundo Totten e Howes, 1997, apud Gozzi, 2005, p. 60)

A Tabela 1, retirada de Totten e Howes (1997, apud Gozzi, 2005, p60), traz expressões que indicam a variação do volume para cada tipo de transformação de fase em

função da porcentagem de carbono na liga, além de indicar os valores dessas variações para o aço SAE 4140. Esses valores devem ser introduzidos no modelo computacional a fim de representar corretamente a expansão volumétrica na transformação de fase dos aços e, com isso, permitir o cálculo e avaliação dessa contribuição na geração das tensões residuais.

Um dos tratamentos térmicos que utilizam o conceito de têmpera e que será de interesse nesse trabalho é conhecido como tratamento “Through Hardening”, ou como difundido pela tradução para a língua portuguesa, “endurecimento de fora a fora”.

Esse processo consiste em se aquecer todo o material e mantê-lo numa mesma temperatura (850°C ou 1120K) por um determinado tempo, a fim de que os valores de temperatura sejam bastante homogêneos ao longo da peça tratada termicamente. Em seguida, a peça tratada é mergulhada em um líquido que está a temperatura de 20°C (ou 293K) por um intervalo de tempo de 150 segundos (Pacheco, Camarão e Savi, 2000). A Figura 8 ilustra a evolução da temperatura em diferentes pontos de um cilindro de diâmetro 45mm, submetido ao método “Through Hardening”.

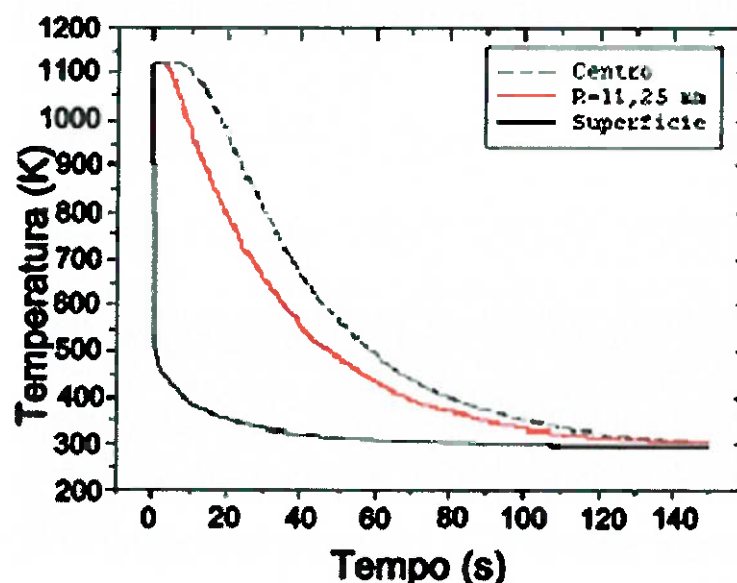


Figura 8 – Curvas de Temperaturas para 3 diferentes pontos do raio do cilindro de diâmetro 45 mm no tratamento térmico “Through Hardening”. Dados baseados no trabalho de Pacheco, Camarão e Savi (2000).

Segundo Pacheco et al (2000), caso a direção longitudinal de uma peça cilíndrica esteja livre de carregamentos, ou seja, caso possa deformar-se livremente na direção do seu eixo e ainda tenha espessura pequena, pode ser adotado para a análise o estado plano de tensões.

1.2.4 Variação das Propriedades Físicas dos Aços na transformação de Fase

Conforme já ampla e historicamente difundido pela literatura técnica, as propriedades térmicas e mecânicas dos aços variam em função da temperatura do material, de uma forma tal que no ponto de início da transformação martensítica a mudança estrutural causa saltos bruscos nos valores de algumas propriedades. Camarão, Pacheco e Savi (2000), em seu estudo e simulação numérica do processo de têmpera em cilindros de aço, trazem um conjunto de equações que descrevem o comportamento das propriedades térmicas e mecânicas do aço SAE 4140H, em função da temperatura. As propriedades analisadas por esses autores foram:

Parâmetro associado ao endurecimento cinemático ¹:

$$H = \begin{cases} 2.092 \times 10^6 + 3.833 \times 10^5 T - 3.459 \times 10^2 T^2, & \text{se } T \leq 723K \\ 2.259 \times 10^9 - 2.988 \times 10^6 T, & \text{se } < T \leq 748K \\ 5.064 \times 10^7 - 3.492 \times 10^4 T, & \text{se } T > 748K \end{cases} \quad (5)$$

Tensão de Escoamento:

$$\sigma_Y = \begin{cases} 7.520 \times 10^8 + 2.370 \times 10^5 T - 5.995 \times 10^2 T^2, & \text{se } T \leq 723K \\ 1.598 \times 10^{10} - 2.126 \times 10^7 T, & \text{se } < T \leq 748K \\ 1.595 \times 10^8 - 1.094 \times 10^5 T, & \text{se } T > 748 \end{cases} \quad (6)$$

Coefficiente de Expansão Térmica:

$$\alpha_T = \begin{cases} 1.115 \times 10^{-5} + 1.918 \times 10^{-8} T - 8.798 \times 10^{-11} T^2 - 2.043 \times 10^{-13} T^3, & \text{se } T \leq 748K \\ 2.230 \times 10^{-5}, & \text{se } T > 748K \end{cases} \quad (7)$$

¹ A expressão parâmetro associado ao endurecimento cinemático expressa o equivalente, no regime de deformação plástica, ao que é o Módulo de Young para o regime elástico, ou seja, é o quociente entre tensão e deformação para o regime plástico.

Calor Específico:

$$c = 2.159 \times 10^2 + 0.548T \quad (8)$$

Condutividade Térmica:

$$K = 5.223 + 1.318 \times 10^{-2} T \quad (9)$$

As Figuras 9 a 12 trazem os gráficos gerados a partir das equações de Melander ² (1985) (apud Camarão et al, 2000). Na Figura 9 mostra-se a variação do Módulo de Young em função da temperatura. Na Figura 10 apresenta-se a variação da tensão de escoamento, na 11 o coeficiente de expansão térmica e, na 12, a variação da condutividade térmica.

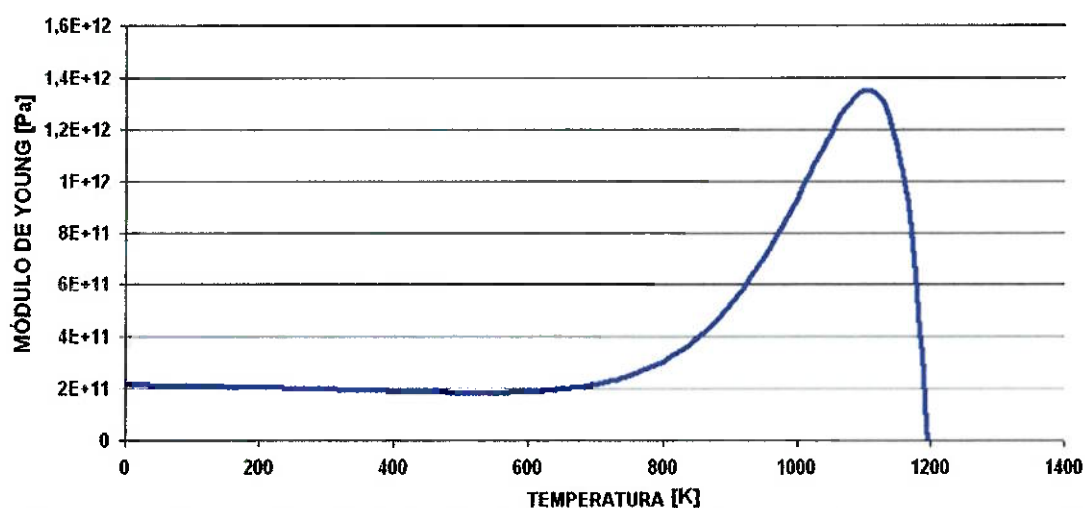


Figura 9 – Variação do Módulo de Elasticidade em função da temperatura para um aço SAE 4140H (valores calculados com base nas equações de 5 a 9)

² Em seu artigo, Camarão et al baseiam-se no trabalho de Mikael Melander.

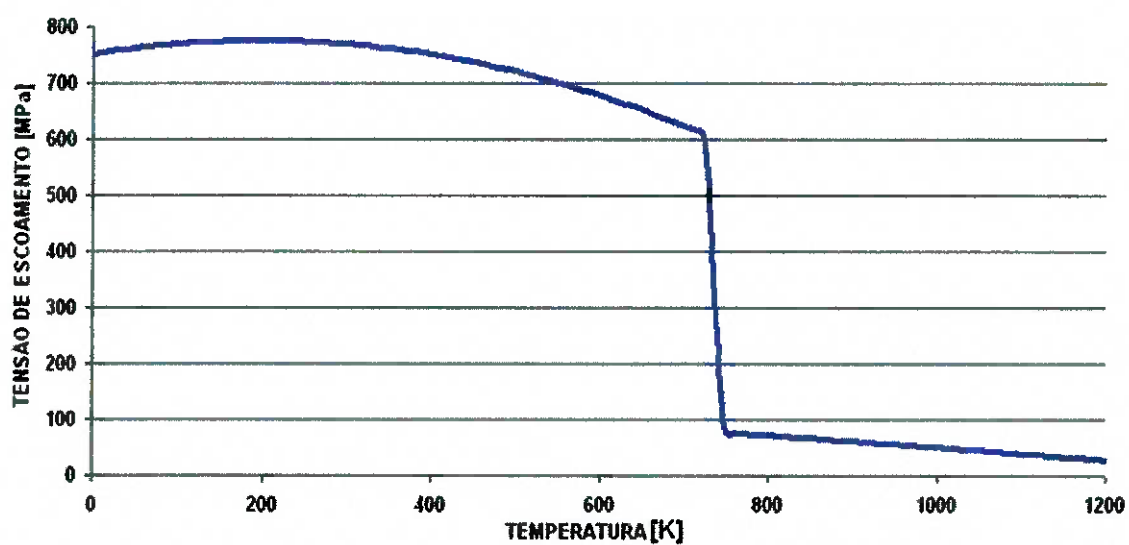


Figura 10 – Variação do valor da tensão de escoamento em função da temperatura (valores calculados com base nas equações de 5 a 9)

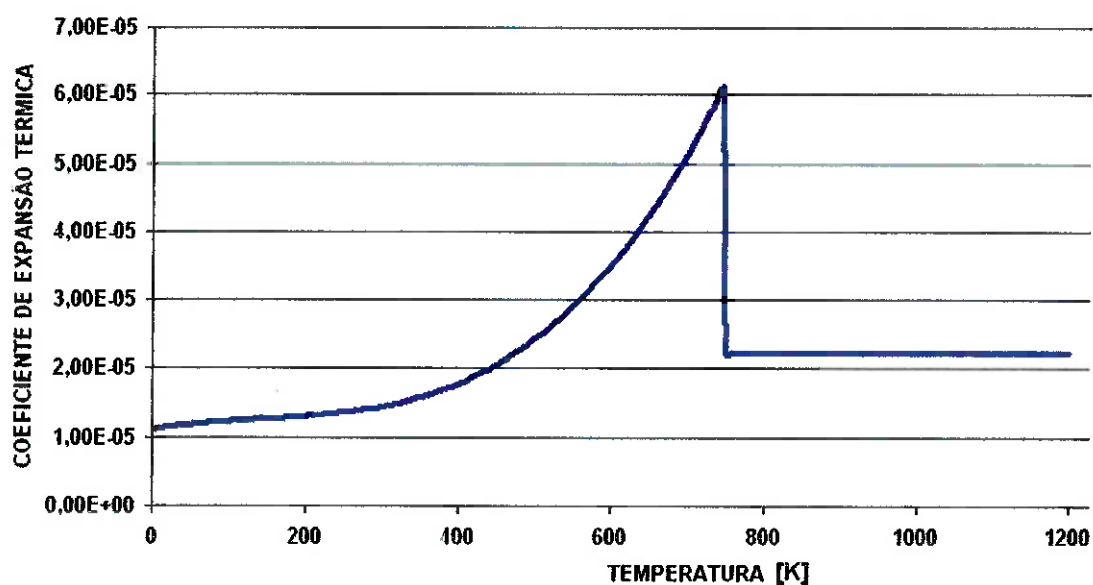


Figura 11 – Variação do valor do coeficiente de expansão térmica (valores calculados com base nas equações de 5 a 9)

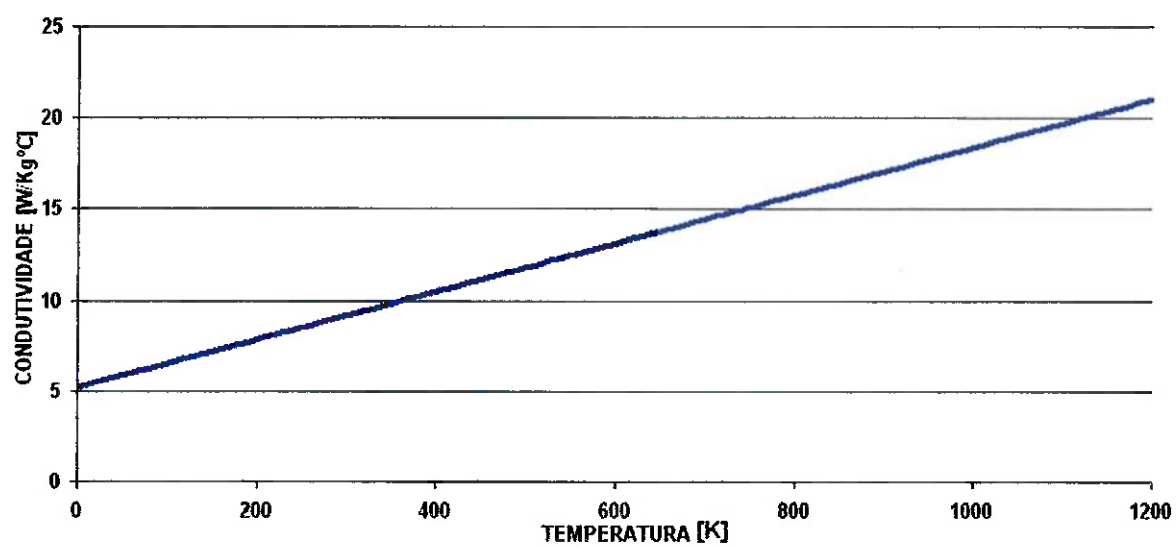


Figura 12 – Comportamento da condutividade térmica em função da temperatura (valores calculados com base nas equações de 5 a 9)

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho de formatura propõe a construção e validação de um modelo numérico que analise o processo de evolução das tensões residuais térmicas e por transformação de fase oriundas dos processos de tratamento térmico a que são submetidos componentes mecânicos com geometria cilíndrica.

A validação do modelo será feita a partir de comparações dos resultados obtidos neste trabalho com resultados presentes na literatura. Assim, a partir do desenvolvimento de modelos computacionais, objetiva-se construir uma ferramenta eficaz que permita estudar o desenvolvimento do campo de tensões na seção transversal de cilindros e sua distribuição ao longo do tempo, compreendendo os fenômenos envolvidos no sistema e no processo.

Pretende-se, dessa forma, gerar elementos para aprimorar os conhecimentos a respeito do tema, permitindo e facilitando análises posteriores, de forma a ter resultados e efeitos de caráter técnico, científico, tecnológico e econômico.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira intenção do trabalho é realizar a construção e o teste do modelo computacional. Para a construção do modelo, utilizou-se o software de Elementos Finitos ABAQUS. Para testar e corrigir o modelo tomou-se como base os aspectos qualitativos do trabalho de Ebert (1978) e a análise quantitativa de Pacheco, Camarão e Savi (2000), os quais tentou-se reproduzir.

3.1 Simulação por Elementos Finitos

3.1.1 Informações Gerais

No modelamento computacional existem as fases de pré e pós-processamento. A etapa de pré-processamento se divide em duas, sendo que na primeira são informadas ao modelo as condições de carregamento (entrada do sistema) ou condições de contorno para o cálculo da temperatura em todo o cilindro ao longo do tempo. A segunda realiza o cálculo da distribuição de tensões na seção do cilindro, a partir de um histórico de temperatura em todos os pontos do cilindro, fornecido na primeira etapa (Baran, 1988). No pós-processamento faz-se apenas a observação dos resultados.

3.1.2 Construção do Modelo Computacional

O modelo computacional gerado consiste em uma malha bidimensional que representa a seção transversal do cilindro. No intuito de se reproduzir o trabalho de Pacheco, Camarão e Savi (2000), adotou-se a geometria do cilindro do artigo, com diâmetro 45 mm e com as propriedades do aço SAE 4140H, sendo que, para a representação e o equacionamento do sistema, adotou-se o estado plano de tensões, assim como fizeram os autores citados. Ainda assim, salienta-se que a análise pelo estado plano de deformações poderia permitir resultados mais próximos do caso real.

A Figura 13 mostra a malha construída para as simulações em MEF.

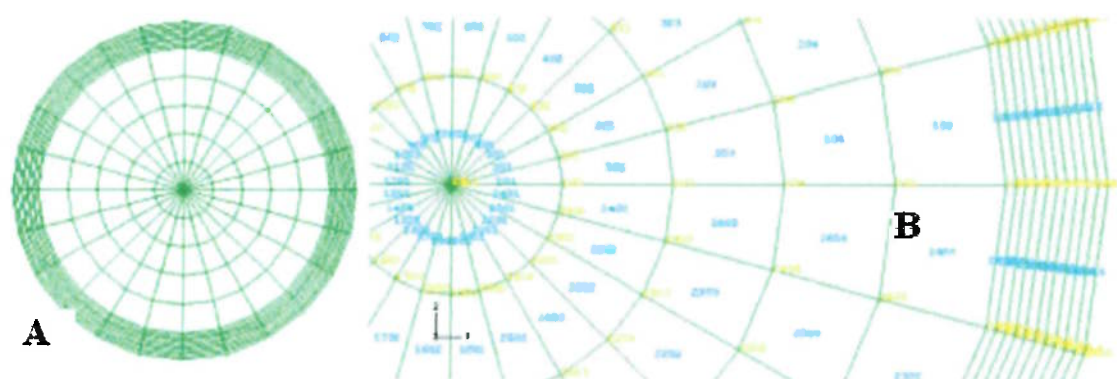


Figura 13 – Malha construída para a simulação por Elementos Finitos. (A) Visão geral do modelo e (B) detalhe do refinamento da malha na região próxima à superfície

Como condição de entrada para o modelo optou-se por colocar os valores de temperatura dos pontos da superfície do cilindro, observadas no tratamento “Through Hardening”, estudado por Pacheco, Camarão e Savi (2000). A Tabela 2, que se relaciona com a Figura 8, traz os valores da evolução da temperatura em diferentes pontos do cilindro. Dessa forma, os pontos da curva da Figura 8, referentes à superfície, servem como condição de contorno para todo o sistema e as temperaturas ao longo do tempo para os outros pontos são calculadas com base nessa condição de contorno.

Tempo (seg)	Temperatura (K)	Tempo (seg)	Temperatura (K)	Tempo (seg)	Temperatura (K)
0	1120	51	293	101	293
1	450	52	293	102	293
2	445	53	293	103	293
3	440	54	293	104	293
4	435	55	293	105	293
5	430	56	293	106	293
6	425	57	293	107	293
7	420	58	293	108	293
8	415	59	293	109	293
9	410	60	293	110	293
10	405	61	293	111	293
11	400	62	293	112	293
12	395	63	293	113	293
13	390	64	293	114	293
14	386	65	293	115	293
15	381	66	293	116	293
16	376	67	293	117	293
17	372	68	293	118	293
18	367	69	293	119	293
19	362	70	293	120	293
20	357	71	293	121	293
21	352	72	293	122	293
22	348	73	293	123	293
23	344	74	293	124	293
24	340	75	293	125	293
25	337	76	293	126	293
26	334	77	293	127	293
27	332	78	293	128	293
28	330	79	293	129	293
29	328	80	293	130	293
30	326	81	293	131	293
31	324	82	293	132	293
32	322	83	293	133	293
33	320	84	293	134	293
34	318	85	293	135	293
35	316	86	293	136	293
36	314	87	293	137	293
37	312	88	293	138	293
38	310	89	293	139	293
39	308	90	293	140	293
40	306	91	293	141	293
41	304	92	293	142	293
42	302	93	293	143	293
43	300	94	293	144	293
44	298	95	293	145	293
45	296	96	293	146	293
46	295	97	293	147	293
47	294	98	293	148	293
48	293	99	293	149	293
49	293	100	293	150	293
50	293				

Tabela 2 – Valores utilizados como condição de contorno de temperatura para os nós da superfície do modelo em Elementos Finitos

3.2 Teste do Modelo Computacional Construído

As primeiras análises numéricas foram realizadas alimentando-se o programa de Elementos Finitos com as informações referentes às propriedades térmicas e mecânicas do aço SAE 4140, as quais também seguiram as selecionadas nos trabalhos de Melander (1985) e Pacheco, Camarão e Savi (2000) e correspondem às apresentadas nas Figuras 9, 10, 11 e 12. Os resultados obtidos na análise térmica do sistema mostraram-se equivalentes aos encontrados na literatura, indicando coerência nesta primeira simulação, conforme é mostrado na Figura 14. Entretanto a análise de tensões mostrou-se bastante diferente do esperado, como pode ser observado pela análise da Figura 15.

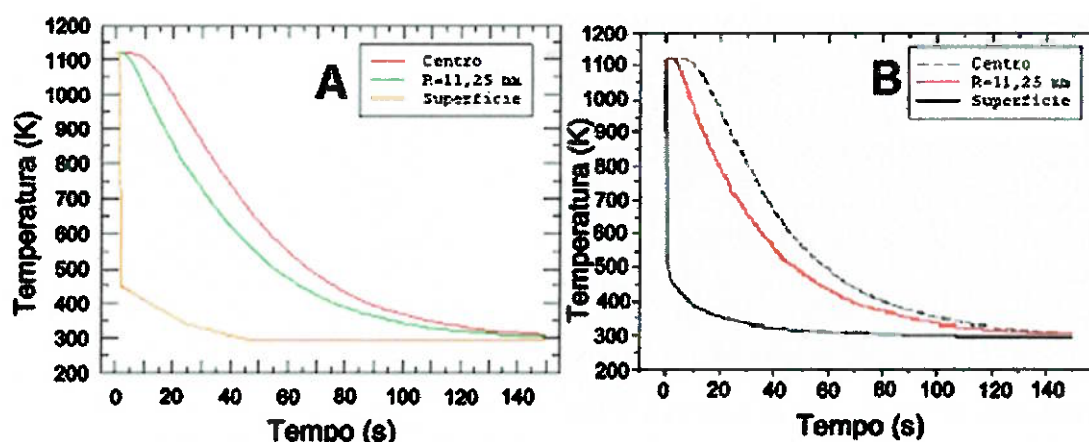


Figura 14 – Resultado térmico obtido. Comparação entre as curvas de temperaturas para 3 diferentes pontos do raio do cilindro em cada modelo. (A) MEF e (B) Dados obtidos no trabalho de Pacheco et al (2000)

Esse fato mostrou que a análise não estava coerente e que era necessário uma revisão dos dados de entrada do sistema. Reavaliando cada dado de entrada do sistema foi observado que a curva referente à expansão volumétrica do sistema (que apresenta o coeficiente de expansão linear em função da temperatura – Figura 11) não informava ao sistema a expansão

volumétrica referente à transformação de fase, uma vez que, segundo a Tabela 1, ocorre uma expansão volumétrica de 4,428% na transformação da austenita em martensita.

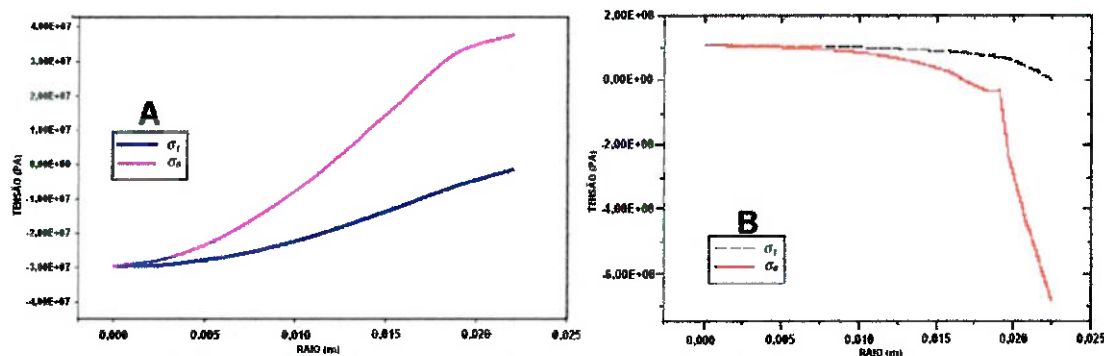


Figura 15 – Resultado do cálculo de tensões em função do raio do cilindro. Comparação entre as curvas de temperaturas para 3 diferentes pontos do raio do cilindro em cada modelo. (A) MEF e (B) Dados obtidos no trabalho de Pacheco et al (2000)

A maneira encontrada para se informar isso ao sistema foi alterar a curva da Figura 11. Assim, como é no resfriamento que ocorre a expansão, devem-se ter coeficientes de expansão linear e volumétrico negativos, de acordo com as expressões das Equações 10 e 11.

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T \quad (10)$$

$$\Delta V = V_0 \gamma \Delta T \quad (11)$$

$$\gamma = 3\alpha \quad (12)$$

Nestas Equações ΔL indica a variação linear, ΔV é a variação de volume, L_0 é o comprimento inicial, V_0 o volume inicial, α o coeficiente de expansão linear, γ o coeficiente de expansão volumétrica e ΔT a variação de temperatura.

Desse modo, para uma variação de 4,428% no volume, e levando-se em conta as temperatura de início, $M_s=748K$ ($475^\circ C$), e de fim, $M_f=573K$ ($300^\circ C$), da transformação martensítica, chega-se a um valor de $\alpha=8,4 \cdot 10^{-5}$, conforme mostrado a seguir:

$$\Delta T = M_s - M_f = 573 - 748 = -175 \quad (13)$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} \approx 0,045 \quad (14)$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \gamma \Delta T \rightarrow \gamma = \frac{0,045}{(-175)} \Rightarrow \gamma = 2,5 \cdot 10^{-4} \quad (15)$$

E assim:

$$\gamma = 3\alpha \rightarrow \alpha = \frac{2,5 \cdot 10^{-4}}{3} = 8,4 \cdot 10^{-5} \quad (16)$$

A Figura 16 mostra o novo gráfico do coeficiente de expansão linear para a ocorrência de transformação de austenita em martensita.

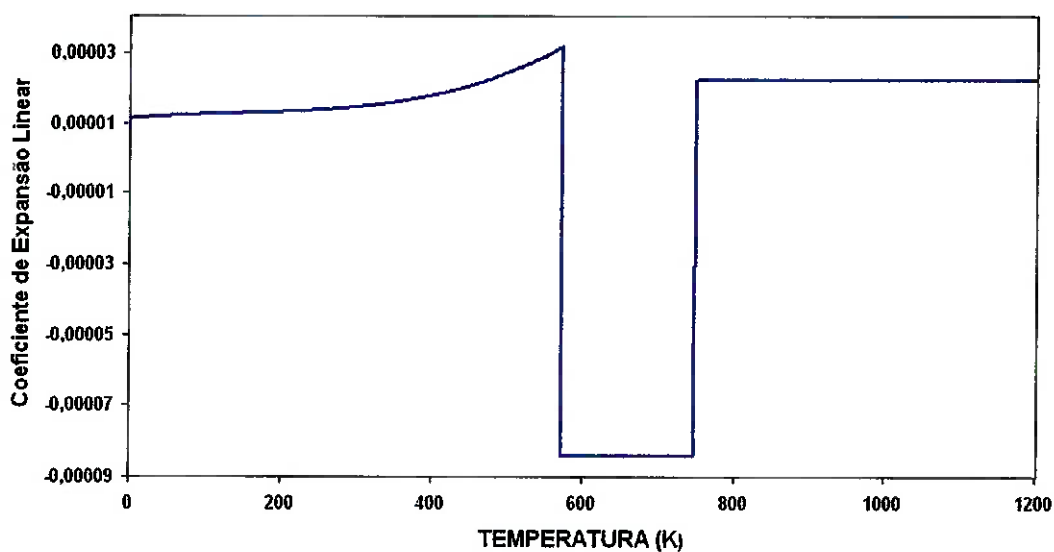


Figura 16 – Novo comportamento para a variação do coeficiente de expansão térmica linear representando a expansão volumétrica na transformação martensítica

Entretanto, é importante perceber que utilizar o coeficiente de expansão linear negativo foi apenas um artifício computacional para informar ao programa de Elementos Finitos que ocorre uma expansão volumétrica na transformação de fase.

Esse recurso foi testado construindo-se, por meio do MEF, um modelo simples de uma barra (Figura 17), que pode expandir ou contrair, sem restrição, quando uma de suas extremidades é resfriada partindo-se de uma temperatura de 1220 K. A esse modelo de barra, aplicou-se como dado de entrada para o coeficiente de expansão linear, a curva mostrada na Figura 16, que apresenta um valor negativo a fim de representar a expansão no resfriamento. Como era esperado, os nós se deslocaram num indicativo de expansão volumétrica, como mostrado na Figura 18.

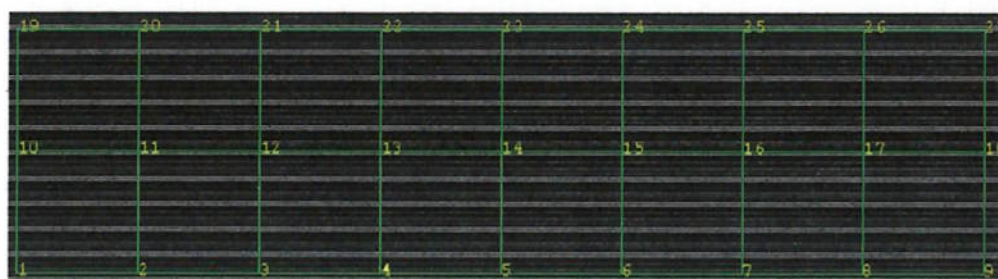


Figura 17 – Modelo em MEF de uma barra que é livre para expandir e contrair quando resfriada, utilizando coeficiente de expansão linear negativo para a transformação de fase.

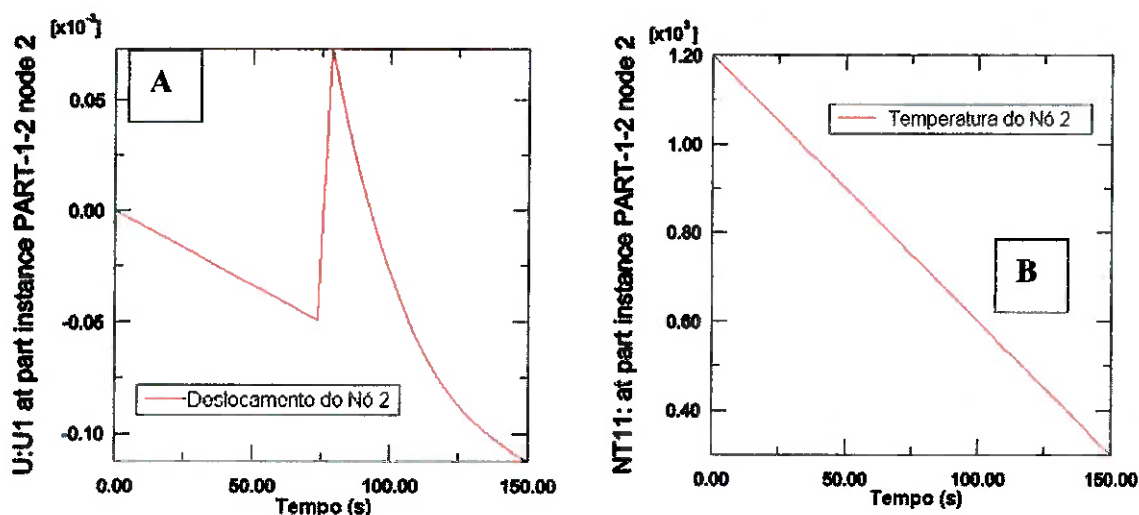


Figura 18 –Deslocamento do nó 2 (figura A) e sua variação da temperatura (figura A) como teste para se utilizar o artifício de um coeficiente de expansão linear negativo para a transformação de fase

Para se observar a eficácia desse artifício deve-se analisar conjuntamente os dois gráficos da Figura 18, tanto o de temperatura (Figura 18a) quanto o de deslocamento (Figura

18b). Quando, a partir do resfriamento, se atinge a temperatura de 748K, o nó analisado (número 2, neste caso) deixa de se deslocar num sentido negativo (contração) e passa a se deslocar num sentido positivo (sinal indicativo de expansão). Isso evidencia que é correta a decisão de se adotar um valor negativo para o coeficiente de expansão linear a fim de representar a expansão volumétrica na transformação martensítica e, com isso, permitir o cálculo correto das tensões residuais.

3.3 Análise dos diferentes tipos de transformação de Fase

Deve-se salientar, ainda, que nas primeiras simulações é considerado que todo o cilindro sofre transformação de fase, passando de austenita a martensita. Todavia, diferenças nas curvas de resfriamento do núcleo e da superfície do cilindro fazem com que, dependendo da profundidade em relação à superfície, ocorram diferentes transformações de fase (Figura 2) ou mesmo que não ocorra transformação alguma, permanecendo o material na fase austenítica.

Para introduzir essas variações nos cálculos do modelo, foram calculadas novas curvas para o coeficiente de expansão térmica linear, de forma que se obteve um gráfico da variação dessa propriedade para cada tipo de transformação estudada (Figuras 19 e 20).

Nessa segunda etapa foram analisadas três diferentes configurações para a transformação de fase. Na primeira, uma casca de 5 mm de espessura se transforma em martensita, enquanto que o núcleo passa para a fase perlítica. Numa segunda análise, a casca de 5 mm se transforma em martensita e no núcleo não há transformação. Com isso, chega-se a um total de quatro diferentes configurações em estudo, conforme mostrado na Tabela 3.

	Núcleo	Casca de 5 mm
Simulação A	Martensita (sem expansão)	Martensita (sem expansão)
Simulação B	Martensita	Martensita
Simulação C	Perlita	Martensita
Simulação D	Sem transformação	Martensita

Tabela 3 – Diferentes configurações analisadas em cada simulação quanto ao tipo de transformação de fase

As simulações podem também ser divididas em dois grupos, levando-se em conta as propriedades utilizadas. Nas simulações A e B um único material é considerado, enquanto nas simulações C e D, deve-se diferenciar as propriedades do núcleo e da casca.

As curvas do coeficiente de expansão linear para os casos C e D são apresentados nas Figuras 19 e 20. Para a transformação em perlita foi considerada uma expansão volumétrica de 3,756%, o que equivale a um coeficiente de expansão linear $\alpha = -7,15 \cdot 10^{-5}$. Para o caso do núcleo sem transformação foi mantido um valor de α constante e igual a $2,23 \cdot 10^{-5}$.

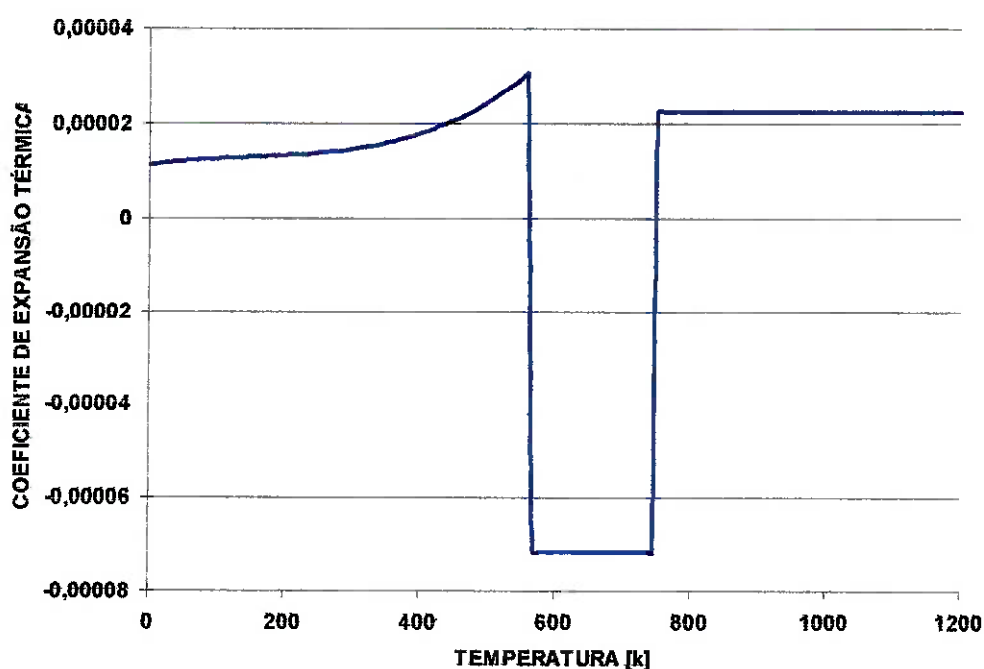


Figura 19 – Novo comportamento para a variação do coeficiente de expansão térmica linear para o caso da simulação C (núcleo se transforma em perlita)

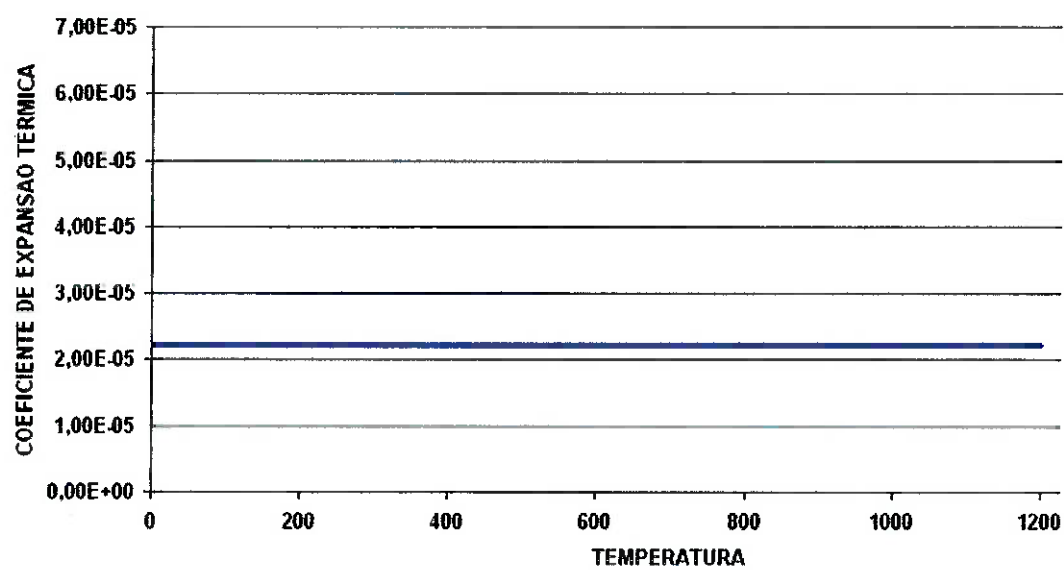


Figura 20 – Novo comportamento para a variação do coeficiente de expansão térmica linear para o caso da simulação D (não há transformação de fase)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na comparação entre os resultados obtidos com o modelo computacional deste trabalho e os apresentados por Pacheco, Camarão e Savi (2000), como já mostrado anteriormente na Figura 14, os resultados da análise térmica para os dois modelos mostraram-se concordantes e equivalentes. As curvas indicadas por A mostram os resultados do modelo construído neste trabalho, enquanto que as curvas B indicam os resultados de Pacheco, Camarão e Savi (2000).

As Figuras 21, 22, 23 e 24 mostram, respectivamente, o comportamento das tensões radial (σ_r) e tangencial (σ_θ) em função do raio do cilindro, para o instante final das simulações A, B, C e D, ou seja, passados os 150 segundos do tratamento térmico.

Comparando-se os resultados das simulações aos obtidos por Pacheco, Camarão e Savi (2000) observa-se que o resultado que apresenta maior proximidade ao apresentado na literatura é o que considera transformação martensítica na casca e o núcleo sem transformação. A Figura 25 traz lado a lado esses dois resultados. Nela pode-se ver a semelhança entre os resultados dos dois modelos.

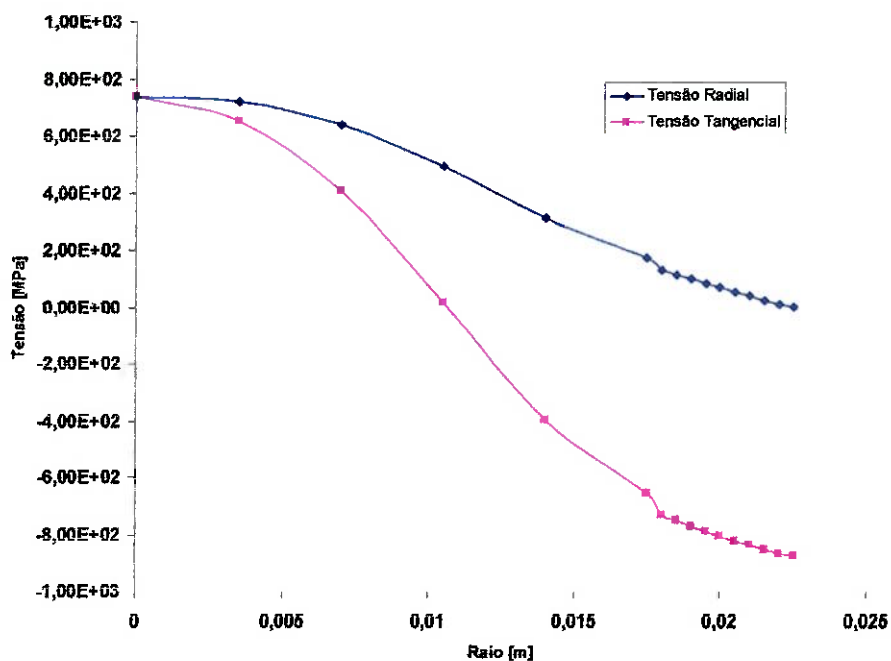


Figura 21 – Curvas de tensão ao longo do raio do cilindro para a simulação A – Casca e Núcleo se transformam em martensita mas não se considera a expansão da transformação de fase

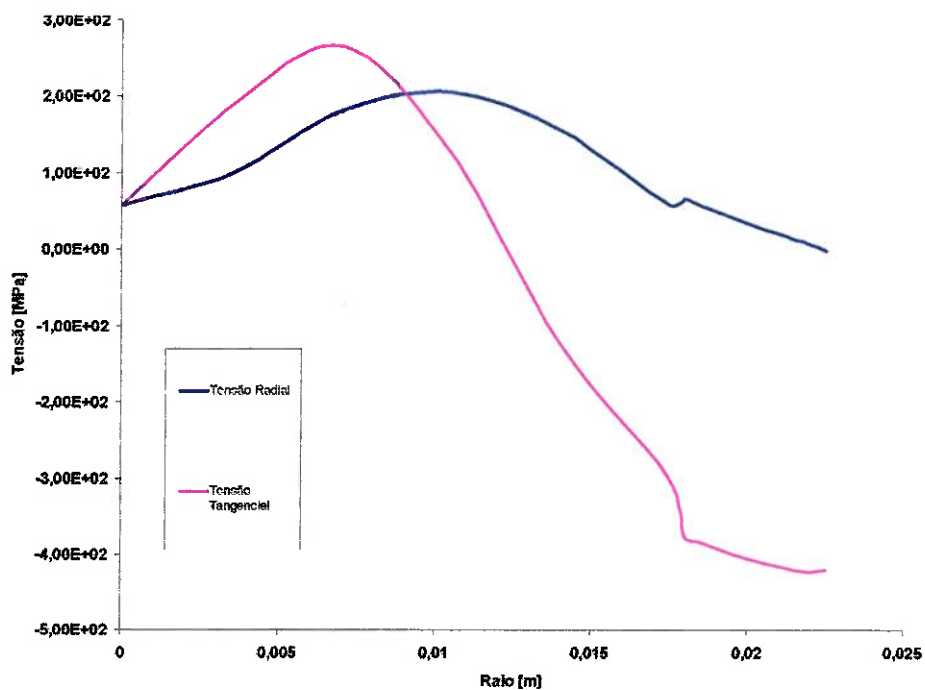


Figura 22 – Curvas de tensão ao longo do raio do cilindro para a simulação B - Casca e Núcleo se transformam em martensita e é considerada a expansão da transformação de fase

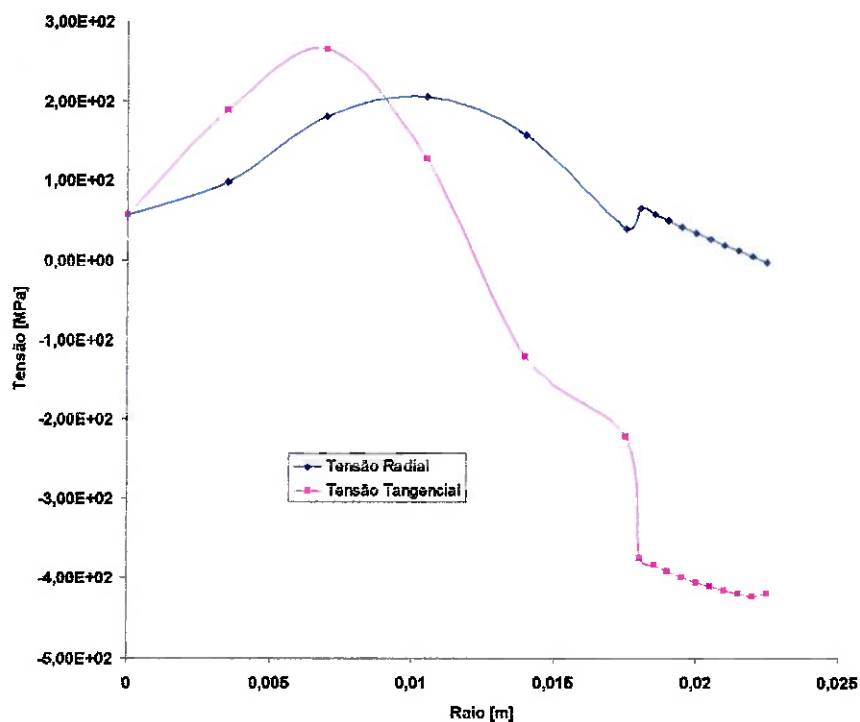


Figura 23 – Curvas de tensão ao longo do raio do cilindro para a simulação C – Casca se transforma em martensita e núcleo em perlita

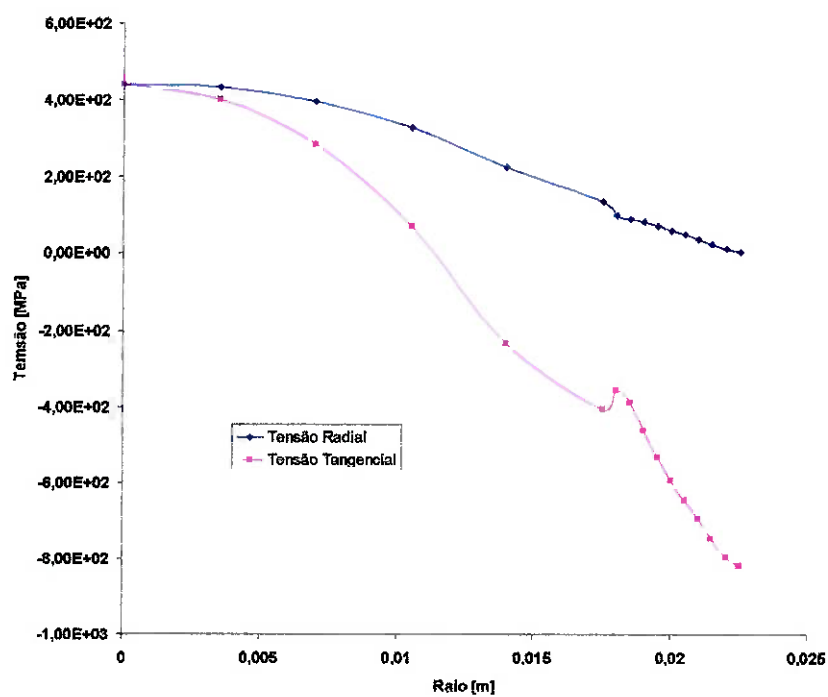


Figura 24 – Curvas de tensão ao longo do raio do cilindro para a simulação D - Casca se transforma em martensita e núcleo não transforma

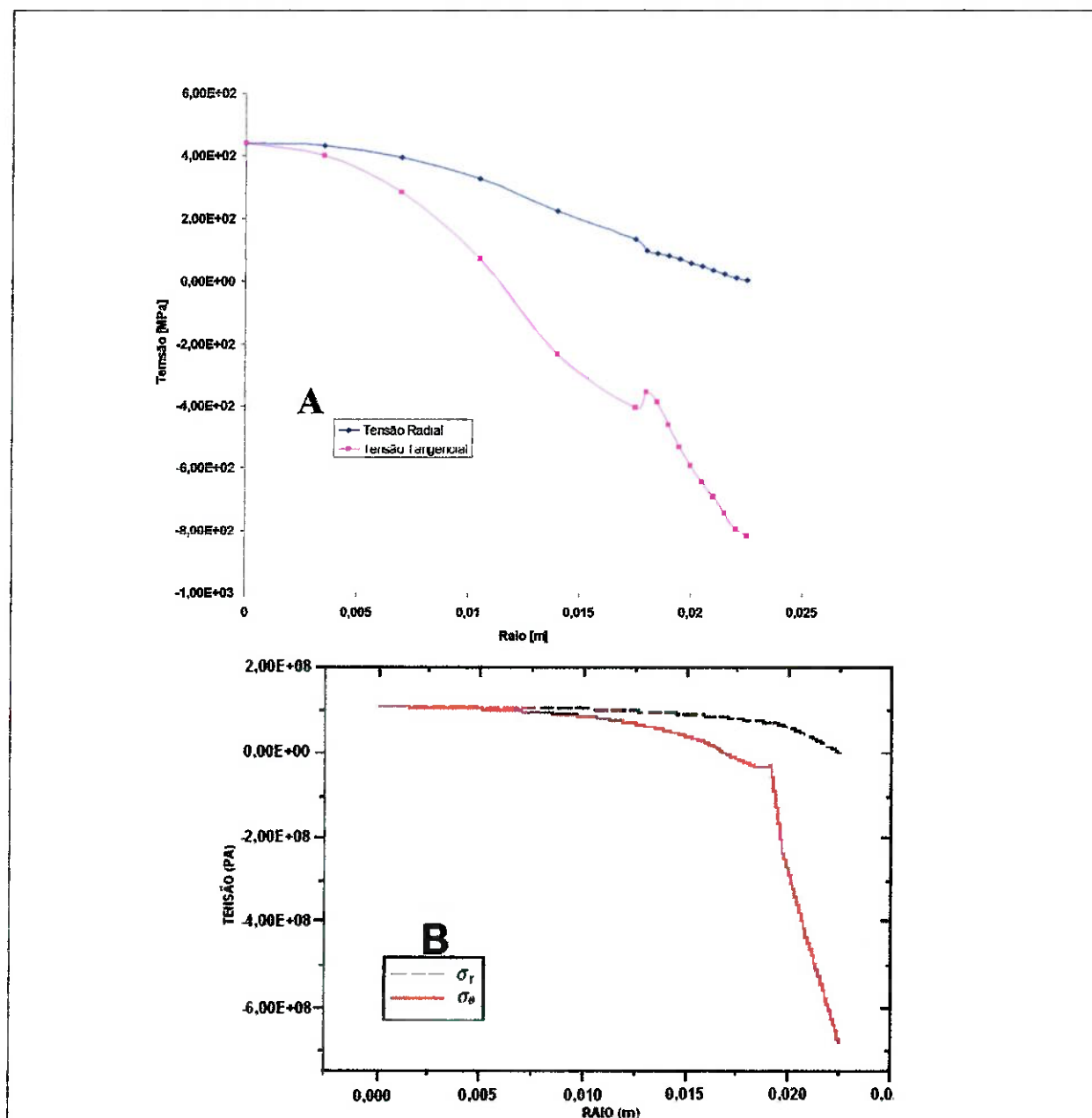


Figura 25 – Comparação entre as curvas de tensão radial e tangencial ao longo do raio do cilindro entre cada modelo. (A) MEF e (B) Dados obtidos no trabalho de Pacheco et al (2000)

As curvas de ambos os gráficos indicam a presença de duas regiões com comportamentos diferentes no cilindro, delimitadas por uma camada a 5 mm da superfície, que, segundo o artigo, é a região em que ocorre transformação martensítica. Para o raio de 17,5 mm observa-se um ponto de descontinuidade do comportamento das tensões nos dois modelos. Em termos numéricos:

- Os valores das tensões ao longo do raio do cilindro estudado são da ordem de centenas de MPa, mas há diferenças entre valores numéricos dos dois modelos.
- No núcleo, os valores de tensão trativa são de 100MPa para o modelo de Pacheco, Camarão e Savi (2000) e de 400 MPa para o modelo construído neste presente trabalho.
- Na superfície, os valores da tensão compressiva são concordantes entre os dois modelos e atingem -800MPa.

Estudos posteriores são necessários para se entender os motivos das pequenas diferenças entre os resultados dos dois modelos. Dentre as possibilidades a considerar cita-se aqui:

- Refinar a malha do modelo, com elementos menores, ou seja, com uma melhor discretização, pode-se chegar a resultados mais satisfatórios.
- Revisar e detalhar as propriedades mecânicas do material, de forma a identificar padrões na alteração dos resultados com uma determinada variação da propriedade mecânica. Em outras palavras, pode-se, num método de tentativa e erro, variar os valores das propriedades até se chegar a um resultado melhor.

O resultado da Figura 23 apresenta o estudo da condição em que o núcleo do cilindro se transforma em perlita, enquanto a casca, em martensita. Essa análise pode ser considerada como um caso mais próximo das situações reais dos tratamentos térmicos, se comparada com a análise da Figura 22, que faz uma simplificação, admitindo que todo o cilindro se transforma em martensita.

Como discutido no início do texto, segundo as Figuras 1 e 2, são as taxas de resfriamento que determinam as transformações de fase. Dessa forma, como o resfriamento do núcleo do cilindro é mais lento que o da superfície, é de se esperar que núcleo e superfície não apresentem a mesma fase ao final do processo de resfriamento. A Figura 23, ainda que bastante semelhante às Figuras 22 e 24 quanto à forma, traz um resultado que pode ser considerado um avanço em relação ao trabalho de Pacheco, Camarão e Savi (2000), que não trazem essa distinção em seu modelo.

5. CONCLUSÕES

Para os casos em estudo neste trabalho, a análise da evolução das tensões residuais em cilindros mostrou que:

- Quando se considera o efeito das tensões residuais térmicas e de transformação de fase, ao final do processo de tratamento térmico, o cilindro fica sob tensões trativas no núcleo e compressivas na superfície.
- A simulação que leva em conta a transformação da austenita em perlita (Figura 23) pode ser considerada um avanço em relação ao modelo de Pacheco et al, que não faz essa consideração.
- Ademais, o modelo construído neste trabalho mostrou-se bastante concordante com os modelos da literatura e com os resultados qualitativos esperados. Confrontando os vários resultados, pode-se considerar o modelo proposto como validado cientificamente e tecnologicamente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] American Society for Metals – **Metals Handbook**. 9.ed. Ohio: Metals Park, 1990. 793 p.
- [2] Baran, Nicholas M., **Finite Element Analysis on Microcomputers**, McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [3] Coletânea de Manuais para utilização do software **ABAQUS (Guias do usuário)**, versão 6.5. ABAQUS, Inc.
- [4] Ebert, L.J., **The Role of Residual Stresses in the Mechanical Performance of Case Carburized Steels**, Metallurgical Transactions, 9A, (1978), pp. 1537-1551.
- [5] Gozzi, Danilo S., **Estudo do Problema de Empenamento de Tarugos de Aço Provenientes de Lingotamento Contínuo**, Trabalho de Formatura, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 2005.
- [6] McAdams, Willians H., **Transmission de Calor**. Tercera edición. Tradução de Jaime Moneva. McGraw-Hill, 1964.
- [7] Melander, M., **“A Computational and Experimental Investigation of Induction and Laser Hardening”**. Ph.D. Thesis, Departament of Mechanical Engineering, Linkoping University, Suécia, 1985

- [8] Oliveira, M. F., Zoby, M. R. G., Souza, R. M. de, **“Simulação da Evolução de Tensões Térmicas em Cilindros de Laminação”**, Trabalho apresentado no Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 2001.
- [9] Pacheco P.M.C.L., Savi M.A. and Camarão A.F., **“Numerical Simulation of the Quenching Process in Steel Cylinders”**, CILAMCE 2000 - 21th Congresso Ibero Latino-Americano sobre Métodos Numéricos para Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, 6-8 Dezembro 2000.
- [10] Pacheco, P.M.C.L., Oliveira, S. A., Camarão, A. F. and Savi, M. A., **A model to predict residual stresses introduced by the quenching process in steels**, Proceedings of the 14th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Bauru, Brazil, 1997.
- [11] Pilkey, Walter D., **Peterson’s Stress Concentration Factors**, John Wiley & Sons, Inc., 1997
- [12] Rodeiro, P. F., **“Análise de Distribuição de temperaturas e Tensões Residuais em soldas do tipo Ring-Weld”**, dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 2005.
- [13] Sen, S., Aksakal, B. and Ozel, A., **Transient and residual thermal stresses in quenched cylindrical bodies**, International Journal of Mechanical Sciences, v. 42, pp. 2013-2029, 2000.

- [14] Serantoni, C. R., **“Fadiga Térmica de Ferros Fundidos Brancos Multicomponentes”**, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 2003.

- [15] Stevens, P. G., Ivens, K. P. and Harper, P., “Increasing work-roll life by improved roll-cooling practice”, *Journal of the Iron and Steel Institute*, pp. 1-11, 1971.

- [16] Timoshenko, S. P., Gere, J. E. **Mecânica dos Sólidos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1984. Volumes 1 e 2.

- [17] Totten G. E., Howes M. A., **Steel Heat Treatment Handbook**, Marcel Dekker, New York, 1997.