

MARCELO SADAKI KAWAKAMI

ESTUDO DA FLUÊNCIA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS
ESTABILIZADOS AO TITÂNIO E NIÓBIO E SIMULAÇÃO
NUMÉRICA DO PROCESSO NO ABAQUS

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Tomaz Manabu Hashimoto

Guaratinguetá
2011

K22e	Kawakami, Marcelo Sadaki Estudo da fluência dos aços inoxidáveis ferríticos estabilizados ao titânio e nióbio e simulação numérica do processo no abaqus / Marcelo Sadaki Kawakami. – Guaratinguetá : [s.n.], 2011 54f.: il. Bibliografia: f.:54 Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, 2011 Orientador: Prof. Dr. Tomaz Manabu Hashimoto 1. Elementos finitos 2. Laminação (Metalurgia) I. Título CDU 519.6
------	--

**ESTUDO DA FLUÊNCIA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS
ESTABILIZADOS AO TITÂNIO E NIÓBIO E SIMULAÇÃO
NUMÉRICA DO PROCESSO NO ABAQUS**

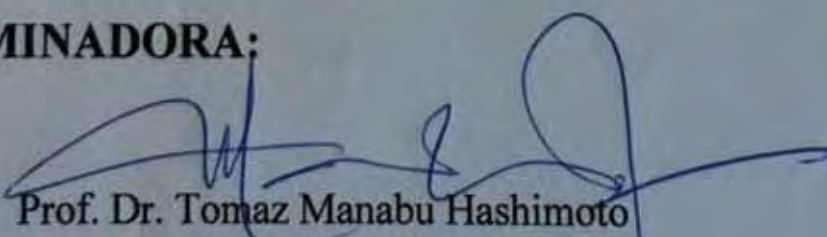
MARCELO SADAKI KAWAKAMI

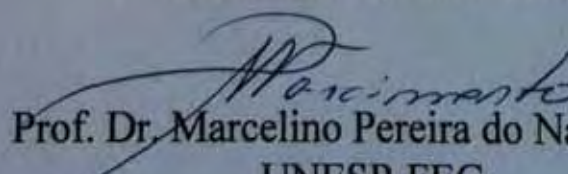
**ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA
DE GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

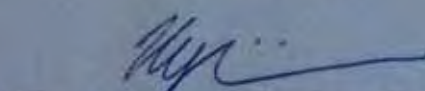
**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Tomaz Manabu Hashimoto
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento
UNESP-FEG


Eng. Marcos Yutaka Shiino
UNESP-FEG

DADOS CURRICULARES

MARCELO SADAHI KAWAKAMI

NASCIMENTO 25.09.1987 – MARÍLIA/SP

FILIAÇÃO Celso Kazuyuki Kawakami
Meire Imaizumi Kawakami

2006/2011 Curso de Graduação
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Dedicatória

aos meus amigos, à minha família, em especial
aos meus pais Celso e Meire, pelo apoio e
incentivo em toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter iluminado meu caminho e guiado meus passos, agradeço pela minha vida, pela minha saúde, pela minha capacidade, pela minha família e por meus amigos.

À minha família agradeço por todo apoio, compreensão e incentivo dados tanto para a realização desse trabalho, quanto durante a graduação e em outros momentos de minha vida.

Pela orientação, direcionamento e apoio para a realização desse trabalho, agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Tomaz Manabu Hashimoto. Agradeço aos meus pais Celso e Meire, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

Agradeço à ArcelorMittal, por ter fornecido subsídios para a realização desse trabalho. Em particular, agradeço aos engenheiros Arnaud Dessis e Emilie Calmels, pelo incentivo na realização desse estudo e apoio profissional.

Epígrafe

“ Quem quiser vencer na vida deve fazer como os seus sábios: mesmo com a alma partida, ter um sorriso nos lábios. ”

Dinamor

KAWAKAMI, M. S., **Estudo da Fluência dos Aços Inoxidáveis Ferríticos Estabilizados ao Titânio e Nióbio e Simulação Numérica do Processo no Abaqus**. 2011. 56 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá 2011.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo criar um modelo de elementos finitos (FEM) representando a fluência em uma chapa de aço durante o processo de reaquecimento da laminação a quente, a partir de ensaios de tração a quente em uma máquina que reproduz o comportamento termomecânico Gleeble 3500. O objetivo é entender e prevenir o fenômeno de fluência alterando o perfil de aquecimento e parâmetros geométricos (comprimento e espessura) e também entender como é a formação do defeito. Uma vez definido os parâmetros de entrada do Software a partir dos ensaios a solução aproximada do problema é auxiliada através do ABAQUS CAE. Comparando os aços AISI 409, AISI 430Ti, AISI 441 e AISI 444, os resultados mostraram que o aço AISI 409 possui uma sensibilidade menor à fluência.

PALAVRAS-CHAVE: Elementos Finitos (FEM), Fluência, Laminação a quente, Gleeble 3500, ABAQUS CAE.

KAWAKAMI, M. S., **Study of Creep behavior of stainless steel stabilized by Ti and Nb and modeling process in Abaqus**. 2011. 56 f. Monograph (Undergraduate Work in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá 2011.

ABSTRACT

The purpose of this research was tested a finite element model (FEM) that represented the creep of a slab during the reheating process of hot rolling. The aim is to prevent creep phenomenon changing the reheating profile with hot tensile test in Gleeble 3500, and, also, understand the former defect crisis. The goal of this work is to have a predictive tool to optimize the reheating process changing parameters (length and thickness). Then, use input parameters obtained from the tests to approximate the solution of the problem aided by Abaqus CAE. The results have showed that the ferritic stainless steel AISI 409 has a lower sensitivity to creep comparing to the stainless steel AISI 409, AISI 430Ti, AISI 441 and AISI 444.

KEY-WORDS: Element Finite (FEM), Creep, Hot Rolling, Gleeble 3500, Abaqus CAE.

Lista de Figuras

Figura 1 – Defeitos de incrustações de óxidos no produto final	14
Figura 2 – Princípio de oxidação dos aços inoxidáveis (ARCELOMITTAL, 2005)	17
Figura 3 – Diagrama de fase Ferro-Cromo e com a adição de Ti e Nb (FISHER,1953).....	18
Figura 4 – Corrosão por pites ou puntiforme (WEBSITE: dutosquimica.blogspot.com, 2010)....	20
Figura 5 – Corrosão Intergranular em aços inoxidáveis (WEBSITE:inovacaotecnologica.com.br,2004)	21
Figura 6 – Típica curva de deformação versus tempo sob tensão elevada (GERALDES, 2011) ...	23
Figura 7 – Ilustração esquemática das formas das curvas de fluência (OLIVEIRA, 2004)	24
Figura 8 – Tipo de deslocamento do tipo cunha (CALLISTER, JR., 2002)	25
Figura 9 – Transporte de materia aos contornos de grão sensivelmente a direção normal de esforço em tração(vermelho) e na direção oposta (compressão)	26
Figura 10 – Curva típica tensão deformação (REIS,2009)	29
Figura 11 – Curva de encruamento (PIGNATTA,2008).....	31
Figura 12 – (a) Metal Encruado (b) Início da recristalização (c) Metal recristalizado (CARDOSO, 2007)	32
Figura 13 – Ilustração de um porta de carro modelada no Abaqus (ABAQUS MANUAL, 2009) .	34
Figura 14 – Vista Geral do Gleeble 3500	36
Figura 15 – Sistema geral de refrigeração da máquina Gleeble 3500	36
Figura 16 – Dimensões padrão do corpo de prova.....	37
Figura 17 – Posicionamento de um corpo de prova na máquina	38
Figura 18 – Gradiente térmico no corpo de prova	39
Figura 19 – Influência da velocidade de aquecimento 40 °C/segundos	39
Figura 20 - Influência da velocidade de aquecimento 80 °C/segundos	39
Figura 21 – Corpo de prova após o ensaio de tração a quente	40
Figura 22 – Aço 430Ti no microscópio optico à temperatura ambiente.....	41
Figura 23 – Esquema de um corpo de prova sobre forças de compressão	41
Figura 24 – Programa Quick Sim	42
Figura 25 – Exemplo de uma curva Tensão x Deformação – Aço AISI 441 à 1.200°C	42
Figura 26 – Curva Tensão x Deformação intervalo onde a Tensão é máxima	43
Figura 27 – Exemplo à 1.200°C de uma lei de comportamento	45
Figura 28 – Classificação por tipo de aço de risco à fluência.....	46
Figura 29 – Forno de reaquecimento	47
Figura 30 – Vista em 2D e 3D da chapa de aço.....	49
Figura 31 – Inserção dos parâmetros	50
Figura 32 – Direções dos eixos no Abaqus	51
Figura 33 – Elementos de malha em uma chapa de aço	51

Sumário

1.Introdução.....	13
1.1 Objetivos	13
1.2 Justificativas.....	13
1.3 Estrutura do trabalho.....	15
2. Revisão Bibliográfica	16
2.1 Os aços inoxidáveis.....	16
2.1.1 Breve Histórico	16
2.1.2 Influências dos elementos de liga.....	17
2.1.3 Aços Inoxidáveis Ferríticos.....	18
2.1.4 Corrosão nos aços inoxidáveis	19
2.2 Fluência.....	21
2.2.1 Os diferentes estágios da fluência	21
2.2.2 Leis e mecanismos da fluência em altas temperaturas	24
2.2.3 Fluência de deslocamento: Lei de Bailey-Norton	24
2.2.4 Fluência difusional: Lei de Herring-Nabarro	26
2.3 Parâmetros Mecânicos	27
2.3.1 Tensão e deformação.....	27
2.3.2 Características de um metal.....	30
2.4 Simulação numérica.....	32
2.4.1 ABAQUS	33
3. Procedimento Experimental	35
3.1 Parâmetros do ensaio	37
3.2 Fontes de erros no ensaio.....	38
3.2.1 Gradiente térmico.....	38
3.2.2 Fissuras Internas	40
3.2.3 Erro na Programação – Quick Sim.....	41
3.3 Resultados do Ensaio de tração à quente	42
3.3.1 Determinação das leis de Fluência	44
3.3.2 Classificação entre os tipos de aço em relação ao risco de fluência	45
4. Simulação numérica no Abaqus	47

4.1 Descrição do processo.....	47
4.2 Descrição do modelo.....	48
4.2.1 Material – Propriedades mecânicas e leis de comportamento.....	49
4.2.2 Etapas de Cálculo	51
4.3 Resultados e comentários da Simulação Numérica	52
5. Conclusões e Considerações finais.....	54
6. Referências Bibliográficas.....	55

1.Introdução

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é entender o comportamento de uma chapa de aço inoxidável quanto a sua resistência a fluência, durante o processo de laminação a quente e com a simulação numérica ter a capacidade da avaliação de um risco com base na análise de dados experimentais e a simulação destes por meio de Elementos Finitos.

1.2 Justificativas

Atualmente o estudo da fluência de inúmeros materiais é um fenômeno cada vez mais estudado para entender melhor o comportamento dos mesmos quanto à este fenômeno. Se um material é submetido à uma carga constante (em temperaturas elevadas), ele pode sofrer uma deformação plástica irreversível, que em algumas aplicações é prejudicável para o material.

A importância técnica do fenômeno de ruptura por fluência é conhecido como um dos maiores problemas no meio industrial. Por exemplo, podem ser citados, as caldeiras, tubulações sobre pressão, as refinarias de petróleo, vasos de pressão em indústrias petroquímicas, turbinas a gás, foguetes e mísseis, entre outros. Em todas estas aplicações o material sofre este fenômeno de fluência. Visto todos estes exemplos, seria interessante o desenvolvimento de um novo material que pudesse resistir altas temperaturas e cargas elevadas durante um longo período de tempo.

Em altas temperaturas, a resistência à tração depende da taxa de deformação e igualmente do tempo de exposição. Então é preciso levar em consideração os efeitos do comportamento viscoso do material, mesmo ele sendo um sólido.

Na siderúrgica ArcelorMittal Stainless Steel, é estudado há dois anos o defeito de incrustações de óxido conforme Figura 1.

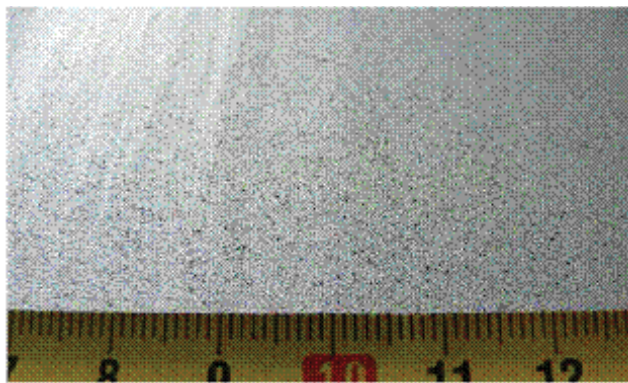


Figura 1 – Defeitos de incrustações de óxidos no produto final

Atualmente, existe uma solução industrial que permite eliminar estes defeitos visuais, adicionando uma etapa de fabricação ao produto que seria o polimento da chapa de aço. Esta solução, apesar de ser simples, gera um grande custo de produção e agrega um grande valor ao produto. O setor de P&D da ArcelorMittal, então propôs uma solução alternativa que é de aumentar a temperatura de reaquecimento das chapas de aço no forno. Entretanto a causa desse aumento de temperatura induz o fenômeno de fluência sobre a chapa de aço inoxidável que é o tema de estudo do trabalho.

Foi analisado um processo, a laminação a quente, é uma etapa da produção do aço que consiste em diminuir drasticamente a espessura de uma chapa grossa de aço, até a obtenção de uma bobina de aço que pode ser tratada a frio posteriormente. Antes deste processo, o aço deve ser aquecido a uma temperatura, durante três horas aproximadamente de 20°C à 1.200°C – 1.300°C. As chapas grossas são pré-aquecidas em um forno e ficam apoiadas sobre suportes que apoiam a superfície desta chapa de maneira equivalente.

Durante o aquecimento, a chapa grossa de aço vai sofrer o fenômeno da fluência, e a chapa vai se deformar por uma força constante que é exercida pelo seu próprio peso. Alguns fatores que interferem na intensidade desta deformação são a composição química do aço, suas dimensões e sua posição em relação aos suportes.

O objetivo deste trabalho é estudar o fenômeno da fluência sobre os aços inoxidáveis ferríticos que são sensíveis a este fenômeno. A fluência pode trazer sérios problemas como por exemplo:

- Se a fluência for trágica, a chapa grossa irá se deformar de uma maneira que não poderá mais ser retirada do forno pelo processo. Então será preciso parar a produção e desligar o forno para remover a chapa grossa.

- Se a fluência não for trágica, ou seja, a chapa não vai ser aquecida suficientemente a uma temperatura ideal para se laminar, então zonas frias serão induzidas na chapa grossa, o que induz defeitos superficiais no produto final.

Para o estudo, ensaios termomecânicos foram realizados em uma máquina chamada Gleeble, que permite fazer ensaios de tração com temperatura controlada sobre diversos corpos de prova. Esse ensaio simula o comportamento da chapa grossa dentro do forno e o corpo de prova foi deformado em baixas taxas de deformação. Uma vez realizados os ensaios, foram inseridos os resultados em um simulador numérico de elementos finitos, o Abaqus, que mostrará a flecha máxima da chapa grossa, e assim pode-se avaliar um risco.

1.3 Estrutura do trabalho

Serão apresentadas a seguir as descrições dos capítulos que compõem este trabalho.

No capítulo um, a introdução dos assuntos a serem tratados, com uma visão geral do trabalho. Também serão mostrados os objetivos gerais e específicos atingidos com este trabalho, além das suas justificativas de realização.

No capítulo dois é apresentada a revisão bibliográfica do assunto, abordando os principais tópicos sobre aços inoxidáveis, elementos finitos e fluência.

No capítulo três é apresentada a parte do procedimento experimental, todas as metodologias para a realização dos ensaios, ilustrando e descrevendo os principais passos e algumas fontes de erros provenientes dos ensaios.

No capítulo quatro é mostrado o desenvolvimento do trabalho, com todas as informações detalhadas e resultados obtidos sobre a parte de simulação numérica. Neste capítulo são apresentados os modelos de elementos finitos, a definição do material, as etapas de cálculo e resultados e análises sobre a simulação. Neste capítulo também são apresentadas propostas de alterações de parâmetros para a modificação e melhoria dos resultados.

No capítulo cinco são feitas as considerações e conclusões finais deste trabalho, apresentado a discussão dos resultados, possíveis melhorias e a importância do trabalho para o estudo em questão.

No capítulo seis são indicadas as referências bibliográficas.

2. Revisão Bibliográfica

Antes da introdução do fenômeno da fluência que é o foco do trabalho, será apresentado as principais características de um aço inoxidável e o seu comportamento em altas temperaturas.

2.1 Os aços inoxidáveis

2.1.1 Breve Histórico

O homem passou por diversas eras, e pode-se perceber que a cada era que passava, a caracterização e a utilização dos materiais se tornava mais importante. Ao longo da história, o desenvolvimento do ferro e do aço sofreu grandes transformações. Segundo Donald (1977), um grande problema permaneceu sem solução até o início do século XX: os objetos de ferro não eram muito resistentes à corrosão.

Na Inglaterra, Brearley (1912), começou a estudar profundamente sobre ligas resistentes à corrosão a pedido dos fabricantes de armas, pois o calor liberado pelos gases diminuía drasticamente a vida útil de uma arma. Seus trabalhos descreviam experiências em ligas contendo 12,8% de cromo, 0,24% de carbono. Brearley não obteve sucesso ao desenvolver uma liga que apresentasse uma maior resistência ao desgaste, porém ele descobriu uma liga fortemente resistente à corrosão. Foi o início da descoberta do aço inoxidável, na qual a aplicação imediata foi destinada para a fabricação de talheres.

Dantszen (1911) iniciou nos Estados Unidos experiências com ligas contendo 14 a 16% de cromo e com baixo teor de carbono (de 0,007 a 0,015%). Ele foi o precursor dos aços inoxidáveis ferríticos, o foco deste estudo. Em 1915 a utilização destas ligas foi aplicado para a construção de turbinas a vapor sendo largamente utilizada até os dias de hoje.

2.1.2 Influências dos elementos de liga

Os aços inoxidáveis são aqueles no qual o teor em cromo é superior ou igual a 10,5% (dependendo da resistência desejada à corrosão esse teor será maior). Quando exposto ao ar ou água, uma camada de óxido de ferro fina e estável é formada com os elementos da liga, conforme Figura 2.

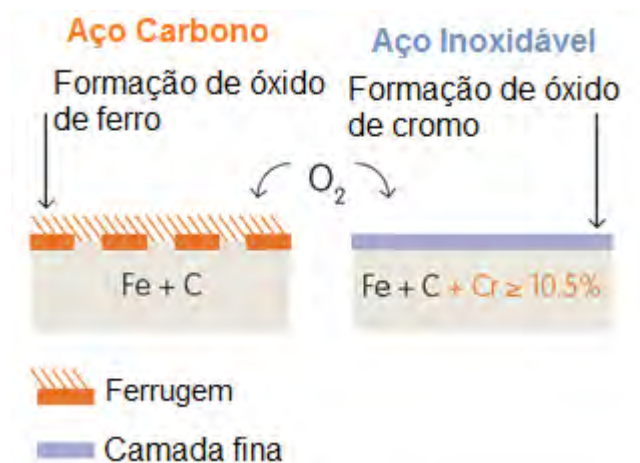


Figura 2 – Princípio de oxidação dos aços inoxidáveis (ARCELORMITTAL, 2005)

Segundo Donald (1977), o cromo é um dos elementos formadores de ferrita em que o campo da ferrita fase α , diminui ou suprime o campo da austenita (fase γ), no domínio de temperatura compreendido entre $831^{\circ}C$ a $1.394^{\circ}C$. No diagrama de equilíbrio Fe-Cr, para uma composição de 8% de cromo a transformação de fase α para fase γ ocorre a cerca de $831^{\circ}C$, podendo aumentar gradativamente a medida que a taxa de cromo é aumentada.

Segundo Callister Jr. (2002), ao adicionar diferentes elementos e variar o teor de Cromo nas ligas de aços inoxidáveis, é possível criar diferentes tipos de aços com propriedades físicas ou químicas totalmente diferente uma das outras. Estes tipos de aço são agrupadas em quatro grandes famílias: os aços inoxidáveis martensíticos, ferríticos, austeníticos, duplex que seria uma mistura dos ferríticos com os austeníticos. E dentro de uma família, adicionando elementos como molibidênio, titânio, nióbio, obtêm-se aços com grande resistência mecânica, a corrosão, a altas temperaturas. Para o estudo em questão é abordado apenas a família dos ferríticos.

Segundo Sedriks (1996), elementos são adicionados às ligas com propósitos específicos:

- Titânio e nióbio atuam como estabilizadores e também para reduzir a corrosão intergranular.
- Níquel é adicionado para melhorar a resistência mecânica e a resistência à corrosão generalizada.
- Silício e molibidênio são adicionados para aumentar a resistência à corrosão por pites.
- Cobre é adicionado para melhorar a resistência em meios ácidos.

2.1.3 Aços Inoxidáveis Ferríticos

Segundo Donald (1977), aços inoxidáveis ferríticos são ligas compostas de ferro e cromo, com teores de 11% a 27% de cromo, que irão conferir uma boa resistência à corrosão. Sua microestrutura é constituída de ferrita, solução sólida de carbono em ferro α , com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), ferromagnéticos, possuem relativamente alto limite de escoamento e baixa ductilidade. O diagrama de fases Fe-Cr permite conferir a estabilidade estrutural em altas temperaturas do aço inoxidável ferrítico. Ao adicionar elementos como titânio (Ti), molibidênio (Mo), nióbio (Nb), favorece a formação da fase α , como pode-se observar na Figura 3 com a diminuição da região de formação da fase γ . Para o estudo em questão o aço é levado para temperaturas muito altas, portanto é importante que não ocorra essa mudança de fase.

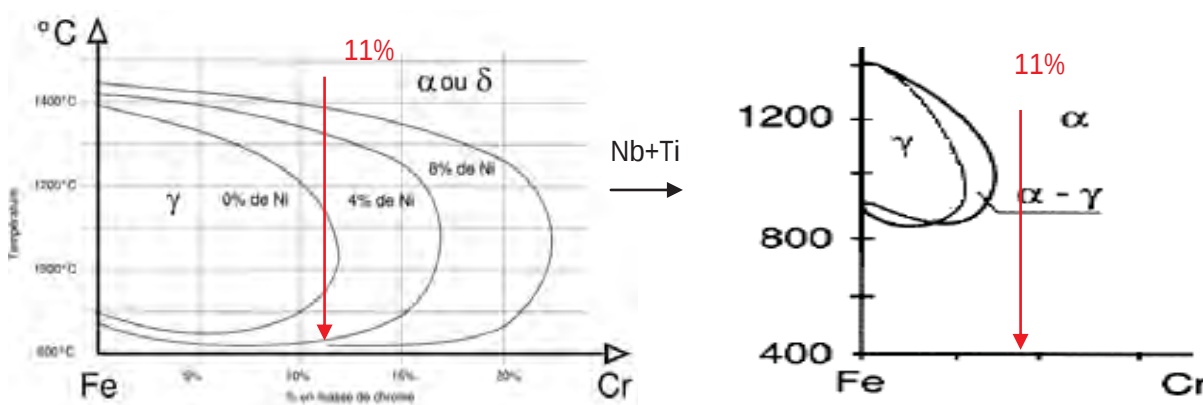


Figura 3 – Diagrama de fase Ferro-Cromo e o Diagrama com a adição de Ti e Nb (FISHER,1953)

As ligas ferríticas apresentam uma baixo custo devido à ausência ou pouca adição de Níquel (Ni), e se comportam melhor que as ligas austeníticas quanto à condutividade térmica e expansão térmica. O alto teor de cromo e molibdênio, têm por finalidade aumentar a resistência à corrosão localizada.

A Tabela 1 mostra as composições químicas de alguns tipos de aços inoxidáveis ferríticos utilizados no estudo em questão.

Tabela 1 – Composição química dos aços inoxidáveis estabilizados no estudo

Tipos de aço	Ni	Mn	C	N	Cr	Mo	Si	Nb	Ti
AISI 409	0,11	0,26	0,01	0,01	11,38	0,01	0,51	0,01	0,19
AISI 430 Ti	0,25	0,32	0,02	0,01	16,12	0,03	0,50	0,01	0,36
AISI 441	0,17	0,29	0,01	0,02	17,61	0,01	0,59	0,50	0,15
AISI 444	0,24	0,27	0,01	0,02	17,74	1,81	0,50	0,32	0,15

Em seguida são tratadas as diferentes formas de corrosão em aços inoxidáveis e o porque da estabilização do aço em aplicações a altas temperaturas.

2.1.4 Corrosão nos aços inoxidáveis

A corrosão em aços inoxidáveis podem trazer uma série de problemas como por exemplo na aparência do material, que em certas aplicações como esquadrias de aço inoxidável na construção civil se torna indesejável. Na manutenção de uma planta industrial, se fossem utilizados materiais resistentes à corrosão, poderiam reduzir drasticamente custo com a troca de materiais. A contaminação de um produto químico é um outro problema ocasionado pelos resíduos da corrosão o que gera uma queda do preço final do produto ou, em certos casos, a sua perda.

Segundo Gentil (2003), a corrosão é definida como a deterioração de um material, pela ação química ou eletroquímica do meio e ainda aliada aos esforços mecânicos. Algumas formas ou tipos de corrosão mais decorrentes em aços inoxidáveis pelas diferentes causas e mecanismos são:

2.1.4.1 Corrosão puntiforme ou por pite

Caracterizada pelo ataque de pequenas áreas de uma superfície metálica. São pequenos buracos que se formam no interior do material podendo se propagar segundo uma direção praticamente vertical podendo atravessar o material conforme Figura 4.



Figura 4 – Corrosão por pites ou puntiforme (WEBSITE: dutosquimica.blogspot.com, 2010)

2.1.4.2 Corrosão Intergranular

Segundo Callister (2002) os aços inoxidáveis devido à formação de uma zona empobrecida em cromo nos contornos de grão sofrem corrosão intergranular devido à precipitação de carbonetos de cromo (Cr_{23}C_6) conforme Figura 5. Os átomos de cromo difundem-se para os contornos de grão, formando carbonetos, diminuindo a resistência à corrosão. Esta zona empobrecida é chamada de sensitização, um fenômeno muito importante para o entendimento da estabilização dos aços inoxidáveis ferríticos. Os aços inoxidáveis ferríticos sofrem sensitização quando expostos em temperaturas acima de 925°C aproximadamente.

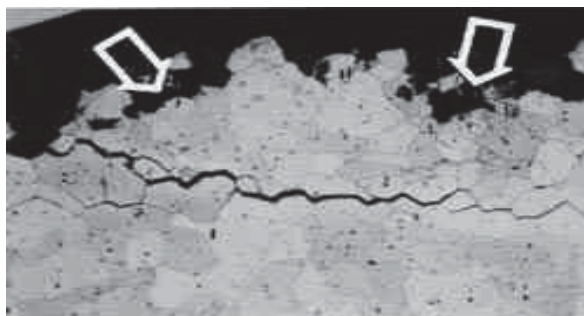


Figura 5 – Corrosão Intergranular em aços inoxidáveis (WEBSITE:inovacaotecnologica.com.br,2004)

Uma forma muito usual para evitar a sensitização, segundo Callister Jr. (2002), se faz empregando-se aos aços inoxidáveis elementos como Nióbio e Titânio, que fixam o carbono, não deixando livre para formar precipitados com o cromo que é o principal elemento que forma a camada protetora oxidante de um aço inoxidável. Por este motivo, que o estudo deste trabalho é feito com aços inoxidáveis estabilizados.

2.2 Fluência

A definição de fluência segundo Cottrell (1964), é a deformação permanente de materiais quando os mesmos estão submetidos a uma carga ou tensão constante, e estes parâmetros são dependentes do tempo. Este fenômeno acaba sendo indesejável, pois acaba comprometendo a vida útil dos materiais quando expostos em certas condições de trabalho. O estudo da fluência acaba se tornando importante geralmente para temperaturas maiores do que 40% da sua temperatura absoluta de fusão.

2.2.1 Os diferentes estágios da fluência

Para o entendimento do comportamento de um material sob o fenômeno de fluência, segundo Callister (2002), pode-se realizar um ensaio que consiste em submeter um corpo de prova a uma carga constante, e à temperatura constante. O resultado obtido, após a realização deste ensaio, é uma curva de deformação em função do tempo, como mostra a Figura 6.

Esta curva é dividida em três fases distintas:

- Fase I: Fluência primária: $0 < \frac{T_e}{T_f} < 0,3$:

T_e – Temperatura de ensaio

T_f – Temperatura de fusão [K]

A carga inicial provoca uma deformação crescente no material, de tal forma que a taxa de deformação diminui constantemente ao decorrer do tempo, até que se estabilize. Esta fluência segundo Herring (1950) é dita como logarítmica, pois a deformação é proporcional ao logaritmo do tempo.

- Fase II: Fluência secundária ou estado estacionário: $0,3 < \frac{T_e}{T_f} < 0,5$:

Se caracteriza por ter taxa constante de deformação. Geralmente é o estágio que possui uma maior duração, a taxa de deformação se torna praticamente constante ao longo do intervalo de tempo, até que se começa a perceber um aumento na taxa de deformação.

- Fase III: Fluência terciária ou fluência de alta temperatura: $\frac{T_e}{T_f} > 0,5$:

A taxa de deformação cresce progressivamente até um valor máximo que corresponde a ruptura do material. Segundo Herring (1950), os fenômenos de autodifusão se tornam preponderantes nessa fase. Este terceiro estado de fluência é associado às modificações microestruturais como por exemplo o crescimento de grãos, recristalização, e precipitação.

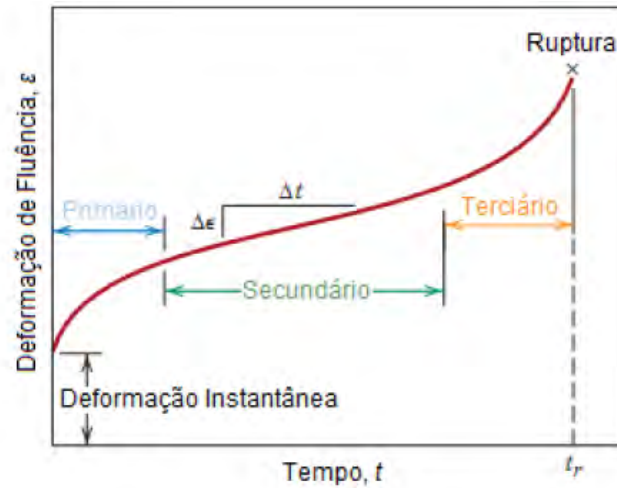


Figura 6 – Típica curva de deformação versus tempo sob tensão elevada (GERALDES, 2011)

Segundo Viswanathan (1989), para caracterizar a fluência de um material alguns parâmetros como a temperatura e o nível das tensões aplicadas devem ser consideradas. Para metais em geral, em temperaturas inferiores a 40% da temperatura de fusão, será notada apenas a primeira fase primária da fluência.

É importante notar que uma temperatura elevada para um material, pode não ser tão elevada para outros materiais. Por exemplo, em uma temperatura de 300°C para um aço, o fenômeno da fluência será menor do que se comparado à um material acrílico (plástico). Então, para solucionar este problema, deve-se utilizar a razão entre a temperatura de ensaio e a temperatura de fusão do material.

$$T_H = \frac{T_e}{T_f} \quad \text{onde,} \quad \begin{array}{l} T_H = \text{Temperatura Homóloga} \\ T_e = \text{Temperatura de ensaio} \\ T_f = \text{Temperatura de Fusão} \end{array} \quad (1)$$

Para maiores tensões e temperaturas, pode-se notar maior deformação instantânea ao se aplicar a carga. A figura 7 mostra o comportamento de uma curva de fluência em função da variação de tensão e temperatura.

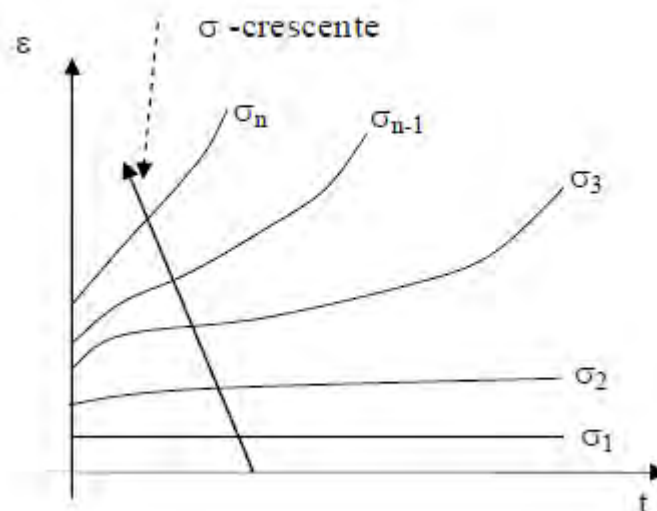


Figura 7 – Ilustração esquemática das formas das curvas de fluência (OLIVEIRA, 2004)

2.2.2 Leis e mecanismos da fluência em altas temperaturas

Segundo Herring (1950), a viscoplasticidade em altas temperaturas está diretamente relacionada com os fenômenos de difusão. Duas categorias básicas podem ser distinguidas quando se estuda estes tipos de fenômenos. Se a distância percorrida pela matéria é curta em relação aos grãos do metal, os mecanismos de fluência são controlados pelos movimentos das discordâncias, ou fluência de deslocamento (lei de Bailey-Norton – $0,5T_f < T_e < 0,8T_f$), mas se a distância percorrida pela matéria for menor ainda, o mecanismo de transporte de matéria se faz pela difusão intergranular (modelo de Herring-Nabarro – $T_e > 0,8T_f$), ou pode-se dizer, simplesmente, fluência difusional.

2.2.3 Fluência de deslocamento: Lei de Bailey-Norton

Segundo Norton (1929), existem duas grandes classes:

- Fluência por restauração

Devido à fraca taxa de deformação, o rearranjo da matéria e a sua grande temperatura, ocorre por tratamento térmico (recozimento) sobre a microestrutura.

Ocorre uma competição entre a recuperação do material pela fluência por restauração com o deslocamento de grãos. Esta situação ocorre na segunda fase da fluência onde a taxa de deformação se torna constante.

- Fluência pelo movimento das discordâncias

O fenômeno de movimento das discordâncias ocorre devido à tensão externa e a existência de alguns precipitados que promovem distorções no plano de deslizamento das discordâncias que são os obstáculos (Figura 8).

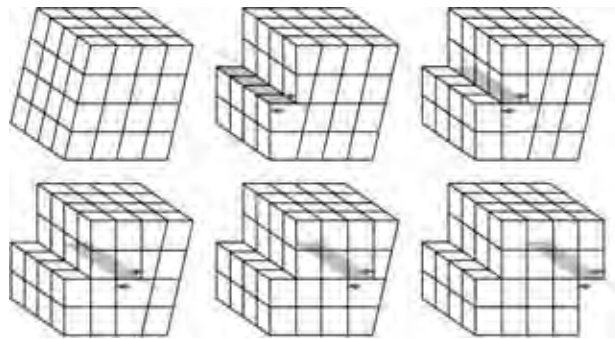


Figura 8 – Tipo de deslocamento do tipo cunha (CALLISTER, JR., 2002)

Este mecanismo de movimento das discordâncias é contínuo. O modelo associado à este fenômeno pode ser descrito pela lei de Arrhenius:

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

Onde:

- A - constante
- Q – Energia de ativação térmica de fluência (J.mol^{-1})
- R – Constante universal dos gases perfeitos : $8,31 \text{ J.mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- T – Temperatura (K)

2.2.4 Fluência difusional: Lei de Herring-Nabarro

O mecanismo de fluência difusional atua em temperaturas $T_e > 0,8T_f$, onde é o caso do estudo em questão deste trabalho. Segundo Herring (1950), a deformação plástica é o resultado do movimento das discordâncias. Em altas temperaturas, é mais decorrente a mobilidade destas discordâncias, o que causa sérios danos aos materiais. Os mecanismos de recristalização podem provocar um aumento no tamanho dos grãos. A fluência depende então de uma série de fatores, tais quais: estruturais (no caso dos metais, sua pureza, elementos de liga, estado cristalino, etc.), da dimensão da carga aplicada e também da temperatura.

Segundo Herring e Nabarro quando se aplica uma tensão a um cristal em temperaturas elevadas, irá ocorrer uma deformação devido ao transporte de matéria por difusão. Os fenômenos de difusão dos átomos dentro dos grãos podem produzir uma deformação plástica se a matéria é transportada a partir dos contornos de grão, o que causa um esforço de tensão. A transferência dos átomos (Figura 9) acaba criando esforços de compressão e tração dependendo de sua direção.

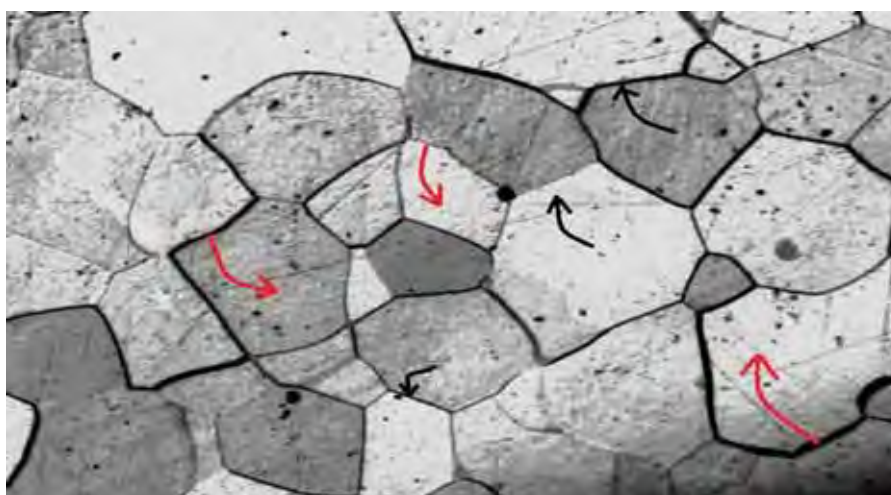


Figura 9 – Transporte de matéria aos contornos de grão sensivelmente a direção normal de esforço em tração(vermelho) e na direção oposta (compressão)

Herring e Nabarro mostraram teoricamente que a taxa de deformação é dada pela seguinte relação:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2\sigma b^3 D}{L^2 k T} \quad (3)$$

Onde σ é a tensão aplicada,

b – o vetor de Burgers,

D – coeficiente de auto-difusão

L – dimensão média do grão

k – constante

T – a temperatura absoluta de fluência

2.3 Parâmetros Mecânicos

Os materiais podem se comportar de diversas maneiras quando submetido a carregamentos. Alguns sofrem deformações lentas e contínuas quando carregados, e ao remover este carregamento ocorre uma recuperação do material. Outros não possuem estas características, devido a uma série de fatores. Portanto se faz por necessário a definição de alguns parâmetros mecânicos.

2.3.1 Tensão e deformação

Todo o material pode se romper, seja ele um aço, um vidro, um plástico. Todavia, para que isto ocorra é necessário a aplicação de uma força sobre o material. Cada material possui sua característica e forma, portanto a força necessária para romper um material depende de uma série de parâmetros. É chamado de tensão(σ), a resistência sobre a aplicação de uma força em uma unidade de área. A tensão é dada por:

$$\sigma = \frac{F}{A_T} , \quad (4)$$

onde, A_T = Área da superfície transversal

F = Força

A característica que um material tem para resistir mais que um outro material ainda no regime elástico sem se romper chama-se de tensão de escoamento ou limite de escoamento. A deformação dos materiais é descrito na ciência dos materiais, como a maneira que se deforma peças e objetos. É de grande importância para a fabricação de peças, concepção (resistência da peça em sua utilização normal) e segurança (proteção das pessoas em caso de acidente). A capacidade de um material deformar ou para resistir à deformação, depende de alguns parâmetros:

- Da forma do material;
- Flexibilidade/rigidez: Caracteriza a elasticidade, a capacidade de se deformar de maneira reversível.
- Ductilidade: A capacidade de um material para deformar sem se romper, ou seja, a capacidade do objeto se deformar plasticamente, de forma irreversível;
- Fragilidade: Caracteriza a capacidade de resistir a propagação de trincas e absorver a energia de um impacto.

A deformação é definida como a variação por unidade de comprimento de uma dimensão linear de um material ou amostra, normalmente expressa em % em relação ao comprimento inicial do material. Deformação real ou natural, que se refere à duração no tempo t é igual a: $\ln (L / L_0)$, onde L é o comprimento no tempo t e L_0 denota o comprimento inicial da amostra.

2.3.1.1 Deformação Elástica

Quando um material é submetido a uma força ele se deforma, e após a remoção desta força aplicada, retorna ao seu estado inicial. Esta deformação é definida como a elástica. Na região elástica, a tensão é linearmente proporcional à deformação.

A relação entre a tensão e a deformação é dada pela lei de Hooke, que é definida por:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon ; \quad (5)$$

onde:

ε : Deformação do material

E = Módulo de Young;

2.3.1.2 Deformação Plástica

A deformação plástica diferentemente da elástica é irreversível, e se produz de diversas maneiras distintas. Quando a carga aplicada a um material passa um valor correspondente ao limite de elasticidade, o material sofre uma deformação permanente. Esta deformação pode ser obtida graficamente pelo curva tensão deformação.

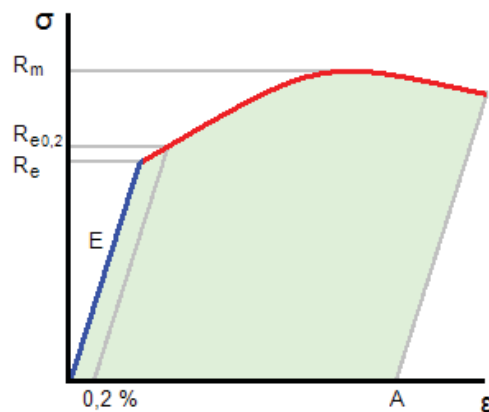


Figura 10 – Curva típica tensão deformação (REIS,2009)

A capacidade de um material tolerar uma grande deformação plástica é a ductilidade, mas isso dependerá tanto da natureza do material, quanto à carga que está sendo efetivamente aplicada nele.

2.3.1.3 Ensaio de tração

As propriedades mecânicas mais importantes para o aço é a sua resistência à tração e o limite de escoamento. Elas estão relacionadas com a propriedade de ductilidade do material, onde o material pode sofrer grandes deformações antes de se romper. Quando o aço é submetido a uma força de tração, ele passa por três estados sucessivos (curva tensão-deformação): o elástico, o plástico e a sua ruptura.

No domínio elástico, o aço se alonga quando sofre uma deformação. Este alongamento é proporcional à força de tração. Quando esta força parar de atuar, o aço retorna ao seu tamanho original. As deformações podem ser determinados a partir da lei de Hooke. Quando o limite de escoamento (R_e) é atingido, o aço passa para o domínio plástico. Este limite é uma característica fundamental de aços, pois a maioria dos projetos ele é utilizado como o limite de aplicação de carga.

No domínio plástico, quando aumenta a força aplicada, observa-se que uma parte do material não consegue retornar ao seu tamanho original. Entra-se então na deformação plástica do aço. A medida que se aumenta mais a carga aplicada ao aço, mais próximo está do seu domínio de ruptura. Este domínio é caracterizado pela deformação em uma zona local, chamado de zona de estricção, que é o último estágio antes do rompimento do material.

2.3.2 Características de um metal

2.3.2.1 Encruamento

A influência do encruamento em um metal, está ligado diretamente com a ductilidade, onde a deformação plástica realizada, causará o endurecimento e aumento de resistência do metal. Portanto o encruamento é definido como o seu endurecimento pela deformação plástica.que aumenta nas condições de um ensaio de tração.

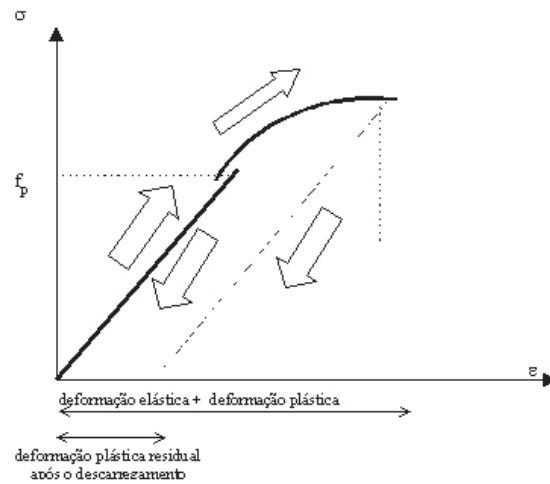


Figura 11 – Curva de encruamento (PIGNATTA,2008)

2.3.2.2 Restauração mecânica

O tratamento térmico de um metal encruado pode ocasionar um retorno parcial ou total das propriedades físicas e mecânicas de um metal, pela redução do número de imperfeições cristalinas, ou crescimento de novos grãos a partir da sua estrutura de subgrãos. A recristalização é a formação por nucleação e crescimento de novos grãos em um metal encruado. Quando o metal é aquecido, os átomos se deslocarão visando um arranjo mais perfeito e indeformado. Observa-se a restituição das propriedades mecânicas do material dúctil. O crescimento de grãos é a última etapa, onde os grãos menores, gerados na recristalização são absorvidos por grãos maiores. Este fato acontece com o aumento da temperatura conforme figura 12.

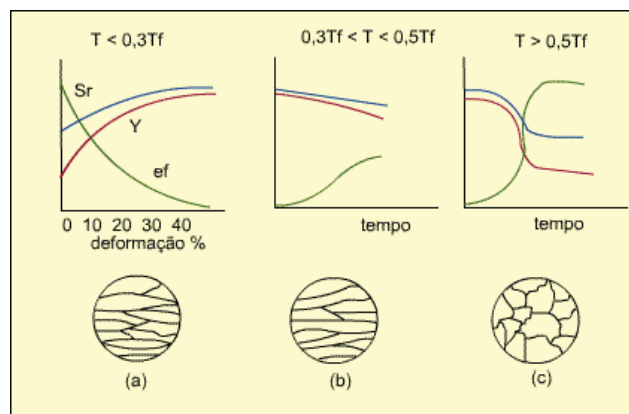


Figura 12 – (a) Metal Encruado (b) Início da recrystalização (c) Metal recrystalizado
(CARDOSO, 2007)

2.4 Simulação numérica

O método dos elementos finitos é uma técnica de solução numérica aplicável a um amplo leque de problemas físicos como: análise de tensões e deformações em sólidos bi e tri-dimensionais, placas, cascas, análise linear e não-linear, estática e dinâmica, mecânica dos sólidos, problemas relacionados a fluidos, distribuição de temperaturas, eletromagnetismo.

Ao se deparar com o projeto de uma estrutura, o engenheiro deve primeiramente estabelecer um esquema de cálculo. Neste esquema, a estrutura real deve ser idealizada de forma que seja possível a sua análise. Por exemplo, seja o projeto de uma viga bi-apoiada. Deve-se inicialmente, modelar a viga, aplicar as condições de equilíbrio, calculando as reações nos apoios, em seguida determinar os esforços internos máximos (Neste caso momento fletor máximo e esforço cortante máximo) e, através das tensões admissíveis efetuar o projeto ou análise da viga. Além disto, pode-se efetuar o projeto considerando as deflexões máximas também. Desta mesma é possível calcular vários tipos de elementos estruturais: barras, eixos circulares, colunas, tubos, placas circulares submetidas a carregamento simétrico, cascas de revolução. Observa-se todos estes casos correspondem a elementos estruturais relativamente simples cujas soluções exatas são previstas.

No caso de estrutura de contorno irregular, um procedimento como o descrito acima não é possível já que a mecânica dos materiais não prevê solução exata para este caso. Desta forma deve-se procurar soluções alternativas, como os métodos

aproximados. Entre os métodos aproximados, os mais conhecidos e citados na literatura são os métodos de Rayleigh-Ritz e Galerkin segundo Grandin (1986).

Para simular a situação real, o método dos elementos finitos, consiste em uma técnica onde o corpo em análise é discretizado em um número finito de partes, denominado elementos, que são conectados entre si através de pontos ou nós. O método dos elementos finitos tem sua formulação baseada nos métodos de Rayleigh-Ritz, onde a solução do problema são substituídas por funções aproximadoras. Para o auxílio na simulação foi utilizado o software ABAQUS.

2.4.1 ABAQUS

O Abaqus é um software de cálculo de elementos finitos desenvolvido pela Dassault System's. Ele pode ser usado em 3 módulos:

- ABAQUS/Standard é um método de solução geral que reporta à um sistema tradicional de integração implícita.
- O método de solução ABAQUS/Explicit trabalha em um sistema de integração explícita para a resolução de problemas com sistemas dinâmicos em um estado triplo de tensão não lineares.
- ABAQUS/CAE constitui de um módulo integrado com o modelamento, visualização e resolução. É o módulo mais utilizado.

Cada um destes módulos podem ser complementados por módulos específicos, dependendo da aplicação. Os módulos ABAQUS, ABAQUS/CAE são escritos integralmente com a linguagem de programação C++, Fortran para os cálculos parciais e Python para os scripts e parametrizações. A gestão de interface gráfica é garantida pela FOX Toolkit.

O ABAQUS é muito utilizado em indústrias automobilísticas e aeronáuticas, devido à grande demanda de novos materiais e novos sistemas utilizados nesses tipos de indústria. A sua interface facilita para fazer uma simulação numérica, a grande quantidade de modelação de materiais diferentes possibilita simular diversas situações diferentes, conforme Figura 13, que utiliza de exemplo uma porta de carro e avaliar a sua deformação máxima e outros parâmetros como a tensão. Para o estudo em questão,

será simulado uma chapa de aço inoxidável dentro de um forno por um certo período de tempo e verificar qual é a deformação máxima.

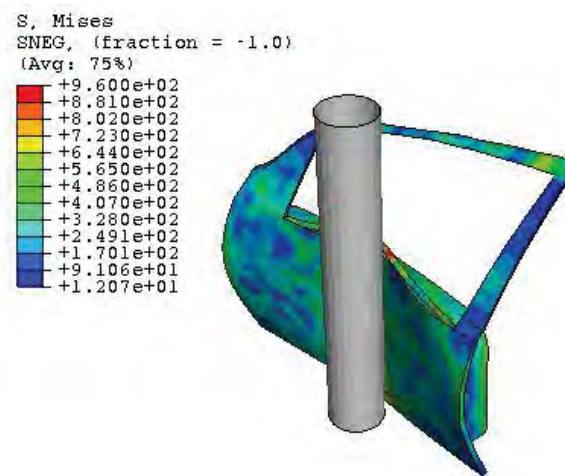


Figura 13 – Ilustração de um porta de carro modelada no Abaqus (ABAQUS MANUAL, 2009)

3. Procedimento Experimental

Os ensaios foram executados no Centro de Pesquisas de Aço Inoxidável da ArcelorMittal na cidade de Isbergues na França, que tem por objetivo desenvolver novas soluções e melhorar os procedimentos e processos de fabricação de um aço inoxidável.

Ensaio mecânico de tração a quente foram realizados em um simulador termomecânico para se obter a curva tensão deformação, e determinar os parâmetros que serão simulados no Abaqus. Outras análises foram feitas sobre o aço inoxidável, realizando ataques químicos e observações em microscópios eletrônicos.

Para os ensaios, 4 tipos diferentes de aços inoxidáveis ferríticos foram simulados: AISI 409 (ET00), AISI 430Ti (FT21), AISI 441 (FT90), AISI 444 (FD91). Para tornar a simulação numérica do aço mais eficaz, é necessário conhecer o comportamento do aço em altas temperaturas para que não ocorra o risco de falha nos ensaios. ET00, FT21, FT90 e FD91 são as nomenclaturas utilizadas pela ArcelorMittal para esses tipos de aço.

Os ensaios foram executados em um simulador termomecânico que realiza tanto a tração quanto à compressão a quente. Existem dois módulos que podem ser utilizados no Gleeble 3.500, o módulo HydraWedge que é limitado à realizar somente ensaios de compressão, utilizando altas taxas de deformação, simulando uma situação real de um laminador a quente, e o módulo Standard que possui um sistema mecânico integrado de um cilindro servo hidráulico capaz de exercer dez toneladas de força estática e deformações na ordem de 1.000 mm/s, e um sistema térmico na qual o calor sobre o corpo de prova é gerado por efeito Joule, onde pode-se atingir uma taxa de transferência de calor na ordem de 1000 °C/s

A figura 14 ilustra a vista geral do simulador numérico.



Figura 14 – Vista Geral do Gleeble 3500

Para efetuar o controle de temperatura no corpo de prova, um termopar é soldado no centro do corpo de prova e conectado à captadores de temperatura que irão efetuar este controle. Para se evitar o superaquecimento na máquina, existe um sistema de refrigeração nos cilindros hidráulicos. Este princípio vai gerar um gradiente térmico ao longo do corpo de prova. A Figura 15 ilustra o esquema geral de funcionamento da máquina

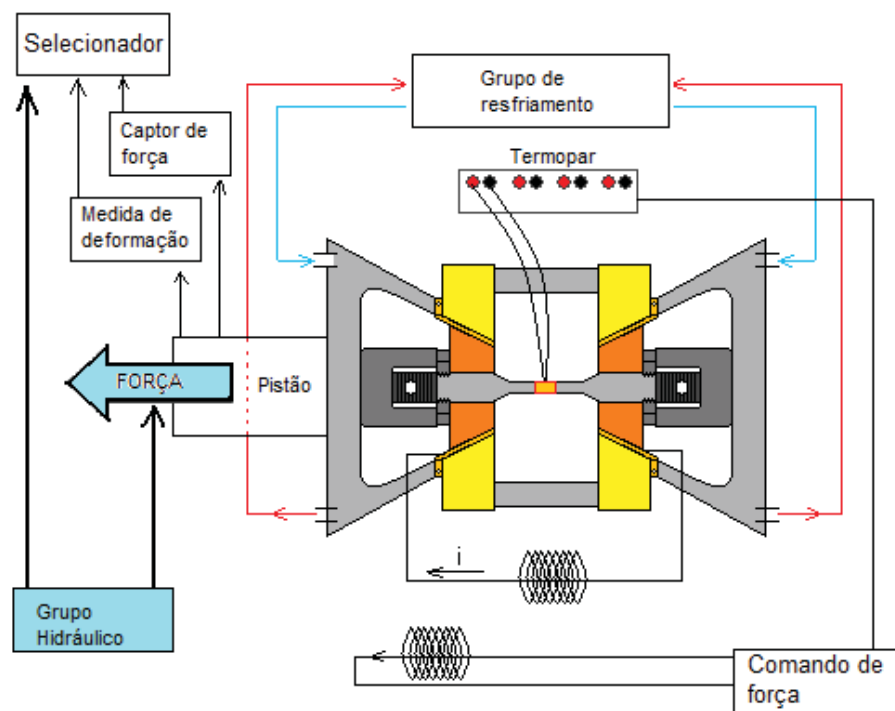


Figura 15 – Sistema geral de refrigeração da máquina Gleeble 3500

3.1 Parâmetros do ensaio

A fabricação dos corpos de prova foi feita de acordo com os padrões da máquina Gleeble 3.500. As dimensões do corpo de prova está representada pela Figura 16:

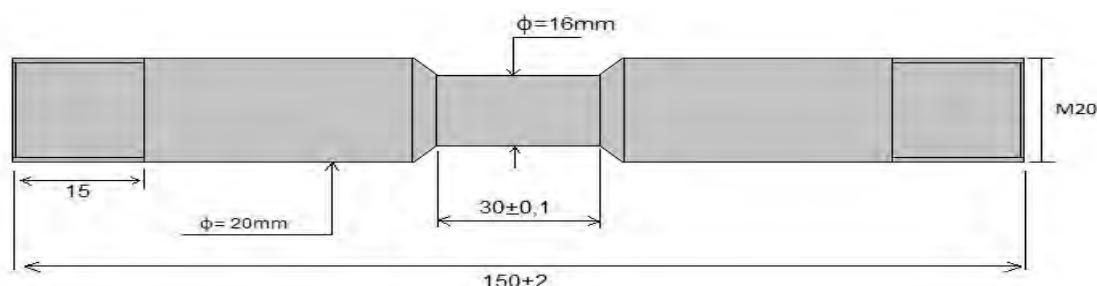


Figura 16 – Dimensões padrão do corpo de prova

Existem 2 tipos de controle em relação ao cilindro mecânico que se pode fazer para tracionar o corpo de prova. A primeira opção é determinar uma taxa de deformação por tempo [mm/s] e mantê-la constante ou fazer o controle pela força [N] que será aplicada ao corpo em um intervalo de tempo. Como o objetivo era determinar a tensão máxima, foi escolhido fazer o controle dos ensaios pela taxa de deformação por tempo [mm/s]. Os parâmetros de ensaio utilizados na Tabela 2 são limitados à uma taxa de deformação por tempo muito baixa para que se possa obter uma lei de comportamento válida neste domínio. Foram realizados 36 ensaios no total.

Tabela 2 – Parâmetros do Ensaio

Temperatura (°C)	Taxa de deformação por tempo (mm/s)
1150	0,01
	0,025
	0,1
1200	0,01
	0,025
	0,1
1220	0,01
	0,025
	0,1

A primeira etapa nos ensaios consistiu em soldar sobre o corpo de prova termopares do tipo S para fazer o controle do ciclo térmico. Outros termopares foram soldados ao longo do corpo de prova para se verificar o gradiente térmico formado. Em seguida, o corpo de prova foi fixado sobre suportes de cobre ilustrados na Figura 17. A última etapa foi a definição da programação dos ciclos térmico e mecânico com um programa chamado QuickSim. Para impedir a oxidação devido à água que se evaporava com o sistema de refrigeração, Argônio era injetado na câmara para deixar a superfície inerte. Um extensômetro foi posicionado no centro do corpo de prova para medir a deformação total.

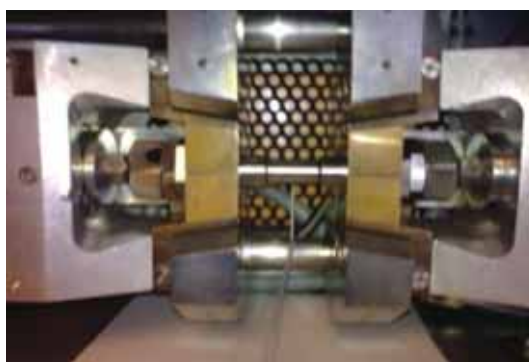


Figura 17 – Posicionamento de um corpo de prova na máquina

3.2 Fontes de erros no ensaio

Para a obtenção dos resultados, alguns problemas foram detectados na realização dos ensaios, que poderiam ser possíveis fontes de erros nos resultados obtidos para a interpolação das leis.: gradiente térmico, fissuras internas e erro na programação QuickSim.

3.2.1 Gradiente térmico

O sistema de refrigeração dos cilindros hidráulicos juntamente com o aquecimento no centro do corpo de prova, gera um gradiente térmico, conforme Figura 18, promovendo deformações não constantes ao longo do corpo.

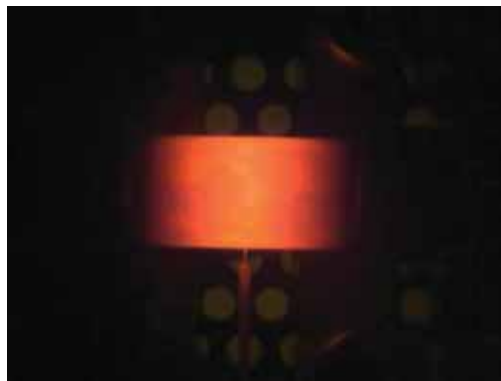


Figura 18 – Gradiente térmico no corpo de prova

Para tentar diminuir este efeito, uma alteração na programação do ciclo térmica foi feita. No primeiro ensaio, o perfil térmico utilizado foi de 40°C/s da temperatura ambiente até 1.260°C conforme Figura 19 e a variação de um termopar no centro do corpo de prova para um distante de 5 mm era de 42°C .

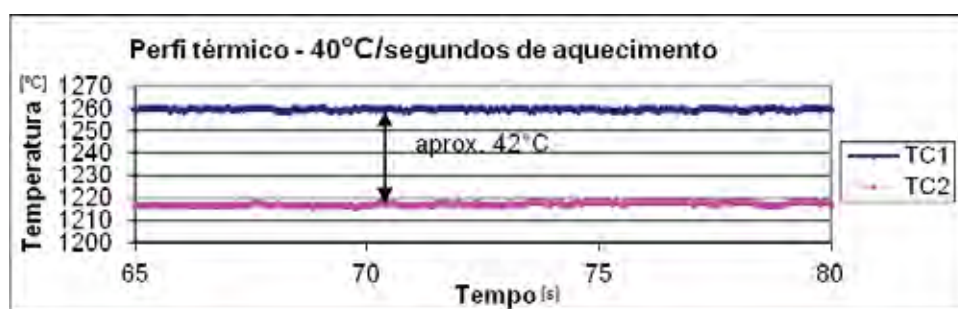


Figura 19 – Influência da velocidade de aquecimento $40^{\circ}\text{C/segundos}$

No segundo caso foi utilizado uma taxa de aquecimento de 80°C/s e a diferença de temperatura entre os dois termopares foram de 40°C conforme mostra a figura 20.

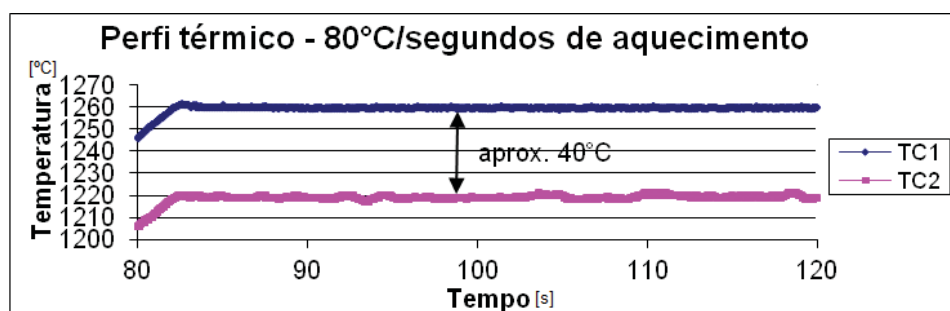


Figura 20 - Influência da velocidade de aquecimento $80^{\circ}\text{C/segundos}$

A conclusão é que a mudança do perfil de aquecimento não consegue diminuir este efeito do gradiente térmico, portanto esta fonte de erro deve ser levado em consideração na interpolação das leis.

3.2.2 Fissuras Internas

Durante o ensaio de tração a quente, foi observada a formação de trincas no corpo de prova como ilustra a Figura 21. Em razão disto, foi observado no microscópio optico se já haviam esses tipos de trincas em temperatura ambiente no corpo de prova que ainda não foi deformado, para saber a origem destas trincas. A Figura 22 mostra a existência de microtrincas antes mesmo do ensaio de tração a quente. Essas trincas são provenientes do fenômeno conhecido com temperatura de transição dúctil-frágil. Para a fabricação dos corpos de prova, é extraído da chapa de aço uma amostra que antes de ser usinada está na temperatura ambiente. Quando a chapa de aço passa de uma temperatura muito alta para a temperatura ambiente, algumas fases do metal se fragilizam fazendo com que apareçam as trincas internas. É possível também devido a tensões residuais provenientes de resfriamento não uniforme gerando trincas.



Figura 21 – Corpo de prova após o ensaio de tração a quente



Figura 22 – Aço 430Ti no microscópio óptico à temperatura ambiente

3.2.3 Erro na Programação – Quick Sim

Antes de iniciar um ensaio é preciso fazer uma programação no programa Quick Sim e determinar os ciclos mecânicos e térmicos. Ambos devem estar associados, pois quando o corpo de prova é aquecido, a dilatação térmica ocorre gradativamente e não pode ser impedida, ou bloqueada para que uma força de compressão seja evitada ao corpo de prova. A Figura 23 mostra a dilatação térmica devido aos esforços.

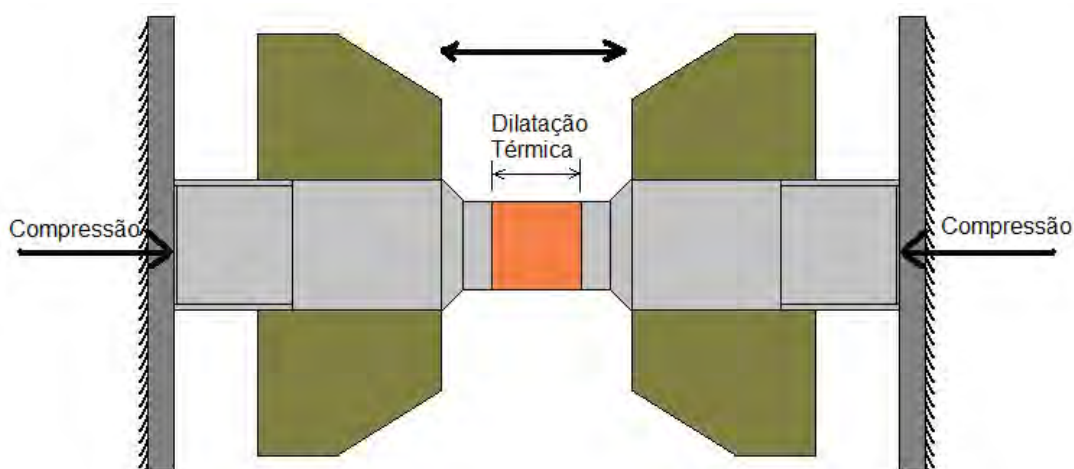


Figura 23 – Esquema de um corpo de prova sobre forças de compressão

Uma vez definido os ciclos térmico e mecânico, valores específicos para cada ensaio, como por exemplo a temperatura são adicionados ao programa conforme Figura 24. O erro de programação, em alguns ensaios estava gerando uma força de compressão inicial no corpo de prova antes de tracioná-lo. Essa força de compressão foi eliminada utilizando o controle por força nos cilindros hidráulicos.

QuikSim - [Table - G:\QUIKSIM\PATRICEV180510D.TAB]						
#	L	Time	Axis 1	Axis 2	Axis 3	
1		System	Axial strain using HZT060, l = 10.000mm, d = 16.000mm			
2		Stress-Strain	Force HZT060 PowAngle PTemp Strain Stress Stroke TC4			
3		Acquire	essai rheologie			
4			FT90			
5						
6						
7		Start	☒ Mechanical	☐ High	☒ Thermal	
8		Mode	Force (kgf)	Wedge (cm)	TC4 (C)	
9		Sample	20.0Hz			
10		00:02.0000	8.0	0.000	0	
11		02:01.0000	8.0	0.000	1160	
12		00:05.0000	8.0	0.000	1160	
13		04:55.0000	8.0	0.000	1160	
14		00:02.0000	8.0	0.000	1150	
15		Mode	Stroke (mm)	Wedge (cm)	TC4 (C)	
16		Zero	HZT060 Stroke			
17		Sample	20.0Hz			
18		00:01.0000	0.00	0.000	1150	
19		05:20.0000	8.00	0.000	1150	
20		Mode	Force (kgf)	Wedge (cm)	TC4 (C)	
21		00:10.0000	10.0	0.000	0	
22		GSL>	wait TC1 <200C			
23		End	☐ Mechanical	☐ High	☐ Thermal	

Figura 24 – Programa Quick Sim

3.3 Resultados do Ensaio de tração à quente

Os dados que o Gleeble 3.500 fornece, são coletados por um computador conectado diretamente com a máquina, em uma planilha excel. Para cada tipo de aço, temperatura e taxa de deformação imposta, tem-se uma curva tensão-deformação onde o que nos interessa é a tensão máxima. A Figura 25, ilustra uma curva típica para o aço AISI 441, ensaiado a 1.200°C.

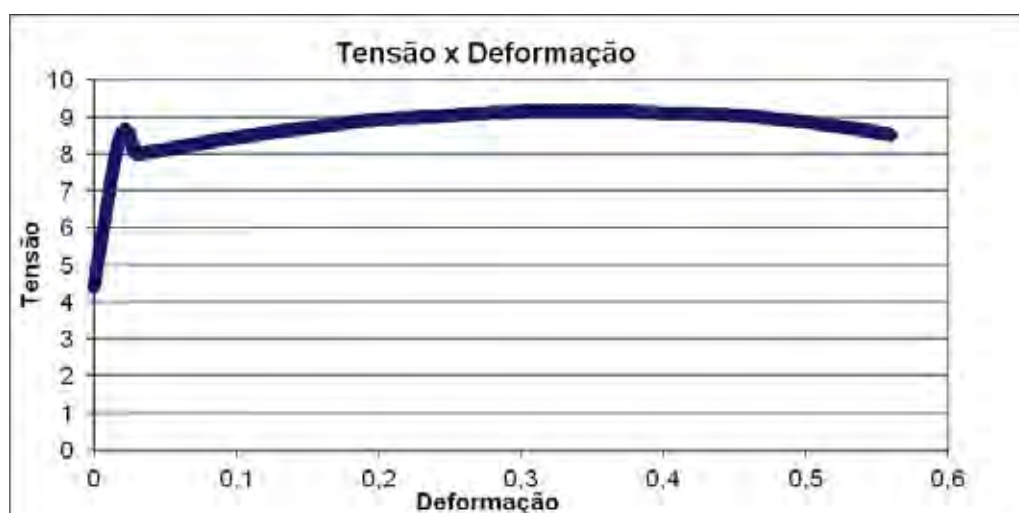


Figura 25 – Exemplo de uma curva Tensão x Deformação – Aço AISI 441 à 1.200°C

Para cada ensaio, é coletado a partir do gráfico a tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) e a taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) em um certo intervalo de tempo que a tensão é máxima, como ilustrado na Figura 26.

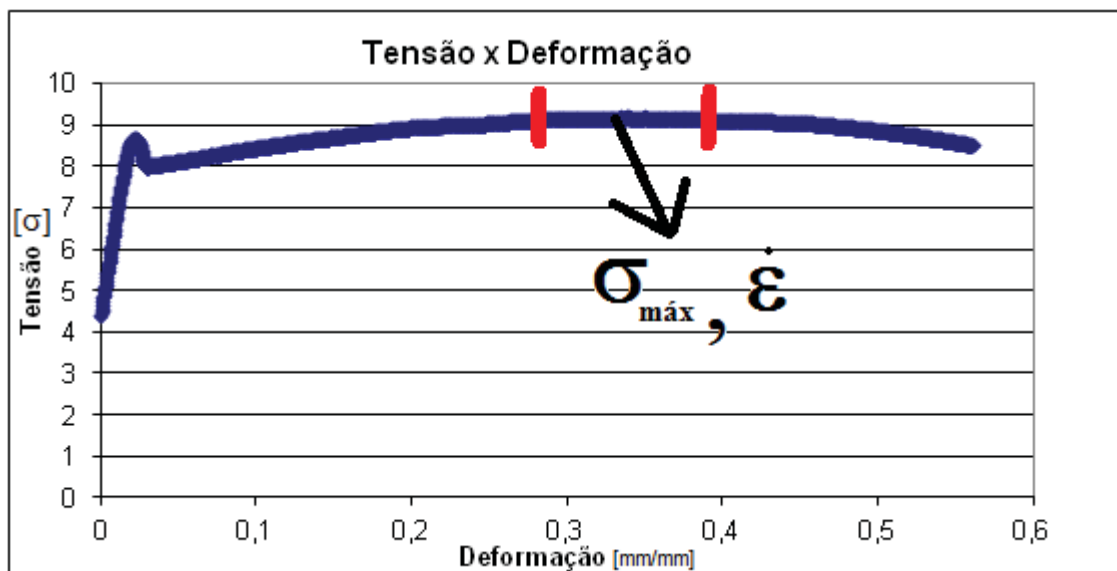


Figura 26 – Curva Tensão x Deformação intervalo onde a Tensão é máxima

Na Tabela 3, estão os valores de Tensão máxima e taxa de deformação associada para cada tipo de aço e temperatura. Alguns ensaios não foram realizados devido à limitação dos corpos de prova. Esses ensaios não vão trazer impactos nos resultados finais, pois com uma temperatura de 1.200°C, as tensões já estão altas, e para o estudo em questão, é interessante avaliar os aços que são mais críticos ao fenômeno de fluência.

Tabela 3 – Leis de comportamento para cada tipo de aço

Temperatura	Taxa de deformação por tempo	Tipos de Aço							
		AISI 409		AISI 430Ti		AISI 441		AISI 444	
		Tensão MAX (MPa)	Taxa de def. (10 ⁻⁵ .s ⁻¹)	Tensão MAX (MPa)	Taxa de def. (10 ⁻⁵ .s ⁻¹)	Tensão MAX (MPa)	Taxa de def. (10 ⁻⁵ .s ⁻¹)	Tensão MAX (MPa)	Taxa de def. (10 ⁻⁵ .s ⁻¹)
1.150°C	0,01mm/s	4,9	65,89	4,74	65,95	4,91	65,12	7,1	68,3
	0,025mm/s	5,2	165,9	4,98	153,25	6,92	160,31	8,4	163,4
	0,1mm/s	7,0	651,748	6,90	613,86	10,02	623,82	13,4	645,0
1.200°C	0,01mm/s	4,0	62,5	3,46	66,70	4,66	65,16	6	63,80
	0,025mm/s	4,2	166,0	4,13	160,33	6,02	161,66	6,32	158,10
	0,1mm/s	5,6	630,0	6,11	621,41	8,80	633,63	9,15	622,50
1.220°C	0,01mm/s	3,9	61,8	3,57	65,41	4,76	64,89	-	-
	0,025mm/s	4,0	164,5	3,44	149,43	5,09	159,23	-	-
	0,1mm/s	5,1	643,1	5,24	600,25	7,07	634,22	-	-

3.3.1 Determinação das leis de Fluência

Após definir os pontos experimentais, com o auxílio do Excel foram definidas as leis de Fluência para cada tipo de aço e temperatura. No tópico anterior, foram citadas algumas fontes de erro que poderiam alterar os resultados finais. Portanto a interpolação no Excel foi ajustada de modo que a classificação de cada tipo de aço seja coerente com as suas propriedades de resistência. A Figura 27 ilustra um exemplo das leis de comportamento à uma temperatura de 1.200°C.

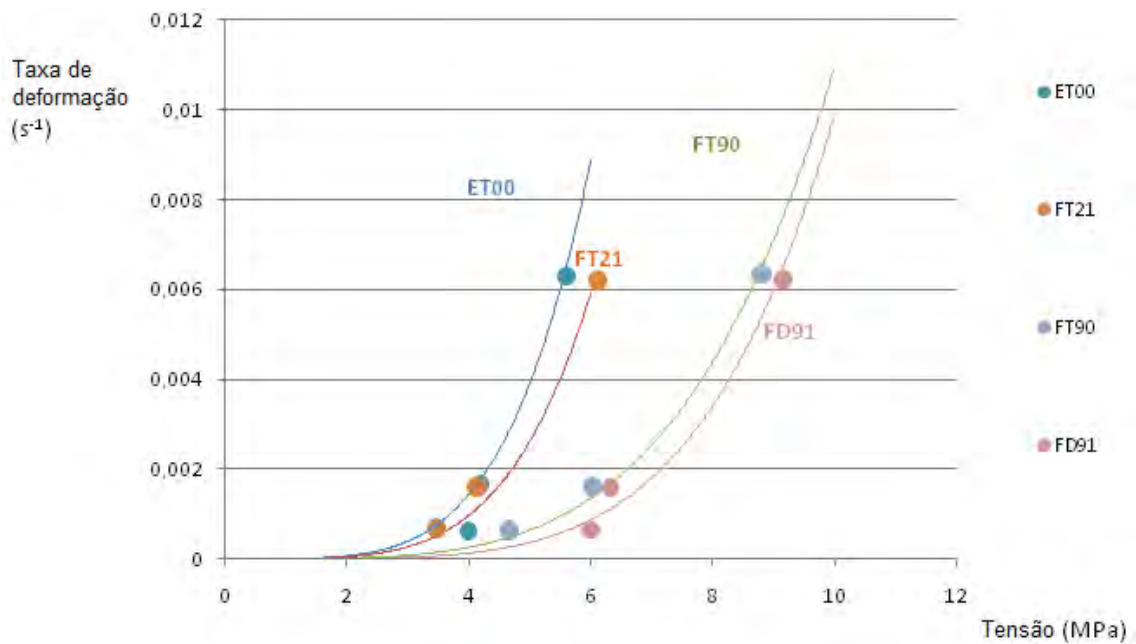


Figura 27 – Exemplo à 1.200°C de uma lei de comportamento

Na Tabela 4, estão os valores de A e n que representam os coeficientes descritos pela lei de Arrhenius. Estes serão os dados de entrada no Abaqus, na qual irão descrever o comportamento do aço.

Tabela 4 – Valores das constantes A e n

Valores de A e n - $\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^n$								
Temperatura(°C)	AISI 409 (ET00)		AISI 430Ti (FT21)		AISI 441 (FT90)		AISI 444 (FD91)	
	A	n	A	n	A	n	A	N
1.150	1,76E-07	5,48612	2,22E-07	5,2	6,94E-07	3,93	3,42E-07	3,84
1.200	2,80E-06	4,5	1,95E-06	4,476607	8,72E-07	4,1	1,69E-07	4,77
1.220	3,00E-06	4,8	2,50E-06	4,75	1,02E-06	4,45	-	-

3.3.2 Classificação entre os tipos de aço em relação ao risco de fluência

Para fazer uma classificação entre os tipos de aço em relação ao risco de fluência, foram estudados que cada aço irá formar o seu tipo de precipitado em solução

sólida e dependendo do tipo de precipitado formado, a contribuição para impedir este fenômeno pode aumentar. A Tabela 5 mostra os teores em solução sólida para cada tipo de aço.

Tabela 5 – Solução Sólida de Ti e Nb

Tipo de aço	Delta Ti	Delta Nb equilíbrio
AISI 409 (ET00)	0,121	-
AISI 430Ti (FT21)	0,240	-
AISI 444 (FD91)	0,024	0,359
AISI 441 (FT90)	0,023	0,535

Os aços que possuem Nb em solução sólida, possuem uma resistência maior à fluência devido a formação do precipitado Nb(C, N), Fe_2Nb . Pela Tabela 5 fica bem claro que os tipos de aço AISI 441 e AISI 444 possuem uma menor sensibilidade à este fenômeno quando comparado aos tipo de aço AISI 409 e AISI 430Ti. Por outro lado, se comparar entre o AISI 441 e AISI 444, o tipo de aço AISI 444 deveria ter mais sensibilidade ao fenômeno, porém devido ao molibdênio que é um elemento que aumenta a resistência à fluência sem a formação de precipitados, o aço AISI 444 possuirá maior resistência à fluência. A Figura 28 ilustra a classificação por tipo de aço com relação ao risco à fluência.



Figura 28 – Classificação por tipo de aço de risco à fluência

4. Simulação numérica no Abaqus

O programa para fazer a simulação numérica é o ABAQUS. Uma vez definida as leis de comportamento do material, deve-se simular a chapa de aço em um forno. Este modelo permitirá determinar a flecha crítica de uma chapa de aço. O objetivo é quantificar os valores das flechas (deformações), uma vez que não se sabe o valor exato, mas apenas se tem uma idéia (observada industrialmente) de qual chapa irá produzir uma flecha maior. Após ter uma ideia dos valores, modificações de dimensões (espessura, largura), parâmetros (temperatura, tempo) foram feitas para otimizar o processo.

4.1 Descrição do processo

O processo a ser simulado é o comportamento de uma chapa de aço dentro de um forno de dimensões: Largura: 12,9 m – Comprimento: 36 m, que possui apoios móveis para deslocar a chapa de aço para os processos seguintes. A chapa foi aquecida por volta de vinte minutos antes de ir para o processo de laminação à quente. A Figura 29 ilustra a vista geral de um forno em uma siderúrgica



Figura 29 – Forno de reaquecimento

4.2 Descrição do modelo

Para levar em consideração o comportamento do aço, existe no Abaqus uma série de modelos matemáticos, e o que mais se aproxima com a lei de comportamento encontrada na seção anterior é a “*Power-law model – Time Hardening*” que é dada por:

$$\dot{\varepsilon} = A \tilde{q}^n t^m \quad \text{- Taxa de deformação em função do tempo} \quad (6)$$

Onde,

$\dot{\varepsilon}$ – Taxa de Deformação

$\tilde{q}$ – Tensão

t – Tempo

A, n, m – Constantes definidas pelo usuário

A chapa de aço foi modelada em 2D conforme figura 30, pois ao longo da chapa de aço existe uma simetria. Portanto, o efeito de simular apenas uma placa 2D foi o mesmo que se for simulado a chapa por inteira. Supõe-se que a espessura é muito pequena se comparado às outras dimensões da chapa, portanto foi utilizado a hipótese de tensão no plano. As unidades estão no Sistema Internacional: mm, s, ton, N. A chapa de aço representa então um retângulo em 2D deformável, de dimensões que variam de 10,8 m à 11,8 m de largura e de 200 mm à 220 mm de altura.

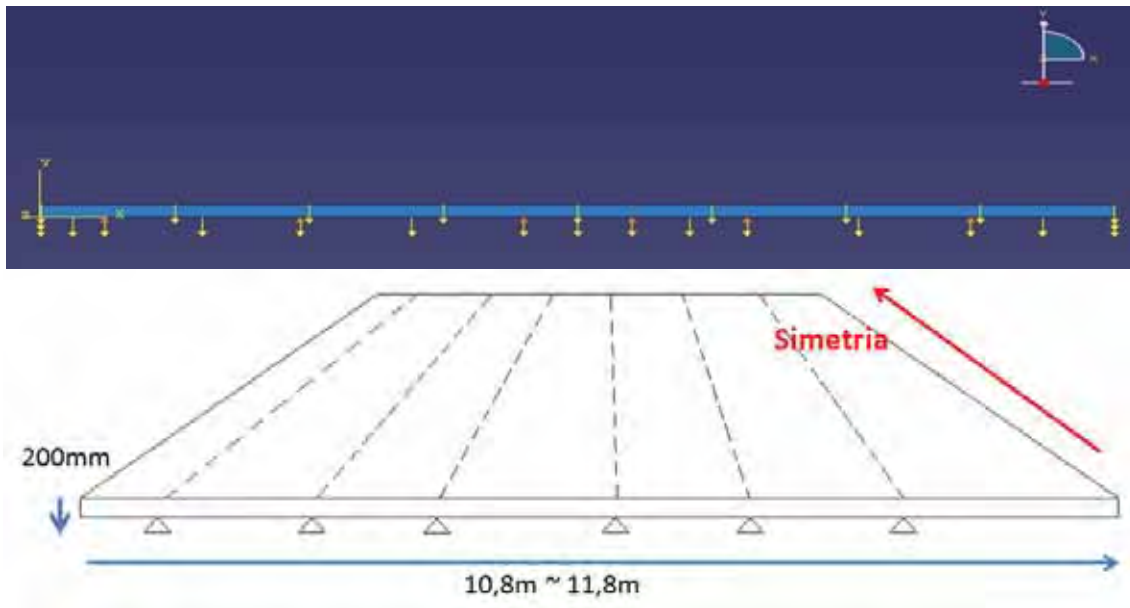


Figura 30 – Vista em 2D e 3D da chapa de aço

4.2.1 Material – Propriedades mecânicas e leis de comportamento

A determinação da massa volumétrica para cada tipo de aço varia de acordo com a composição e temperatura. Portanto segundo Kenneth (1997) o cálculo da massa volumétrica para um aço inoxidável é dada pela seguinte equação:

$$\rho = \{[(69,4.\%Fe) + (66,3.\%Cr) + (71,4.\%Ni) + (57,2.\%Mn) + (51,5.\%Mo) + (49,3.\%Si)] - 0,86(T-1.823K)\} \quad (7)$$

Onde,

%Fe – Porcentagem em Ferro da composição do aço

%Cr – Porcentagem em Cromo da composição do aço

%Ni – Porcentagem em Níquel da composição do aço

%Mn – Porcentagem em Manganês da composição do aço

%Mo – Porcentagem em Molibidênio da composição do aço

%Si – Porcentagem em Silício da composição do aço

T – Temperatura do aço em Kelvin

As propriedades elásticas do material como o módulo de Young e coeficiente de Poisson devem ser determinadas a partir das curvas de tração conforme figura 31: módulo de Young $E = 5.348,48 \text{ MPa}$ na temperatura de 1.200°C e coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$. A partir da lei de comportamento escolhida “Time Hardening” serão definidos os valores A – Power law Multiplier, n – Equation Stress Order e m – Time Order. O campo de condutividade não é necessário determinar os parâmetros, pois não existe troca térmica entre dois corpos de diferentes natureza.

Edit Material

Name: Material-1

Description:

Material Behaviors

- Conductivity
- Creep**
- Density
- Elastic

General Mechanical Thermal Other Delete

Creep

Law: Time-Hardening Suboptions

☒ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

	Power Law Multiplier	Eq Stress Order	Time Order
1	1.02E-006	4.45	0

OK Cancel

Figura 31 – Inserção dos parâmetros

4.2.2 Etapas de Cálculo

As etapas de cálculo consistem em duas fases, a primeira é a etapa inicial (Static/General) onde é definido os apoios e os esforços que a chapa está sofrendo pelos apoios (Força Gravitacional). A segunda etapa é a chapa dentro do forno (Coupled/Temperature-Displacement), onde a chapa será aquecida e ficará um tempo dentro do forno se deformando. As condições de contorno definidas, foram tais que a translação e deformação sobre o eixo Y(U2) é zero durante todas as etapas, e a carga $P(U2) = -9.810 \text{ N}$. A Figura 32 ilustra as direções dos eixos no Abaqus.

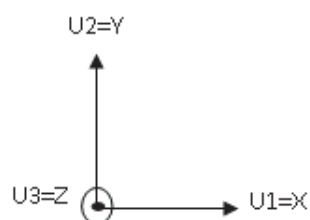


Figura 32 – Direções dos eixos no Abaqus

A definição das malhas, devido às limitações da versão estudante Abaqus (1.000 elementos) foi utilizado um elemento com 4 nós, bilinear, em estado de tensão plana com integração completa. A malha é estruturada com elementos quad – CPS4T conforme Figura 33. O total de elementos é 561 (3 elementos na espessura).

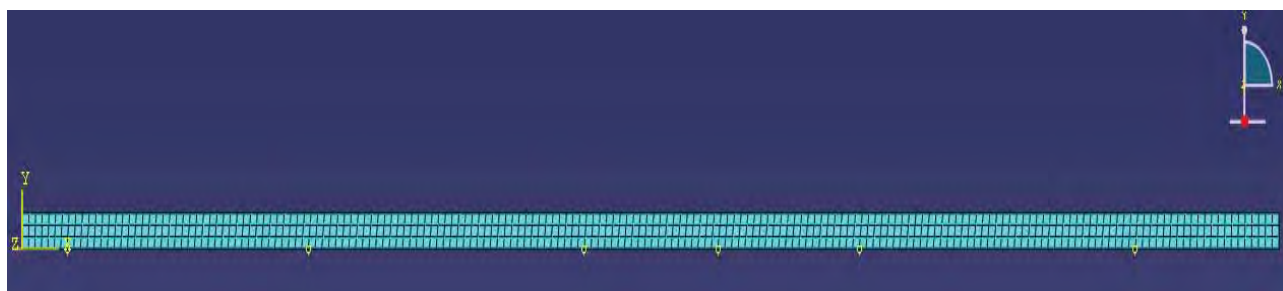


Figura 33 – Elementos de malha em uma chapa de aço

4.3 Resultados e comentários da Simulação Numérica

Primeiramente a simulação foi feita à 1.200°C com uma espessura de 200 mm para ter uma idéia dos valores iniciais de flecha e saber onde partir para a alteração dos parâmetros (aumentar a espessura, aumentar a temperatura, aumentar a largura). Na produção, o valor crítico na qual o valor de flecha não pode passar é de 200 mm. A tabela abaixo mostra os resultados da primeira simulação.

Tabela 6 – Valores de flechas à temperatura de 1.200°C e espessura de 200 mm

Espessura 200mm – 1.200°C		
Tipo de aço	Largura 11,2m	Largura 11,8m
AISI 409 (ET00)	23,6077 mm	216,7 mm
AISI 430Ti (FT21)	16,9092 mm	149,17 mm
AISI 441 (FT90)	11,7 mm	82,3 mm
AISI 444 (FD91)	3,6 mm	20,5 mm

A tabela 6 mostra que valores de flecha com uma largura de 11,2 m não terá problemas à uma temperatura de 1.200°C, entretanto com uma largura de 11,8m os valores de flecha dos aços AISI 409 e AISI 430 Ti são críticos com chances de ficarem bloqueados dentro do forno. Já o aço AISI444 mesmo com uma largura de 11,8 m o valor da flecha não será crítico. Na Tabela 7 estão os valores de flechas com os parâmetros alterados (espessura, largura, temperatura) definidos pela produção e pelo centro de pesquisas para verificar melhorias e avaliar os riscos.

Tabela 7 – Valores de flechas com os novos parâmetros

Espessura 200mm - 1220°C			
Tipos de aço	Largura 11,2m	Largura 11m	Largura 10,8m
AISI 409 (ET00)	24,05mm	9,6mm	3,7mm
AISI 430Ti (FT21)	20,1mm	8,4mm	3,3mm
AISI 441 (FT90)	9,9mm	2,07mm	0,98mm
Espessura 220mm - 1220°C			
Tipos de aço	Largura 11,3m		Largura 11,8m
AISI 409 (ET00)	24,5mm		166,7mm
AISI 441 (FT90)	9,9mm		54,3mm
Espessura 210mm - 1200°C			
Tipos de aço	Largura 11,2m	Largura 11,4m	Largura 11,8m
AISI 409 (ET00)	18,7mm	40,9mm	167,2mm
AISI 430Ti (FT21)	13,5mm	28,9mm	115,3mm
AISI 441 (FT90)	7,5mm	14,6mm	49,8mm
Espessura 210mm - 1220°C			
AISI 409 (ET00)	18,9mm	43,0mm	190,2mm
AISI 430Ti (FT21)	15,6mm	34,9mm	150,8mm
AISI 441 (FT90)	8,0mm	16,4mm	61,6mm

Os resultados mostram que quando aumenta-se a largura e temperatura, os valores de flecha aumentam, quando ocorre o aumento da espessura, a tendência é a diminuição do valor da flecha devido ao aumento da rigidez. Porém deve-se ter atenção com o aumento da espessura, pois a partir do momento que a deformação começa devido ao seu maior peso o efeito pode ser mais grave.

5. Conclusões e Considerações finais

Uma das contribuições deste estudo foi a possibilidade de fazer uma classificação entre os tipos de aço quanto à resistência sobre fluência e quantificar este valor para a avaliação de um risco. Entre a classificação estabelecida dos tipos de aço com relação à solução sólida, os resultados obtidos mostraram lógica com esta teoria. Outro fator a se considerar foram as fontes de erro obtidas do ensaio de tração à quente no Gleeble que pode trazer uma margem de erro de 10% nos resultados finais, porém não alteram a classificação entre os tipos de aço.

Com os resultados dos ensaios a interpolação das leis foi feita no Excel. O programa faz o posicionamento que melhor se encaixa para todos os pontos. Tensões na ordem de 5MPa não terão problemas, entretanto tensões aproximadamente de 1MPa algumas curvas acabam se cruzando nesta faixa sendo necessário ajustar as curvas para que elas sigam a classificação correta quanto à sua resistência à fluência. Este ajuste é possível fazer, quando se trabalha em uma margem de mais ou menos 10% para os resultados.

Este trabalho permitirá melhorar o processo de reaquecimento da chapa de aço antes de ser laminado. É possível ter uma idéia de uma temperatura crítica na qual não se pode passar para evitar um risco. Também é possível aumentar a espessura da chapa de aço para um aumento na produtividade e capacidade de produção, porém é um outro risco que pode ocorrer se não for avaliado corretamente uma espessura ideal.

Uma vez que a quantidade de solução sólida, é um fator que julga sobre a resistência à fluência. Por exemplo, o aço AISI 444, tem Nb como solução sólida e uma quantidade de Mo adicionado à sua estrutura, na qual formam precipitados que impedem o movimento das discordâncias.

6. Referências Bibliográficas

BAILEY, R. W., **Creep of Steel under simple and Compound Stresses and the use of high initial temperature in steam power plants**, Tokyo Sectional Meeting of the World Power Conference, Tokyo (1929), p. 1089.

CALLISTER Jr, Willian D. **Ciência engenharia de materiais**. Introdução 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

COTTRELL, A. H. **The Mechanical Properties of Matter**. John Wiley: London, 1964. p. 295-300, 336-339.

DONALD PECKNER; I. M Bernstein – Copyright 1977 by McGraw-Hill, Inc. – **Handbook of Stainless Steels**

GENTIL, VICENTE; **Corrosão**. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003

GRANDIN, H. Jr. **Fundamentals of the Finite Element Method**, Mammillan Publishing Company, New York, 1986.

HERRING C., **J. Applic. Phys.**, 21, 437 (1950)

MILLS Kenneth C., Yuchu SU, Zushu LI and Robert F. BROOKS, **Equations for Calculation of the Thermo-physical Properties of Stainless Steel** (1997)

NABARRO F.R.N. , **Bristol Conference, Phys. Soc.**, London 1948.

NORTON, F. H., **The Creep of Steel at High Temperature**. Mc Graw Hill, New York (1929).

MILLS C., Kenneth and Robert F. BROOKS, **Equations for Calculation of the Thermo-physical Properties of Stainless Steel**

SEDRIKS, A. J., **Corrosion of Stainless Steels**. 2ªed. A Wiley – Interscience Publications, 1996

VISWANATHAN, R. **The Effect of Stress and Temperatura on the Creep and Rupture Behavior of a 1.25 pct. Chromium – 0.5 pct. Molybdenum Steel**, Metall. Trans. A, Vol. 8ª, 1977. p. 877-883.