



# SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA OTIMIZAÇÃO DE COMPONENTE METÁLICO USADO EM FORNO PARA SOLDAGEM POR DIFUSÃO<sup>1</sup>

*Osmar Roberto Bagnato<sup>2</sup>*

*Marco Antonio dos Santos Fernandes<sup>3</sup>*

*Marcio José Cuccolo Rosales<sup>4</sup>*

## Resumo

A soldagem por difusão consiste em um processo de união em temperaturas elevadas, porém abaixo do ponto de fusão dos materiais. Dentre os parâmetros que governam o processo, os principais são a temperatura, a carga estática aplicada e tempo de difusão. Os componentes selecionados para a fabricação de fornos de difusão devem ser projetados para suportar ao fenômeno de fluência. A simulação numérica é uma ferramenta fundamental para o projeto de estruturas e componentes de engenharia. Neste sentido, este projeto tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico de um componente fabricado em ASTM HK 40 refratário através de simulação numérica nas condições de operação de um forno de solda por difusão de ligas metálicas. Os resultados são apresentados de forma a comparar o componente real que recebe a influência da temperatura e da carga aplicada em função do tempo, com o modelo criado por simulação numérica, utilizando o software ANSYS®. As alterações, tanto na qualidade do material - composição química - quanto na geometria da peça, foram realizadas considerando o efeito dos parâmetros de processo sobre a degradação da microestrutura e, conseqüentemente, das propriedades mecânicas do componente em serviço. Além de preservar a qualidade final do produto soldado, o uso da simulação numérica auxiliou na elaboração do novo projeto do componente de tal modo a garantir a integridade física e a otimização funcional do forno.

**Palavras-chave:** Simulação numérica; Soldagem; Difusão; Fluência.

## NUMERICAL SIMULATION FOR OPTIMIZATION OF METAL COMPONENT USED IN A DIFFUSION WELDING FURNACE

### Abstract

Diffusion bonding is a welding process that produces a solid state joint, once it works below the melting point of materials. Among the process parameters that guarantee the quality of welded components are temperature, static applied load and diffusion time. Components selected for the production of diffusion furnaces must be designed to withstand creep phenomenon. Numerical simulation is a fundamental tool for design structures and engineering components. Thus, this paper aims to evaluate the mechanical behavior of a casting component made of refractory stainless steel by using numerical simulation of a diffusion furnace operation for bonding metallic alloys. The results compare the real component that receives the influence of temperature and applied load versus time, with the model created by numerical simulation using ANSYS®. The changes, both in material quality - chemical composition - and geometry were carried out to consider the effect of process parameters on degradation of the material microstructure and consequently mechanical properties of the component. Beyond maintaining the final quality of the welded product, the use of numerical simulation helped to define the new component design ensuring its physical integrity and proper functioning.

**Keywords:** Numerical simulation; Welding; Diffusion bonding; Creep.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.*

<sup>2</sup> *Líder do Grupo de Materiais – LNLS (Lab. Nacional de Luz Síncrotron)*

<sup>3</sup> *Engenheiro Mecânico – LNLS (Lab. Nacional de Luz Síncrotron)*

<sup>4</sup> *Engenheiro de Materiais – LNLS (Lab. Nacional de Luz Síncrotron)*

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem por difusão é um processo no qual a união dos materiais é efetuada no estado sólido. Tal processo se dá através da migração de átomos de um material para outro, nos pontos de contato, devido a diferenças de concentração.<sup>(1)</sup>

Este processo de soldagem deve ser executado em altas temperaturas, usualmente acima de 50% da temperatura de fusão do material. As peças são pressionadas uma contra a outra a fim de garantir o contato e evitar vazios que interferem na superfície talde contato das peças soldadas.<sup>(1)</sup>

Componentes utilizados nesse processo de soldagem devem ser projetados de forma com que as solicitações mecânicas ao qual serão submetidos, associada à alta temperatura de trabalho, não acarretem no fenômeno da fluência.<sup>(2)</sup> A soma destas condições de operação acaba por danificar os componentes, o processo e o produto a ser soldado.

Neste artigo, é abordado o projeto da mesa da prensa de um forno usado no processo de soldagem por difusão de ligas metálicas, mais especificamente na soldagem similar de AISI 316L e Inconel-625, considerando-se a alteração nas propriedades mecânicas de cada componente em função da temperatura de operação do processo.

A análise dos esforços mecânicos que atuam no componente durante o processo foi efetuada com base em simulações de Elementos Finitos, utilizando o software ANSYS®. Este método, fundamentado na resolução de equações parciais diferenciais com condições de contorno, permite calcular as tensões na peça projetada, segundo condições de carga e restrições de deslocamento estabelecidas. Com o uso desta ferramenta de engenharia, foi possível mapear as tensões resultantes na peça durante o processo de soldagem, e conseqüentemente, as alterações geométricas foram calculadas com o objetivo de distribuir a tensão na superfície de aplicação da carga, resultando no aumento da qualidade do produto soldado e na estabilidade do processo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados os estudos de duas mesas de forno: a mesa que está sendo substituída devido à grande deformação plástica sofrida em longo tempo de trabalho, e a mesa atual, que está na fase de concepção e fabricação.

A primeira mesa foi fabricada em aço inoxidável martensítico AISI 431, segundo norma ASTM A276,<sup>(3)</sup> e a segunda em aço inoxidável austenítico grau HK 40, segundo norma ASTM A351.<sup>(4)</sup> As propriedades mecânicas destes materiais foram investigadas na literatura de forma a analisar o comportamento quando o material é submetido a altas temperaturas e aplicação de carga constante.

Os estudos demonstraram que o módulo de elasticidade do aço HK 40 não sofre queda acentuada quando o material é submetido a altas temperaturas de trabalho, por se tratar de um metal refratário. No entanto, a tensão de escoamento e a tensão de ruptura diminuem em até 50% em relação às mesmas propriedades na temperatura ambiente.<sup>(5-8)</sup> Desta forma, consideraram-se as seguintes propriedades nas simulações efetuadas, de acordo com a Tabela 1.<sup>(9)</sup>

**Tabela 1.** Propriedades mecânicas consideradas para simulação numérica<sup>(4,9)</sup>

<b>Aço inoxidável HK40</b>	
Módulo de Elasticidade	100 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Tensão de Escoamento	130 MPa

Mesmo, segundo a literatura,<sup>(5)</sup> a queda no módulo de elasticidade do HK 40 em altas temperaturas sendo pequena, considerou-se aqui este parâmetro como sendo 50% do seu valor em temperatura ambiente por uma questão de segurança.

No caso do aço inox 431 foi constatado para temperaturas acima de 700°C, que o material sofre alterações microestruturais, o que provoca uma diminuição abrupta das suas propriedades mecânicas. Desta forma, todas as considerações do projeto foram revistas, pois com a redução das propriedades mecânicas, a rigidez do componente tende a diminuir e as tensões de aplicação de carga, a aumentar, provocando também deformações plásticas mais acentuadas.

As mesas foram desenhadas em software CAD, *INVENTOR PRO*®, e os modelos foram exportados para o software *ANSYS*®, a fim de efetuar as análises de elementos finitos. Considerou-se uma temperatura de trabalho de 800°C, e assim, as propriedades do material também nesta temperatura.

Nas simulações efetuadas, a carga foi aplicada estaticamente, em regime permanente, condição que pode ser representada pelo sistema linear,<sup>(10)</sup> da Equação 1.

**Equação 1.**  $[K]\{X\} = \{F\}$

Onde:

$[K]$  é a matriz de rigidez global do sistema,  $n \times n$ , onde  $n$  é o número de graus de liberdade total do sistema;

$\{X\}$  é o vetor de amplitude de deslocamentos,  $n \times 1$ ;

$\{F\}$  é o vetor de amplitude das cargas externas aplicadas nos graus de liberdade correspondentes,  $n \times 1$ ;

Para analisar os resultados obtidos, foram observadas a Tensão de Von Mises, Tensão Máxima Principal, Deformação e Região de Contato nas mesas superior e inferior, que completam o sistema de operação do processo de difusão. Uma série de análises foi realizada, bem como alterações na superfície da mesa foram propostas, de forma a equalizar e minimizar a tensão aplicada. Tais alterações visam impedir os mecanismos de deformação observados na operação do forno com a mesa do projeto anterior, garantindo a integridade física e funcional do projeto da mesa atual.

Através das análises efetuadas foi realizado um 'processo iterativo' na geometria da peça. Para cada solução analisada, a geometria da peça sofreu alterações de tal forma que o projeto final convergisse para uma solução na qual as tensões fossem distribuídas homoganeamente na superfície de aplicação de carga das mesas.

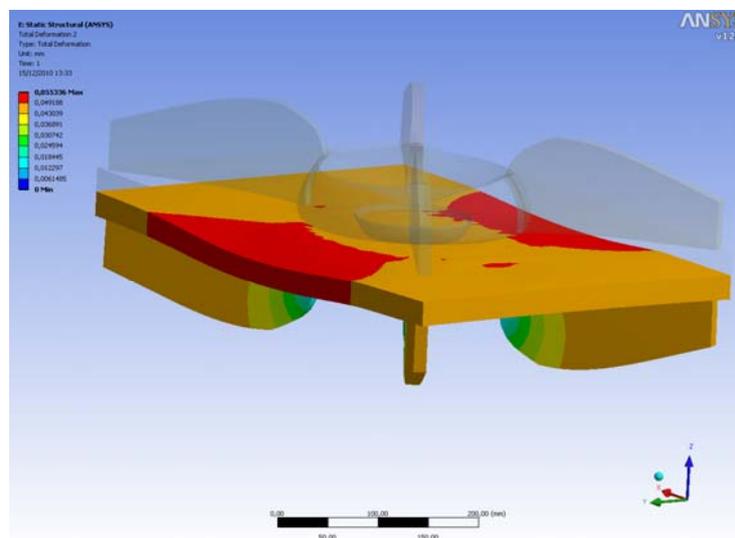
### 3 RESULTADOS

A primeira peça analisada por simulação foi a mesa do projeto anterior. Na parada de manutenção do forno, verificou-se que o componente havia sofrido grandes deformações nas extremidades, como pode ser observado na Figura 1.



**Figura 1.** Foto da mesa anterior, retirada do forno de soldagem por difusão.

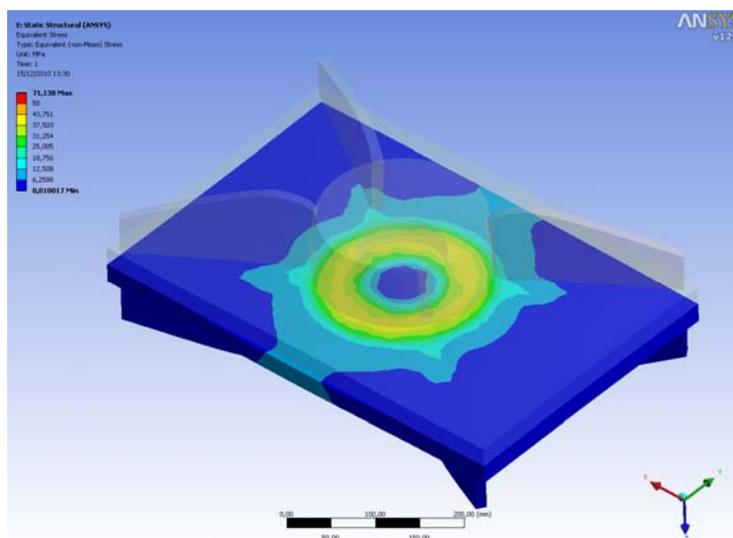
As simulações efetuadas com o modelo desta peça, como evidenciado na Figura 2, representaram um modo de deformação compatível com o observado fisicamente. No entanto, os valores numéricos de tensões e deformações foram relativamente baixos, de acordo com as propriedades usadas, o que difere das deformações observadas na mesa retirada do forno. Isso pode ser explicado em função da alta temperatura de trabalho que alterou as propriedades mecânicas do material, fazendo com que estas diminuíssem a ponto de provocar deformações plásticas intensas nas extremidades e no centro da peça.



**Figura 2.** Simulação numérica do modelo da mesa retirada do forno.

As simulações efetuadas também mostraram que, segundo o modelo utilizado, as tensões não foram distribuídas igualmente na superfície da mesa durante as operações de soldagem, e conseqüentemente na peça soldada pelo processo de difusão. Como já explicitado anteriormente, a aplicação de carga constante é fundamental no processo de soldagem por difusão, pois sua função é garantir um contato íntimo entre as peças, de modo que seja possível a difusão atômica entre as

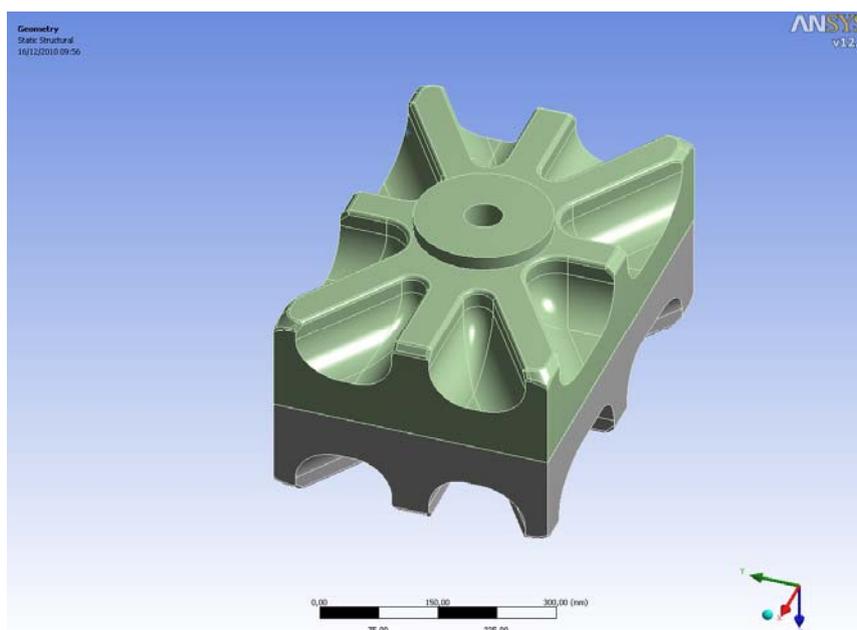
partes.<sup>(1)</sup> A Figura 3 mostra a distribuição da tensão de Von Mises, de forma radial em torno do centro da peça, evidenciando um valor máximo de 45 MPa.



**Figura 3.** Distribuição da Tensão de Von Mises, resultante da simulação do modelo da mesa retirada do forno.

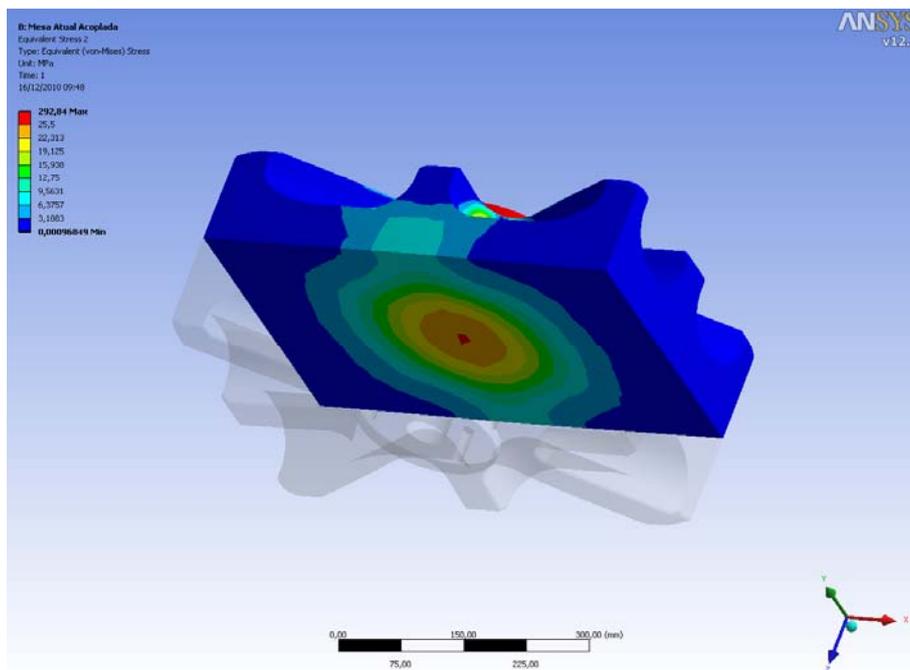
Desta forma, as simulações efetuadas permitiram a verificação de possíveis falhas do projeto da mesa anterior. No novo projeto, realizou-se uma alteração geométrica significativa, de modo a produzir uma peça com mais robustez.

Além de dobrar a espessura da base da mesa, aumentou-se também a espessura das nervuras, adicionaram-se uma nervura no centro da lateral maior e da menor, e construiu-se um perfil de transição suave entre a base da mesa e as nervuras, de forma a atenuar pontos concentradores de tensões térmicas e mecânicas que poderiam promover a deformação localizada do componente durante o processo de soldagem por difusão.



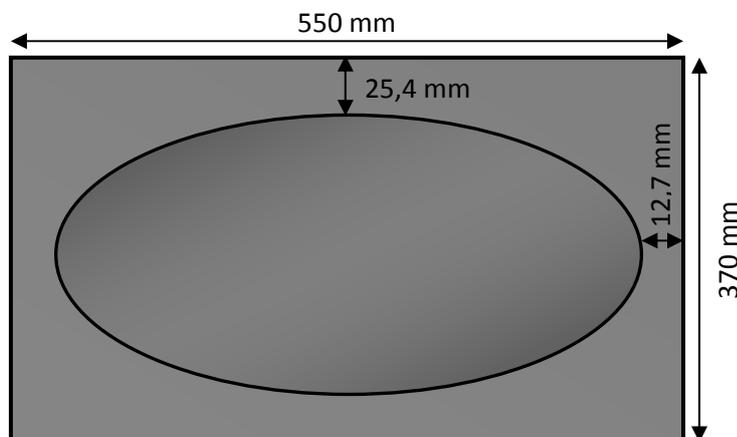
**Figura 4.** Projeto inicial da nova mesa em processo de fabricação.

A Figura 4 representa, através de um modelo CAD, o projeto inicial da nova mesa. Tal qual o projeto anterior, as primeiras simulações efetuadas com o novo projeto demonstraram uma concentração de tensão no centro da peça. As tensões de Von Mises foram geradas em torno de 25 MPa, como pode ser observado na Figura 5, o que representa um valor mais baixo que a concentração observada na simulação da peça antiga. Contudo, a ausência de tensão nas bordas, já apresentada no projeto anterior, não é desejável para o processo de soldagem por difusão, uma vez que a carga não é distribuída uniformemente em toda a superfície da peça a ser soldada.



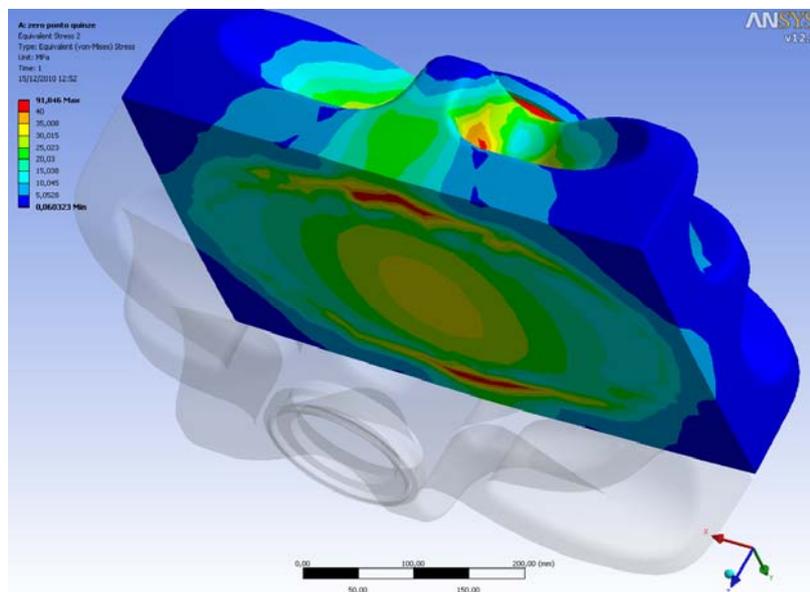
**Figura 5.** Distribuição da Tensão de Von Mises no projeto inicial da nova mesa.

Desta forma, alterações geométricas foram efetuadas na superfície da peça, de tal modo a garantir que as partes mais externas da superfície da mesa fossem as primeiras áreas de contato, garantindo assim a aplicação de tensão nestas regiões. A solução foi elaborada com a execução de um corte elíptico na superfície de contato da mesa superior, com profundidade máxima de 0,1 mm no centro do elipsóide, tal qual esquematizado na Figura 6.



**Figura 6.** Esquema do corte elíptico efetuado na superfície da nova mesa.

Nesta nova alteração geométrica, o contato inicial nas bordas visa garantir a distribuição da carga estática aplicada. Conforme a carga é aplicada, a sessão elipsóide vai gradativamente se deformando e entrando em contato com as peças a serem soldadas. Desta forma, primeiramente se tem um contato na região das bordas da mesa que, gradativamente, vai se estendendo até o centro. O resultado de tal corte, em termos da Tensão de Von Mises, pode ser visto na Figura 7.



**Figura 7.** Distribuição da Tensão de Von Mises no projeto da nova mesa após execução do corte elíptico.

Como pode ser observado, apesar de haver um aumento na Tensão de Von Mises no centro da peça, para o máximo de 35 MPa, devido a deformação do elipsóide, também ocorreu uma distribuição de tensão bem mais homogênea na superfície de toda a peça. Com os resultados gerados, pode-se perceber que o fator de segurança, segundo os padrões previamente estabelecidos para o escoamento, ainda persiste alto, tal qual pode ser observado na Tabela 2.

**Tabela 2.** Fator de segurança do projeto (por Tensão de Von Mises)

Tensão de Escoamento	Tensão na Mesa	Fator de Segurança
130 MPa	35 MPa	3,71

Desta forma, os resultados convergiram para um modelo de acordo com os objetivos iniciais, eliminando fatores não desejáveis que estivessem presentes no projeto da mesa anterior.

## 4 CONCLUSÃO

Altas temperaturas podem provocar drásticas mudanças nas propriedades mecânicas dos materiais, em especial sob aplicação de carga ou deformação constantes. No caso do problema abordado, verificou-se isso claramente em função do fenômeno de fluência, ao qual os componentes são submetidos quando operam dentro de um forno do processo de soldagem por difusão. O projeto da mesa anterior, confeccionada em aço inoxidável 431, possuía uma geometria mais frágil e suas propriedades foram drasticamente alteradas em função do excesso de temperatura, o que promoveu mudanças microestruturais no material.



No novo projeto, o aço inox 431 foi substituído pelo inox refratário grau HK 40, visando o aumento das propriedades mecânicas em altas temperaturas, até 800°C, que é a temperatura de trabalho projetada. As mudanças geométricas produzidas também garantiram a robustez do novo projeto da peça. Contudo, apenas tais alterações não foram suficientes para garantir a distribuição da tensão aplicada e, conseqüentemente, a qualidade do processo de soldagem. A distribuição da tensão aplicada na peça a ser soldada, deve ser homogênea para o processo de soldagem por difusão.

Assim, houve também uma alteração geométrica na superfície da mesa superior, visando distribuir a tensão aplicada e diminuir o gradiente radial na peça, o que garante qualidade do produto soldado e a estabilidade do processo.

O objetivo das simulações de peças trabalhando em altas temperaturas foi atingido, uma vez que possíveis problemas foram mapeados de tal modo a construir uma geometria mais adequada para a mesa, bem como para a equalização das tensões na peça. O uso da ferramenta de simulação numérica é fundamental para projetar novos componentes de engenharia, em especial aqueles que trabalham em condições extremas, como, por exemplo, sob o efeito do fenômeno de fluência.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao Laboratório Nacional de Luz Síncrotron e a Statoil Brasil pelo apoio fornecido no projeto.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 KAZAKOV, N. F. Diffusion Bonding of Materials. Pergamon Press, 1985.
- 2 YU, C. H., AHN, H. K. Evaluation of mechanical properties under a temperature gradient field. Meas. Sci. Technol. 12, p. 1881–1885, 2001.
- 3 American Standardization Testing Materials. A276: Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes. ASTM, 2010.
- 4 American Standardization Testing Materials. A351: Standard Specification for Casting, Austenitic, for Pressure-Containing Parts. ASTM, 2010.
- 5 KIM, Y. J., et al. High Temperature Mechanical Properties of HK40-type Heat-resistant Cast Austenitic Stainless Steels. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 19, p. 700-704, 2010.
- 6 ABDELLA, K. Explicit full-range stress\_strain relations for stainless steel at high temperatures. Journal of Constructional Steel Research 65, p. 794-800, 2009.
- 7 CHEN, J., YOUNG, B. Stress-strain curves for stainless steel at elevated temperatures. Engineering Structures 28, 229–239, 2006.
- 8 GARDNER, L., INSAUSTI, A., NG, K.T., ASHRAF, M. Elevated temperature material properties of stainless steel alloys. Journal of Constructional Steel Research 66, p. 634-647, 2010.
- 9 MatWeb – Material Property Data. 309 Stainless Steel. Disponível em <http://www.matweb.com/>, acessado em 21/12/2009.
- 10 KWON, Y. W., BANG, H. The finite element method using MATLAB. 2<sup>a</sup> ed. Boca Raton : CRC, 2000.