

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.

PPGE3M

ESTUDO COMPARATIVO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE DOIS
CICLOS DE REAQUECIMENTO DE TARUGOS DE AÇO

Antonio Ricardo Stadtländer

Dissertação para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

ESTUDO COMPARATIVO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE DOIS
CICLOS DE REAQUECIMENTO DE TARUGOS DE AÇO

ANTONIO RICARDO STADTLÄNDER
Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Tecnologia e Ciência dos Materiais

Porto Alegre
2012

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fabiano Dornelles Ramos, IFRS
Dr. Marcio Levi Kramer de Macedo, UFRGS
Prof. Dr. Wagner Viana Bielefeldt, UFRGS

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGE3M

Dedico este trabalho ao meu filho Wagner Bueno Stadtländer.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Afonso Reguly pela orientação e pelo conhecimento transmitido e ao Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker pela confiança e auxílio prestados. A ambos também agradeço sinceramente pela oportunidade de aprendizado proporcionada pela atuação no LAMEF.

Aos membros da banca examinadora pelas contribuições que elevaram a qualidade deste humilde trabalho.

Ao Engenheiro e Mestre Leoneros Acosta Barbosa que sempre me auxiliou e incentivou na continuidade dos estudos de pós-graduação e também pelo seu auxílio e participação neste trabalho.

Aos Engenheiros, Técnicos e Funcionários do Setor de Laminação da Gerdau Aços Especiais Piratini que proporcionaram as informações necessárias e sempre estiveram disponíveis durante a execução dos trabalhos. Meus agradecimentos também ao pessoal da Segurança do Trabalho pelo zelo durante os procedimentos.

Ao pessoal do Setor de Instrumentação da Gerdau Aços Especiais Piratini pelo seu auxílio inestimável durante os procedimentos de medição das temperaturas.

A todos os colegas e funcionários do LAMEF, pelo auxílio prestado e pela convivência, que me proporcionaram muitas oportunidades de crescimento profissional e individual.

Ao Dr. Eng^o Marcio Levi Kramer de Macedo, pela paciência, pelo auxílio e pelos ensinamentos prestados na convivência diária. E também pelo estímulo necessário para a conclusão deste trabalho.

Ao Eng^o Marco Aurélio Ressler Fischer pelas informações prestadas e auxílio para a revisão bibliográfica.

A todos os professores que contribuíram na minha formação como engenheiro meus sinceros agradecimentos.

A meus pais, Karl Ricard Stadtländer (in memoriam) e Cecília Stadtländer, primeiros mestres e professores, que sempre me incentivaram ao estudo e a busca do

conhecimento. À minha Esposa, Elaine T. B. Stadtländer e meu filho Wagner B. Stadtländer pelo apoio e estímulo.

Ao CNPq, ao LAMEF e a UFRGS pelo apoio técnico e financeiro, dando condições materiais para a realização do trabalho.

RESUMO

Um processo competitivo no mercado atual exige a união de qualidade e produtividade. Além disto, o aumento da eficiência dos processos vem ao encontro da atual preocupação com os impactos ambientais das atividades produtivas, principalmente no que concerne ao uso de combustíveis fósseis. O objetivo principal deste estudo foi verificar a possibilidade de aumento da produtividade de um forno de reaquecimento, passando de 42 para 45 toneladas por hora de tarugos de aço com qualidade similar à AISI/SAE 52100. Para esta finalidade, foram efetuadas simulações numéricas dos ciclos de reaquecimento utilizando um aplicativo computacional. Inicialmente foi efetuada uma revisão da bibliografia referente ao assunto, seguindo-se de um trabalho prático que constou de um procedimento de instrumentação em um tarugo com qualidade similar à de um aço AISI/SAE 52100 para obtenção de dados reais do processo de reaquecimento e sua utilização para verificação do comportamento do software utilizado e, por fim, simulações numéricas com dois diferentes tempos de reaquecimento, relativos a uma produção de 42 e 45 toneladas por hora. Considerando-se o perfil térmico do tarugo de aço, obtido a partir das simulações, verificou-se que o equipamento em questão encontra-se próximo aos limites de produtividade. Diminuições no tempo de reaquecimento, ou seja, aumentos na taxa de produção, provavelmente comprometeriam a qualidade do processo e do produto.

ABSTRACT

A productive process to be competitive requires the union of quality and productivity. Furthermore, the increased efficiency of processes encounters the current concern with the environmental impacts of production activities, particularly with regard to fossil fuels consumption and emissions. The main objective of this study was to investigate the possibility of increasing the productivity of a reheating furnace from 42 to 45 tons per hour of AISI/SAE 52100 steel billets. For this purpose, numerical simulations of reheating cycles were performed using a computer application. Initially a literature review on the subject was performed, followed by a practical work that consisted of a instrumentation procedure in a AISI / SAE 52100 billet to obtain real data from reheating process. This data was used to validate the numerical simulation and, finally, two different reheating times relating to a production of 42 and 45 tons per hour were simulated. Considering the thermal profile obtained from the simulations, it is likely that the furnace is within its productivity limits. Reductions in the reheat time, thus increasing the production rate, are likely to compromise the quality of the final product.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS	XIV
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Processo de Fabricação do Aço	3
2.1.1 Aciaria	4
2.1.2 Forjaria	4
2.1.3 Preparo de tarugos	5
2.1.4 Laminação	5
2.1.5 Transformação mecânica.....	6
2.1.6 Tratamento térmico	6
2.2 Aquecimento dos aços.	6
2.3 Fornos de reaquecimento	7
2.3.1 Fornos tipo <i>Pusher</i>	9
2.3.2 Fornos tipo <i>Walking Beam</i>	9
2.4 Estudos em fornos de reaquecimento	10
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	16
3.1 Instrumentação de um tarugo de aço	16
3.1.1 Características do forno de reaquecimento	16
3.1.2 Procedimento de instrumentação do tarugo de aço	19
3.2 Ajuste do <i>software</i> FIRST	21
3.2.1 O <i>software</i> FIRST	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	27

4.1	Resultados da instrumentação.....	27
4.1.1	Ajuste dos parâmetros do <i>software</i> com os dados obtidos da instrumentação	32
4.1.2	Resultados dos ajustes.....	38
4.2	Simulação de dois ciclos de reaquecimento.....	40
4.2.1	Parâmetros utilizados	40
4.2.2	Resultados das simulações numéricas.....	41
4.3	Sumário das Discussões.....	42
5	CONCLUSÕES	46
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES.....	47
7	REFERÊNCIAS	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1	Diagrama esquemático do ciclo de produção do aço.(GERDAU – Aços Especiais Piratini).	4
Figura 2-2	Diagrama esquemático de um forno de reaquecimento de tarugos. (Adaptado de Chen et al, 2005).	12
Figura 2-3	Distribuição de temperaturas para algumas curvas de reaquecimento. (Adaptado de Chen et al, 2005).	14
Figura 3-1	Diagrama esquemático do forno de reaquecimento 10500, mostrando uma vista lateral em corte. Dimensões em mm.	18
Figura 3-2	Diagrama das furações efetuadas no tarugo de teste para a inserção dos termopares.....	20
Figura 3-3	Imagem mostrando a aparência da tela principal de configuração do <i>software</i>	22
Figura 3-4	Imagem mostrando a aparência da tela de configuração das zonas de aquecimento.	23
Figura 3-5	Imagem mostrando a tela com os resultados gráficos de uma simulação....	23
Figura 3-6	Imagem apresentando uma comparação visual entre os resultados gráficos obtidos com o programa First e utilizando-se o MS-Excel.....	26
Figura 4-1	Variação da temperatura em função do tempo na região inferior do tarugo, durante um ciclo de reaquecimento.	28
Figura 4-2	Variação da temperatura em função da posição no interior do forno na região inferior do tarugo, mostrando as zonas e temperaturas programadas do forno.	28
Figura 4-3	Variação da temperatura em função do tempo na região central (núcleo) do tarugo, durante um ciclo de reaquecimento.	30
Figura 4-4	Variação da temperatura em função da posição no interior do forno na região central do tarugo, mostrando as zonas e temperaturas programadas do forno.	30
Figura 4-5	Variação da temperatura em função do tempo na região superior do tarugo, durante um ciclo de reaquecimento.	32
Figura 4-6	Tela principal de entrada de dados do simulador, mostrando os valores que foram alterados.....	34
Figura 4-7	Tela de entrada para os dados das zonas de aquecimento, mostrando os valores que foram alterados.	35

Figura 4-8	Tela de resultados do simulador, mostrando a evolução da temperatura do tarugo em função da posição.....	35
Figura 4-9	Comparação entre os resultados da simulação e da instrumentação, para o núcleo do tarugo.....	36
Figura 4-10	Gráfico da temperatura em função do tempo para o procedimento de instrumentação do núcleo do tarugo.	37
Figura 4-11	Tela de entrada dos dados das zonas de aquecimento, mostrando valor alterado.....	38
Figura 4-12	Curvas de temperatura em função do tempo para a instrumentação do núcleo do tarugo e a respectiva simulação.	39
Figura 4-13	Curvas de temperatura em função do tempo para a instrumentação da região inferior do tarugo e a respectiva simulação.	39
Figura 4-14	Resultados da simulação numérica para um ciclo de reaquecimento de 80 minutos.....	41
Figura 4-15	Resultados da simulação numérica para um ciclo de reaquecimento de 70 minutos.....	42
Figura 4-16	Gráfico comparativo entre resultados das simulações na superfície do tarugo e curvas de reaquecimento mencionadas por Chen et al.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Dados dimensionais do forno de reaquecimento de tarugos – Forno 10500 – GERDAU - AEP.....	17
Tabela 3.2 - Dimensões das zonas de aquecimento.....	18
Tabela 3.3 - Dimensões das zonas e as dimensões relativas.	19
Tabela 3.4 - Tabela exemplificando resultados numéricos obtidos de uma simulação.....	26
Tabela 4.1 - Dados de entrada para o programa, fornecidos pelo pessoal responsável pela operação do forno.	34
Tabela 4.2 - Dados de entrada para o programa para as simulações de 40 ton/hora e 45 ton/hora.	40

LISTA DE ABREVIATURAS

AEP – Empresa Gerdau – Aços Especiais Piratini.

AISI – *American Iron and Steel Institute*.

Arctg – Função inversa da função tangente.

°C – Graus Celsius.

EPA – Esmerilhamento Parcial.

ETO – Esmerilhamento Total.

FIRST – Acrônimo de *Furnace Interactive Research Software Toolkit*.

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo.

h – hora.

Kg – quilograma.

L – Comprimento total do forno.

m – metro.

min– minuto.

MJ – megaJoule.

mm–milímetro.

POSCO–*Pohang Iron and Steel Company*.

s – segundo.

SAC – Sem Acabamento (relativo ao esmerilhamento de tarugos).

SAE – *Society of Automotive Engineers*.

sen – Função seno.

T – Temperatura.

Tc – Temperatura da superfície do tarugo na entrada do forno.

Td – Temperatura da superfície do tarugo na saída do forno.

Ts – Temperatura da superfície do tarugo em determinada posição no forno.

μV – micro Volts.

z – posição do tarugo no interior do forno em determinado instante.

1 INTRODUÇÃO

A união de produtividade e qualidade é o grande desafio das empresas na tentativa de obter um processo competitivo em um mercado extremamente exigente. Deste modo, é crucial um conhecimento dos processos e determinar os melhores parâmetros possíveis para estes.

Além da união entre produtividade e qualidade, atualmente também há uma grande preocupação com os impactos ambientais resultantes das atividades produtivas. O consumo de energia, principalmente de energias não renováveis (combustíveis fósseis) é o principal alvo das empresas, visando a sua utilização com a máxima eficiência possível.

O reaquecimento de tarugos de aço para a posterior conformação mecânica é um dos processos de maior consumo energético ficando atrás somente do processo de fusão do aço. Deste modo, uma grande atenção é dedicada de modo a reduzir este consumo, promovendo uma maior eficiência no consumo de combustível e aumentando a produtividade do forno de reaquecimento. Este aumento da eficiência térmica, além de promover uma diminuição de custos, também está fortemente relacionado à questão ambiental, uma vez que aumentando a eficiência, diminui-se o consumo de combustíveis fósseis e emissão de poluentes.

A utilização de equipamentos e softwares em pequena escala e em ambiente laboratorial é uma excelente alternativa para que as empresas possam obter melhores condições nos processos sem interrupção no ritmo de produção. Deste modo, é importante o conhecimento do processo, sempre que possível quantitativamente através de medições efetuadas durante o andamento normal destes processos e a utilização destes dados para simulações em escala laboratorial.

Considerando-se que as perdas térmicas de um forno através de paredes, gases, fluidos de resfriamento, etc., são relativamente fixos, um aumento da produção horária implica em aumento do rendimento térmico de um forno. Deste modo, O objetivo principal do trabalho foi verificar a possibilidade de aumento da produtividade de 42 para 45

ton/hora, com foco na qualidade de aço SAE 52100, efetuando-se simulações numéricas dos dois ciclos de produção com a utilização de um aplicativo computacional comercial.

Inicialmente foram efetuadas medidas de temperatura dos tarugos, para obtenção do perfil térmico destes durante um processo normal de reaquecimento. Em seguida, estes dados foram confrontados com os resultados de simulações numéricas, sendo efetuadas as correções necessárias. Finalmente foram efetuadas as simulações com os dois ciclos de interesse (42 e 45 ton/hora).

A partir destes resultados observou-se que o ciclo de maior produtividade apresentava um maior gradiente térmico entre as regiões do tarugo, sugerindo um limite operacional do equipamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é realizada uma breve descrição do processo de produção de aço na empresa GERDAU – Aços Especiais Piratini e uma revisão da literatura existente sobre equipamentos e processos de reaquecimento dos aços bem como melhoramentos nos processos de reaquecimento.

2.1 Processo de Fabricação do Aço

O aço é obtido basicamente através de duas fontes: a partir do minério de ferro e a partir da sucata ferrosa. A empresa Gerdau – Aços Especiais Piratini (Gerdau AEP) produz aços longos especiais, constituindo-se de aços para construção mecânica e aços ligados, sendo a sua principal matéria prima a sucata ferrosa.

As áreas produtivas da Gerdau AEP consistem basicamente das seguintes:

- Pátio de sucata.
- Aciaria.
- Preparo de tarugos.
- Laminação.
- Forjaria.
- Transformação mecânica.
- Tratamento térmico.

O processo inicia-se no pátio de sucata e segue para a aciaria, onde é feita a fusão, o refino e o lingotamento do aço. Os lingotes ou tarugos de aço são armazenados em uma área especialmente destinada no aguardo das etapas posteriores. Em seguida segue-se o preparo dos tarugos através de esmerilhamento e posterior inspeção. Finalmente, os tarugos são encaminhados para a laminação onde é efetuado o reaquecimento e a

conformação mecânica para obtenção de barras laminadas ou fio máquina. Após, estes produtos podem seguir para etapas posteriores de acabamento como decapagem, tratamento térmico, trefila, etc. A Figura 2-1 apresenta um diagrama que ilustra esquematicamente este processo.

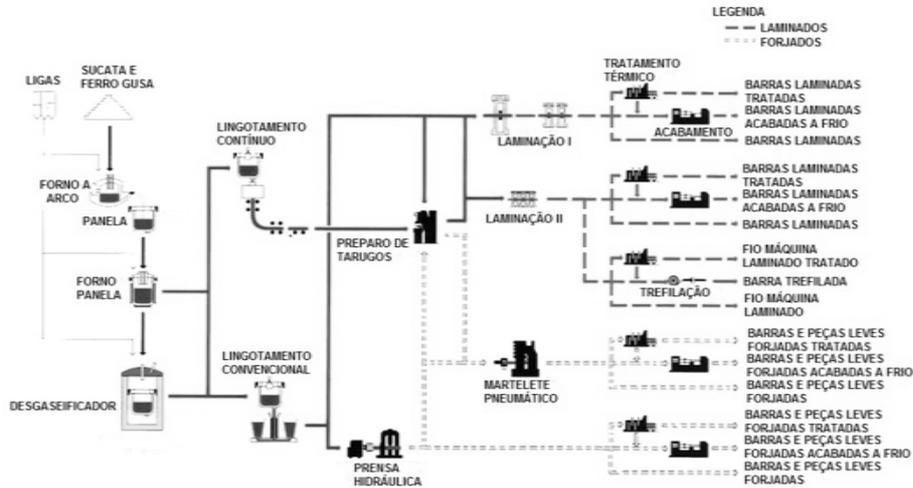


Figura 2-1 Diagrama esquemático do ciclo de produção do aço.(GERDAU – Aços Especiais Piratini).

2.1.1 Aciaria

O produto final da aciaria são os lingotes e os tarugos de aço. Os lingotes, obtidos a partir do lingotamento convencional são encaminhados para a forjaria, onde são posteriormente conformados para barras de secções grandes.

Os tarugos, com secções quadradas que variam de 150 a 200 mm de lado são encaminhados para a laminação, para a sua conformação em barras laminadas e fio máquina.

2.1.2 Forjaria

Os lingotes, produzidos por Lingotamento Convencional pela Aciaria, compõe a matéria prima da forjaria. Estes lingotes sofrem um processo de aquecimento e em seguida são conformados em prensa hidráulica, cuja capacidade é de 1000 t, ou marteletes de 1000, 600 e 250 kg. Também são realizados serviços de usinagem e tratamento térmico nos seus produtos. Estes lingotes também podem ser direcionados para a laminação.

2.1.3 Preparo de tarugos

Nesta área, os tarugos provenientes de Lingotamento Contínuo são submetidos a inspeção de modo a detectar possíveis defeitos superficiais e removê-los através de esmerilhamento antes do processo de reaquecimento e laminação. O esmerilhamento pode ser total (ETO), parcial (EPA) e sem acabamento (SAC).

Nesta área também são inspecionadas barras laminadas redondas, com bitolas maiores do que 76,20 mm e, através de inspeção manual, as barras quadradas maiores que 80,00 mm.

2.1.4 Laminação

A laminação é um processo de deformação plástica de metais onde o material é submetido a altas tensões compressivas resultantes da passagem através de rolos. É realizado pela aplicação de compressão direta sobre o aço, juntamente com a aplicação de força na superfície deste, resultando no conseqüente alongamento na direção perpendicular ao sentido da força.

É o processo de transformação mecânica de metais mais usados na prática porque apresenta uma alta produtividade e um controle dimensional do produto acabado que pode ser bastante preciso. Na laminação a quente os tarugos de aço são colocados em fornos de reaquecimento com temperaturas entre 1100°C e 1300°C (DIETER, 1981).

Na laminação de fio máquina, após sair do forno de reaquecimento, o tarugo passa por um descarepador primário e em seguida pelas cadeiras de laminação iniciais, resultando em uma pequena diminuição de bitola do tarugo. Novamente, um descarepador secundário, e a partir deste ponto ocorre à diminuição contínua de seu diâmetro através da passagem pelos rolos laminadores. Ao longo do trem de laminação os óxidos continuam sendo formados sobre o aço, porém, em função da deformação sucessiva a que o fio máquina é submetido estes são continuamente destacados do aço. Segue-se o resfriamento primário, a formação da bobina de fio máquina e o resfriamento final.

2.1.5 Transformação mecânica

A Transformação Mecânica realiza o acabamento final dos produtos. Os processos aos quais as áreas estão capacitadas a executar destacam-se a decapagem de barras e fio máquina, descascamento, trefila e usinagem.

Também nesta área é realizada a inspeção final dos produtos menores que 80 mm (quadrados e redondos), sendo a inspeção das barras redondas executada em duas linhas automáticas de inspeção por correntes parasitas. Enquanto que para as barras quadradas, a inspeção é visual.

2.1.6 Tratamento térmico

O tratamento térmico localiza-se junto à área de Transformação Mecânica. Devido à diversidade dos produtos e aplicações, a área está equipada com nove fornos, com capacidade de executar os seguintes tratamentos térmicos: normalização, solubilização, têmpera em óleo ou água, revenido, recozimento e esferoidização.

2.2 Aquecimento dos aços.

O aquecimento dos aços é uma etapa importante tanto para tratamentos térmicos como para conformação mecânica. Para o caso da transformação mecânica, o aquecimento proporciona transferência de energia para a carga de modo a facilitar os micromecanismos de deformação plástica. (BEUREN e TRAVI, 2000)

Na fase de aquecimento, tanto de um processo de tratamento térmico como de reaquecimento, considera-se três variáveis básicas:

- Velocidade de aquecimento.
- Temperatura de aquecimento.
- Tempo de permanência na temperatura.

Uma velocidade de aquecimento alta, ou seja, um aquecimento muito rápido ocasiona um gradiente de temperatura no interior do material, o que pode provocar um empenamento muito severo ou mesmo o surgimento de trincas. Assim, a velocidade de

aquecimento deve ser determinada levando-se em consideração a composição química do material e o tamanho das peças a serem aquecidas. (ARAÚJO, 2009).

O aquecimento também deve ser uniforme em toda a secção e comprimento da peça de modo a evitar rupturas internas ou variações tanto na secção com no tamanho de grão do produto acabado. Cada peça de aço deve ser aquecida aproximadamente a mesma temperatura evitando-se assim atrasos na laminação em virtude de ajustes nos cilindros. (ARAÚJO, 2009).

A temperatura de aquecimento é mais ou menos um fator fixo, determinado pela natureza do processo (tratamento térmico ou conformação mecânica) e depende da composição química do aço. Na prática, determina-se uma faixa de temperatura de aquecimento em vez de um valor determinado. Esta faixa também depende do tipo de processo. Em geral, para tratamentos térmicos tem-se uma faixa mais estreita do que para conformação mecânica (CHANDLER, 1995).

Esta temperatura de aquecimento deve ser suficientemente alta para que não ocorra redução de velocidade no laminador nem esforços excessivos sobre os cilindros. Também não deve ocorrer um superaquecimento, pois temperaturas excessivamente altas comprometem as propriedades físicas e estrutura de grão do material (ARAÚJO, 2009).

O tempo de permanência na temperatura tem uma influência semelhante à da temperatura máxima, ou seja, quanto maior o tempo, maior a homogeneidade térmica e química. Em geral, o tempo de permanência é determinado pelas dimensões da peça. No entanto, têm-se que levar em conta que tempos muito longos, além do gasto desnecessário de energia, promovem um crescimento de grão (mais acentuado quanto maior for a temperatura) e causam a oxidação e descarbonetação superficial. (CHANDLER, 1995).

2.3 Fornos de rea aquecimento

Na laminação dos aços, os fornos contínuos desempenham a função de aquecer os produtos intermediários (tarugos, por exemplo), até atingir uma determinada temperatura que os torna suficientemente plásticos para o processamento subsequente.

De acordo com Hauck e Laia, o consumo dos fornos de rea aquecimento pode atingir até 15% do consumo global de uma usina integrada. Este fato justifica os constantes

desenvolvimentos nas áreas envolvidas com o processo de reaquecimento, como, por exemplo, refratários, instrumentação, combustíveis e processos de combustão, automação, operação, etc. O foco principal destes desenvolvimentos está na otimização do processo de aquecimento, com a racionalização do consumo de combustível, aumento de produtividade e, conseqüentemente, redução de custos. (HAUCK e LAIA, 2000).

Os fornos de reaquecimento de aços podem ser divididos em dois grandes grupos:

- Fornos intermitentes ou de bateladas, onde a carga é colocada no forno, sofre o ciclo térmico e é retirada, antes da alimentação posterior.
- Fornos contínuos, onde a carga é colocada e retirada continuamente. Nestes fornos sempre há uma entrada para a alimentação da carga e uma saída para retirada da carga.

Os fornos contínuos iniciaram na Suécia em 1848, quando GustofEckman construiu um forno comprido com soleira inclinada. Para terem um aquecimento mais uniforme, as peças eram viradas manualmente por meio de barras introduzidas por vigias existentes na lateral do forno. Em 1913, Morgan projetou um forno com soleira inclinada e descarga lateral. Quando a espessura das peças ultrapassou 100 mm, os fornos de uma ou duas zonas de aquecimento mostraram-se insatisfatórios, surgindo então os fornos de três até cinco zonas (ARAUJO, 2009).

Os fornos contínuos apresentam uma maior produtividade que os fornos intermitentes, sendo muito comuns na indústria atualmente. As peças em aquecimento movimentam-se continuamente no interior do forno, sendo que este pode ser facilmente automatizado. Devido a isto, estes fornos são utilizados para aquecer grandes volumes de peças. A temperatura pode variar no interior do forno, que pode ser dividido em várias regiões. Assim, ao movimentarem-se no interior do forno, as peças podem ser submetidas a ciclos térmicos relativamente complexos. (ARAUJO, 2009).

Os fornos contínuos utilizados para o reaquecimento de tarugos podem ser de dois tipos basicamente: os fornos tipo *Pusher* e os fornos tipo *Walking Beam*. (ARAUJO, 2009).

2.3.1 Fornos tipo *Pusher*

Os fornos tipo *Pusher* são de concepção mais antiga, sendo que uma característica destes fornos é a maneira de enformamento onde, a cada peça enformada pelo empurrador tem-se uma peça desenformada pela rampa de descarga. Em virtude do processo de enformamento, não existe espaço livre entre as peças dentro do forno e a transferência de calor ocorre basicamente pela superfície superior das peças (ARAUJO, 2009).

Neste tipo de forno pode ocorrer encavalamento no interior do forno se houver uma grande diferença entre a espessura das peças ou se houver acúmulo de carepa na soleira. Também há um limite prático para a soleira no forno tipo *pusher*: se a relação entre o comprimento efetivo da soleira e a espessura da peça exceder 250, há o risco de encavalamento da carga. (ARAUJO, 2009).

2.3.2 Fornos tipo *WalkingBeam*

Neste tipo de forno a movimentação das peças é feita através de um sistema de vigas móveis, refrigeradas e termicamente isoladas, que elevam as peças, movendo-as para frente e depositando-as sobre as vigas fixas, que então sustentam a carga até o próximo ciclo de movimentação das vigas móveis.

Neste forno, as operações de enformamento e extração são independentes, pois não há acoplamento do movimento dos extratores em relação ao movimento de enformamento. Com este sistema têm-se uma maior flexibilidade de operação, sendo possível variar o espaçamento entre as peças e podendo, inclusive, efetuar o reenformamento de peças já extraídas, através da movimentação reversa dos extratores.

Neste tipo de forno, o aquecimento também ocorre pelas paredes laterais da peça, proporcionando um aquecimento mais homogêneo e em menor tempo se comparado com os fornos tipo *pusher*. (ARAUJO, 2009).

Uma variante dos fornos *walking beam* são os fornos *walking hearth* ou soleira móvel. Nos fornos *walkin gbeam*, sendo um sistema com vigas fixas e vigas móveis, temos um espaço entre as vigas, o que possibilita a construção com queimadores na parte inferior, proporcionando uma maior homogeneidade térmica das peças. No entanto, as vigas devem ser refrigeradas, causando uma perda térmica.

Nos fornos *walkinghearth* a soleira é dividida em uma parte fixa e uma parte móvel, não havendo espaço entre elas. Desta forma o aquecimento não pode ser efetuado pela parte inferior, mas a perda térmica é diminuída, pois a soleira é isolada não sendo necessária a refrigeração da mesma.

Portanto, nos fornos de soleira móvel não há o contato contínuo da carga com trilhos resfriados (reduzindo, portanto as marcas ocasionadas por esta característica). No entanto, o sistema de soleira móvel tem um acionamento mais complexo e um custo de investimento maior. Outro fato que deve ser levado em conta é que a carepa desprendida dos tarugos pode ocasionar problemas ao acionamento da soleira. (ARAUJO, 2009)

2.4 Estudos em fornos de reaquecimento

Como visto anteriormente, os fornos contínuos são largamente empregados na indústria em virtude da sua maior produtividade. Na laminação dos aços, o processo de reaquecimento é efetuado exclusivamente por fornos contínuos, com automatização inclusive do processo de enformamento e desenformamento do material. Através de dispositivos especiais de acionamento e de combustão, as placas ou tarugos são movimentados e aquecidos, desde a temperatura de enformamento até a temperatura requerida pelo processo de laminação.

Em geral, os estudos em fornos de reaquecimentos têm seu foco principalmente em simulações do processo de reaquecimento para monitoramento durante o andamento regular do processo ou visando melhorar o desempenho do processo objetivando economia de energia, com aumento da produtividade e, atualmente, menor quantidade de emissão de gases poluentes.

Processos de reaquecimento com controle automatizado requerem peças aquecidas com alta qualidade no que diz respeito a tempo, temperatura, perfil térmico e atmosfera do forno. Os *softwares* de simulação foram desenvolvidos para monitoramento em tempo real, baseados nas condições de operação do forno. (JAKLIC et al, 2007)

Já o aumento da eficiência térmica é importante por duas razões. Primeiramente, a eficiência térmica de um forno está fortemente ligada ao consumo de combustível e, portanto às emissões de gases poluentes. Uma diminuição do consumo de energia ou um aumento da eficiência na utilização do combustível está diretamente relacionado à uma diminuição de geração de dióxido de carbono. Também uma considerável quantidade de

energia, ou combustível fóssil é utilizada no reaquecimento de peças para a elevada temperatura necessária para a conformação mecânica. Assim, uma melhora na eficiência do processo significa redução do consumo energético e, portanto, diminuição dos custos. (HAN et al, 2011, SI et al, 2011, KIM et al, 2007).

O tarugo de aço é aquecido principalmente nas zonas de pré-aquecimento e aquecimento. O aumento da temperatura do tarugo na zona de encharque é pequeno, mas é nesta zona que ocorre a homogeneização térmica. A temperatura média do tarugo aumenta em torno de 1100°C durante o trânsito entre o início da zona de preaquecimento até o final da zona de aquecimento, enquanto aumenta em aproximadamente 150°C durante o transito na zona de encharque. A maior parte da energia é transferida para o tarugo por radiação, enquanto a transferência por condução térmica tem uma pequena contribuição. Em torno de 96% do calor total transferido para o lingote é devido à radiação. (HAN et al, 2010)

Em relação à economia de energia, estudos indicaram que o preaquecimento dos lingotes antes da entrada no forno, mediante a utilização dos gases de saída do forno, é possível e proporciona um aumento da eficiência energética. (SI et al, 2011).

Para atingir uma alta produtividade com qualidade e com uma excelente administração do consumo de energia, é necessário conhecer o desempenho do forno com trabalhos de instrumentação, simulação e modelamento computacional. Trabalhos dessa ordem geralmente não saem do âmbito interno das empresas, o que torna o acesso a este assunto muito restrito.

Além da diminuição do consumo energético do forno e redução da emissão de poluentes, a necessidade de uma distribuição uniforme de temperatura dentro do tarugo na saída deste do forno aumenta a importância de predições rápidas e precisas do processo de reaquecimento tendo em vista o subsequente processo de laminação. Kim (KIM, 2007) desenvolveu um *software* para simulação do ambiente e perfil térmico para um forno de reaquecimento específico na usina POSCO (*Pohang Iron and Steel Company*, Coréia do Sul) obtendo uma boa concordância entre os resultados simulados e medições diretas efetuadas no forno. Neste trabalho também foi considerado que, apesar dos resultados numéricos terem sido aplicados para um equipamento específico, a mesma metodologia pode ser utilizada para modelar processos de reaquecimento em fornos similares. (KIM, 2007).

Um dado importante que também deve ser levado em conta em simulações é a interação entre a atmosfera do forno e as peças em aquecimento. Segundo Han et al (HAN et al, 2012) considerando que a maior parcela de aquecimento do tarugo é efetuada por radiação, deve-se levar em conta a influência da formação de carepa e as suas características de emissividade e condutividade térmica. Em 2010, Jang et al (JANG,2010) desenvolveram um estudo sobre o desenvolvimento da camada de óxidos (carepa) e a sua influência nas características de reaquecimento dos tarugos de aço, onde observaram que a camada de óxidos formada sobre a superfície do tarugo reduziu a taxa de aquecimento do tarugo e aumentou o gradiente térmico no interior deste.

No trabalho de Chen et al (CHEN et al, 2005) é abordado especificamente o rendimento dos fornos contínuos e a possibilidade de aumento deste rendimento. Estes autores efetuaram simulações numéricas e medidas diretas em um forno contínuo. Este forno foi estudado como um sistema e dividido em quatro seções diferentes: zona de recuperação, zona de pré-aquecimento, zona de aquecimento e zona de encharque.

Um desenho esquemático do forno é mostrado na Figura 2-2, conforme fornecido pelos autores:

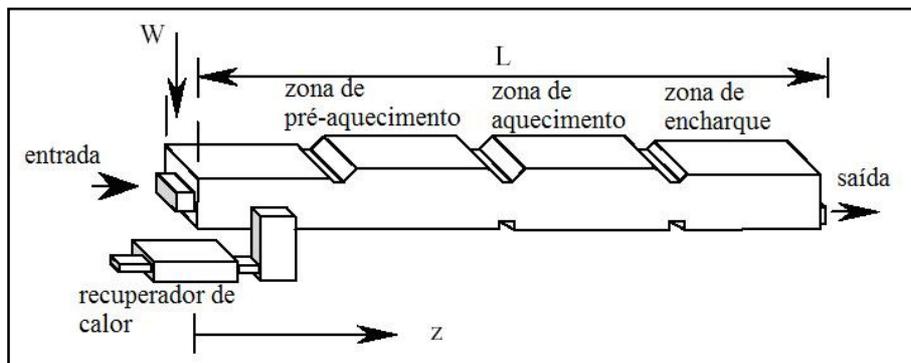


Figura 2-2 Diagrama esquemático de um forno de reaquecimento de tarugos. (Adaptado de Chen et al, 2005).

Depois que os lingotes são colocados no forno de reaquecimento, eles passam sequencialmente pelas zonas de pré-aquecimento, aquecimento e encharque. Cada zona destas apresenta uma temperatura, programada de acordo com a qualidade do aço a ser reaquecido, caracterizando o perfil térmico do forno. Este perfil térmico, além de

determinar a temperatura na superfície do tarugo também afeta o consumo energético do forno.

O perfil térmico do forno, juntamente com o tempo decorrido entre a entrada e a saída, determina a distribuição interna de temperaturas no tarugo.

Neste trabalho Chen et al(CHEN, 2005), mencionam que uma curva de aquecimento, ou perfil térmico do forno, que controla o aquecimento dos tarugos, pode ser descrita pela equação 1:

$$\frac{T_s - T_c}{T_d - T_c} = 0,5 + 0,475 \text{ArcTg} \left[1,75 \left(2 \frac{z}{L} - 1 \right) \right] \quad \text{Eq. (1)}$$

onde T_s é a temperatura da superfície do tarugo em uma determinada posição no forno (z), T_c é a temperatura de entrada e T_d é a temperatura de saída, z é a posição do tarugo em um determinado instante e L é o comprimento total do forno. Observando a relação acima, temos então o fator z/L , que seria a fração da distância percorrida pelo tarugo no forno (e se considerarmos o processo contínuo de reaquecimento seria a fração do tempo total de reaquecimento) e o primeiro termo: $(T_s - T_c)/(T_d - T_c)$ é uma relação adimensional entre as temperaturas, indicando a fração da temperatura final a ser atingida. Aqui deve-se salientar que estes dados foram obtidos pelos autores para um forno em particular.

Neste artigo, os pesquisadores também mencionam que para altas ou baixas taxas de reaquecimento esta curva deve ser ajustada. Considerando estes dois casos especiais, uma situação com altas taxas de aquecimento pode ser descrita por uma curva senoidal expressa por uma função do tipo:

$$\frac{T_s - T_c}{T_d - T_c} = \text{sen} \left(\frac{z}{L} \right) \quad \text{Eq. (2)}$$

Já para uma situação com baixa taxa de produção poderia ser descrita por uma curva expressa por uma função polinomial de segunda ordem:

$$\frac{T_s - T_c}{T_d - T_c} = \left(\frac{z}{L} \right)^2 \quad \text{Eq. (3)}$$

Considerando estas três situações descritas acima, construiram um gráfico da distribuição de temperaturas para as relações citadas acima, conforme mostra a Figura 2-3:

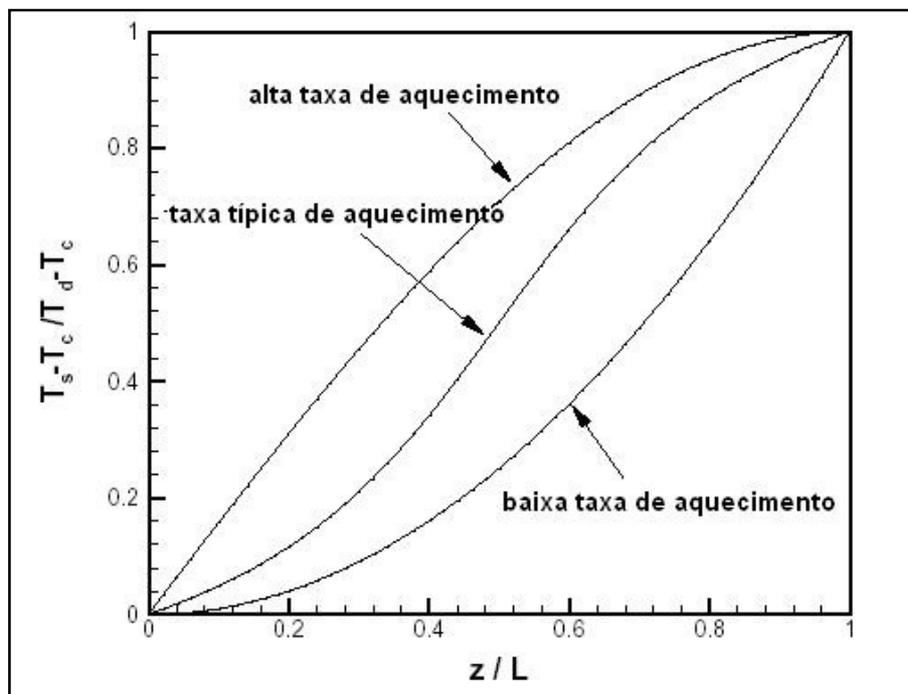


Figura 2-3 Distribuição de temperaturas para algumas curvas de reaquecimento. (Adaptado de Chen et al, 2005).

Após as simulações numéricas e medições efetuadas no forno, Chen et al (CHEN et al, 2005) concluíram que quando a taxa de consumo de combustível e o tempo de retenção do tarugo no forno são levados em consideração, torna-se aparente que uma alta taxa de aquecimento com alta produção apresenta uma utilização mais eficiente do combustível. Isto vem do fato de que, a despeito de uma menor perda energética com uma baixa taxa de aquecimento, isto é insuficiente para compensar um tempo de retenção mais elevado.

Outra conclusão importante é que o rendimento térmico do forno aumenta com o aumento da taxa de produção. Em outras palavras, a eficiência do uso de combustível é maior com uma taxa de produção maior.

Jaklic et al,(JAKLIC et al, 2005) efetuaram um estudo da influência de diferentes espaçamentos entre os tarugos em um forno contínuo de reaquecimento. Para isto utilizaram um modelo de simulação para o processo de reaquecimento de tarugos com secção quadrada de três diferentes dimensões. Posteriormente os dados foram validados

com medições diretas efetuadas com termopares, colocados em diferentes posições nos tarugos, que acompanharam estes durante o processo de reaquecimento.

Segundo os pesquisadores, a produtividade está diretamente relacionada com a frequência de descarga dos tarugos. As condições de reaquecimento dos tarugos são, entretanto, diferentes para diferentes espaços entre os tarugos. No caso de pequenos espaços entre os tarugos, onde eles estão mais próximos uns dos outros, o reaquecimento é assimétrico, principalmente através da superfície superior do tarugo; a soleira está mais fria por que é aquecida indiretamente através dos tarugos. No caso de espaços maiores entre os tarugos, o reaquecimento é mais simétrico, porém o tempo de reaquecimento é menor. A soleira fica mais quente, pois é principalmente reaquecida diretamente pelas paredes do forno e pelos gases aquecidos. Estes fatos sugerem que há um ótimo espaço entre os tarugos onde uma maior produtividade é alcançada. (JAKLIC et al, 2005).

Após efetuadas as simulações, Jaklic et al (JAKLIC et al, 2005) validaram os resultados por medições diretas efetuadas com termopares fixos nos tarugos de teste, que acompanharam o processo de reaquecimento. No caso, foram utilizados 5 termopares do tipo K, com diâmetro de 5mm e comprimento de 35 m. Foi encontrado uma boa concordância entre os algoritmos utilizados na simulação e o ambiente físico do processo de reaquecimento. Foram efetuadas medições com tarugos de secção quadrada, com 180, 220 e 300 mm, que foram reaquecidos durante o processo normal de produção.

Após a análise dos dados, e normalizando-se o espaço entre os tarugos com o tamanho da secção do tarugo, os resultados mostraram que a maior produtividade é alcançada para o mesmo espaço normalizado para todos os três tamanhos de tarugos simulados. O valor ótimo do espaço normalizado fica em torno de 0,5, ou seja, o espaço ótimo entre os tarugos seria a metade do tamanho da secção do tarugo.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais efetuados para verificação da possibilidade de otimização do ciclo de reaquecimento de tarugos. O procedimento experimental foi dividido em três componentes:

1. Instrumentação de um tarugo de aço, com o objetivo de medir as temperaturas e o ciclo térmico real durante o processo de reaquecimento.
2. Ajuste do *software* FIRST (acrônimo de *Furnace Interactive Research Software Toolkit*) a partir dos dados obtidos da instrumentação do tarugo.
3. Simulação do ciclo de reaquecimento com o *software* FIRST. Após o ajuste do *software* com os dados reais, efetuaram-se simulações com o objetivo de verificar as possibilidades de aumento da produtividade do forno.

3.1 Instrumentação de um tarugo de aço

A instrumentação do tarugo foi efetuada para verificar as temperaturas e o ciclo térmico das peças em processo de reaquecimento no forno. O objetivo deste procedimento foi obter dados reais de processo para a posterior verificação do *software* de simulação do processo de reaquecimento.

3.1.1 Características do forno de reaquecimento

O forno de reaquecimento (na denominação da empresa é o forno 10500) é um equipamento utilizado para o reaquecimento de tarugos para posterior processo de laminação. É um forno tipo soleira móvel, com queimadores posicionados no teto e composto basicamente de 4 zonas, a saber: zona de entrada, zona de pré-aquecimento, zona de aquecimento e zona de encharque. Entre a zona de pré-aquecimento e a zona de aquecimento há uma cortina de refratário de aproximadamente 200 mm de espessura para separação entre estas zonas.

Este forno opera utilizando como combustível o gás natural e pode usar como combustível alternativo o gás liquefeito de petróleo (GLP). Em sua construção apresenta um trocador de calor com a finalidade de aquecer o ar necessário para a combustão aumentando, assim, a sua eficiência térmica.

Os queimadores estão localizados nas zonas de pré-aquecimento, aquecimento e encharque. Na zona de entrada não há queimadores, sendo que os tarugos nesta zona iniciam o aquecimento através dos gases aquecidos provenientes das zonas posteriores. Na zona de encharque, além dos queimadores posicionados no teto há também queimadores posicionados na parede frontal.

Em virtude de uma parada de manutenção deste equipamento foi possível efetuar as medidas *in loco* das dimensões internas do forno, bem como visualizar diretamente os dispositivos tais como queimadores, soleira, rolos de entrada e saída, etc.

O forno apresenta um comprimento interno total (de parede a parede) de 17820 mm e um comprimento útil (soleira) de 16700 mm. A altura interna é de 1800 mm e a largura é de 6470 mm. Entre a zona de pré-aquecimento e aquecimento há uma cortina de refratário com 200 mm de espessura, que fica posicionada à 400 mm da soleira. As dimensões das zonas do forno foram obtidas através de diagramas do projeto do forno e confirmadas nas medições efetuadas durante a parada de manutenção. Na Tabela 3.1 são apresentadas as informações gerais resumidas, de acordo com os dados fornecidos.

Tabela 3.1 - Dados dimensionais do forno de reaquecimento de tarugos – Forno 10500 – GERDAU - AEP.

Comprimento útil	16.500 mm
Distância entre eixos de carregamento e descarregamento	17.300 mm
Comprimento interno total	18.000 mm
Largura interna	6.500 mm
Nível piso	± 0
Nível inferior (sala mecânica)	- 3.300 mm
Nível da soleira dentro do forno	770 mm
Altura interna do forno	1.800 mm
Nível superior (coletor geral ar de combustão)	≈ 6.020 mm
Nível do gancho da ponte rolante	6.190 mm

Estes dados dimensionais são necessários como dados de entrada no *software* FIRST para as simulações posteriores. A Figura 3-1 apresenta um diagrama esquemático do forno em vista lateral, apresentando as dimensões de altura e comprimento e a disposição das zonas de aquecimento. Também pode-se verificar o posicionamento da cortina de refratário entre as zonas de pré-aquecimento e aquecimento.

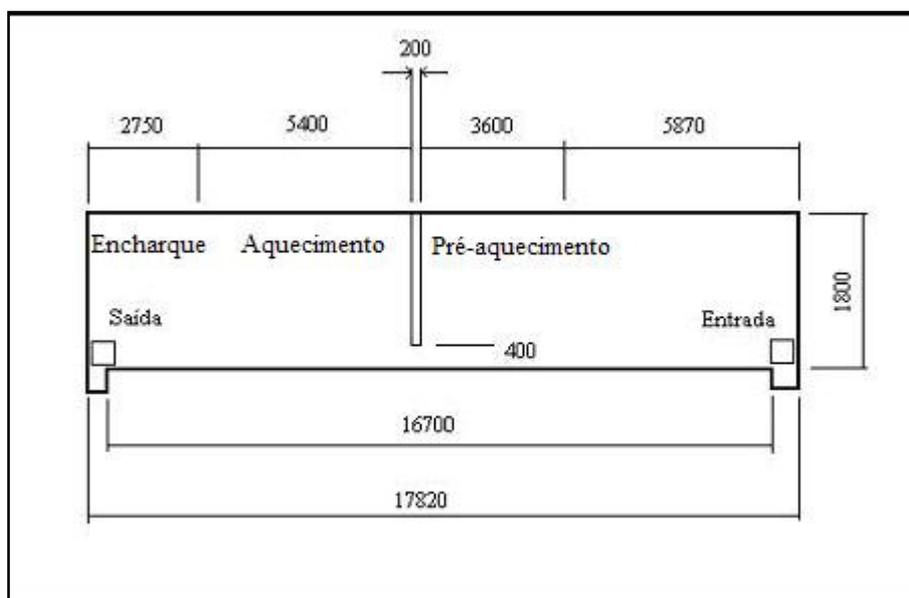


Figura 3-1 Diagrama esquemático do forno de reaquecimento 10500, mostrando uma vista lateral em corte. Dimensões em mm.

A Tabela 3.2 apresenta os dados dimensionais do forno, resumidos por zona. Estes dados foram obtidos através de plantas e diagramas do forno e confirmados em medições diretas efetuadas durante a parada de manutenção, levando-se em consideração a posição dos queimadores e a cortina de refratário.

Tabela 3.2 - Dimensões das zonas de aquecimento.

Zona	Largura (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)
Entrada	6.470	1.800	5.870
Pré-aquecimento	6.470	1.800	3.600
Aquecimento	6.470	1.800	5.400
Encharque	6.470	1.800	2.750

Levando em conta os dados da Tabela 3.2, pode-se considerar a dimensão relativa de cada zona do forno. Assim, se a velocidade do tarugo dentro do forno for constante,

pode-se calcular a posição do tarugo e verificar em qual zona ele se encontra a partir do tempo decorrido desde a entrada da peça.

A Tabela 3.3 mostra os dados dispostos desta maneira, relacionando as zonas do forno, suas dimensões absolutas e as dimensões relativas, expressas em porcentagem do comprimento total do forno.

Tabela 3.3 - Dimensões das zonas e as dimensões relativas.

Zona	Comprimento (mm)	Comprimento relativo (%)
Entrada	5.870	33
Pré-aquecimento	3.600	21
Aquecimento	5.400	31
Encharque	2.750	15

Com os dados da Tabela 3.3 é possível verificar em qual zona se encontrou o tarugo em um determinado instante durante o procedimento de instrumentação e comparar a temperatura programada para cada zona e a temperatura real em que estava a região monitorada do tarugo.

3.1.2 Procedimento de instrumentação do tarugo de aço

A instrumentação do tarugo de aço foi efetuada durante o processo normal de produção, utilizando-se um tarugo de teste com composição química similar à de um aço SAE 52100, onde foram efetuados orifícios para a introdução dos termopares.

Foi escolhido um tarugo de secção quadrada de 150 mm e os termopares foram posicionados na secção central do tarugo em três regiões: região superior, núcleo e região inferior (soleira).

A Figura 3-2 apresenta um diagrama do posicionamento dos termopares nas regiões escolhidas. A temperatura na região superior foi medida à aproximadamente 10 mm da superfície superior do tarugo e na região inferior o termopar ficou posicionado a aproximadamente 10 mm da superfície inferior.

Com base na literatura pesquisada (JAKLIC et al, 2005) e considerando as faixas de temperatura do processo, foram utilizados termopares do tipo K, com 35 m de comprimento e 3,5 mm de diâmetro.

De acordo com dados obtidos do fornecedor (Grupo Ecil, 2012) os termopares tipo K são formados pela junção de fios de Chromel e Alumel, sendo adequados para medição contínua desde -200 °C até 1260 °C, em atmosferas oxidantes ou completamente inertes. Este termopar é de uso geral e é mais resistente à oxidação em temperaturas altas do que os tipos E, J e T. Tem um baixo custo e está disponível em diversas montagens. Apresenta uma sensibilidade de aproximadamente $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

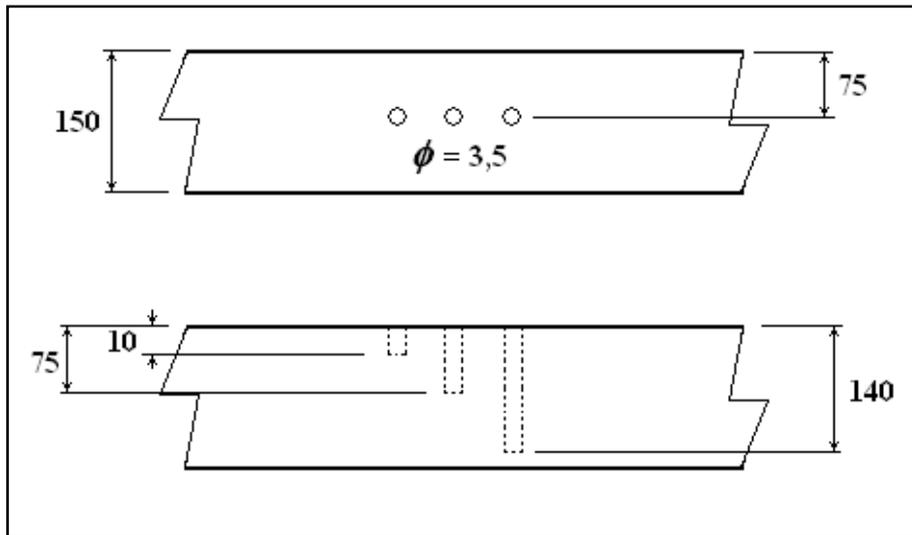


Figura 3-2 Diagrama das furações efetuadas no tarugo de teste para a inserção dos termopares.

Por questões de segurança e para não ocorrer uma interrupção prolongada no processo de aquecimento, foi efetuada uma medida em cada posição no tarugo por vez. Ou seja, para a obtenção das medidas nas três posições do tarugo foram necessários três processos de aquecimento com o tarugo.

O termopar foi conduzido por um tubo metálico inserido em uma vigia frontal no forno e guiado para a porta lateral de entrada dos tarugos. O tarugo de teste foi previamente colocado na posição de entrada e o termopar foi inserido no furo desejado. Em seguida, o tarugo foi transportado para dentro do forno, seguindo o processo normal de aquecimento.

Os dados de temperatura foram adquiridos por um registrador marca Ecil, que foi conectado ao termopar por uma extensão e com os dados de temperatura sendo adquiridos a cada minuto. O registrador ficou localizado na sala de controle do forno. Os dados foram coletados através de mídia removível (disquete) e analisados com a utilização de planilha eletrônica.

Após o ciclo de reaquecimento, o tarugo foi retirado do forno por uma porta de saída lateral no forno, oposta àquela utilizada para o processo normal de laminação. Com este procedimento o andamento normal da produção não ficou prejudicado e a remoção do termopar foi facilitada. Devido à necessidade da fixação do termopar ao tarugo para evitar o seu deslocamento da posição durante o processo, na saída do tarugo os termopares utilizados para a instrumentação das regiões inferior e núcleo se romperam, ficando inutilizados. Portanto, foram utilizados três termopares para o procedimento completo da instrumentação.

Como a medida de temperatura foi efetuada em uma região do tarugo de cada vez, o procedimento foi efetuado em três dias diferentes, inclusive para a necessidade do tempo de resfriamento do tarugo. Devido a isto, o resultado para cada região do tarugo corresponde a um tempo de reaquecimento diferente, ou seja, não há uma relação entre as temperaturas de cada região.

Durante o procedimento da instrumentação foram verificados quais os parâmetros programados para o forno, tais como temperaturas nas diversas zonas, tempo de passe e distância do passe. As temperaturas e o tempo de passe foram programados de acordo com a qualidade do aço que estava sendo processada no momento. O tamanho do passe não foi modificado durante o procedimento, sendo mantido em 318 mm. Sendo a distância útil do forno de 16700 mm e o tamanho do passe de 318 mm, durante os procedimentos de instrumentação havia 52 peças no interior do forno.

3.2 Ajuste do *software* FIRST

3.2.1 O *software* FIRST

O *software* FIRST proporciona uma simulação do processo de reaquecimento em forno contínuo tipo *walking beam*. A partir de dados de entrada tais como dimensões das peças e produção horária, tipo de combustível, utilização de recuperador de calor, perdas térmicas e dimensões do forno, ele fornece resultados simulados do aquecimento das peças, bem como gráficos da evolução das temperaturas, gráficos de decarbonetação e empenamento das peças no forno. Este *software* foi desenvolvido pela *Thermware System* e adquirido juntamente com o forno, por ocasião da sua instalação e a versão utilizada é a 1.2.

Na Figura 3-3 pode-se ver a tela principal das configurações dos dados de entrada. Constam aí os dados de identificação, dimensões totais do forno, dimensões dos produtos, taxa de produção, tamanho do passo da soleira, tipo de combustível e recuperador de calor, sendo estes dados inseridos pelo usuário.

Na Figura 3-4 observa-se a tela para a configuração das diferentes zonas de aquecimento do forno. Esta tela é acessada através do botão “Top Z”, na tela principal de configurações. Nesta seção colocam-se os dados de cada zona de aquecimento: dimensões, perdas térmicas por zona e temperaturas. As temperaturas são as determinadas para o processo de reaquecimento, de acordo com a qualidade do aço a ser aquecido, as dimensões são as características do forno e as perdas térmicas calculadas a partir dos dados construtivos do forno.

Name		TAR 150x5950 MM	
Cust	AEP		
Date	02/05/05		

FURNACE CONFIGURATION			
Length	16900	Ht	1820
Width	6500	Hb	0

PRODUCT DATA			
Length	5950	Steel	4
Thick	150	ChT°	20
Width	150	Step	330
Prod	42	Surf	100
Nb of prod	51		

FUEL			
Type	gas	PCI	107000
PC	22	VF	24
Air Excess	10		

AIR RECUPERATOR			
W.GAS		AIR	
T° out	600	T° out	450
T° in	580	T° Burn	420
T° Calc	111	Recup (Y/N)	Y

Buttons: Top Z, OK

Help: Operator Name

Figura 3-3 Imagem mostrando a aparência da tela principal de configuração do software.

OK	Absc	Height	Losses	Temp
	(mm)	(mm)	(MJ/h)	(°C)
zone 1	5390	1820	450	-1
zone 2	8995	1820	150	850
zone 3	9245	400	1000	-1
zone 4	14570	1820	1200	1200
zone 5	16900	1820	1600	1230
zone 6	0	0	0	0
zone 7	0	0	0	0

Figura 3-4 Imagem mostrando a aparência da tela de configuração das zonas de aquecimento.

Os dados apresentados na Figura 3-3 e Figura 3-4 já constavam em um arquivo existente no *software*. Com estes dados, pode-se efetuar uma simulação. Os resultados desta simulação podem ser visualizados diretamente no programa através do menu principal, sendo apresentados de forma gráfica, com as curvas de aquecimento, empenamento, oxidação (carepa) e descarbonetação bem como os resultados de consumo de combustível, temperatura de saída etc.

A Figura 3-5 mostra a tela com os resultados gráficos de uma simulação efetuada com os dados constantes na Figura 3-3 e Figura 3-4.

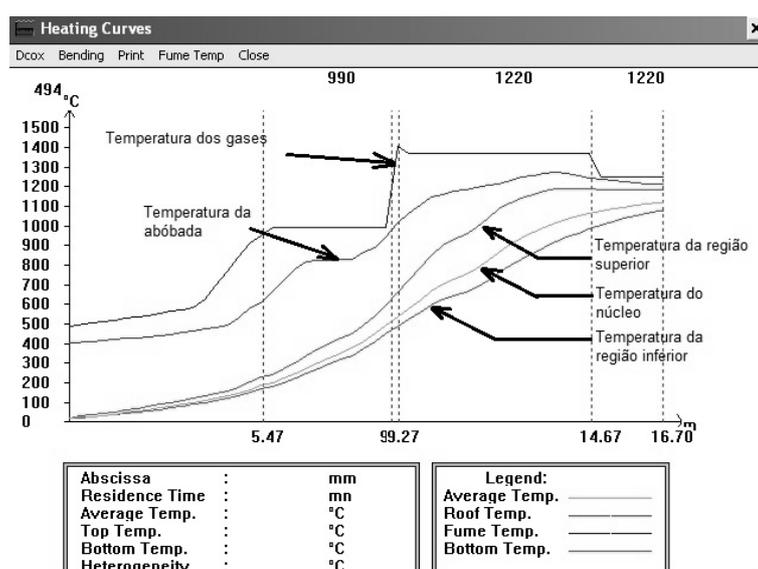


Figura 3-5 Imagem mostrando a tela com os resultados gráficos de uma simulação.

Porém, os resultados apresentados desta forma proporcionam uma comparação difícil entre duas ou mais simulações, pois as curvas são apresentadas para cada simulação e não há a possibilidade de superposição de curvas de diferentes simulações.

No entanto, ao se efetuar uma simulação, o programa gera automaticamente cinco arquivos de resultados: RESULT1.RES, RESULT2.RES, RESULT3.RES, RESULT4.RES e TRANSFER.RES. Estes arquivos, com exceção do TRANSFER.RES podem ser abertos com o MS-word ou com o MS-excel. O arquivo RESULT1.RES apresenta os resultados da simulação, bem como os dados de entrada e identificação, produção horária, temperatura de saída, etc. Os dados a seguir exemplificam os resultados constantes neste arquivo para a simulação indicada na Figura 3-5.

```
tar150.cfg          AEP          02/05/05          Page 1
-----
Ref : AEP
Operator : TAR_150x5950_MM
Date    : 02/05/05
-----
```

```

                          Furnace data
L : 16.90m  ZS : 5  HS : 1.82m  PC : 24.20  TW.Gas : 580øC
1 : 6.50m  ZI : 0  HI : 0.00m  VF : 26.20  Tair   : 450øC
-----
```

	Ztop	Abs	T.abs	Height	Losses	Temp
1	5390mm	-1mm	1670mm	450MJ/h	-1øC	
2	8995mm	7193mm	1670mm	150MJ/h	850øC	
3	9245mm	9120mm	250mm	1000MJ/h	-1øC	
4	14570mm	11908mm	1670mm	1200MJ/h	1200øC	
5	16900mm	15735mm	1670mm	1600MJ/h	1230øC	

```

                          THERMAL BALANCE
Ztop  Temp  Fuel Consumption  losses  P enth  G enth  W.G enth
(øC)      (Nm3/h)  (%)  (MJ/h)  (MJ/h)  (MJ/h)  (MJ/h)
-----
          1    -1      0.00    0.00    39    1521    0    -1560
          2   850   -68.21 -18.40    90    5452   -8018 -13561
          3    -1      0.00    0.00   1070   1313    0    -2375
4  1200   347.97  93.87   2151   17632  40907  21123
5  1230    90.92  24.53   3109   2584   10687  4994
-----
```

```

Production      : 42.00 t/h
Specific heat consumption : 944.35 MJ/t :225.92 Kcal/kg
Fuel total consumption   : 370.68 Nm3/h
Waste gas temperature out of Furnace : 367 øC
Waste gas temperature out of Air Recup : 154 øC
-----
```

Air Temperature (at burner): 270 °C

Product data :

Length : 5950 mm
Width : 150 mm
Height : 150 mm
Weight : 1024 kg
Step : 330 mm
Steel Grade : BISRA 4
Emissivity correction : 100 %
Heating time : 74.62 mn
Charging temperature : 20 °C
Discharging temperature : 1188 °C

Production : 42.00 t/h
Fuel calorific value : 107000 Kj/Nm³

Os resultados constantes no arquivo RESULT2.RES podem ser abertos com o MS-excel, resultando em uma planilha contendo os dados necessários para a construção das curvas de aquecimento. Esta planilha apresenta a variação das temperaturas em relação ao tempo de permanência no forno e em relação à posição dentro do forno. Contém sete colunas, sendo as duas primeiras relativas, respectivamente, à posição e ao tempo e as seguintes relativas às temperaturas.

Considerando as colunas da esquerda para a direita, a primeira coluna (Abs (m)) apresenta os dados de distância percorrida dentro do forno, em metros (m).

A segunda coluna (Time (min)) apresenta os dados de tempo, desde a entrada do tarugo até a saída, em minutos (min).

A terceira, quarta e quinta colunas apresentam os dados de temperatura do tarugo, sendo respectivamente a temperatura média ($T_m(^{\circ}\text{C})$), a temperatura da superfície superior ($T_t(^{\circ}\text{C})$) e a temperatura da superfície inferior ($T_b(^{\circ}\text{C})$), em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

A quinta e a sexta coluna apresentam os dados de temperatura, respectivamente, da abóbada do forno ($TR_t(^{\circ}\text{C})$) e dos gases no interior ($TF_t(^{\circ}\text{C})$).

A Tabela 3.4 exemplifica os dados relacionados desta maneira. A partir destes dados, pode-se construir gráficos comparativos entre várias simulações, tendo como variável independente tanto o tempo como a posição no interior do forno, bem como comparar os resultados de simulações com os resultados de medidas de temperatura efetuadas no processo. Também pode-se calcular taxas de aquecimento e deste modo efetuar simulações físicas em pequena escala, em fornos de laboratório.

Tabela 3.4 - Tabela exemplificando resultados numéricos obtidos de uma simulação.

Abs (m)	Time (min)	Tm (°C)	Tt (°C)	Tb (°C)	TRt (°C)	TFt (°C)
0	0	20	20	20	337	412
0,33	1,46	22	26	22	338	415
0,66	2,93	26	31	24	340	421
0,99	4,39	29	36	26	343	427
1,32	5,85	33	40	30	347	433
1,65	7,32	37	45	33	352	439
1,98	8,78	41	51	37	356	446
2,31	10,24	46	57	42	360	453
2,64	11,7	52	64	47	365	460
2,97	13,17	58	71	52	372	467
3,3	14,63	64	77	57	378	474
3,63	16,09	70	84	63	385	481

A Figura 3-6 apresenta uma imagem comparativa entre a tela com os resultados gráficos da simulação, gerados pelo software e o gráfico correspondente efetuado com o programa MS-Excel, a partir dos dados numéricos fornecidos no resultado da simulação. Pode-se verificar a semelhança entre os gráficos. Além disto, com os gráficos gerados com a utilização do MS-Excel pode-se plotar mais de uma simulação no mesmo gráfico, facilitando uma comparação entre elas.

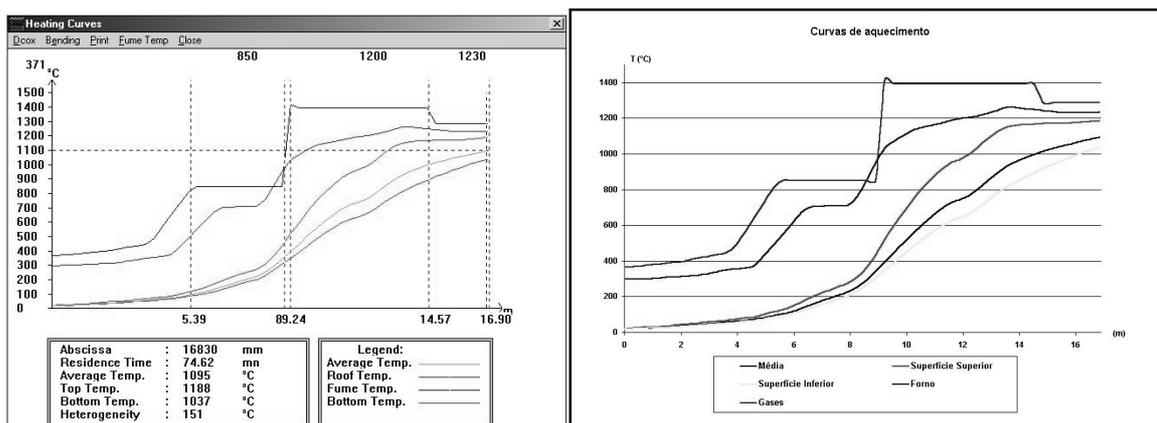


Figura 3-6 Imagem apresentando uma comparação visual entre os resultados gráficos obtidos com o programa First e utilizando-se o MS-Excel.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados inicialmente os resultados do trabalho de instrumentação do tarugo e ajustes do software com base nestes resultados. Em seguida são apresentados os resultados das simulações numéricas para os ciclos de 80 e 70 minutos representando taxas de produção respectivamente de 42 e 45 ton/hora. Por fim é efetuada a discussão dos resultados deste trabalho em relação ao exposto na revisão bibliográfica

4.1 Resultados da instrumentação

Instrumentação da região inferior do tarugo.

Durante a instrumentação da região inferior do tarugo o termopar ficou posicionado a uma profundidade de 140 mm no interior do tarugo, ou seja, a 10 mm da soleira.

De acordo com os dados fornecidos pelos responsáveis da operação, o forno estava programado para operar com os seguintes parâmetros:

- Temperatura da zona de pré-aquecimento: 1000°C.
- Temperatura da zona de aquecimento: 1230°C.
- Temperatura da zona de encharque: 1230°C.
- Passe programado: 96 segundos.

Considerando-se o tempo de passe programado de 96 segundos, ou seja, uma peça aquecida sendo retirada a cada 96 segundos, a produção horária foi de 37 peças por hora e considerando que a quantidade de peças no interior do forno foi de 52, o tempo total do processo de reaquecimento foi de aproximadamente 84 minutos.

Na Figura 4-1 observa-se a variação da temperatura em função do tempo para a região inferior do tarugo. Pode-se observar que esta região do tarugo atingiu uma temperatura de 1210°C ao final do processo de reaquecimento, na saída do tarugo. Porém não houve a estabilização da temperatura, ou seja, não houve um patamar de temperatura.

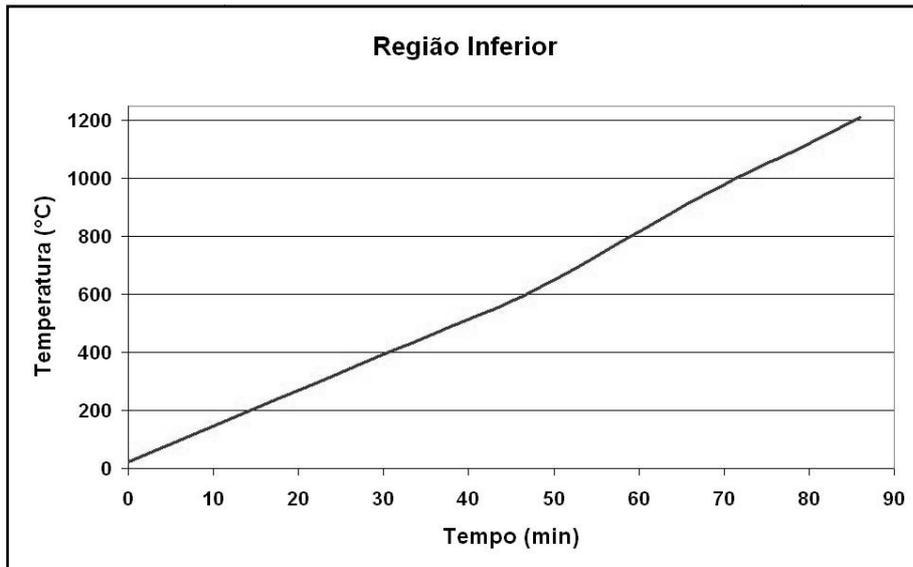


Figura 4-1 Variação da temperatura em função do tempo na região inferior do tarugo, durante um ciclo de reaquecimento.

Na Figura 4-2 observa-se a variação da temperatura em função da posição no interior do forno. Os dados de posição foram calculados a partir do tempo de percurso do tarugo no interior do forno e do tempo total de duração do processo, sendo considerados os dados da Tabela 3.3 para as dimensões das zonas. As temperaturas programadas foram fornecidas pela pessoal responsável pela operação do forno.

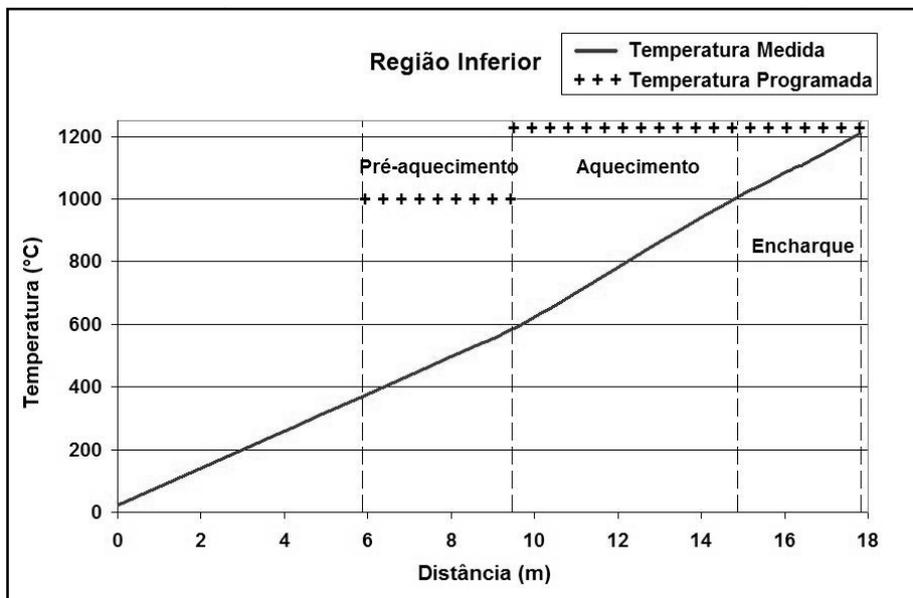


Figura 4-2 Variação da temperatura em função da posição no interior do forno na região inferior do tarugo, mostrando as zonas e temperaturas programadas do forno.

Instrumentação da região central (núcleo) do tarugo.

Durante a instrumentação da região central do tarugo o termopar ficou posicionado a uma profundidade de 75 mm no interior do tarugo, ou seja, no núcleo do tarugo.

De acordo com os dados fornecidos pela operação, o forno estava programado para operar com os seguintes parâmetros:

- Temperatura da zona de pré-aquecimento: 990°C.
- Temperatura da zona de aquecimento: 1220°C.
- Temperatura da zona de encharque: 1220°C.
- Passe programado: 80 segundos.

Considerando-se o tempo de passe programado de 80 segundos, ou seja, a cada 80 segundos foi retirada uma peça aquecida, a produção horária foi de 45 peças por hora e considerando que a quantidade de peças no interior do forno foi de 52, o tempo total do processo de reaquecimento seria de 70 minutos.

Porém, devido a pequenos tempos de espera provenientes de ajustes do processo, o tempo real de percurso do tarugo de teste foi de 80 minutos, ou seja, o tempo de passe foi de 92 segundos, resultando em uma produção de 40 peças por hora.

A Figura 4-3 apresenta o resultado das medidas de temperatura efetuadas na região central do tarugo.

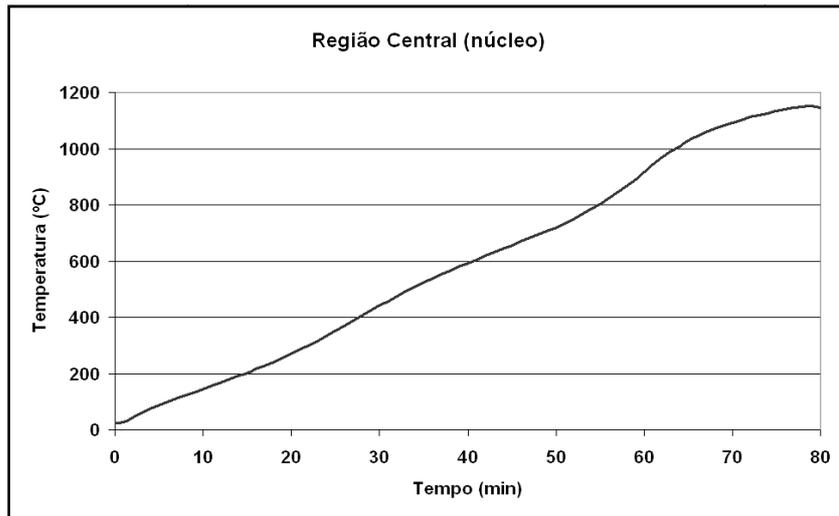


Figura 4-3 Variação da temperatura em função do tempo na região central (núcleo) do tarugo, durante um ciclo de reaquecimento.

Os resultados mostrados na Figura 4-3 indicam que a região central do tarugo atingiu uma temperatura aproximada de 1153°C quando da saída do tarugo do forno, ficando abaixo da temperatura programada. Também observa-se que houve uma tendência para estabilização da temperatura, porém não ocorrendo esta estabilização.

A figura 4.4 mostra a variação da temperatura em função da posição no interior do forno. As temperaturas programadas foram fornecidas pela pessoal responsável pela operação do forno.

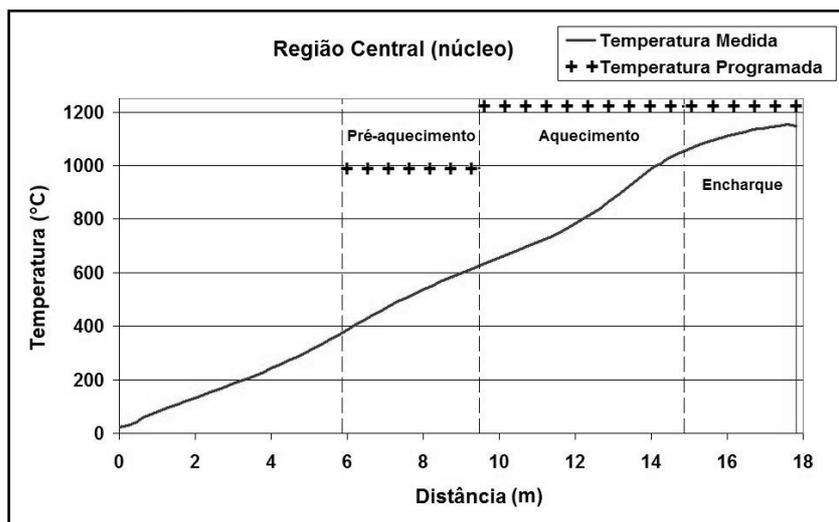


Figura 4-4 Variação da temperatura em função da posição no interior do forno na região central do tarugo, mostrando as zonas e temperaturas programadas do forno.

Instrumentação da região superior do tarugo.

Durante a instrumentação da região superior do tarugo o termopar ficou posicionado a uma profundidade de 10 mm de profundidade a partir da superfície superior do tarugo.

De acordo com os dados fornecidos pela operação, o forno estava programado para operar com os seguintes parâmetros:

- Temperatura da zona de pré-aquecimento: 950°C.
- Temperatura da zona de aquecimento: 1140°C.
- Temperatura da zona de encharque: 1140°C.
- Passe programado: 100 segundos.

Considerando-se o tempo de passe programado de 100 segundos, ou seja, a cada 100 segundos seria retirada uma peça aquecida, a produção horária seria de 36 peças por hora e considerando que a quantidade de peças no interior do forno foi de 52, o tempo total do processo de reaquecimento seria de 87 minutos.

No entanto, no decorrer do procedimento de instrumentação ocorreu uma parada na produção em virtude de problemas ocorridos em um laminador. Esta parada para manutenção ocasionou uma interrupção na movimentação das peças no forno de aproximadamente 40 min. Segundo dados fornecidos pela operação, a interrupção ocorreu após 47 minutos da entrada do tarugo de teste. Considerando que o tempo programado para o processo de reaquecimento seria de 87 minutos, tem-se que o tarugo ficou parado numa posição de aproximadamente 54% da distância total que seria percorrida no interior do forno, ou seja, no fim da zona de pré-aquecimento, próximo à cortina de refratário.

A Figura 4-5 mostra o resultado gráfico da temperatura em função do tempo, para a instrumentação da região superior do tarugo. As duas retas verticais indicam aproximadamente o intervalo de tempo em que ocorreu a interrupção do processo, de acordo com os dados fornecidos pelo pessoal da operação.

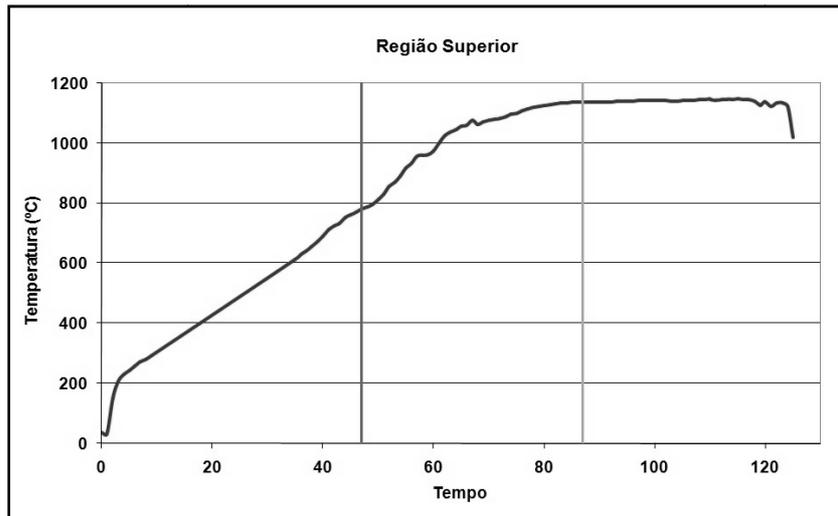


Figura 4-5 Variação da temperatura em função do tempo na região superior do tarugo, durante um ciclo de reaquecimento.

Os resultados mostrados na Figura 4-5 indicam que houve uma estabilização da temperatura na região superior do tarugo. Porém este resultado pode ser consequência da interrupção do processo. Com a parada da peça no interior do forno foi possível ocorrer a estabilização. Os dados indicam que a região superior atingiu uma temperatura de 1147°C, que concorda com a temperatura final ajustada para o forno que foi de 1140°C.

Devido a esta parada no processo não há significância em plotar um gráfico de temperatura em função da distância, pois poderia haver um erro na tentativa de mostrar a evolução da temperatura no ponto em que a peça ficou parada no interior do forno. Do gráfico da Figura 4-5 pode-se concluir que após um tempo de aproximadamente 90 minutos ocorreu uma estabilização da temperatura na sua região superior e que esta temperatura coincidiu com a temperatura ajustada do forno.

4.1.1 Ajuste dos parâmetros do software com os dados obtidos da instrumentação

Com os dados das dimensões do forno e do combustível utilizado, fornecidos pela operação, mais os dados obtidos através da instrumentação do tarugo, foram efetuadas simulações com o *Software* FIRST para verificar a compatibilidade entre os dados reais de temperatura e os resultados simulados. Com base na comparação entre os resultados da instrumentação e os resultados simulados, foram efetuados ajustes em alguns parâmetros do simulador na tentativa de obter uma maior concordância entre os resultados reais e os simulados.

Para as comparações iniciais foram utilizados os resultados obtidos da instrumentação do núcleo do tarugo, pois durante este procedimento o forno operou sem nenhuma parada, com o processo permanecendo estável durante todo o reaquecimento do tarugo, resultando em um gráfico real da evolução da temperatura em função do tempo. Como o *software* apresenta resultados para uma operação contínua do forno, se houver alguma interrupção no processo o perfil de temperatura real sofrerá um desvio daquela indicada pelo simulador.

Assim, a comparação entre os resultados reais de temperatura e os resultados da simulação, bem como os ajustes dos parâmetros de entrada do simulador foram efetuados tomando-se como base os resultados obtidos através da instrumentação do núcleo do tarugo. Depois de obtido um resultado compatível na comparação entre a simulação e a instrumentação na região do núcleo do tarugo, foram avaliados os resultados comparando-se a simulação para a região inferior e os resultados da instrumentação para esta região.

Não foi efetuada uma comparação entre os resultados simulados e a instrumentação efetuada na superfície superior em virtude da interrupção no processo ocorrida durante as medidas. Assim, a comparação não seria significativa.

Primeiramente efetuou-se uma simulação com os dados dimensionais do forno e combustível, bem como os parâmetros que estavam ajustados para o forno durante a instrumentação, como a temperatura de cada zona e a produção horária. Não foram alteradas as perdas térmicas de cada zona, sendo mantidos os valores já existentes na configuração do programa.

As tentativas de modificação das perdas térmicas durante o estudo do programa mostraram que as alterações destes parâmetros não ocasionam significativa mudança na evolução da temperatura das peças, porém apresentam mudanças significativas nos resultados de consumo de combustível. Para comparação destes resultados seriam necessários estudos das condutividades térmicas das paredes do forno bem como diversas medidas de temperatura, tanto dos gases de entrada e dos gases de saída, como as temperaturas externas do forno e todas as possíveis perdas térmicas.

A Tabela 4.1 indica os dados de entrada que foram fornecidos ao programa e as Figuras 4.6 e 4.7 mostram, respectivamente, a tela principal de entrada de dados e a tela para as configurações das zonas.

Tabela 4.1 - Dados de entrada para o programa, fornecidos pelo pessoal responsável pela operação do forno.

Tamanho do passo	318 mm
Tempo do passo programado	92 s
Produção horária	40 peças/hora
Temperatura da zona de pré-aquecimento	990°C
Temperatura da zona de aquecimento	1220°C
Temperatura da zona de encharque	1220°C

The screenshot shows a 'Main configuration' window with the following sections and values:

- General:** Name: TAR_150x5950_MM, Cust: AEP, Date: 02/05/05
- FUEL:** Type: gas, PCI: 107000, PC: 22, VF: 24, Air Excess: 10
- FURNACE CONFIGURATION:** Length: 16700, Ht: 1820, Width: 6500, Hb: 0
- PRODUCT DATA:** Length: 5950, Steel: 4, Thick: 150, ChT°: 20, Width: 150, Step: 318, Prod: 40, Surf: 100, Nb of prod: 52
- AIR RECUPERATOR:** W.GAS: T° out: 600, T° in: 580, T° Calc: 111; AIR: T° out: 450, T° Burn: 420, Recup [Y/N]: Y
- Buttons:** Top Z, OK
- Footer:** Help: Operator Name

Figura 4-6 Tela principal de entrada de dados do simulador, mostrando os valores que foram alterados.

Top Zone Configuration				
OK	Absc	Height	Losses	Temp
	(mm)	(mm)	(MJ/h)	(°C)
zone 1	5470	1820	450	-1
zone 2	9070	1820	150	990
zone 3	9270	400	1000	-1
zone 4	14670	1820	1200	1220
zone 5	16700	1820	1600	1220
zone 6	0	0	0	0
zone 7	0	0	0	0

Figura 4-7 Tela de entrada para os dados das zonas de aquecimento, mostrando os valores que foram alterados.

Após a modificação dos valores dos dados de entrada, foi efetuada a simulação. O resultado gráfico desta simulação encontra-se na Figura 4-8. Este é o resultado apresentado pela tela do simulador.

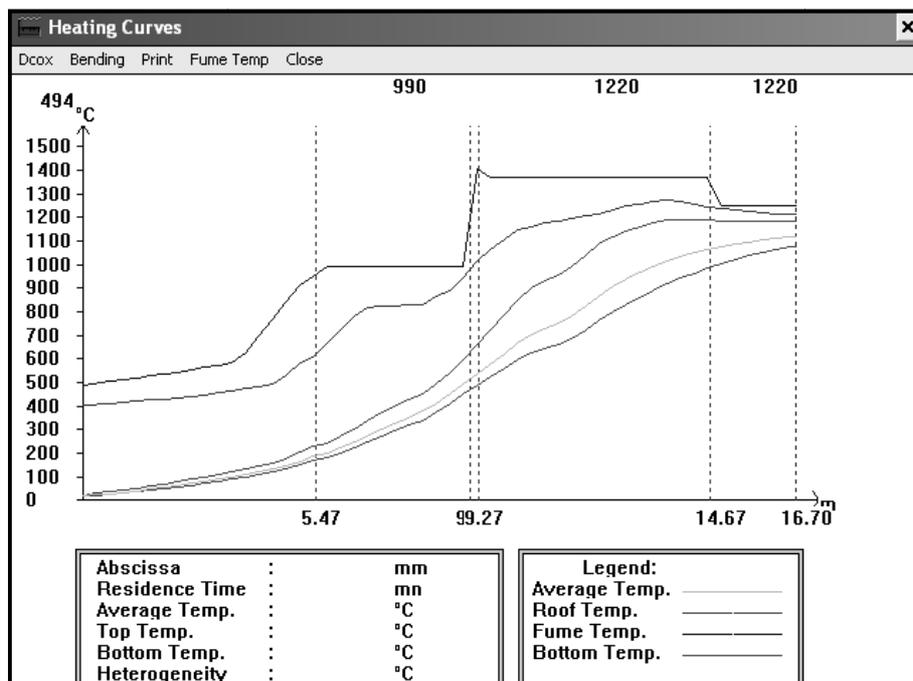


Figura 4-8 Tela de resultados do simulador, mostrando a evolução da temperatura do tarugo em função da posição.

Na Figura 4-9, encontra-se um gráfico gerado a partir do programa MS-Excel, com os dados adquiridos no arquivo RESULT2.RES, gerado pelo simulador. Com este gráfico também está plotada a curva de temperatura em função do tempo, resultante da instrumentação do núcleo do tarugo. Para uma melhor visualização, os resultados do simulador referem-se somente ao núcleo do tarugo. Nesta figura também se observam linhas verticais, demarcando os intervalos de tempo em que o tarugo permaneceu em cada zona (considerando o tempo total de trânsito e os valores percentuais do tamanho de cada zona, conforme mostrado na Tabela 3.3).

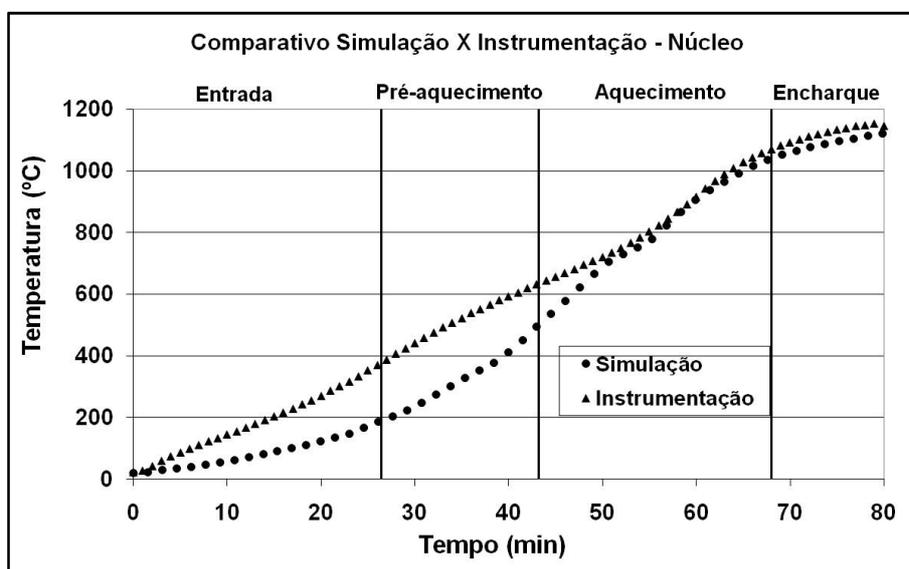


Figura 4-9 Comparação entre os resultados da simulação e da instrumentação, para o núcleo do tarugo.

Com a comparação efetuada na Figura 4-9, pode-se verificar que há uma diferença significativa entre os resultados do simulador e os resultados das medidas efetuadas no núcleo do tarugo para temperaturas abaixo de 800 °C.

Para os ajustes dos parâmetros de entrada do programa, não foram alteradas a produção horária nem as dimensões totais do forno, bem como foram mantidas as perdas térmicas.

Como primeira tentativa, foi efetuada uma alteração no coeficiente de emissividade térmica, indicado como "SURF" na parte inferior esquerda da tela principal do programa (Figura 4-6). Os valores, segundo a tela de ajuda do próprio programa, podem variar de 0 a

100%. Tentou-se aumentar este parâmetro para valores maiores que 100%, o que indicou uma tendência para um ajuste melhor entre os resultados simulados e os reais, porém ainda ocorrendo uma diferença na zona de entrada.

No entanto, durante o procedimento da instrumentação, para a fixação do termopar ao tarugo de teste, o termopar foi guiado através da vigia frontal do forno até a porta de entrada de tarugos. Durante este procedimento, enquanto o termopar passou da vigia frontal até a porta de entrada de tarugos, ele ficou exposto ao ambiente interno do forno, medindo, portanto, a temperatura na zona de entrada. Como o termopar estava conectado ao registrador, esta temperatura também pode ser verificada, embora por um curto espaço de tempo. Na Figura 4-10 pode-se observar o gráfico de temperatura em função do tempo durante todo o tempo em que o termopar esteve conectado ao registrador, durante a instrumentação do núcleo do tarugo.

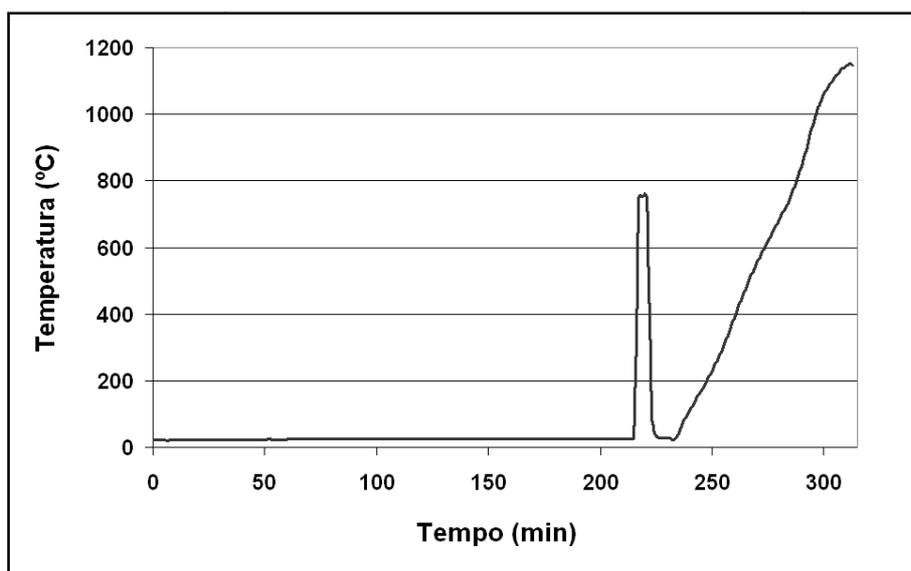


Figura 4-10 Gráfico da temperatura em função do tempo para o procedimento de instrumentação do núcleo do tarugo.

Pode-se observar na Figura 4-10 que no período inicial a temperatura se manteve constante, em torno de 24°C, ou seja, próximo a temperatura ambiente. A seguir, observa-se um pico de temperatura, que é o intervalo de tempo em que o termopar passa através da vigia frontal e é direcionado para a porta lateral de entrada do forno. Em seguida a temperatura diminui novamente, durante o procedimento de fixação do termopar no tarugo.

A partir desta observação foi obtida uma temperatura aproximada na zona de entrada do forno, que se situa em torno dos 700°C.

Este valor de temperatura foi colocado como dado de entrada no simulador para verificar qual seria o comportamento da curva de temperatura em função do tempo. Assim, mantendo-se todos os outros dados de entrada da tela principal constantes, alterou-se apenas a temperatura da zona de entrada para 700°C, com a tela de entrada de dados das zonas mostrada na Figura 4-11.

	Absc (mm)	Height (mm)	Losses (MJ/h)	Temp (°C)
zone 1	5470	1820	450	700
zone 2	9070	1820	150	990
zone 3	9270	400	1000	-1
zone 4	14670	1820	1200	1220
zone 5	16700	1820	1600	1220
zone 6	0	0	0	0
zone 7	0	0	0	0

Figura 4-11 Tela de entrada dos dados das zonas de aquecimento, mostrando valor alterado.

Com esta alteração chegou-se ao resultado que mais se aproximou dos resultados da instrumentação. Pequenas modificações em temperaturas da zona de entrada ou tamanho das zonas, bem como alterações na altura da cortina (que no programa é considerada como uma zona), não conseguiram melhorar significativamente os resultados.

4.1.2 Resultados dos ajustes

Após o ajuste efetuado considerando-se a temperatura medida na zona de entrada, foram efetuadas simulações utilizando-se os parâmetros operacionais existentes durante o procedimento de instrumentação do forno e comparando-se os resultados destas simulações com os resultados obtidos a partir da instrumentação.

Na Figura 4-12, observa-se o resultado final comparando-se a curva de temperatura em função do tempo resultante da instrumentação no núcleo do tarugo e a curva gerada

pelo simulador para esta região. Da mesma forma, na Figura 4-13, é apresentado o gráfico de temperatura em função do tempo para a instrumentação da região inferior juntamente com a simulação efetuada para esta região.

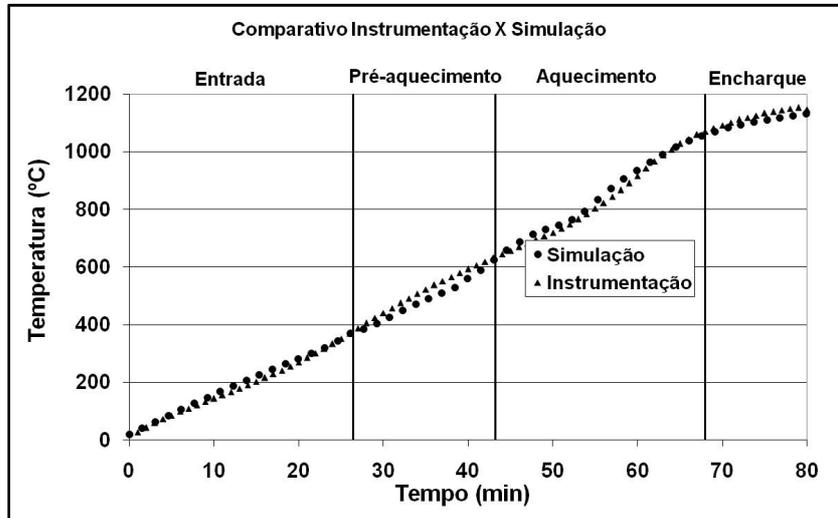


Figura 4-12 Curvas de temperatura em função do tempo para a instrumentação do núcleo do tarugo e a respectiva simulação.

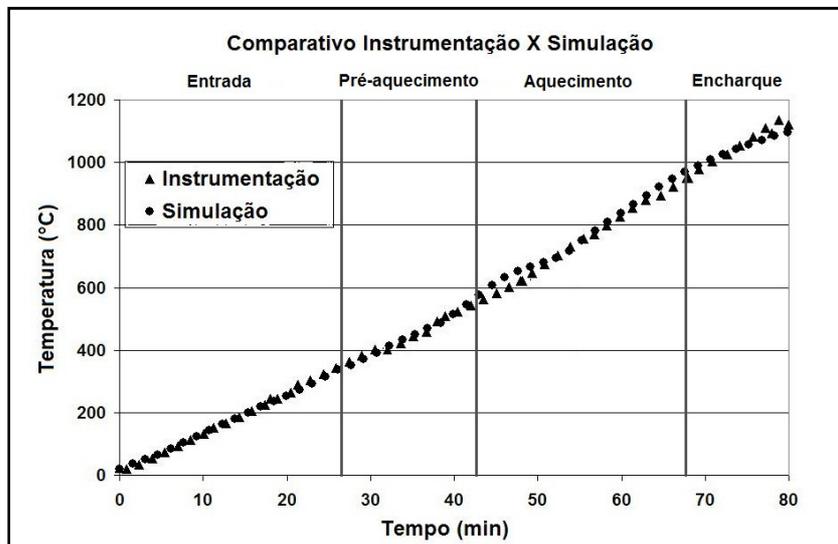


Figura 4-13 Curvas de temperatura em função do tempo para a instrumentação da região inferior do tarugo e a respectiva simulação.

Conforme observado nas Figuras Figura 4-12 e Figura 4-13, há uma concordância entre os dados obtidos a partir da instrumentação e os resultados obtidos através de simulação com o programa FIRST.

4.2 Simulação de dois ciclos de reaquecimento

Considerando que há uma boa concordância entre os resultados do simulador, depois de efetuadas as modificações nos dados de entrada, e os resultados obtidos via instrumentação, foi possível realizar simulações numéricas para ciclos de reaquecimento com períodos de 80 minutos e 70 minutos.

Para estas simulações foram mantidas as variáveis relativas ao forno que foram modificadas para conseguir a concordância entre a simulação e a instrumentação, tais como dimensões, combustível, coeficiente de emissividade, etc e alterou-se somente a produção horária do forno.

4.2.1 Parâmetros utilizados

As simulações de ciclos de reaquecimento de 70 minutos e 80 minutos foram efetuadas modificando-se somente a taxa de produção. Os dados de temperatura para cada zona, perdas térmicas, coeficiente de emissividade, etc, foram mantidos constantes conforme a Figura 4-11.

Assim, considerando-se que na operação do forno com um tamanho de passe de 318 mm há 52 tarugos em seu interior, para um ciclo de 70 minutos a taxa de produção será de 45 peças por hora e para o ciclo de 80 minutos a taxa de produção será de 40 peças por hora. Estes dados fornecidos ao programa para a simulação estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Dados de entrada para o programa para as simulações de 40 ton/hora e 45 ton/hora.

Parâmetro	Ciclo 40 ton/hora	Ciclo 45 ton/hora
Tamanho do passo	318 mm	318 mm
Tempo de reaquecimento	80 min	70 min
Tempo do passo programado	92 s	80 s
Produção horária	40 peças/hora	45 peças/hora
Temperatura da zona de pré-aquecimento	990°C	990°C
Temperatura da zona de aquecimento	1220°C	1220°C
Temperatura da zona de encharque	1220°C	1220°C

4.2.2 Resultados das simulações numéricas

Na Figura 4-14 é apresentado o resultado gráfico da simulação para um ciclo de 80 minutos, correspondente à uma produção de 40 ton/hora. Estão plotadas as curvas da temperatura em função do tempo para as regiões inferior, núcleo e superior do tarugo. Na Figura 4-15 observa-se o resultado gráfico para um ciclo de 70 minutos, correspondente à uma produção de 45 ton/hora.

Nestas figuras observa-se que em ambos os ciclos a superfície superior do tarugo atinge um patamar, em torno dos 1200°C. O núcleo e a superfície inferior não atingem esta temperatura e no ciclo de 70 minutos a diferença de temperatura entre as superfícies superior e inferior é mais acentuada. Para o ciclo de 80 minutos, esta diferença fica em torno de 97°C. Já para o ciclo de 70 minutos, a diferença situa-se em torno de 127°C. Também pode-se observar que o tempo em que a superfície superior permanece na temperatura para o ciclo de 80 minutos é maior que no ciclo de 70 minutos, sendo de 14 minutos para o ciclo de 80 minutos e 10 minutos para o ciclo de 70 minutos.

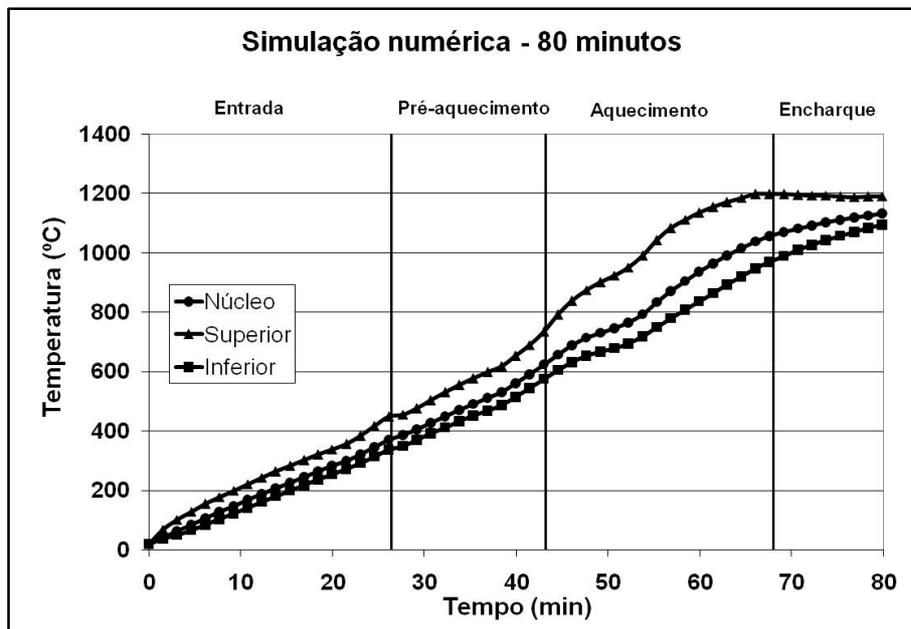


Figura 4-14 Resultados da simulação numérica para um ciclo de reaquecimento de 80 minutos.

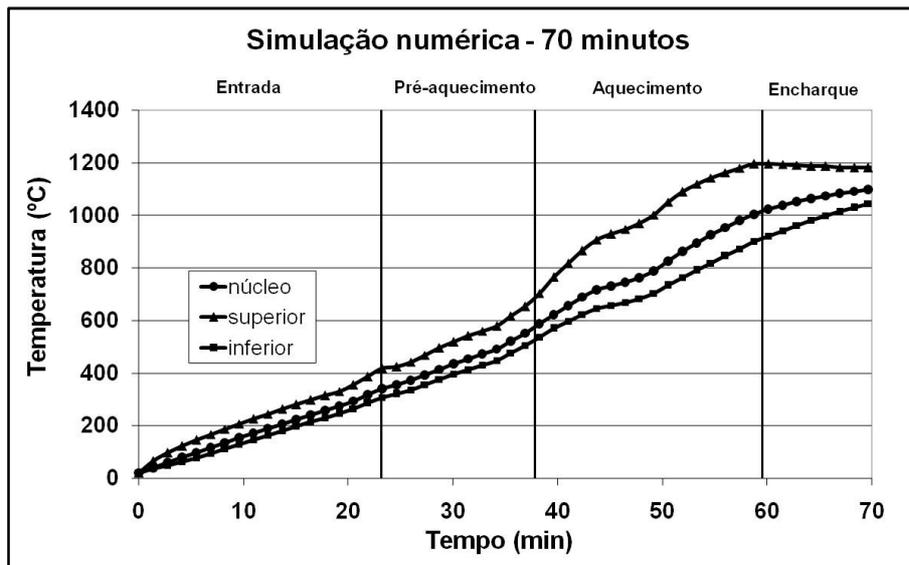


Figura 4-15 Resultados da simulação numérica para um ciclo de reaquecimento de 70 minutos.

4.3 Sumário das Discussões

Em relação ao procedimento de instrumentação do forno, o ideal seria a aquisição de dados nos diferentes pontos do tarugo durante um único ciclo de aquecimento, conhecendo-se assim simultaneamente a evolução da temperatura nestes pontos.

Para o seu estudo, Jaklic et al (JAKLIC et al, 2005) utilizou o procedimento de instrumentar 5 regiões do tarugo: uma no centro e as outras quatro junto às faces, em um único ciclo de reaquecimento. No caso do presente trabalho, optou-se por efetuar uma medida por vez, considerando a grande possibilidade de rompimento do termopar durante o procedimento, como de fato ocorreu durante as medidas na região inferior e central do tarugo. Durante o ciclo de reaquecimento, a movimentação das peças é suficientemente lenta e não causa problemas. O rompimento do termopar ocorria no final do ciclo, quando a velocidade de saída do tarugo é alta e também ocorre a movimentação lateral do mesmo.

O método ideal, inicialmente considerado, seria a utilização de um dispositivo de aquisição de dados termicamente isolado e que acompanharia o tarugo durante o ciclo. Estes dispositivos, existentes no mercado, possibilitariam a aquisição dos dados em tempo real e em vários pontos diferentes. No entanto, este procedimento teve que ser descartado devido à diferença dimensional entre o equipamento completo (sistema de aquisição e isolamento térmicos) e a abertura disponível no forno.

A comparação efetuada entre os resultados da instrumentação e da simulação numérica com o *software* FIRST mostrou que é possível uma concordância entre os resultados, porém deve haver um cuidado especial com os dados de entrada do programa. Conforme foi observado, alterações na temperatura da zona de entrada afetaram significativamente os resultados. Portanto, apesar da concordância com as temperaturas medidas, foi necessário adicionar o valor medido de 700°C na zona de entrada. Considerando que esta zona não tem controle de temperatura (não apresenta queimadores), este valor é dependente das condições de operação do forno. Neste caso, o *software* não contempla esta característica e efetua a simulação como se a temperatura inicial fosse a temperatura ambiente, ocasionando a diferença observada entre a simulação e a temperatura real antes dos ajustes efetuados.

Para efeitos comparativos, foram plotadas em um mesmo gráfico as curvas sugeridas no trabalho de Chen et al (Figura 2-3) e as curvas simuladas de reaquecimento na superfície do tarugo para os ciclos de 70 e 80 minutos. Este gráfico é apresentado na Figura 4-16.

Os resultados obtidos da simulação, em dados de temperatura em função do tempo foram convertidos para os valores adimensionais sendo z/L a fração do tempo total decorrido para cada ciclo e $T_s - T_c / T_D - T_c$ a relação entre a temperatura da superfície em um dado instante e a temperatura máxima atingida no final do processo.

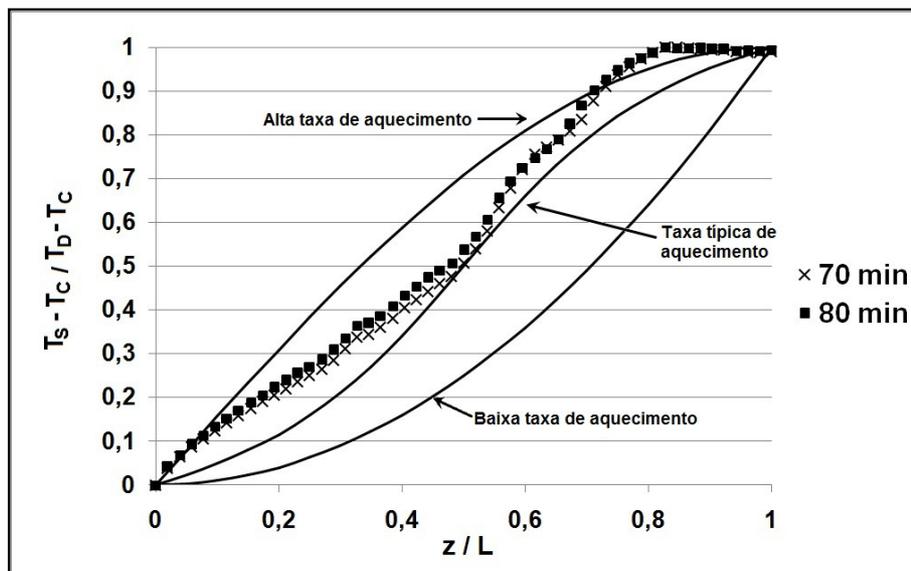


Figura 4-16 Gráfico comparativo entre resultados das simulações na superfície do tarugo e curvas de reaquecimento mencionadas por Chen et al.

Para ambos os ciclos, pode-se observar que houve estabilização da temperatura da superfície do tarugo após uma fração de 0,8 ou 80% do tempo do ciclo. Também se observa, mais notadamente até cerca de 50% do tempo de cada ciclo, que as temperaturas na superfície para o ciclo de 80 minutos são maiores que para o ciclo de 70 minutos, decorrente do fato de que no ciclo mais longo o tarugo permanece mais tempo em cada zona.

O comportamento geral das curvas simuladas apresenta valores de temperaturas maiores do que as de uma taxa típica de aquecimento, com tendência para uma alta taxa de aquecimento, com base nos resultados de Chen et al. Também de acordo com este autor, uma alta taxa de aquecimento com alta produção representaria uma utilização mais eficiente do combustível. Observando o gráfico da Figura 4-16, poderia se pensar em um aumento da temperatura na região central do forno, aproximando-se da curva de alta taxa de aquecimento, e um aumento da taxa de produção. Porém, conforme observado nos resultados da simulação, poderia ocorrer uma maior diferença de temperatura entre as regiões do tarugo, que no ciclo de 70 minutos chegou a atingir 127°C.

Para uma melhor avaliação dos resultados apresentados pelo *software*, medidas mais acuradas de temperatura devem ser efetuadas, sendo que a medida da temperatura do tarugo durante o processo de reaquecimento deve ser efetuada nos três pontos (superior, núcleo e inferior) simultaneamente e com o cuidado de que durante o processo não ocorram interrupções, ou seja, o processo de reaquecimento deve acontecer de forma contínua.

Também devem ser efetuadas as medidas das temperaturas dos gases de entrada e saída do forno, bem como as vazões de gases combustíveis e ar. Com estes dados poderiam ser avaliados também os resultados do rendimento do forno, tanto os gerados pelo simulador como o rendimento real do forno durante o processo.

Como o ciclo com o qual foi configurado o simulador foi de aproximadamente 80 minutos, e os resultados do simulador, após as devidas alterações, apresentaram uma concordância com os dados obtidos através da instrumentação, pode-se ter uma confiança que os resultados simulados para o ciclo de 70 minutos correspondem à realidade. Para ciclos mais curtos ou mais longos do que os estudados neste trabalho, o ideal seria uma melhor avaliação do simulador, conforme mencionado anteriormente.

Os resultados das simulações indicaram como era de se esperar, uma diferença maior de temperatura entre a superfície superior e inferior do tarugo para o ciclo mais curto. Baseando-se na literatura revisada esta diferença de temperatura poderia ser excessiva, visto que Araujo cita uma diferença ótima em torno de 20°C. Outros artigos pesquisados, como por exemplo, o trabalho de Han (HAN et al, 2011) e o trabalho de Kim (KIM, 2007), indicaram uma diferença de temperatura variando entre 20 e 50°C, tanto nos resultados simulados como nas medições efetuadas. No entanto, os ciclos utilizados nestes trabalhos foram maiores, como por exemplo, 140 minutos para o trabalho de Han ou os fornos utilizados consideravelmente mais longos (aproximadamente 39 m para o trabalho desenvolvido por Han) o que também implica em um tempo de ciclo maior.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os experimentos realizados pode-se obter as seguintes conclusões:

- O ciclo térmico de 70 minutos, que seria o objetivo do trabalho resultando em uma produção de 45 peças por hora, apresentou um gradiente térmico de aproximadamente 127°C. Este valor poderia indicar o limite da operação do equipamento, ou seja, poderia-se afirmar que este forno em particular já atingiu um limite de produtividade e que tempos menores que 70 minutos comprometeriam a qualidade do processo e do produto.
- A comparação efetuada entre os resultados das medidas diretas efetuadas durante o processo de reaquecimento e a simulação numérica efetuada utilizando-se o *software* FIRST indicou que é possível uma concordância entre estes resultados. Deve-se ter cuidado com os dados de entrada no *software*, pois estes alteram significativamente os resultados, como pode ser observado com o valor de temperatura da zona de entrada;
- Apesar da concordância entre os dados obtidos a partir da simulação e os dados reais medidos, o *software* não simula a temperatura na zona de entrada, sendo que este dado deve ser medido e inserido como dado de entrada;
- A comparação entre as curvas simuladas e curvas de reaquecimento mencionadas na pesquisa de Chen et al indicou um comportamento semelhante a de uma taxa típica de aquecimento, com tendência para uma alta taxa de aquecimento. De acordo com estes autores, este comportamento apresentaria uma utilização mais eficiente do combustível do que uma baixa taxa de aquecimento.
- A técnica de instrumentação foi viável e proporcionou resultados utilizáveis, no entanto o ideal seria a medição simultânea em todos os pontos determinados, em um único ciclo de reaquecimento.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Tendo em vista que o software utilizado também proporciona resultados como consumo de combustível, poderia ser de interesse efetuar também medidas de temperatura no forno de modo a calcular perdas térmicas e confrontar estes resultados com os fornecidos pelo software.

Seguindo esta mesma linha, poderiam ser efetuadas medidas no consumo real de combustível e sua comparação com os resultados obtidos a partir do software.

Considerando-se a diferença de temperatura observada entre as regiões do tarugo, também há a possibilidade de serem efetuadas simulações físicas em pequena escala com a qualidade de aço utilizada neste trabalho, de modo a verificar os efeitos destes gradientes térmicos nas características do material frente aos esforços durante a conformação mecânica do tarugo.

7 REFERÊNCIAS

- ARAUJO, LUIZ ANTONIO DE. **Manual de Siderurgia**, Ed. Arte e Ciência, 2ª ed, 2009.
- ASM METALS HAND BOOK **Heat Treating Vol.4** The Materials Information Society, 1991.
- BEUREN, Jair; TRAVI, Tatiana. **Processos de Aquecimento nos Aços**. [s.l.]: [s.n.], 2000; 28p.
- CHANDLER, H.et al. **Heat Treater's Guide Practices Produres for Irons and Steels – 2nd Edition**". American Society of Metals Publishing, 1995.
- CHEN, W.H. et al. **Analysis on Energy Consumptions and Performance of Reheating Furnaces in a Hot Strip Mill**. International Communications in Heat and Mass Transfer 32, p.695-706, 2005.
- DIETER, George E. **Metalurgia Mecânica**. 2.ed. Tradução de Antonio S. de Souza, Luiz Henrique de Almeida e Paulo E. Valadão de Miranda. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981. 653p.
- Ecil, Temperatura Industrial**. Grupo Ecil.<<http://www.ecil.com.br/temperatura-industrial/pirometria/termopares/>> Acesso em 19 de outubro de 2012.
- HAN S. H., CHANG, D., HUH C. **Efficiency Analysis of Radiative Slab Heating in a Walking-Beam-Type Reheating Furnace**. Energy, pp. 1265 – 1272, 2011.
- HAN S. H.; CHANG D.; KIM C. Y.; **A Numerical Analysis of Slab Heating Characteristics in a Walking Beam Type Reheating Furnace**. International Journal of Heat and Mass Transfer, pp. 3855-3861, junho 2010.
- HAUCK, Gustavo A. C.; LAIA, L. L. **Fornos de Reaquecimento**. São Paulo: ABM, 2000. 44p.

HONNER, Milan. et al. **Temperature and Heat Transfer Measurement in Continuous Reheating Furnaces.** Scandinavian Journal of Metallurgy 2003.32, p.225-32, 2001.

JAKLIC A., VODE, F., KOLENKO, T. **Online Simulation Model of the Slab-Reheating Process in a Pusher-Type Furnace.**Applied Thermal Engineering, pp. 1105 – 1114, 2007.

JAKLIC, Anton et al. **The Influence of the Space Between the Billets on the Productivity of a Continuous Walking-Beam Furnace.** Applied Thermal Engineering 25; p.783-95, 2004.

JANG, J. H., et al. **Investigation of the Slab Heating Characteristics in a Reheating Furnace with the Formation and Growth of Scale on the Slab Surface.**International Journal of Heat and Mass Transfer, pp. 4326 – 4332, 2010.

KIM, M. Y. **A Heat Transfer Model for the Analysis of Transient Heating of the Slab in a Direct-Fired Walking Beam Type Furnace.**International Journal of Heat and Mass Transfer, pp. 3740 – 3748, 2007.

PORTER, David A.; EASTERLING, Kenneth E. **Phase Transformations in Metal and Alloys.**

SI, M., THOMPSON, S., CALDER, K., **Energy Efficiency Assessment by Process Heating Assessment and Survey Tool (PHAST) and Feasibility Analysis of Waste Gas Recovery in the Reheat Furnace at a Steel Company.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 2904 – 2908, 2011.

STEINBOECK, A., et al. **A Mathematical Model of a Slab Reheating Furnace With Radiative Heat Transfer and Non-participating Gaseous Media.** International Journal of Heat and Mass Transfer, pp. 5933 – 5946, 2010.