

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

**DESEMPENHO SUPERFICIAL DE BARRAS LAMINADAS REDONDAS DE AÇO
SAE 1043 FRENTE ÀS VARIÁVEIS DE CONDICIONAMENTO DE TARUGOS,
TEMPERATURA DE LAMINAÇÃO E USO DO DESCAREPADOR**

EDUARDO WEIGELT BUENO
Engenheiro Mecânico

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.

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

**DESEMPENHO SUPERFICIAL DE BARRAS LAMINADAS REDONDAS DE AÇO
SAE 1043 FRENTE ÀS VARIÁVEIS DE CONDICIONAMENTO DE TARUGOS,
TEMPERATURA DE LAMINAÇÃO E USO DO DESCAREPADOR**

EDUARDO WEIGELT BUENO
Engenheiro Mecânico

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.

Porto Alegre

2012

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Profissional 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. André Ronaldo Froehlich, UNISINOS

Prof. Dr. Fabiano Dornelles Ramos, IFRS - Caxias

Prof. Dr. Wagner Viana Bielefeldt, PPGE3M - UFRGS

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGE3M

Porto Alegre, agosto de 2012.

Em nome de Alá, clemente e misericordioso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a minha mãe, *Enilda Maria Weigelt Bueno*, por servir de exemplo ao longo dos anos, ensinando e demonstrando os valores indispensáveis a um bom profissional, mas principalmente os requisitos necessários a um homem de caráter;

ao meu Orientador, *Prof. Dr. Afonso Reguly*, que me guiou e transmitiu, com paciência e dedicação, seu conhecimento e experiência para o desenvolvimento deste projeto;

aos amigos *Jair Janoski, Rodrigo Rego, Claudiomiro de Freitas e Luis Henrique* por não medirem esforços no auxílio das atividades práticas necessárias à elaboração deste projeto;

a minha esposa *Mirelle Mosená*, que contribui para a formatação deste trabalho. Pela paciência e apoio nos momentos difíceis;

aos demais familiares e amigos pelo apoio incondicional;

a *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, por fornecer estudo de qualidade e estrutura laboratorial para o desenvolvimento e aplicação do conhecimento;

aos profissionais *Eng. MS Fabiana Lopes da Silva, Eng. Eduardo Ferreira, Pedro Ermani Lanzarini e Eng. David Hill*, pelo auxílio e conhecimento compartilhado;

a *Gerdau*, pela oportunidade de estudo, conhecimento e desenvolvimento profissional e pessoal;

e, ao meu filho *Lorenzo*, por todo o ensinamento que, mesmo em gestação, tem nos transmitido. Espero que algum dia possa ler estas páginas, e entender a importância que já tinha antes mesmo de nascer.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	IV
RESUMO.....	X
ABSTRACT.....	X
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Laminação	2
2.1.1 Processo de laminação.....	2
2.1.2 Classificação dos laminadores.....	3
2.1.2.1 Quanto à temperatura de trabalho	3
2.1.2.2 Quanto à disposição das gaiolas	4
2.1.3 Matérias-primas	7
2.1.4 Reaquecimento para laminação	7
2.1.4.1 Fornos de reaquecimento	8
2.1.4.2 Carepa	10
2.1.4.3 Descarepador	12
2.1.5 Calibração	15
2.1.5.1 Sequencias de calibração	15
2.1.6 Defeitos superficiais	17
2.1.6.1 Trincas de Aciaria	18
2.1.6.2 Trincas de painel	19
2.1.6.3 Escamas de Aciaria	19
2.1.6.4 Macroinclusões	19
2.1.6.5 Trincas de laminação	20
2.1.6.6 Escamas de laminação	20
2.1.6.7 Dobras	20

2.1.6.8	Incrustação de carepa.....	21
2.1.6.9	Trincas em faixa.....	21
2.1.7	Defeitos superficiais gerados na laminação.....	21
3.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	23
3.1	Materiais e métodos.....	23
3.2	Teste de condicionamento superficial	26
3.3	Teste de temperatura de laminação	27
3.4.	Teste de remoção de carepa - descarepador	28
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
4.1	Teste de condicionamento superficial	32
4.2	Teste de temperatura de laminação	34
4.3	Teste de remoção de carepa - descarepador	37
4.4	Análise dos defeitos superficiais encontrados	42
4.5	Considerações finais	45
5.	CONCLUSÕES	47
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	48
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação de um trem contínuo com gaiolas horizontais (CODA 2006a)....	5
Figura 2.2	Representação de um trem contínuo com gaiolas horizontais e verticais intercaladas (CODA 2006a)	5
Figura 2.3	Arranjo esquemático de trem aberto (CODA 2006a).....	6
Figura 2.4	Arranjo de trem laminador semi-contínuo.....	6
Figura 2.5	Arranjo de trem laminador semi-contínuo.....	9
Figura 2.6	Representação esquemática de camada de carepa e variação da composição desta camada com relação à temperatura (RIZZO 2007).....	12
Figura 2.7	Efeito da altura dos bicos sobre o impacto (FRICK 2009).....	14
Figura 2.8	Demonstração esquemática de um descarepador hidráulico (FRICK 2004).....	15
Figura 2.9	Forma dos canais mais aplicados nas sequencias de laminação (Calibração de Produtos Longos 2008).....	17
Figura 2.10	Temperatura de reaquecimento x Rejeição Superficial (LIM 2000).....	22
Figura 2.11	Uso do descarepador x Rejeição Superficial (LIM 2000)	22
Figura 3.1	Volume de produção da Laminação x Rejeição Superficial na Linha	24
Figura 3.2	Anel do Descarepador destinado as bitolas de 150 a 180 mm	30
Figura 3.3	Anel do Descarepador destinado as bitolas de 240 a 260 mm	30
Figura 4.1	Resultado do teste de Condicionamento Superficial dos Tarugos.....	33
Figura 4.2	Resultado do Teste 1 de Temperatura de Laminação no Trem Acabador.....	34
Figura 4.3	Resultado do Teste 2 de Temperatura de Laminação no Trem Acabador.....	36
Figura 4.4	(a) Resultado primeiro teste de temperatura; (b) Resultado do segundo teste de temperatura de laminação	37
Figura 4.5	Resultado encontrado por Lim et al (2000).....	37
Figura 4.6	Resultado do teste de Descarepação Hidráulica	38
Figura 4.7	Resultado da corrida 1, quanto à distância dos bicos do descarepador	39
Figura 4.8	Resultado da corrida 2, quanto à distância dos bicos do descarepador	40

Figura 4.9 (a) Resultado do teste de Pressão do Descarepador; (b) Resultado dos testes de variação de altura dos bicos do Descarepador.....	41
Figura 4.10 Resultado encontrado por Lim et al (2000).....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Caraterísticas das sequencias de calibração e exemplos de sequencias mais comumente utilizadas (CODA 2006c)	16
Tabela 2.2	Principais defeitos superficiais em barras laminadas sem acabamento (Albúm de Defeitos 2010)	18
Tabela 3.1	Temperatura de Laminação antes do Trem Acabador.....	25
Tabela 3.2	Configuração de laminação da barra redonda de 101,60 mm	26
Tabela 4.1	Temperatura de Laminação antes do Trem Acabador, teste 1 (T1)	34
Tabela 4.2	Temperatura de Laminação antes do Trem Acabador, teste 2 (T2)	35
Tabela 4.3	Pressões aplicadas na remoção de carepa.....	38
Tabela 4.4	Pressões do descarepador, em Bar, para diferentes alturas de jato, em mm	39
Tabela 4.5	Defeitos superficiais encontrados.....	42
Tabela 4.6	Resumo dos resultados obtidos	45
Tabela 4.7	Interação dos parâmetros testados	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- A - comprimento do jato
- B - espessura do jato
- C - espessura do jato na direção de laminação
- D - sobreposição de jatos
- E - distância entre bicos
- H - distância entre o centro do tubo e a face inferior da chapa
- s - espessura do material em processo
- d - diâmetro do tubo
- h1 - comprimento vertical do bico
- h2 - comprimento vertical do jato
- α - ângulo de pulverização do bico
- β - ângulo de inclinação do jato
- T1 - Teste 1
- T2 - Teste 2

RESUMO

Os defeitos superficiais são os maiores problemas de qualidade em barras laminadas a quente, representando inúmeros transtornos durante o processo produtivo, pois dependendo de suas características geram elevada rejeição durante o processo de inspeção. Elevada rejeição significa retrabalho e possível sucateamento. Dentre as diversas causas para a ocorrência de defeitos superficiais, estão os defeitos nos tarugos, a temperatura de laminação, consequência da temperatura de reaquecimento e ritmo de laminação e a remoção de carepa após o reaquecimento. Definiu-se o aço SAE 1043 para o desenvolvimento deste trabalho devido aos níveis de rejeição superficial e elevados volumes de produção, o que gera grande impacto na produção das linhas de inspeção. Os resultados obtidos a partir dos testes realizados demonstram que a temperatura de laminação até determinado limite não tem influência na rejeição superficial, mas que abaixo deste gera elevado índice de rejeição. O uso do descarepador tem grande influencia nos níveis de defeitos superficiais, e o controle de seus parâmetros principais é fundamental. O condicionamento superficial dos tarugos é o parâmetro que mais apresentou influência positiva sobre a rejeição superficial, demonstrando que defeitos pré-existent na matéria-prima têm grande impacto no produto final da laminação.

Palavras-chave: Defeitos superficiais; Temperatura; Reaquecimento; Descarepador.

ABSTRACT

Surface defects are major quality problems in hot rolled bars, representing numerous disturbances during the production process, as depending on their characteristics generate high rejection during the inspection process. High rejection means rework and scrap. Among the various causes for the occurrence of surface defects are defects in the billets, rolling temperature, a consequence of the reheating temperature and rate of roll and removal of scale after reheating. The steel SAE 1043 used in this work was selected due to its level of surface defects and high production volumes, which generates large impact on production inspection process. The results show that the rolling temperature of up to a certain limit does not influence the surface defects, but below this generates a high rate of rejection. The use of descaling has a large influence on the levels of surface defects, and control of its main parameters is essential. The surface conditioning of billets is the parameter that showed a positive influence on the reduction of surface defects, demonstrating that pre-existing defects in materials has large impact on the final rolled product.

Key words: Surface defects; Temperature; Reheating; Hydraulic Descaling.

1. INTRODUÇÃO

Difícil imaginar o mundo atual sem a existência do aço. Ele está presente em todos os ramos da sociedade, de pequenos objetos aos equipamentos utilizados na fabricação destes. Mas, dentre vasta gama de possibilidades de materiais conhecidos e tantos outros recentemente desenvolvidos, por que o aço? A resposta é simples, embora para seu entendimento seja necessário aprofundamento e dedicação: o aço liga de ferro e carbono, é um dos materiais mais versáteis conhecidos, atendendo a um grande gama de propriedades mecânicas.

Na indústria automobilística, o aço é matéria-prima básica, e para tal necessita ter qualidade adequada às exigências. Dentre os requisitos de qualidade do aço para esta aplicação está a isenção de defeitos superficiais e internos, pois estes comprometem o desempenho dos componentes de aço em trabalho.

Defeitos superficiais e internos oriundos dos processos de obtenção do aço e sua posterior conformação são detectados em etapa subsequente de inspeção. O nível de defeitos apresentados tem direta relação com os níveis de retrabalho – remoção de defeitos – e sucateamento.

Tendo foco no processo de Laminação, neste trabalho é apresentada uma análise do desempenho superficial de barras redondas laminadas a quente frente à preparação da matéria-prima para este processo – tarugos – e com relação às variáveis de temperatura de laminação e nível de descarepação.

Os resultados encontrados indicam claramente a necessidade de controle das variáveis testadas, pois seus efeitos na qualidade final das barras laminadas são fundamentais para um bom desempenho e garantia de estabilidade do processo.

Em um trem laminador aberto ou semi-contínuo, ainda uma série de ações são necessárias para o controle da temperatura de laminação, já que nesta configuração de equipamento as perdas térmicas são maiores.

Os testes contidos neste trabalho foram realizados na unidade siderurgia da Gerdau em Charqueadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Laminação

2.1.1. Processo de Laminação

A capacidade dos metais deformarem-se plasticamente sem se romper é uma propriedade extremamente útil desde a pré-história, quando o homem trabalhava metais que apareciam na forma livre na natureza, tais como ouro ou ocasionalmente o ferro de meteoritos, ou ainda metais como a prata, titânio, zinco e o cobre, que foram reduzidos a partir de seus óxidos sob condições naturais ou acidentalmente devido a incêndios em florestas e campos. As principais informações tecnológicas relativas à forma de trabalhar os metais foram desenvolvidas através dos séculos, como uma arte, em um grande número de oficinas em várias partes do mundo.

O forjamento e a fundição são processos de fabricação largamente utilizados há mais de 3000 anos, enquanto que o processo de laminação assumiu uma maior importância na indústria durante o século XIX, embora os primeiros laminadores conhecidos tenham sido empregados para processar a frio metais macios como o chumbo e o estanho no século XV. O processo de laminação foi inclusive objeto de estudos de Leonardo da Vinci, que projetou equipamento de laminação entre os anos de 1489 e 1495, provavelmente para laminação a frio de barras chatas de ouro ou prata para cunhagem de moedas.

A laminação a quente do aço foi iniciada no final do século XVI, na Inglaterra, em primeiro lugar para barras e no século seguinte para placas e chapas. As primeiras patentes de laminação a frio de produtos planos são inglesas, do ano de 1761. Inicialmente o aço era laminado predominantemente na forma de perfis – trilhos, vigas, cantoneiras e barras, mas desde 1930 os produtos planos – chapas – passaram a ser produzidos em volumes maiores (RIZZO 2007).

Laminação é o processo de deformação plástica por onde o metal passa entre rolos. Este é o processo de deformação plástica mais utilizado, pois apresenta alta produção e possibilidade de controle do produto final. O processo consiste em aplicar elevadas forças compressivas sobre o metal.

O processo de laminação pode ser dividido, com relação à temperatura de trabalho, em laminação a quente ou laminação a frio (DIETER 1988).

Conceitualmente, laminação é um processo de conformação mecânica executado por compressão direta, sem retirada de material, visando obter deformação plástica no material conformado. Isto significa alterações permanentes na forma e nas propriedades mecânicas de um corpo sólido, mantida sua massa – volume constante (CODA 2006a).

2.1.2. Classificação dos laminadores

2.1.2.1. Quanto à temperatura de trabalho:

Quanto à temperatura, é usual a classificação dos laminadores ou da própria laminação em laminadores para trabalho a frio e laminadores para trabalho a quente. Mais recentemente desenvolveu-se a laminação a morno, e outros processos de laminação em temperaturas intermediárias conhecidos ainda como laminação controlada (RIZZO 2007).

a) Laminação a frio:

É usada para produção de folhas e chapas finas com acabamento superficial e com tolerância dimensional superiores, comparadas com as chapas finas produzidas por laminação a quente. Adicionalmente a isso, o encruamento resultante da redução a frio pode ser aproveitado para dar maior resistência ao produto final (DIETER 1988).

É um processo que se caracteriza pela conformação do aço a temperatura abaixo da necessária para que ocorra a recristalização, tendo como consequência um aumento da dureza e resistência mecânica, ao mesmo tempo em que reduz a ductilidade e tamanho de grão do aço. A profundidade até a qual a estrutura é modificada depende da seção, tamanho da peça e redução em área (ARAUJO 1997).

b) Laminação a quente:

Considera-se operações de conformação por laminação a quente, aquelas efetuadas em uma temperatura tal que após certa deformação, estabelece-se um equilíbrio entre as velocidades de encruamento e de recuperação e\ou recristalização (RIZZO 2007).

Recristalizar significa recuperar a estrutura cristalina que existia antes da deformação. Trata-se de uma transformação de fases que se dá por nucleação e crescimento (PADILHA 2005).

Na laminação a quente, o material é aquecido inicialmente entre 1100 a 1300°C (DIETER 1988).

2.1.2.2. Quanto à disposição das gaiolas:

O conjunto formado pelos cilindros de laminação, com seus mancais, montantes, suportes e demais componentes é denominado cadeira de laminação. O termo gaiola de laminação também é utilizado, sendo normalmente diferenciado do termo cadeira pela característica de que o primeiro pode ser removido de seu local de instalação para troca de cilindros e ajustes, enquanto o último não é retirado de sua posição original.

Um conjunto de gaiolas forma um trem de laminação (RIZZO 2007).

a) Trem Contínuo:

O arranjo contínuo possui uma série de gaiolas dispostas uma após a outra, com cilindros girando no mesmo sentido, ao longo de um mesmo eixo de laminação e com pequeno afastamento entre as gaiolas. O material é trabalhado ao mesmo tempo em várias gaiolas, cuja velocidade periférica aumenta proporcionalmente, para compensar a redução de seção (ARAUJO 1997).

As gaiolas podem ser duo não reversível ou quádruo.

São trens aplicados para a produção de fio-máquina, perfis pequenos e chapas finas a quente ou a frio.

Neste tipo de trem, a perda de temperatura é baixa e o sistema de guiagem é fácil, mas exige um bom controle de velocidade para evitar excessivo tracionamento ou formação de laço entre as cadeiras, o que é possível com equipamentos de automação e controle do processo (RIZZO 2007).

O arranjo contínuo pode ser composto apenas por gaiolas horizontais, como apresentado na figura 2.1, onde a operação se dá por torções do material laminado entre as gaiolas, ou por gaiolas horizontais e verticais intercaladas, sem a necessidade de torção do material. Esta última configuração é apresentada na figura 2.2 (CODA 2006a).

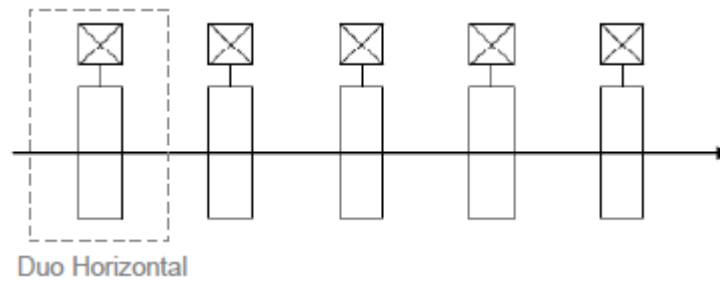


Figura 2.1. Representação de um trem contínuo com gaiolas horizontais (CODA 2006a).

Em ambas as figuras citadas, os retângulos representam uma gaiola duo horizontal, cada conjunto de dois círculos indica uma gaiola duo vertical, os quadrados com um x indicam o motor e a seta representa o sentido de laminação.

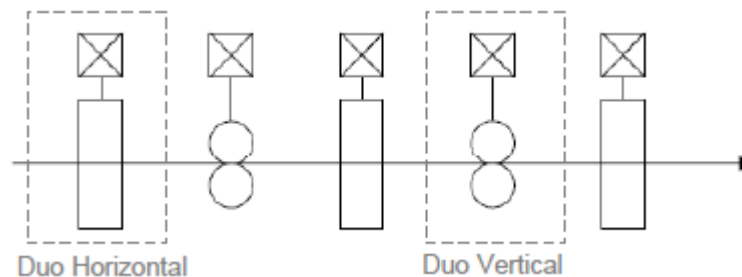


Figura 2.2. Representação de um trem contínuo com gaiolas horizontais e verticais intercaladas (CODA 2006a).

b) Trem aberto:

São constituídos de diversas gaiolas colocadas lado a lado, dotadas de um acionamento único. As gaiolas podem ser trio ou duo-alternadas, reversíveis ou não. A extremidade da peça que está sendo laminada, ao sair de um passe, é dobrada, entrando no passe seguinte no mesmo lado do laminador de onde saiu (ARAÚJO 1997).

Evidentemente, para se ter flexibilidade necessária para o dobramento, a peça em processo de laminação deve ter seção relativamente pequena. Quando a seção não permite o dobramento, utilizam-se as mesas de deslocamento laterais, ocorrendo neste caso, uma maior perda de temperatura (RIZZO 2007).

Na figura 2.3 apresenta-se de forma esquemática um trem laminador aberto, onde o primeiro retângulo representa uma gaiola trio e os três últimos representam cada um uma

gaiola duo horizontal, o quadrado com um x indica o motor e as setas representam o sentido de laminação.

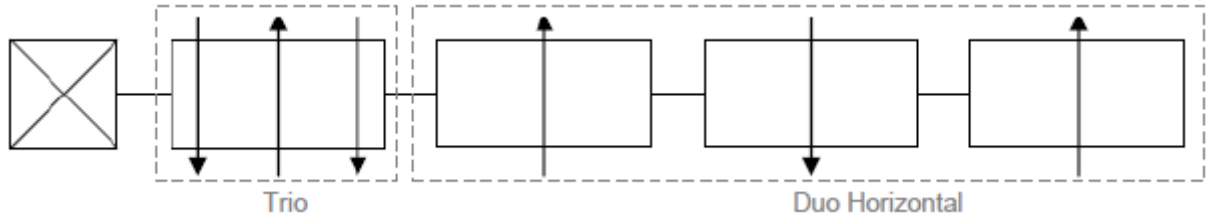


Figura 2.3: Arranjo esquemático de trem aberto (CODA 2006a).

c) Trem Semi-contínuo:

A fim de suprimir as desvantagens dos trens abertos, desenvolveram-se os trens semi-contínuos. Este tipo de configuração constitui, portanto, uma etapa de transição entre os trens abertos – velocidades mais baixas e seções maiores – e os trens contínuos – velocidades maiores e menores seções, para se obter melhor qualidade superficial e compensar a redução de seção (RIZZO 2007).

A figura 2.4 apresenta o arranjo de um trem semi-contínuo, onde os primeiros passes são realizados em configuração aberta e o trem acabador é contínuo.

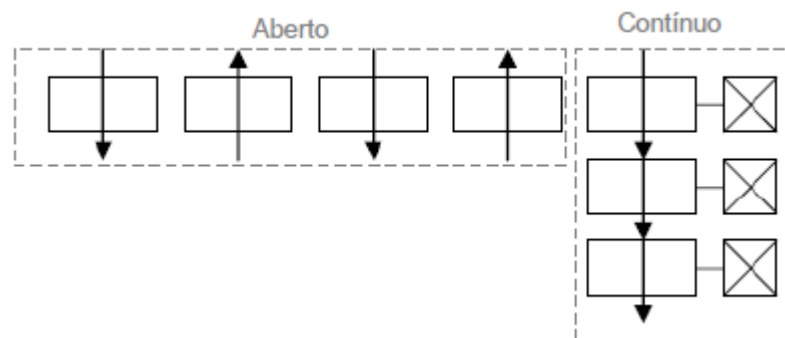


Figura 2.4: Arranjo de trem laminador semi-contínuo.

A figura 2.4 apresenta um trem semi-contínuo composto de uma seqüência de quatro gaiolas duos dispostas lado a lado – arranjo aberto, e uma seqüência de três gaiolas duos dispostas em linha – arranjo contínuo. Este tipo de configuração surge normalmente a partir da inclusão do arranjo em linha, em um trem anteriormente aberto.

2.1.3. Matérias-primas

A matéria-prima a ser laminada pode ser obtida através de processos de lingotamento contínuo – placas, blocos e tarugos – e de lingotamento convencional – lingotes. Esta matéria-prima pode passar por etapas de condicionamento antes de ser carregada no forno de reaquecimento da laminação, em função do tipo de aço, sua aplicação, roteiro de produção, eventos de qualidade durante o lingotamento e solicitação do cliente.

Por condicionamento designa-se o conjunto de atividades realizadas com o intuito de remover defeitos superficiais, internos, de forma e dimensionais dos produtos lingotados. Podendo também ser consideradas como atividades desta etapa de preparação da matéria-prima a marcação/identificação, transporte, armazenamento e seqüenciamento dos produtos a serem laminados (RIZZO 2007).

Considerando as atividades de condicionamento de matéria-prima com o objetivo da melhoria superficial do produto final, atividades como escarfagem – retirada de camada da superfície do material através de maçaricos – e esmerilhamento – remoção de pequena camada superficial através de rebolo abrasivo – são comumente utilizadas (VILELA 2007).

Tanto a atividade de escarfagem quanto a operação de esmerilhamento podem ser realizadas de forma completa – remoção total da superfície do material – quanto de forma parcial/localizada – remoção de região previamente definida ou marcada por método de inspeção superficial (RIZZO 2007).

2.1.4. Reaquecimento para Laminação

A etapa de aquecimento inicial da matéria-prima é necessária para que o aço apresente alta plasticidade tanto no início como no fim do processo de laminação a quente. Esta elevação de temperatura dos lingotes ou dos produtos semi-acabados – placas, blocos e tarugos – até a temperatura de laminação deve ocorrer de uma forma segura, homogênea e econômica (RIZZO 2007).

Esta etapa do processo de laminação a quente exerce importante papel tanto para o bom desenvolvimento da operação de laminação do aço quanto para a qualidade superficial e interna do produto final (BLAIN 1964).

2.1.4.1. Fornos de Reaquecimento

Podem ser distinguidos dois tipos de fornos para reaquecimento inicial do material para a laminação a quente: fornos-poço, utilizados para o aquecimento de lingotes e fornos de reaquecimento, dedicados para produtos semi-acabados tais como tarugos ou placas, embora eventualmente possam ser usados no aquecimento de lingotes pequenos (RIZZO 2007).

Os fornos de reaquecimento podem ser contínuos ou descontínuos, sendo estes últimos utilizados atualmente para o aquecimento de peças de forjamento, permitindo em alguns casos virar os blocos ou lingotes a fim de homogeneizar o aquecimento.

Os fornos de reaquecimento contínuos – tanto a carga como a descarga se realizam de maneira periódica durante a operação – em função do método de deslocamento das peças a serem aquecidas e do formato do forno, podem ser classificados em:

- fornos de empurrar – pusher furnace;
- fornos de vigas caminhantes – walking beam furnace;
- fornos com soleira móvel – walking hearth furnace;
- fornos circulares e
- fornos com mesa de rolos ou fornos túnel.

Dada a natureza deste trabalho, será apresentado em detalhe somente o forno de reaquecimento do tipo walking beam furnace – forno de vigas caminhantes – pois este é o forno envolvido no desenvolvimento deste projeto.

Nos fornos de vigas caminhantes o mecanismo de transporte consiste de um conjunto de vigas e colunas, divididas em móveis e fixas. As peças são sustentadas pelas vigas fixas e para o deslocamento durante o processo de aquecimento, as vigas móveis realizam um movimento oscilatório, conforme ilustra esquematicamente a figura 2.5. As colunas atravessam a soleira e são apoiadas em um chassi móvel acionado por um sistema hidráulico de elevada capacidade de carga. O chassi de translação move-se sobre um chassi de levantamento, acionado por um sistema hidráulico, que se desloca sobre planos inclinados e assegura os movimentos verticais (RIZZO 2007).

As vigas que sustentam o material são refrigeradas com água o que acarreta uma grande desvantagem em termos de perdas de energia, se comparada a fornos do tipo soleira móvel – walking hearth (GUIDE 1994).

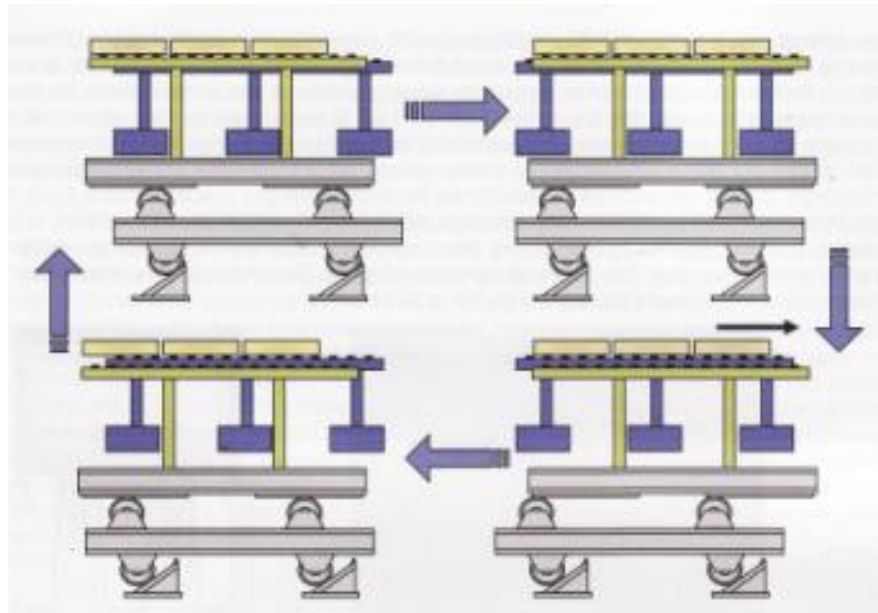


Figura 2.5: Representação esquemática do funcionamento do mecanismo de vigas caminhantes (RIZZO 2007).

Neste tipo de equipamento, os tarugos são normalmente enforçados e desenforçados lateralmente por meio de rolos. A pressão no interior do forno pode ser ajustada por válvulas de controle de saída de fumos situadas entre o recuperador e as chaminés. Os queimadores estão distribuídos na parte superior e inferior do forno (GUIDE 1994).

Os fornos de reaquecimento contínuo podem ter várias zonas de pré-aquecimento, aquecimento e encharque. Nas zonas de pré-aquecimento ou de recuperação o material que entra a temperatura ambiente é aquecido, em contracorrente, até uma temperatura da ordem de 700°C, pelos gases de combustão, procedentes de outras zonas, em direção ao recuperador onde aquecerá o ar de combustão. As zonas de aquecimento ou intermediárias caracterizam-se pelo grande fluxo de calor, onde o material é aquecido na superfície até uma temperatura da ordem de 1150°C a 1250°C, principalmente por radiação do calor das chamas dos queimadores. Finalmente, as zonas de encharque ou de equalização de temperatura, é equipada com queimadores onde se consegue que a diferença de temperatura entre o ponto mais frio – núcleo – e o ponto mais aquecido da peça, seja reduzido ao mínimo, não representando problema para o trem de laminação ou para a qualidade do produto final laminado.

A grande quantidade de calor arrastada pelos gases resultantes da combustão – fumos – pode ser parcialmente aproveitada no aquecimento da carga nas zonas iniciais do forno e no pré-aquecimento do ar de combustão em um equipamento denominado recuperador,

umentando a eficiência do processo. Antes de serem evacuados por chaminés à tiragem manual ou mecânica, os fumos podem eventualmente também aquecer o gás combustível.

Para auxiliar no escoamento dos gases queimados na direção da chaminé do forno e atuar no controle da pressão interna do forno, pode-se injetar entre o recuperador e a chaminé o ar de indução, ou seja, ar captado da atmosfera a temperatura ambiente. Um damper localizado na entrada da chaminé também atua no controle da tiragem dos gases queimados e, conseqüentemente no ajuste da pressão interna do forno.

Recomenda-se trabalhar nas zonas de pré-aquecimento e aquecimento com atmosferas com percentagem mínima de oxigênio, tendendo mesmo a ligeiramente redutora. Entretanto, na zona de encharque, pode-se trabalhar com um valor visado de excesso de 10% - faixa de 5 a 15% - de ar, de modo a tornar a atmosfera oxidante, favorecendo a formação de uma camada de carepa de fácil remoção. Isto corresponde normalmente a um excesso de oxigênio nos fumos de 1,5 a 2,0%. O excesso de ar não pode ser exagerado para não comprometer a eficiência térmica do forno. Por sua vez, a utilização de uma atmosfera redutora – falta de ar, além de acarretar em diminuição na formação de carepa, levaria a um aumento de emissividade dos gases nas regiões de mais alta temperatura, o que promove um aumento da transferência de calor dos gases para o material aquecido, o que reduz a temperatura dos gases que deixam o forno, correspondendo a uma economia de energia. Porém, uma parcela do combustível não é queimada, podendo gerar fumaça negra proveniente do carbono em suspensão nos gases queimados.

O controle da qualidade da combustão objetiva o bom desempenho do forno, com a menor quantidade de combustível possível. É usualmente obtido pela variação da relação combustível/ar de combustão. A variável que melhor indica a qualidade da combustão em curso é a composição dos gases que deixam o forno. Tal composição deverá apresentar, na maior parte dos casos, o mínimo possível de combustível não queimado e de oxigênio e, portanto a maior parte possível de CO₂. Quando for constatado excesso de oxigênio nos gases queimados, diz-se que a atmosfera do forno é oxidante. Havendo, CO ou H₂, a atmosfera do forno é dita redutora (RIZZO 2007).

2.1.4.2. Carepa

Um aspecto importante do ponto de vista da qualidade superficial – e em certos casos das camadas internas – e de rendimento da laminação a quente dos aços esta relacionado com

a formação de carepa, que consiste em uma camada de óxido depositada na superfície dos produtos semi-acabados e nos produtos finais do processo de laminação (RIZZO 2007).

A carepa é formada a partir dos gases que estão na atmosfera do forno, como consequência da combustão completa ou parcial, que podem ser classificados como:

- i) gases oxidantes – oxigênio (O_2), vapor d'água (H_2O) e dióxido de carbono (CO_2);
- ii) gases redutores – monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2).

A carepa gerada a partir destes gases é constituída dos seguintes óxidos: wustita, hematita e magnetita.

A constituição das camadas de carepa varia conforme a temperatura. Acima de $1100^\circ C$ tem-se apenas $Fe_3O_4 + FeO$, abaixo de $500^\circ C$ tem-se Fe_3O_4 e na faixa intermediária destes extremos de temperatura tem-se camada dos três tipos de óxidos.

A wustita – FeO – é um óxido mais macio do que a magnetita e hematita. Não é estável para temperaturas abaixo de $570^\circ C$, mas com o aumento da temperatura a proporção de FeO cresce, e para temperaturas acima de $700^\circ C$, a wustita passa a ocupar cerca de 95% da espessura da carepa. Apresenta um baixo ponto de fusão – 1370 a $1425^\circ C$ – quando comparada ao ferro puro, e a sua fusão pode provocar penetração de óxido nos contornos de grão acarretando uma deterioração da qualidade superficial (RIZZO 2007). A dureza deste óxido é da ordem de 250 a 350 HV (CASTILHOS 2008).

A hematita – Fe_2O_3 – é formada a temperaturas acima de $800^\circ C$. Em elevadas temperaturas – aproximadamente $1100^\circ C$, a hematita ocupa aproximadamente 1% da espessura da camada de carepa, mas é um material duro e abrasivo, apresentando uma coloração avermelhada (RIZZO 2007). A hematita apresenta dureza acima de 1000 HV (CASTILHOS 2008).

A magnetita – Fe_3O_4 – é estável para temperaturas abaixo de $500^\circ C$, sendo o único óxido presente na carepa, cedendo lugar para o FeO para temperaturas acima de $700^\circ C$. Em altas temperaturas ocupa cerca de 4% da espessura da camada de carepa. A magnetita apresenta uma coloração cinza azulada e, assim como a hematita, é um material duro e abrasivo (RIZZO 2007). Sua dureza está entre 450 e 550 HV (CASTILHOS 2008).

A figura 2.6a apresenta esquematicamente uma típica camada de carepa na superfície de um produto semi-acabado, e na figura 2.6b apresenta-se a variação da composição desta camada em função da temperatura.

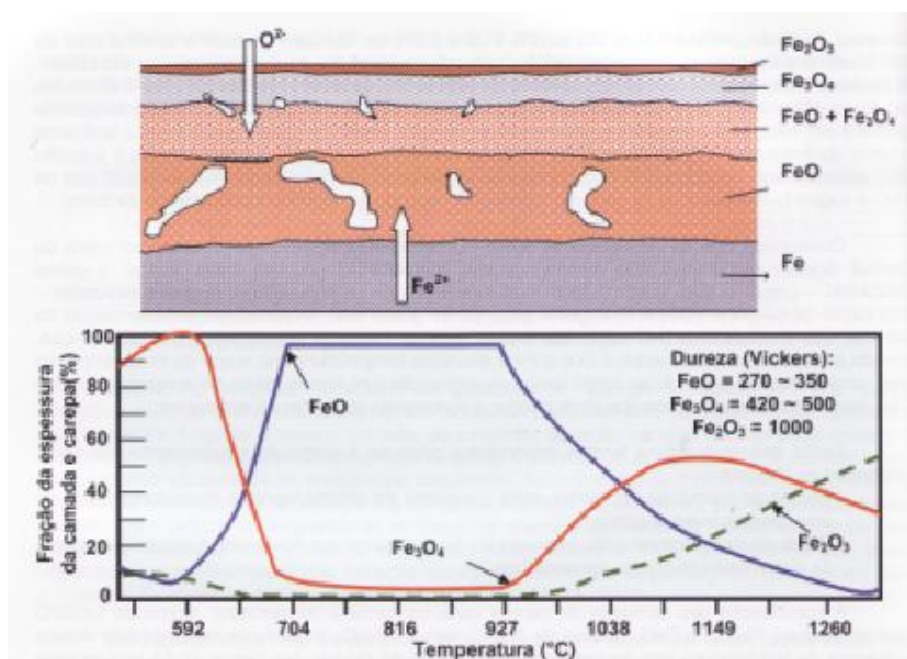


Figura 2.6: Representação esquemática de camada de carepa e variação da composição desta camada com relação à temperatura (RIZZO 2007).

A carepa pode ser classificada em primária, formada no interior dos fornos de reaquecimento, com espessura que não deve ultrapassar cerca de 1,8 a 2,0 mm, secundária, formada durante a exposição do produto semi-acabado aquecido ao ambiente na etapa de desbaste, após a ruptura da camada de carepa primária, e a terciária, que aparece na etapa de laminação de acabamento, após a descarepação na saída do laminador de desbaste e na etapa de resfriamento (GINZBURG, 1989).

2.1.4.3 Descarepador

A demanda por produtos de qualidade e aumento de produtividade tem gerado o desenvolvimento de sistemas mais eficientes de descarepação hidráulica (FRICK 2009).

Descarepação do aço em um processo de laminação a quente trata-se da aplicação de elevada pressão de água em bicos de pulverização. A força de impacto e a pressão destes jatos podem ser determinadas utilizando-se o segundo e o terceiro postulados de Newton. Estes cálculos permitem a aproximação dos valores de impacto e pressão através de fórmula

simples. É possível também a determinação direta do impacto através de transdutores de força, digitalizando a área de impacto dos jatos.

O tamanho das gotas do jato dos bicos parece ser um fator secundário, pois considerações puramente mecânicas conduzem a um modelo suficiente do impacto. Contudo, a medição da área coberta pelos jatos mostra que o filme de água do jato foi desintegrado ao colidir com a superfície, mas não foi completamente atomizado. Diferentes pesquisas comprovam a hipótese de que o choque térmico devido a gradientes elevados de temperatura da superfície da peça sob os jatos é o mecanismo físico dominante da descarepação, especialmente para carepa secundária (BENDIG 2001).

Neste processo a carepa é removida através de dois mecanismos:

- i) Temperatura local da superfície, gerando tensões térmicas entre o óxido e a superfície;
- ii) Força dinâmica imposta pelos jatos d'água.

As tensões térmicas são significativamente influenciadas pela dinâmica do processo de transferência de calor. O coeficiente de transferência de calor é uma função do tipo de bico, da pressão de água, da temperatura da área, da posição do bico em relação à peça e tempo de permanência da peça no processo – velocidade de deslocamento. O valor da força de impacto é o principal fator de remoção da carepa (KOTRBÁČEK 2004). Porém, de acordo com Bendig (2001), “[...] uma estimativa do estresse mecânico, induzida pelo impacto do jato, e a tensão de cisalhamento, criado pelo choque térmico, mostram que o último pode ser cerca de 500 vezes maior e, portanto, é dominante no processo”. Isso demonstra que o mecanismo físico do processo de descarepação ainda é objeto de controversa discussão.

Considerando-se que a força de impacto é o parâmetro dominante no processo de descarepação, a equação 1, que expressa este parâmetro pela relação entre força do jato e a área sob a qual a força é aplicada $[N/mm^2]$, indica que quanto menor a área maior será o impacto. O ângulo e a largura do jato são, portanto, os parâmetros do bico que afetam a área de impacto, desta forma, a partir da seleção de um determinado tipo de bico, a força de impacto dependerá somente da pressão e da vazão de água. Estudos demonstram que um aumento da pressão de água aumenta significativamente o valor do impacto (FRICK 2004).

$$Impacto = \frac{F \text{ [N]}}{A \text{ [mm}^2\text{]}} \quad [1]$$

Portanto, o impacto depende da (1) área sob o jato, (2) ângulo do bico, (3) vazão e pressão de água e (4) altura do jato, sendo que estes parâmetros apresentam um efeito linear sobre o impacto, com exceção da altura que exerce influência exponencial. Conclui-se que, devido a esta influência, a altura do jato é o parâmetro mais efetivo (FRICK 2009).

Na figura 2.7 demonstra-se o efeito da altura do jato sobre o impacto, considerando-se uma vazão de 25,5 l/min, pressão de 200 bar e ângulo de 26°. Percebe-se que, à medida que aumenta a distância entre o bico e a superfície do material a área sob o jato aumenta, reduzindo o impacto.

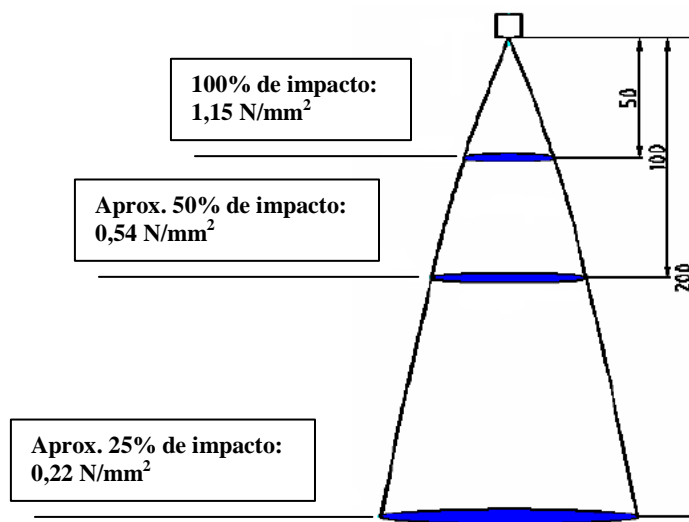


Figura 2.7: Efeito da altura dos bicos sobre o impacto (FRICK 2009).

Na figura 2.8 apresenta-se de forma esquemática um sistema típico de descarepação hidráulica, demonstrando-se os parâmetros físicos da instalação, conforme descrito abaixo:

- | | |
|--|---|
| A= comprimento do jato | s= espessura do material em processo |
| B= espessura do jato | d= diâmetro do tubo |
| C= espessura do jato na direção de laminação | h ₁ = comprimento vertical do bico |
| D= sobreposição de jatos | h ₂ = comprimento vertical do jato |
| E= distância entre bicos | α= ângulo de pulverização do bico |
| H= distância entre o centro do tubo e a face inferior da chapa | β= ângulo de inclinação do jato |

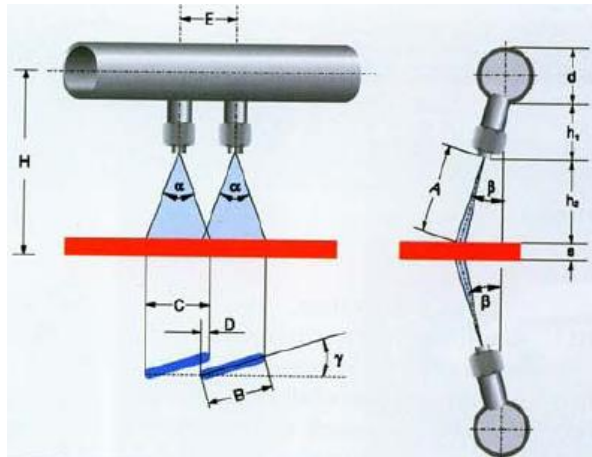


Figura 2.8: Demonstração esquemática de um descarepador hidráulico (FRICK 2004)

2.1.5 Calibração

De acordo com Coda (2005), “a calibração consiste na distribuição da deformação total desejada no material em um conjunto de deformações intermediárias com o objetivo de maximizar a produtividade, aprimorar a qualidade, reduzir as solicitações, facilitar operações complementares – guiagem e manuseio – e reduzir custos”. Estes objetivos são atingidos através da escolha das seqüências de calibração ideal para cada tipo de produto, e do dimensionamento correto dos canais destas seqüências.

2.1.5.1 Seqüências de Calibração

As seqüências de calibração correspondem aos diferentes conjuntos de passes de laminação, com características de aplicação e potencial de deformação específica, e forma geométrica definida.

As seqüências de calibração são formadas por deformações intermediárias que se denominam passes de laminação.

Podem-se classificar as seqüências de calibração para a laminação de produtos longos de aço em desbaste, intermediário e acabador (CODA 2006c).

No desbaste, indicam-se canais que trabalhem bem com grandes seções tais como chatos ou diamantes. O tipo de mecanização também pode ser importante na definição da calibração.

Para os passes de redução - intermediários - aconselham-se seqüências com grande capacidade de redução de área, tais como quadrado – oval – quadrado ou ovais suecos em seções maiores.

No trem acabador onde são necessárias precisão e qualidade recomenda-se os passes redondo – oval – redondo, ou seqüências especiais para cantoneiras ou perfis (Calibração de Produtos Longos 2008). Na tabela 2.1 apresentam-se mais algumas características destas seqüências de calibração, citando-se ainda outros exemplos de seqüências de calibração comumente utilizados.

Tabela 2.1: Características das seqüências de calibração e exemplos de seqüências mais comumente utilizadas (CODA 2006c).

Característica	Desbaste	Intermediário	Acabador
Seções deformadas	Robustas	Médias	Pequenas
Esforços	Elevados	Médios	Menores
Agarre	Possível problema de agarre	Baixa ocorrência de problemas de agarre	Raros problemas de agarre
Redução de área	Médias	Elevadas	Menores
Objetivo	Refinar e compactar a estrutura bruta de fusão; Reduzir área da matéria-prima.	Preparar progressivamente a forma e as dimensões do material para obtenção do produto final.	Conferir forma, dimensões e tolerâncias adequadas e qualidade superficial ao produto final.
Exemplos de seqüências	- Caixa/caixa - Caixa/oval/redondo - Quadrado/oval sueco/quadrado - Quadrado/diamante/quadrado - Diamante/diamante	- Redondo/oval/redondo - Falso redondo/oval/falso redondo - Quadrado/oval/quadrado	- Redondo/oval/redondo - Redondo/oval/redondo - Falso redondo/ova/redondo - Quadrado/diamante/quadrado - Chato mesa lisa/chato mesa lisa

Através da figura 2.9 pode-se observar o detalhe de forma dos canais utilizados nas seqüências de calibração aplicadas ao desbaste, intermediário e trem acabador.

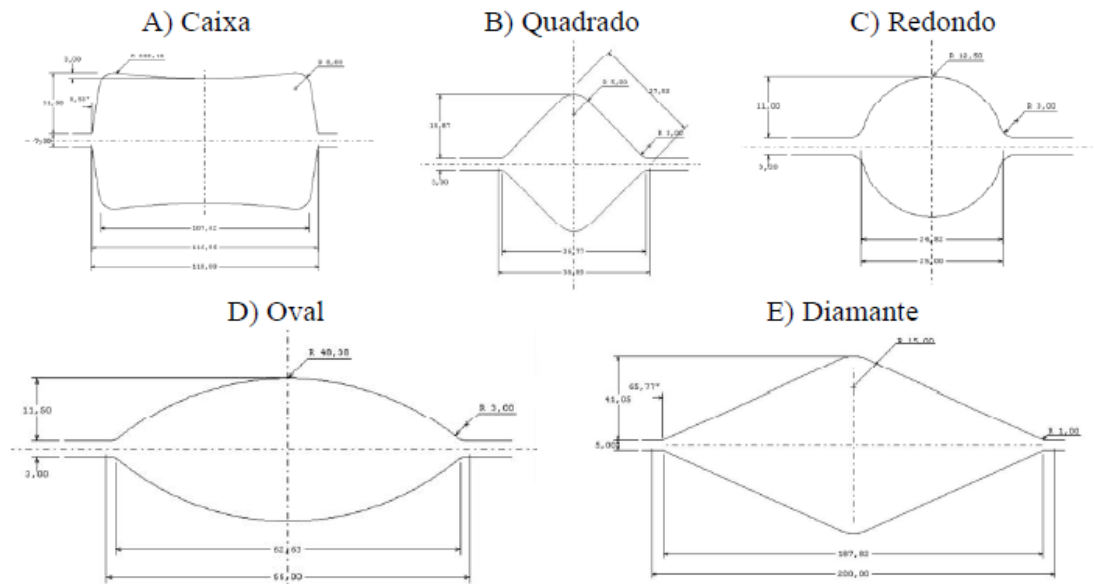


Figura 2.9: Forma dos canais mais aplicados nas seqüências de laminação (Calibração de Produtos Longos 2008).

2.1.6 Defeitos Superficiais

O processo de laminação a quente fornece matéria-prima para processos de forjamento a quente ou a frio, além de vários outros processos de fabricação de peças e componentes mecânicos. A qualidade dos produtos manufaturados depende em muito da qualidade da matéria-prima fornecida pela laminação. Como conseqüência, o cliente sempre exigirá de seus fornecedores produtos com melhor qualidade.

Entre os problemas de qualidade associados a barras laminadas a quente, o problema da qualidade da superfície é o mais importante e significativo (IM 2008).

Defeitos superficiais podem ser definidos como descontinuidades na superfície do material, sendo caracterizados pela forma, profundidade, dimensão e distribuição ao longo da barra laminada. Tem sua origem relacionada aos processos de lingotamento, solidificação, conformação, tratamento térmico, usinagem e manuseio (Álbum de Defeitos 2010).

Mantendo-se o foco no presente trabalho, serão apresentados defeitos com origem no processo de Aciaria, e os defeitos superficiais oriundos do processo de Laminação a Quente.

Os defeitos com maior ocorrência em barras laminadas sem acabamento são apresentados na tabela 2.2, com sua respectiva origem e breve descrição.

Tabela 2.2: Principais defeitos superficiais em barras laminadas sem acabamento (Álbum de Defeitos 2010).

Origem	Nome	Descrição
Aciaria	Trincas	Trincas apresentam-se nas barras laminadas, mas são oriundas de defeitos superficiais nos tarugos.
	Trinca de painel	Trincas apresentam-se com elevada profundidade
	Escamas	Sobreposição de material semelhante a escamas de peixe.
	Macroinclusões	Partículas não metálicas em níveis fora do especificado.
Laminação	Trincas	Trincas oriundas do processo de laminação.
	Escamas	Sobreposição de material semelhante a escamas de peixe.
	Dobra	É uma sobreposição do material de forma variável que penetra em direção ao núcleo.
	Incrustação de carepa	Incrustação de carepa aderente originadas do processo de aquecimento ou conformação.
	Trincas em faixa	Pequenas trincas alinhadas, com baixa profundidade, porém contínuas.

2.1.6.1 Trincas de Aciaria

O tarugo apresenta uma estrutura bruta de fusão, portanto com defeitos internos do tipo vazios, trincas, inclusões entre outros (CODA 2006b). Podendo apresentar ainda defeitos superficiais tipo trincas – longitudinais e transversais – nas faces ou cantos, depressões, marcas de oscilação, blowholes, pinholes entre outros (VILELA 2005).

a) Trinca longitudinal de canto:

São trincas abertas, localizadas nos cantos e paralelas ao eixo do tarugo. Tem origem ligada ao desenho incorreto ou desgaste do molde ou problemas na refrigeração.

b) Trinca transversal de canto:

São trincas perpendiculares ao eixo do tarugo, localizadas nos cantos ou muito próximas a ele, na maioria das vezes aparecem no fundo das marcas de oscilação. Têm origem em diferenças de temperatura, problemas de refrigeração ou oscilação do molde.

c) Trinca longitudinal de face:

São trincas abertas, centralizadas nos lados ou nas zonas próximas aos cantos e em muitos casos aparecem nas regiões afundadas. Tem origem devido a defeitos na refrigeração, na superfície do molde ou no uso de pó inadequado.

d) Trinca transversal de face:

São trincas perpendiculares ao eixo do tarugo localizadas lateralmente e de profundidade variável. Tem origem devido a problemas na extração do tarugo, endireitamento, agarramentos no molde, oscilação do molde e flutuações do nível de aço no molde (Álbum de Defeitos 2010).

2.1.6.2 Trinca de Painei

Trincas longitudinais localizadas no meio da face do tarugo. Podendo ou não aflorar à superfície. Têm origem a partir de choques térmicos, pontos quentes e tem influência com a composição química do aço, sendo mais críticas para seções maiores (Álbum de Defeitos 2010).

2.1.6.3 Escamas de Aciaria

São sobreposições do material semelhante à escama de peixe que, em geral, se desenvolvem predominantemente seguindo uma linha reta e a 90°, fortemente descarbonetadas. Geralmente causadas pela borra de oxicorte, ou por marcas ou riscos durante o manuseio do tarugo na aciaria (Álbum de Defeitos 2010).

2.1.6.4 Macroinclusões

Partículas não metálicas, normalmente óxidos e sulfetos, em níveis fora da especificação. Relacionado principalmente às macroinclusões que afloram do aço líquido para

as faces dos tarugos, ou arraste de pó de molde em direção às marcas de oscilação (Álbum de Defeitos 2010).

Estes defeitos, apresentando-se nos tarugos, podem abrir durante a laminação, caso a seqüência de deformação não tenha sido adequadamente projetada, dando origem a defeitos superficiais no produto final (CODA 2006b).

2.1.6.5 Trincas de Laminação

São descontinuidades que penetram radial ou obliquamente e na mesma direção de laminação. São defeitos de profundidade e comprimento variáveis, apresentando-se de forma alinhada. Tipicamente sem ou com pouca descarbonetação (Álbum de Defeitos 2010).

2.1.6.6 Escamas de Laminação

São sobreposições de material de forma e tamanho variável, que se estendem de maneira irregular sobre a superfície do material laminado, aderindo ao metal base somente em alguns pontos. Pode ser ocasionado por cilindros patinando ou pelo atrito da barra quente com pontos frios durante a laminação e por marcas de manuseio nos fornos de reaquecimento (Álbum de Defeitos 2010).

2.1.6.7 Dobras

São descontinuidades longas, em linhas únicas ou paralelas ao eixo longitudinal, uniformes e em geral penetram obliquamente da superfície para o interior do material. A causa mais freqüente está associada ao excesso de material no canal que é forçado para fora na luz do cilindro – bigode - e nos passes seguintes é dobrado e laminado sobre a superfície do material. Podem também se formar quando os canais não são preenchidos suficientemente e assim o perfil laminado “magro” demais vira no canal. Também pode ser consequência de desalinhamento de gaiolas, causando arestas que são dobradas nos passes seguintes. Quando aparecem em apenas um lado do produto, podem ser causadas por guias mal alinhadas (Álbum de Defeitos 2010).

2.1.6.8 Incrustação de Carepa

São incrustações de óxido do material durante a laminação. Este óxido é o resultado da reação entre o material aquecido e o oxigênio do ar. Esta camada de óxidos pode ter espessura variável em função da temperatura, tempo de permanência em altas temperaturas e atmosfera do forno de reaquecimento, aderindo com maior ou menor firmeza na barra. Se a carepa não é eliminada nos descarepadores, a pressão exercida pelos cilindros pode provocar a sua incrustação, dificultando sua remoção posterior (Álbum de Defeitos 2010).

2.1.6.9 Trincas em Faixa

Pode surgir devido à rugosidade excessiva na superfície desgastada ou danificada dos cilindros de laminação, associado a um alto grau de redução. Este é um tipo especial de trinca de laminação, no qual várias trincas rasas encontram-se alinhadas em uma ou mais geratrizes (Álbum de Defeitos 2010).

2.1.7 Defeitos Superficiais gerados na Laminação

Uma variedade de problemas gerados na laminação, principalmente defeitos específicos, podem surgir a partir da interação entre deformação plástica da peça e deformação elástica dos rolos durante a laminação, devido à influência das elevadas forças de laminação (DIETER 1988). Por isso, uma especificação apropriada das práticas de trabalho a quente é importante. Em particular, a ductilidade e a tensão de escoamento podem ser estabelecidas em função da temperatura e da taxa de deformação (RIZZO 2007).

Quanto à formação de trincas na laminação, os fatores de maior influência são a temperatura de laminação e a seqüência de calibração, porém a influência de outros fatores, como apresentados anteriormente, também deve ser considerada (LIM 2000).

Neste trabalho, tem-se o objetivo de explorar o efeito da temperatura de reaquecimento, e por conseqüência a temperatura de conformação a quente do material, e a influência do uso do descarepador na formação de defeitos superficiais. E, a fim de eliminar ou minimizar os efeitos de defeitos pré-existentes nos tarugos, avalia-se também o desempenho superficial das barras laminadas frente à prévia preparação da superfície do tarugo.

A figura 2.10 demonstra a relação entre o aumento da temperatura de reaquecimento com a rejeição superficial de barras laminadas.

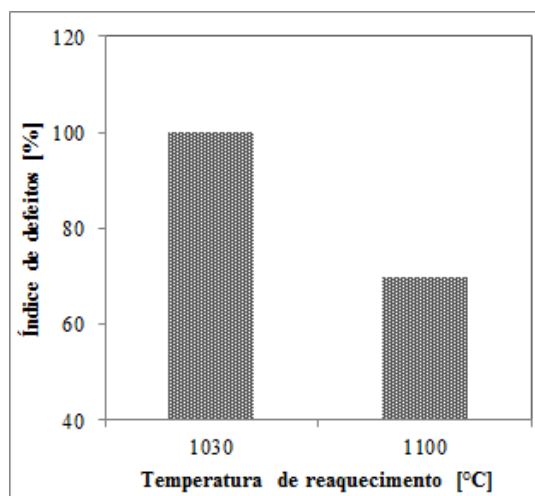


Figura 2.10: Temperatura de reaquecimento x Rejeição Superficial (LIM 2000).

Um aumento de temperatura de reaquecimento propicia que o material seja laminado a uma temperatura mais elevada, o que corresponde a deformações em situação de melhor ductilidade do material, reduzindo o surgimento de trincas por esforços em zonas de baixa ductilidade.

E na figura 2.11 tem-se o efeito da remoção ou não da carepa oriunda do reaquecimento dos tarugos, através de descarepador hidráulico.

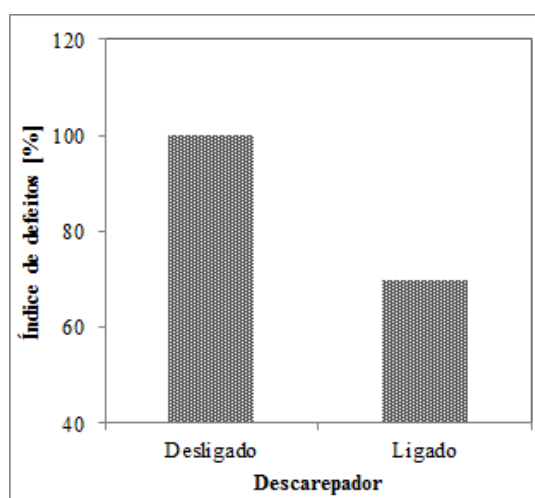


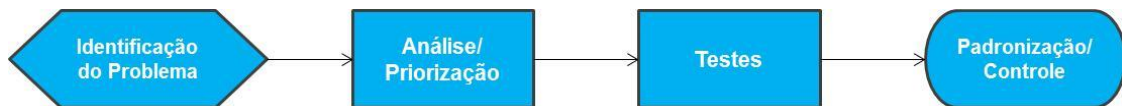
Figura 2.11: Uso do descarepador x Rejeição Superficial (LIM 2000).

O não uso do descarepador permite que a carepa permaneça aderida a superfície do tarugo, e seja laminada, propiciando a nucleação de defeitos superficiais nos passes seguintes.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Materiais e Métodos

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado de acordo com as etapas apresentadas no fluxo abaixo:



Para a definição do aço e bitola para desenvolvimento deste trabalho, tendo-se como objetivo a redução da rejeição superficial nas linhas de inspeção, aumentando-se desta forma a produtividade destes equipamentos, utilizou-se como parâmetros de seleção a rejeição superficial e o volume de produção de cada material, focando-se em bitola igual ou acima de 50,80 mm e menor ou igual a 101,60 mm, material produzido no laminador 1 e inspecionado de forma automática na Linha de Inspeção 3, na unidade siderúrgica de Charqueadas.

O teste de condicionamento superficial foi definido devido ao material atualmente utilizado na bitola selecionada ser aplicado de forma bruta de lingotamento, tornando fundamental a avaliação do desempenho superficial deste material quando condicionado superficialmente enquanto tarugo.

O teste de descarepação foi organizado devido ao entendimento, via revisão bibliográfica, de que este equipamento tem grande influência no desempenho superficial de barras laminadas a quente, e a percepção de que existem oportunidades de melhoria no uso deste equipamento na laminação da unidade de Charqueadas.

A opção por variar a pressão e a distância dos bicos do descarepador à superfície do tarugo deve-se ao fato de que estes parâmetros têm, conforme revisão bibliográfica, a maior influência nos resultados do processo de remoção de carepa.

Por fim, o deste de temperatura de laminação visa quantificar o real impacto da perda de temperatura durante o processo, por tratar-se de um trem semi-contínuo, definir a temperatura limite para o trem acabador e ações para a manutenção da temperatura de aquecimento durante o processo.

As temperaturas de 880°C e 840°C para o teste foram selecionadas a partir de análise do histórico de temperaturas médias atingidas na entrada do trem acabador.

As variáveis respostas são a rejeição superficial, que é a relação entre a quantidade de barras que apresenta e a quantidade total de barras do lote, e o número médio de defeitos por barra, neste caso a relação da quantidade total de defeitos encontrados e o total de barras que apresentou defeito superficial.

Os defeitos superficiais são detectados através de inspeção automática via princípio de campo de fuga. O equipamento é denominado Circoflux. A rejeição superficial e a quantidade de defeitos por barra são obtidas através dos resultados da inspeção superficial, via supervisorio.

Na figura 3.1 pode-se observar que a bitola redonda de 101,60 mm apresenta elevada rejeição superficial e volume de produção, considerando-se dados do ano de 2010. Na seqüência, o desdobramento dos aços produzidos na bitola redonda de 101,60 mm indica que uma oportunidade de trabalho está no aço SAE 1043.

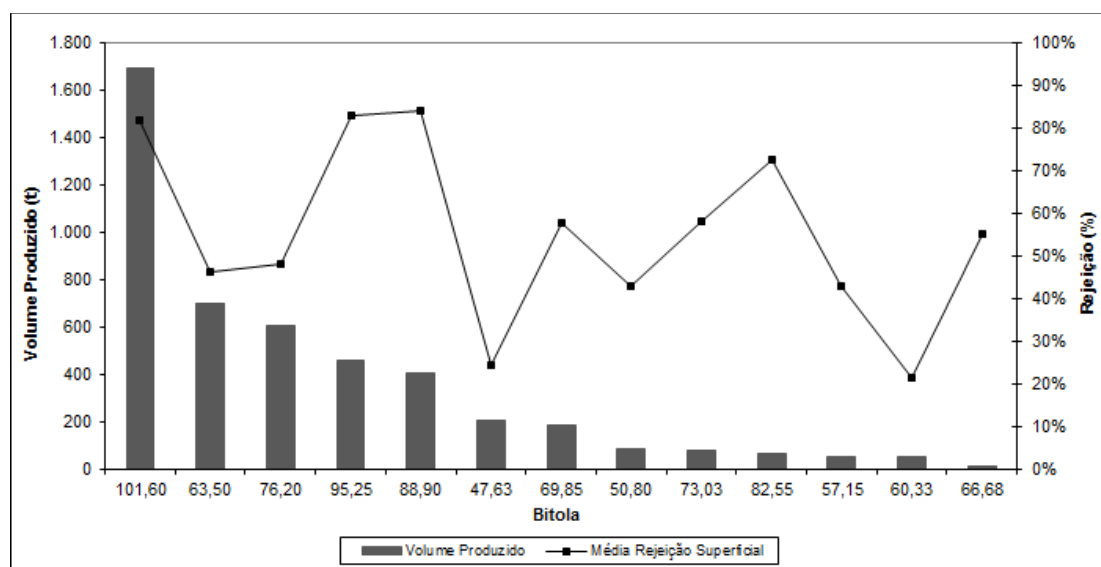


Figura 3.1: Volume de Produção da Laminação x Rejeição Superficial na Linha de Inspeção.

Objetivando a melhoria no desempenho superficial da barra laminada redonda de 101,60 mm no aço SAE 1043, realizaram-se testes em três pontos de possível geração de

defeitos superficiais em barras laminadas a quente, a saber: (1) condicionamento superficial da matéria-prima, considerando-se que os defeitos pré-existentes nos tarugos podem abrir durante a laminação (CODA 2006b), este teste visa quantificar a influência da qualidade superficial dos tarugos no produto final da laminação; (2) sendo a temperatura de laminação um dos mais importantes fatores na geração de defeitos superficiais (LIM 2000) busca-se determinar uma temperatura mínima de laminação, acima da qual o impacto na rejeição superficial das barras, e seu possível sucateamento, sejam controlados, considerando-se a ductilidade e a tensão de escoamento em relação à temperatura e a taxa de deformação (RIZZO 2007); (3) quanto à remoção de carepa formada a partir do reaquecimento para laminação, sabe-se que sua não eliminação através do descarepador pode gerar aderência da camada de óxido na barra, devido à pressão exercida pelos cilindros de laminação, tendo-se como consequência o defeito superficial denominado incrustação de carepa (Álbum de Defeitos 2010), mas também podendo gerar defeito tipo trincas de laminação, a partir da marca deixada na barra, no caso de aderência de carepa e posterior queda, antes dos últimos passes de laminação.

A tabela 3.1 apresenta os testes executados, de forma a simular condições práticas de trabalho, com o objetivo de quantificar o impacto destas variações no resultado de rejeição superficial e quantidade de defeitos por peça.

Tabela 3.1: Resumo dos ensaios realizados.

Teste	Parâmetro	Detalhe
Condicionamento superficial dos tarugos	Esmerilhamento total	Remoção superficial completa das quatro faces e cantos dos tarugos.
	Sem condicionamento	Aplicação na laminação na condição bruta de lingotamento.
Temperatura de laminação	880°C	Temperatura de laminação no trem acabador, mantendo-se no desbaste e trem intermediário as mesmas condições de laminação.
	930°C	
	840°C	
	915°C	
Remoção de carepa	175 Bar	Pressão de água aplicada nos bicos do descarepador, mantendo-se constante a distância dos bicos de aspersão do descarepador em relação à face dos tarugos.
	209 Bar	
	85 mm	Distância dos bicos de aspersão do descarepador em relação às faces do tarugo, mantendo-se a pressão de água constante.
	140 mm	

A configuração da laminação dos tarugos quadrados de 240 x 240 mm de 8 metros, para obtenção de barras laminadas redondas de 101,60 mm de diâmetro ocorre conforme apresentado na tabela 3.2:

Tabela 3.2: Configuração de laminação da barra redonda de 101,60 mm.

Trem	Tipo	Característica	Equipamento	Nº Passes	Perfil
Desbaste	Uma cadeira duo reversível	Fabricante: M&N/GKN Tipo: Baby Blooming Compressão: até 400 t Velocidade máxima: 2,5 m/s	-	9	- Quadrado - Losango
Intermediário	duas cadeiras trio horizontais	Fabricante: M&N/GKN Compressão: até 200 t Velocidade máxima: 1,8 m/s	1ª cadeira	2	- Chato - Quadrado
			2ª cadeira	2	- Oval - Falso Redondo
Acabador	duas gaiolas duo em linha, vertical e horizontal	Fabricante: Danieli Velocidade: de 0,3 a 1,0 m/s	1ª gaiola	1	- Oval
			2ª gaiola	1	- Redondo

Para determinação dos defeitos encontrados foi realizada a caracterização metalográfica no Laboratório Metalúrgico da Unidade Siderúrgica de Charqueadas, através de microscópio óptico Olympus BX60M, e analisador de imagens LEICA QWINV3. As amostras foram preparadas para análise segundo procedimento de metalografia com desbaste seguindo a sequência 120, 320 e 600 grid e polimento em feltro com pasta de diamante 7 e 1 µm. Para revelar a microestrutura, as amostras foram atacadas com solução Nital 2%.

3.2 Teste de condicionamento superficial

Rizzo (2007) designa por condicionamento de matéria-prima para a laminação o conjunto de atividades realizadas com o intuito de remover defeitos superficiais, internos, de forma e dimensionais dos produtos a serem laminados. Considerando as atividades de condicionamento de matéria-prima com o objetivo da melhoria superficial do produto final, atividades como escafagem – retirada de camada da superfície do material através de maçaricos – e esmerilhamento – remoção de pequena camada superficial através de rebolo abrasivo – são comumente utilizadas (VILELA 2007).

A matéria-prima aplicada atualmente para a produção do material em estudo no presente trabalho é um tarugo quadrado proveniente de lingotamento contínuo, com dimensões de 240 x 240 mm e comprimento de 8 metros, sem condicionamento superficial.

Com o intuito de quantificar o impacto dos defeitos superficiais prévios dos tarugos no resultado final da laminação, dividiu-se uma corrida do aço SAE 1043 em duas ordens de produção, aplicando-se em uma das ordens o condicionamento superficial dos tarugos através do esmerilhamento total das quatro faces. A outra ordem de produção não recebeu condicionamento, sendo aplicada na condição bruta.

O esmerilhamento total foi realizado em esmerilhadeira automática Centro Maskin, com remoção via rebolo abrasivo grão 12, com força de 1000 kg. A camada removida em cada face é de aproximadamente 1,5 mm de profundidade.

As ordens de produção foram laminadas em seqüência, com os mesmos parâmetros de reaquecimento – temperatura, tempo e atmosfera do forno – e mesma condição de descarepação.

O Forno de reaquecimento é do tipo walking beam, do fabricante Bendotti, dividido em três zonas – pré-aquecimento, aquecimento e encharque, e utiliza como combustível gás natural.

3.3 Teste de temperatura de laminação

O reaquecimento é, conforme Blain (1964), a etapa do processo de laminação a quente que exerce importante papel tanto para o bom desenvolvimento da operação de laminação do aço quanto para a qualidade superficial e interna do produto final, e torna-se ainda mais crítica quando se leva em conta as perdas de temperatura que ocorrem em um trem aberto ou semi-contínuo (RIZZO 2007), devido a necessidade de manuseio do material e dependência da habilidade operacional, e ainda considerando-se possíveis interrupções do processo.

Com o objetivo de determinar a influência da temperatura de laminação, dividiu-se uma corrida de tarugos em dois grupos de 8 e 9 peças, de forma que as condições de lingotamento fossem iguais. Estes tarugos não receberam condicionamento superficial. Realizou-se o enformamento para reaquecimento dos tarugos em seqüência, com os mesmos parâmetros de reaquecimento – temperatura, tempo e atmosfera do forno – e mesma condição de descarepação.

As etapas de desbaste e intermediário foram executadas conforme ritmo de produção, para os dois grupos de tarugos da corrida. Processou-se o primeiro grupo de tarugos da corrida – 8 tarugos, sendo laminado no trem acabador na temperatura de aproximadamente 930°C. O segundo grupo de tarugos – 9 tarugos – foi laminado normalmente nas etapas de desbaste e intermediário e, a partir deste momento aguardou-se que a temperatura destes tarugos atingisse 880°C, e então as peças seguiram para o trem acabador.

Ainda outra corrida de lingotamento foi dividida em dois grupos, de 10 e 11 tarugos, sendo os 10 primeiros laminados em ritmo normal de laminação, atingindo temperatura de aproximadamente 915°C, e o grupo com 11 tarugos recebeu o mesmo tratamento do primeiro teste – ritmo normal no desbaste e trem intermediário e parada em frente ao trem acabador – neste caso, até aproximadamente 840°C.

Com esta configuração de teste, partiu-se da temperatura atingida pelo ritmo normal de laminação, em torno de 920°C, e reduziu-se a temperatura para alguns tarugos, 880°C e 840°C, situação que pode ocorrer na prática por variação de ritmo devido a problemas operacionais ou de manutenção.

Objetiva-se quantificar os impactos das variações no processo – devido ao laminador de configuração semi-contínua – na rejeição superficial e quantidade de defeitos por barra.

3.4 Teste de remoção de carepa - descarepador

Frick (2009) observa que a demanda por produtos de qualidade e aumento de produtividade tem gerado o desenvolvimento de sistemas mais eficientes de descarepação hidráulica. No processo de descarepação, a remoção do óxido ocorre através de dois mecanismos: (1) tempera local da superfície, gerando tensões térmicas entre o óxido e a superfície do material e (2) força dinâmica imposta pelo jato d'água. O valor da força de impacto é o principal fator de remoção da carepa (KOTRBÁCEK 2004).

Considerando-se que a força de impacto é o parâmetro dominante no processo de descarepação, a equação 1, que expressa este parâmetro pela relação entre força do jato e a área sob a qual a força é aplicada [N/mm^2], indica que quanto menor a área maior será o impacto (FRICK 2004).

$$Impacto = \frac{F [N]}{A [mm^2]} \quad [1]$$

Portanto, o impacto depende da (1) área sob o jato, (2) ângulo do bico, (3) vazão e pressão de água e (4) altura do jato, sendo que estes parâmetros apresentam um efeito linear sobre o impacto, com exceção da altura que exerce influência exponencial. Conclui-se que, devido a esta influência, a altura do jato é o parâmetro mais efetivo (FRICK 2009).

A partir de uma corrida de aço SAE 1043, criaram-se dois grupos de tarugos com 8 peças cada um, e em cada um destes grupos trabalhou-se com pressões do jato d'água diferentes. Estes tarugos não receberam condicionamento superficial.

O descarepador utilizado é da marca Procome, modelo PF-190/50, com pressão de 240 Bar e vazão de 220 l/min.

No grupo 1, utilizou-se pressão do descarepador em aproximadamente 209 Bar e no grupo 2 manteve-se a pressão em torno de 175 Bar. Como se realizou nos testes anteriores, o enfornamento para reaquecimento dos tarugos ocorreu em seqüência, mantendo-se os mesmos parâmetros de reaquecimento – temperatura, tempo e atmosfera do forno - para os dois grupos de peças da corrida.

No segundo teste realizado envolvendo a remoção de carepa, duas corridas de lingotamento foram divididas em dois grupos cada uma. A primeira corrida gerou dois grupos de 9 tarugos, e na segunda corrida os grupos formados foram de 8 tarugos cada.

Manteve-se constante a pressão do jato d'água, e variou-se a distância – altura - dos bicos de aspersão das faces do tarugo. Repetindo-se o teste de impacto da altura do jato nas duas corridas.

Variou-se a altura dos bicos através da seleção dos anéis de bicos do descarepador. O equipamento possui dois anéis de diferentes alturas, destinados a diferentes bitolas de tarugos. A configuração apresentada na figura 3.2 é usualmente destinada a bitolas de tarugos de 150 a 180 mm. Na figura 3.3 apresenta-se o anel usualmente utilizado nas bitolas de 240 mm.

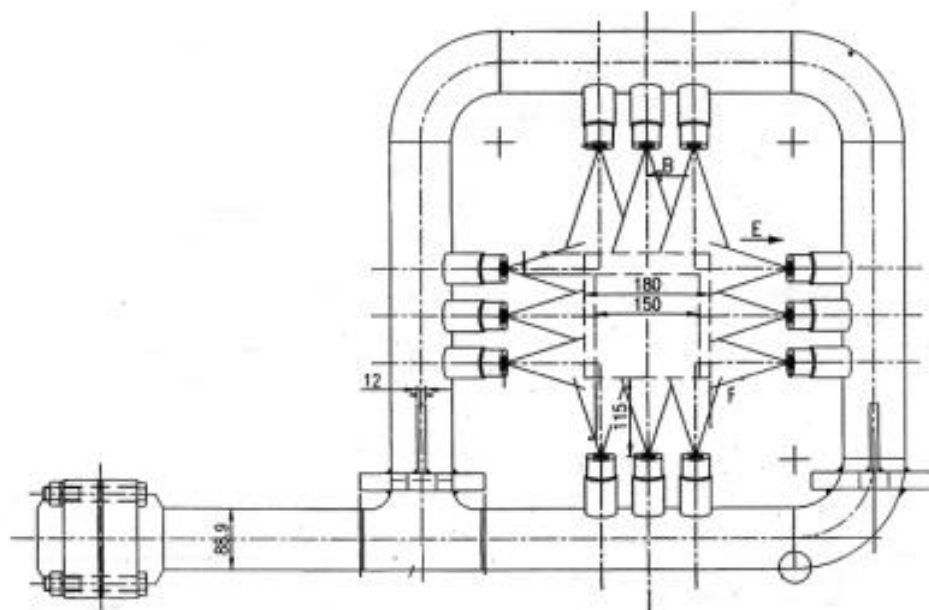


Figura 3.2: Anel do Descarepador destinado às bitolas de 150 a 180 mm.

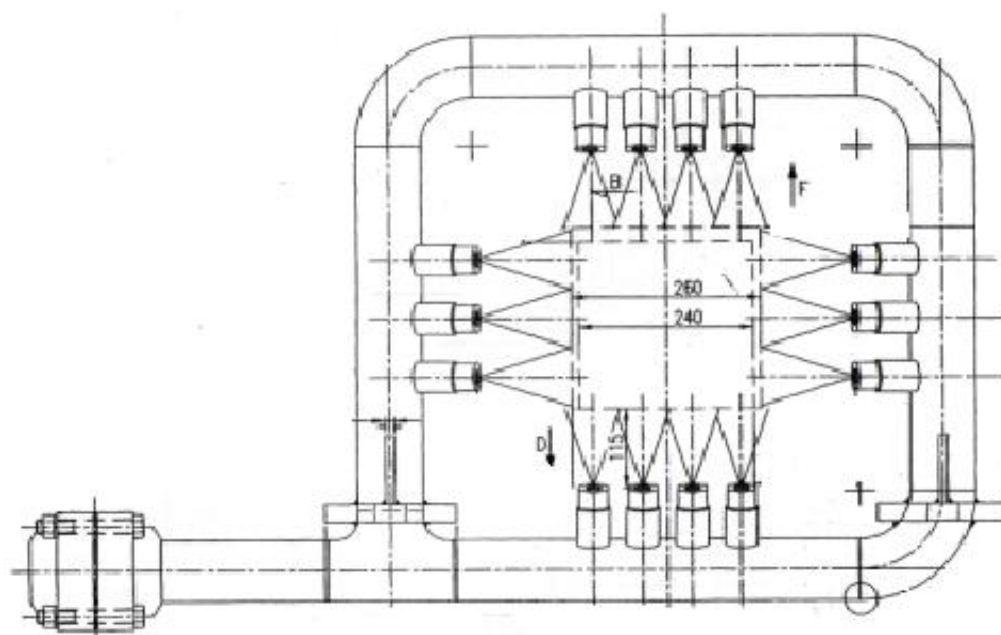


Figura 3.3: Anel do Descarepador destinado às bitolas de 240 a 260 mm.

Destaca-se que o aço em estudo não possui características químicas para grande aderência de carepa, porém ainda assim verificou-se expressivo resultado de qualidade superficial nos testes realizados.

Avaliaram-se os resultados dos testes descritos anteriormente através do comparativo entre o percentual de rejeição superficial e número de defeitos por peça nas duas condições

testadas para cada parâmetro (condicionamento superficial, temperatura de laminação e remoção de carepa).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Teste de condicionamento superficial

A figura 4.1 apresenta o resultado do teste de condicionamento superficial dos tarugos provenientes do lingotamento contínuo, demonstrando como variável resposta: (1) Relação entre a Rejeição Superficial, ou seja, quantas barras apresentaram defeito superficial do total de barras da ordem de produção, nas duas condições testadas; e a (2) Quantidade de Defeitos por Barra, indicando quantos defeitos superficiais cada barra rejeitada apresentou em média.

Os defeitos apresentados no material com condicionamento superficial dos tarugos, conforme caracterização em laboratório foram dobras e escamas de laminação, indicando que defeitos oriundos dos tarugos provavelmente foram eliminados pelo esmerilhamento total.

Os tarugos aplicados na condição bruta de lingotamento tiveram seus defeitos caracterizados como escamas de laminação e trincas de aciaria. O material com esmerilhamento total dos tarugos apresentou menor rejeição superficial e os defeitos com menor profundidade média, quando comparados com a ordem de produção em que os tarugos não receberam condicionamento.

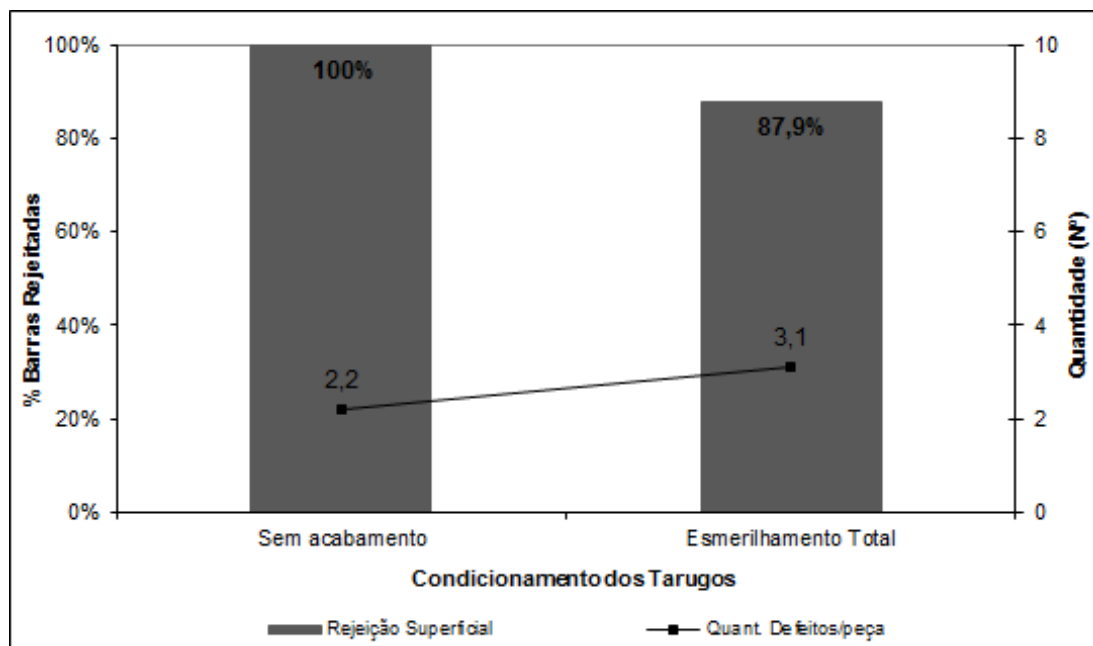


Figura 4.1: Resultado do teste de Condicionamento Superficial dos Tarugos.

O número de defeitos superficiais por barra não correspondeu ao tipo de condicionamento superficial realizado nos tarugos, ou seja, o material com esmerilhamento total de superfície apresentou na média 3,1 defeitos por barra, enquanto a aplicação de tarugos brutos do lingotamento apresentou 2,2 defeitos por barra.

Como se trata de mesma corrida, e por conseqüência semelhantes condições de lingotamento, e considerando-se que o enformamento das duas condições de tarugos foi efetuado em condições semelhantes, mesmo sendo a laminação em seqüência, é provável que o fato de elevado número de defeitos na condição de preparação dos tarugos deva-se a alguma ocorrência operacional durante a laminação, seja de ajuste ou desgaste nos laminadores, seja por mudança operacional nas cabines de comando.

Fica evidente que o condicionamento superficial exerce influência positiva no desempenho superficial do material durante a inspeção, através da eliminação de defeitos e marcas superficiais existentes nos tarugos, comprovando-se os dados da literatura citados por Rizzo (2007) e Lim (2000).

Porém, apesar da evidente melhora nas condições superficiais, o processo de esmerilhamento dispense tempo, aumentando o tempo total de produção, e agrega custo ao produto. Desta forma, fazem-se necessárias ações no lingotamento do aço, e fim de buscar melhores condições superficiais nos tarugos brutos, e controle rigoroso dos parâmetros de rea aquecimento e laminação que, como demonstrados na seqüência deste trabalho, tem forte

influência na geração de defeitos, mas também na eliminação de defeitos superficiais pré-existentes nos tarugos brutos.

4.2 Teste de temperatura de laminação

Na tabela 4.1 apresentam-se as temperaturas de cada tarugo do primeiro teste, em °C, obtidas no pirômetro localizado próximo à tesoura de desponte. Observando-se que, dividiu-se a corrida em dois grupos de 8 e 9 tarugos.

Tabela 4.1: Temperatura de Laminação antes do Trem Acabador, teste 1 (T1), °C.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Grupo 1	923	931	930	935	938	930	936	934	-
Grupo 2	880	882	882	881	875	885	880	885	878

Observa-se na figura 4.2 o resultado do teste de variação de temperatura de laminação durante o trem acabador. Mantem-se a consideração das variáveis respostas do teste anterior: (1) Relação entre a Rejeição Superficial das condições testadas e (2) Quantidade de Defeitos por Barra.

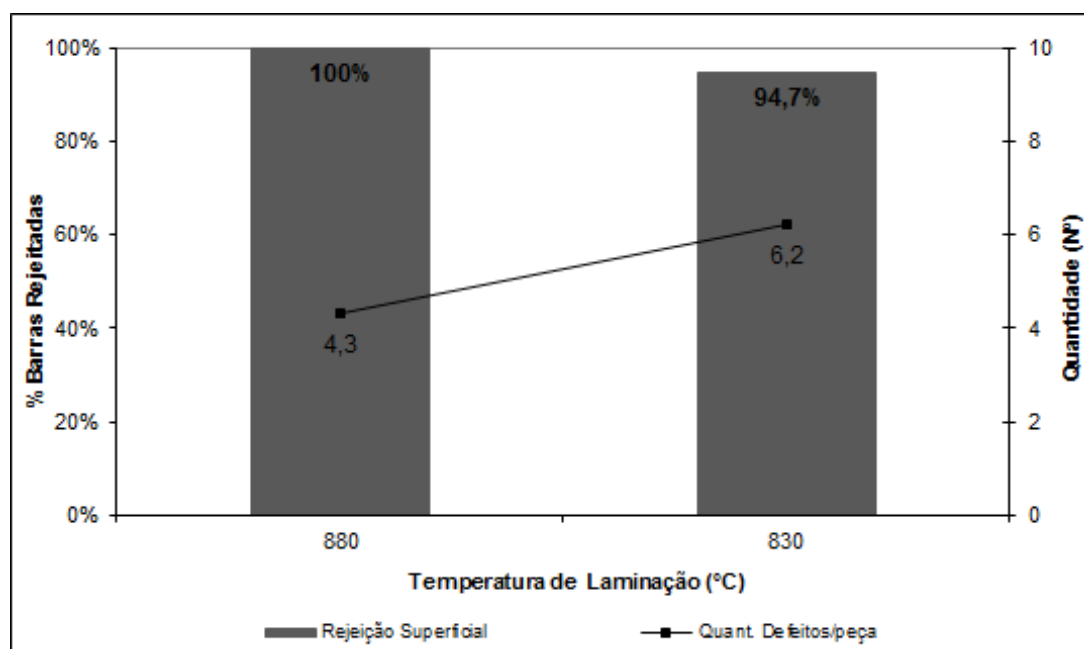


Figura 4.2: Resultado do Teste 1 de Temperatura de Laminação no Trem Acabador.

A rejeição superficial apresentou-se mais elevada em situação de laminação com temperatura em torno de 880°C, com diferença para a condição de temperatura em aproximadamente 930°C de 5,3%. Analisando-se a quantidade de defeitos superficiais, os resultados apresentam-se contrários em relação à rejeição superficial, ou seja, durante a laminação em temperatura mais elevada - 930°C – o material apresentou significativamente mais defeitos por barra, 6,2 defeitos em média, frente aos 4,3 defeitos por barra apresentados pela condição de laminação à temperatura de 880°C.

Como, em ambas as condições de temperatura testadas, os tarugos estavam em estado bruto de lingotamento e a caracterização de defeitos via laboratório indicou, para todas as amostras nas duas condições, a ocorrência de trincas de aciaria, a elevada diferença de defeitos por barra provavelmente está ligada à condição superficial dos tarugos e não a variação de temperatura durante a laminação no trem acabador.

No teste de condicionamento superficial observamos a melhora do desempenho superficial das barras quando obtidas a partir de tarugos esmerilhados, ou seja, a eliminação da camada superficial dos tarugos brutos resultou em ganho de desempenho do material. O que se observa com relação à temperatura de laminação condiz com as afirmações de Blain (1964) e Rizzo (2007), quando afirmam que a temperatura, além de facilitar o processo de laminação, tem forte influência na geração de defeitos superficiais e na sua eliminação ou redução quando considerados os defeitos pré-existentes nos tarugos.

Os resultados aqui obtidos demonstram que para temperaturas mais elevadas, considerando-se as semelhantes condições de laminação aplicadas aos dois grupos de tarugos da corrida, o impacto dos defeitos pré-existentes nos tarugos foi minimizado quanto consideramos a rejeição superficial, embora se observe que a quantidade de defeitos por peça não apresente esta influência.

Na tabela 4.2 demonstra-se das temperaturas praticadas no segundo teste de qualidade, em °C, obtidas no pirômetro próximo a tesoura de desponte.

Tabela 4.2: Temperatura de Laminação antes do Trem Acabador, teste 2 (T2), °C

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Grupo 1	921	941	937	900	898	932	932	908	888	916	-
Grupo 2	848	846	841	850	833	857	839	837	838	823	821

No segundo teste, como esperado e seguindo os resultados do primeiro teste, a rejeição superficial apresentou-se mais elevada em situação de laminação com temperatura mais baixa,

em torno de 840°C, neste teste com expressiva diferença de rejeição superficial, conforme se apresenta na figura 4.3.

Observando-se a quantidade de defeitos superficiais, os resultados apresentam a mesma tendência, ou seja, maior número de defeitos superficiais por peça apresenta-se na parte da corrida laminada em temperatura mais baixa, em torno de 840°C.

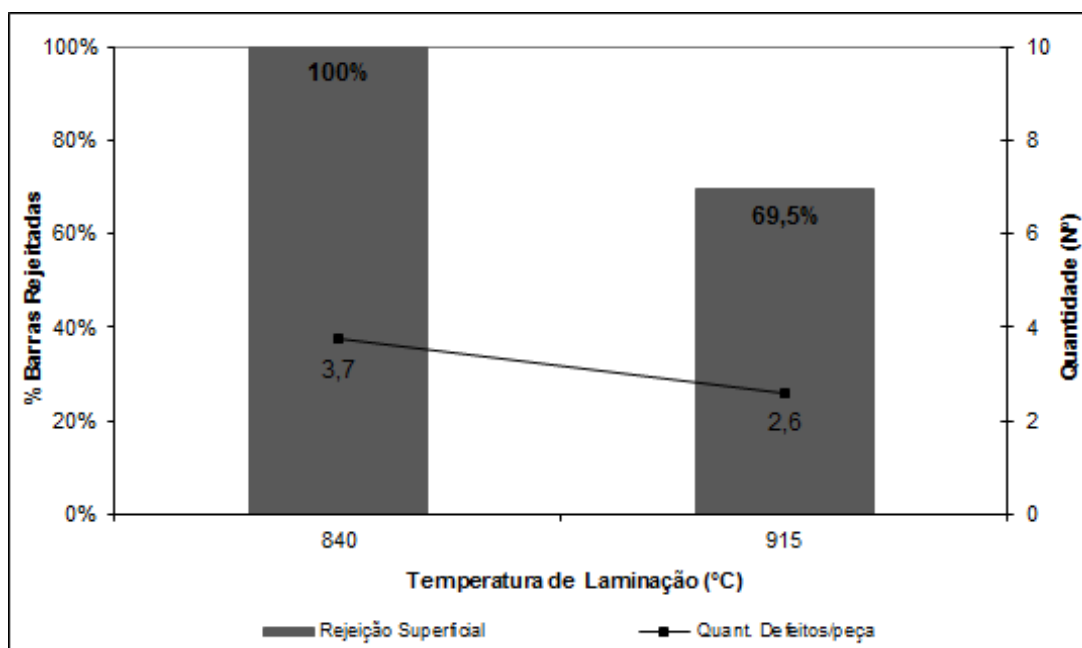
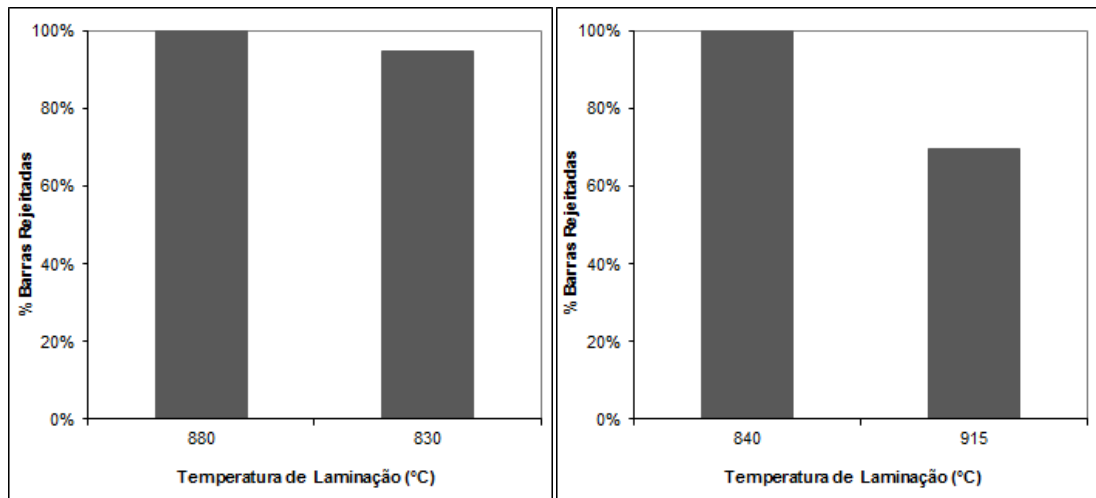


Figura 4.3: Resultado do Teste 2 de Temperatura de Laminação no Trem Acabador.

Considerando agora os resultados do segundo teste de temperatura no trem acabador, fica evidente a importância da temperatura de laminação para a melhoria de desempenho superficial do aço, observando-se que a caracterização dos defeitos de ambas as condições do segundo teste, assim como no primeiro, foi de trincas de aciaria.

Comparativamente, e considerando-se que os testes realizados por Lim et al (2000) quanto à temperatura de aquecimento elevaram a temperatura de laminação, pode-se verificar através da figura 4.4, que demonstra o resultado da rejeição superficial dos testes 1 e 2, respectivamente, com a figura 4.5 que, demonstra os resultados obtidos por Lim et al (2000), que os resultados aqui obtidos seguem a tendência observada na referida literatura.



(a)

(b)

Figura 4.4: (a) Resultado primeiro teste de temperatura; (b) Resultado do segundo teste de temperatura de laminação.

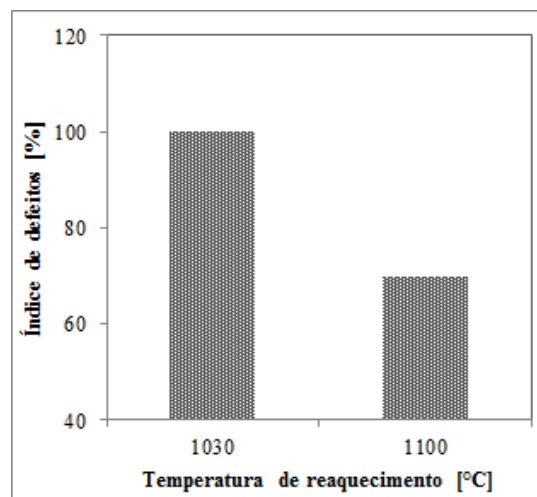


Figura 4.5: Resultado encontrado por Lim et al (2000)

4.3 Teste de remoção de carepa - descarepador

Na tabela 4.3 apresentam-se as pressões aplicadas na descarepação de cada tarugo, em Bar, obtidas através de controle supervisorío. Observando-se que, dividiu-se a corrida em dois grupos de 8 tarugos.

Tabela 4.3: Pressões aplicadas na remoção de carepa, Bar

	1	2	3	4	5	6	7	8
Grupo 1	209	207	210	210	209	209	212	207
Grupo 2	175	173	177	176	176	176	175	177

Observa-se na figura 4.6 o resultado da variação de pressão na retirada de carepa dos tarugos brutos de lingotamento. Novamente, consideram-se as variáveis respostas: (1) Relação entre a Rejeição Superficial, ou seja, quantas barras apresentaram defeito superficial do total de barras da ordem de produção, nas duas condições testadas; e a (2) Quantidade de Defeitos por Barra, indicando quantos defeitos superficiais cada barra rejeitada apresentou em média.

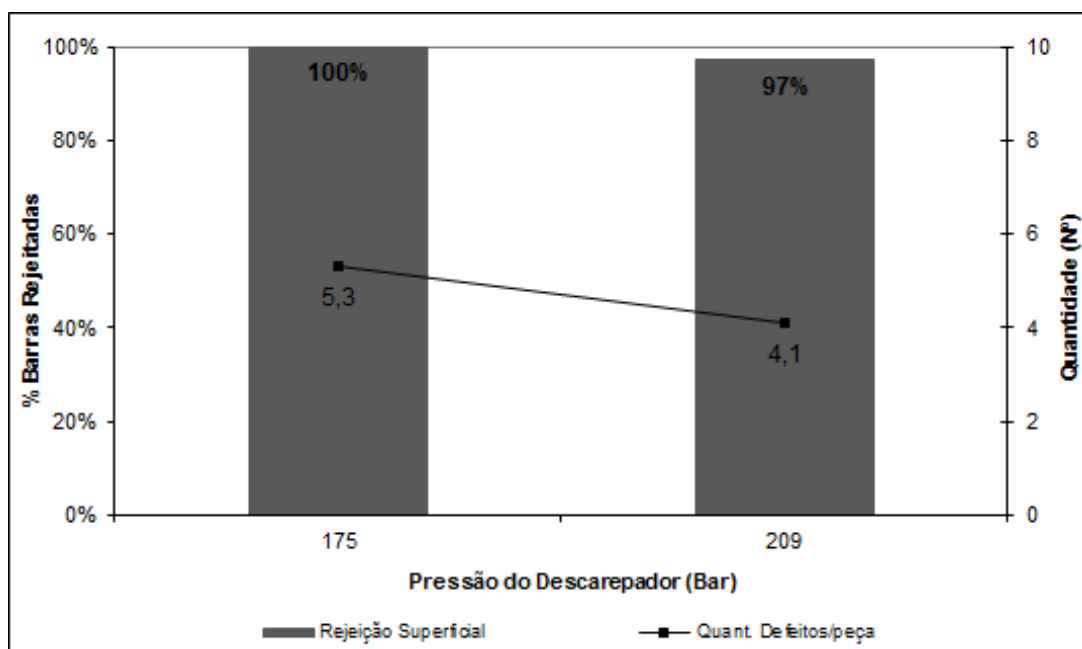


Figura 4.6: Resultado do teste de Descarepação Hidráulica.

A queda de 3% na rejeição superficial, a partir da aplicação de maior pressão durante a remoção da carepa, embora pequena, torna-se interessante quando se considera a queda na quantidade de defeitos superficial média apresentada por barra. Os defeitos apresentados, nas duas situações, são de origem laminação, a saber, dobra, trinca e escamas, e mesmo no caso de menor pressão na descarepação, não houve ocorrência de defeito do tipo incrustação de carepa. Lembrando-se que o enformamento e laminação ocorreram em seqüência, e trata-se de mesma corrida em Aciaria, observa-se que a retirada ou não de carepa apresenta certa correlação com a formação de outros defeitos durante a laminação, lembrando que a carepa

que permanece aderida nos tarugos após o reaquecimento é laminada nos primeiros passes de laminação, nucleando defeitos superficiais (LIM 2000).

No segundo teste de remoção de carepa realizado, objetiva-se quantificar a influência da distância – altura – do jato d'água do descarepador na melhoria do processo de remoção de carepa após o reaquecimento.

Na tabela 4.4, apresentam-se as pressões aplicadas em cada grupo de tarugos, em Bar, indicando a distância em que os bicos de aspersão estavam da superfície do tarugo.

Tabela 4.4: Pressões do descarepador, em Bar, para diferentes alturas de jato d'água, em mm

		Altura	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Corrida 1	Grupo 1	140 mm	231	230	229	230	230	231	229	230	230
	Grupo 2	85 mm	228	236	235	234	234	233	233	233	233
Corrida 2	Grupo 1	140 mm	230	230	230	230	229	229	229	229	-
	Grupo 2	85 mm	233	232	232	232	231	232	232	232	-

Desta forma, observa-se que a pressão utilizada manteve-se constante, proporcionando boas condições de avaliação da influência da altura dos bicos na remoção de carepa.

Na figura 4.7, apresenta-se o desempenho superficial das barras laminadas referentes à corrida 1.

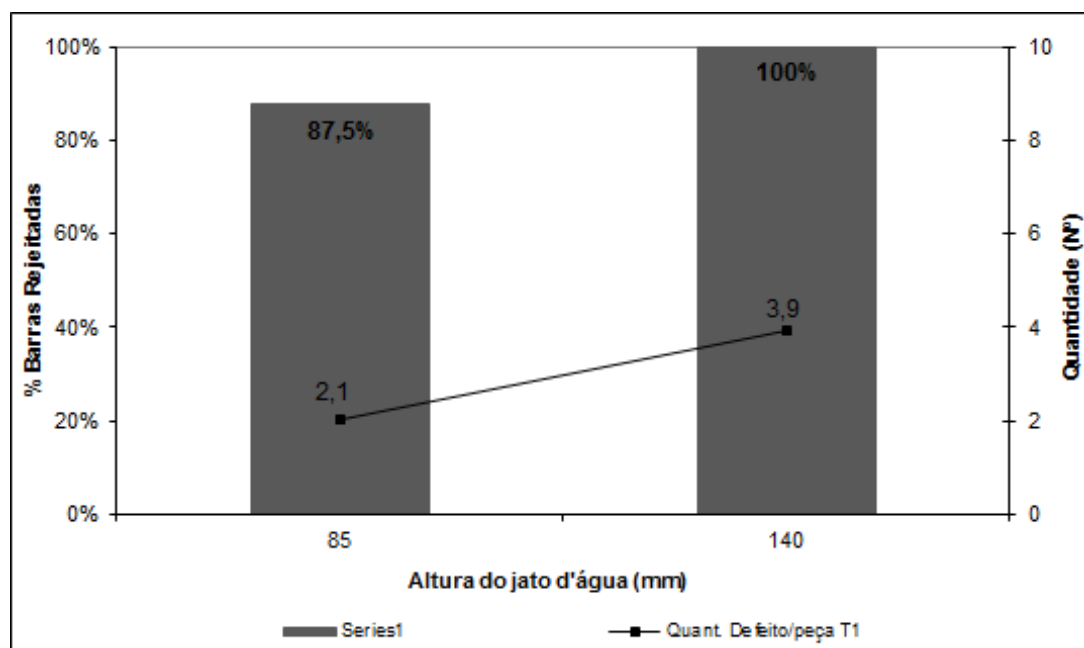


Figura 4.7: Resultado da corrida 1, quanto à distância dos bicos do descarepador.

A figura 4.7 demonstra a redução da rejeição e número de defeitos por peça nas barras em que os tarugos foram descarepados com o jato d'água em menor distância com relação à sua superfície.

O desempenho superficial das barras da corrida 2 é apresentado na figura 4.8.

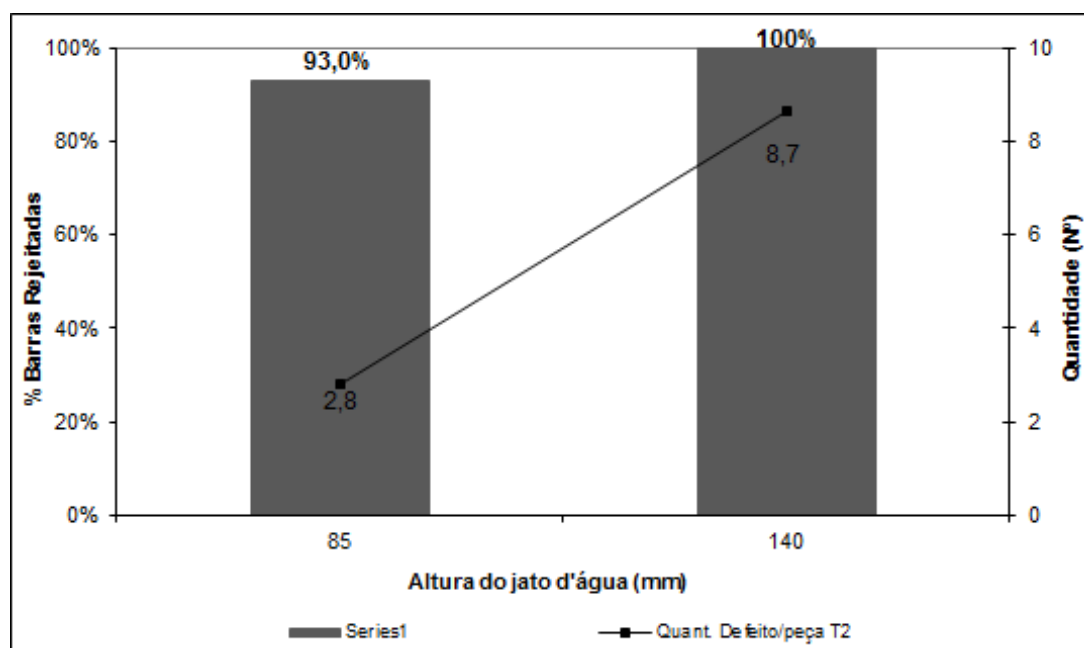


Figura 4.8: Resultado da corrida 2, quanto à distância dos bicos do descarepador.

Rejeição superficial e quantidade de defeitos por barra apresentam-se melhores quando o tarugo foi descarepado com menor distância dos bicos em relação à superfície dos tarugos, confirmando-se os resultados obtidos no teste realizado com a corrida 1.

Evidente a influência da distância dos bicos na rejeição superficial e quantidade de defeitos por peça.

Em ambos os testes realizados, envolvendo diferentes corridas, o desempenho superficial do material descarepado com menor altura – distância – dos bicos do descarepador é melhor, apresentando expressiva redução da quantidade de defeitos superficiais por peça.

Comparando-se a melhoria obtida com a variação da pressão de descarepação frente aos resultados obtidos variando-se a altura dos bicos do jato d'água, demonstrados nas figuras 4.7 e 4.8, percebe-se que o último fator tem maior influência sobre o resultado da descarepação, e por conseqüência, do desempenho superficial do material laminado.

Esta forte tendência de melhoria do desempenho superficial com a variação da altura dos bicos do descarepador vai ao encontro dos resultados indicados por Frick (2009), quando este afirma que a altura dos bicos exerce influência exponencial no impacto, e desta forma é o parâmetro mais efetivo com relação à força dinâmica do jato – impacto.

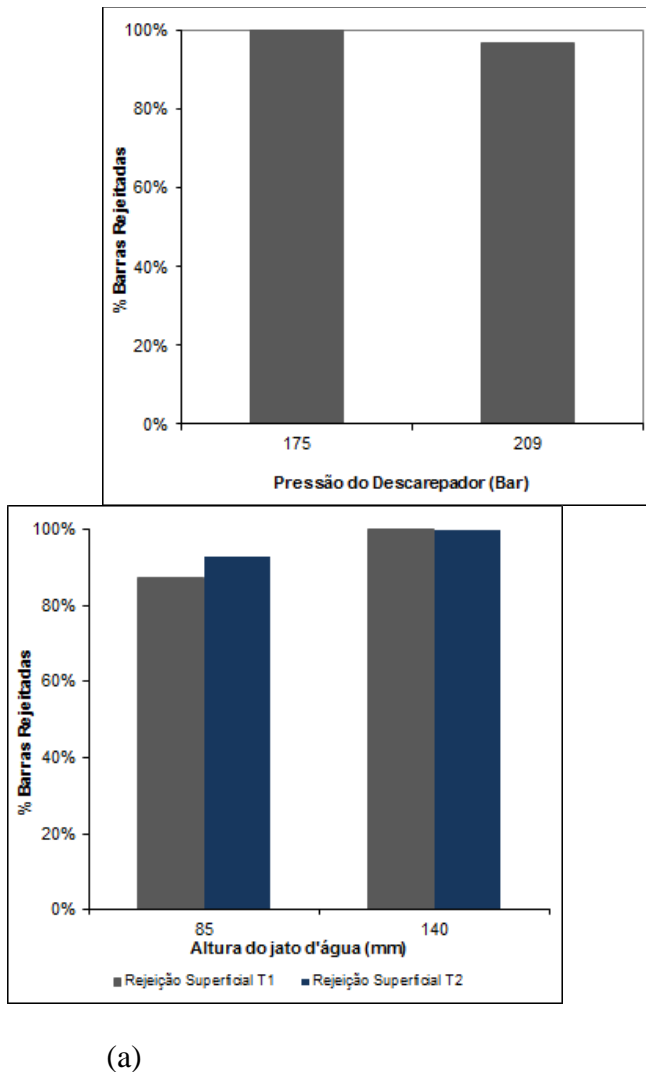


Figura 4.9: (a) Resultado do teste de Pressão do Descarepador; (b) Resultado dos testes de variação de altura dos bicos do Descarepador.

Comparando-se na figura 4.9, considerando-se somente a rejeição superficial, a tendência de redução no índice de defeitos assemelha-se aos resultados obtidos por Lim et al (2000), apresentado na figura 4.10, em seu estudo de otimização de parâmetros de processo para a melhoria da qualidade superficial, com relação à remoção de carepa da superfície da matéria-prima de laminação.

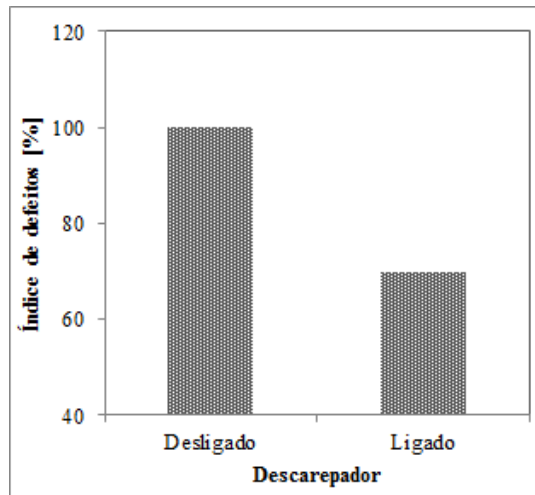
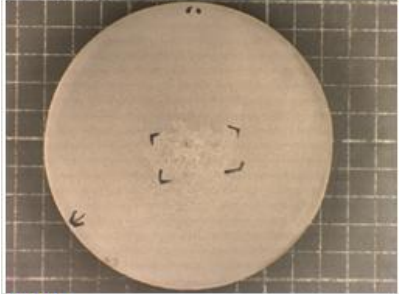
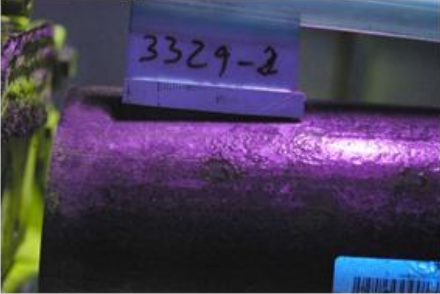
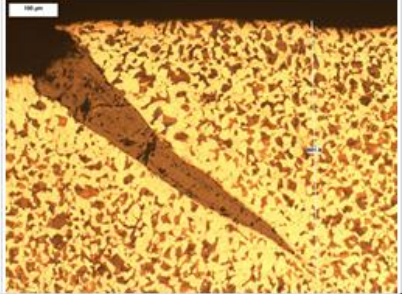
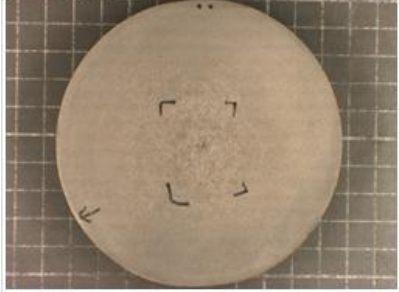
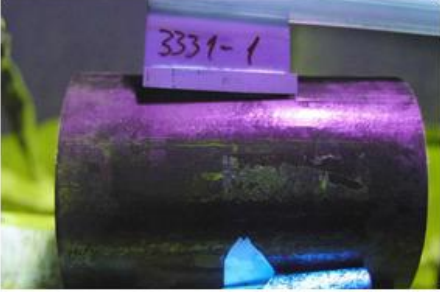
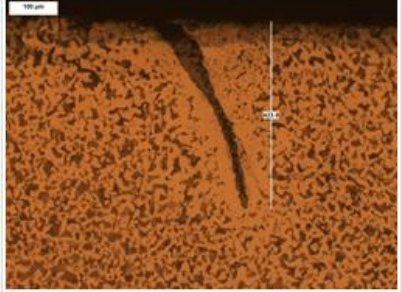
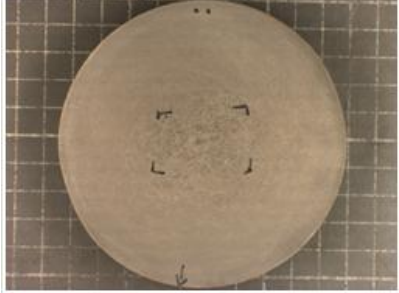

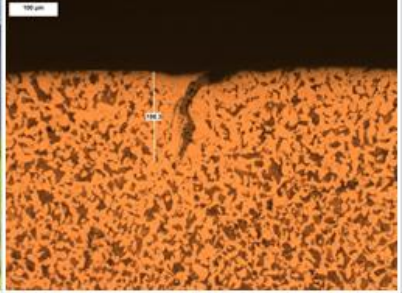


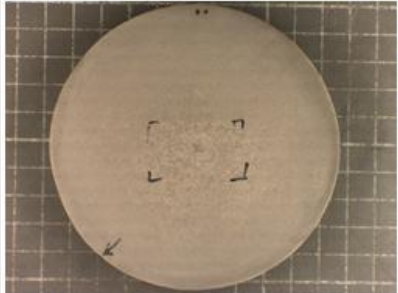
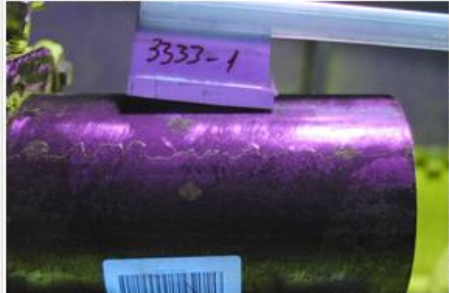
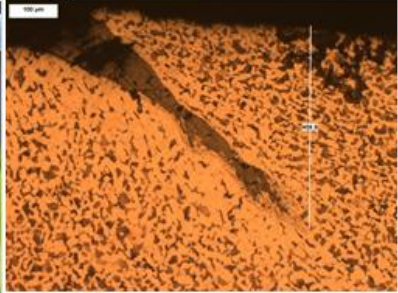
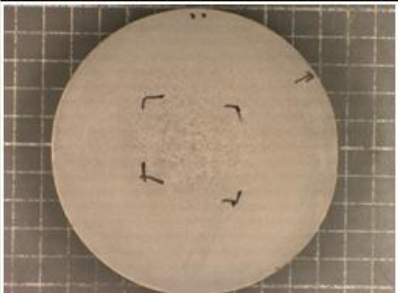
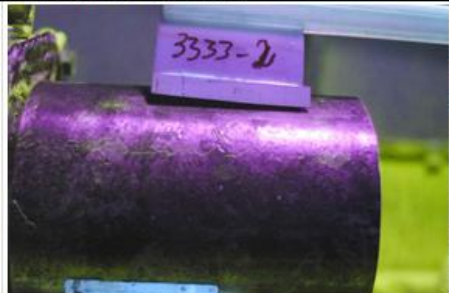
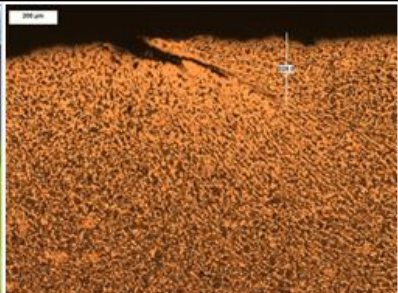
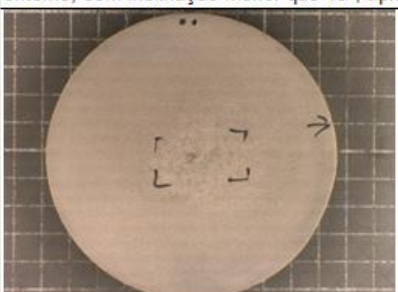
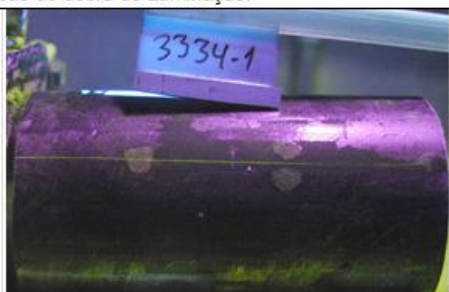
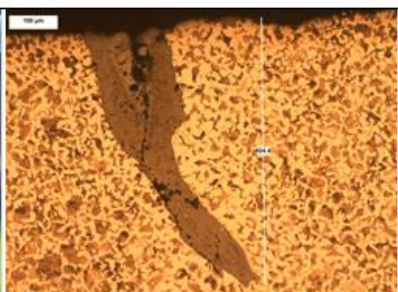
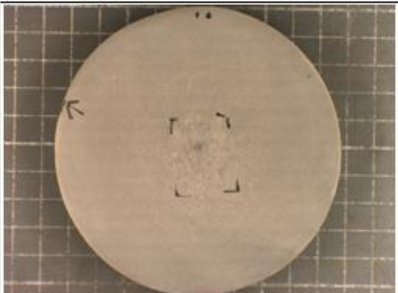

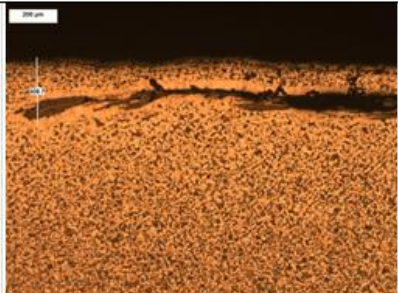
Figura 4.10: Resultado encontrado por Lim et al (2000).

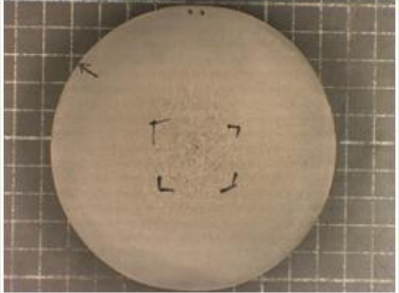
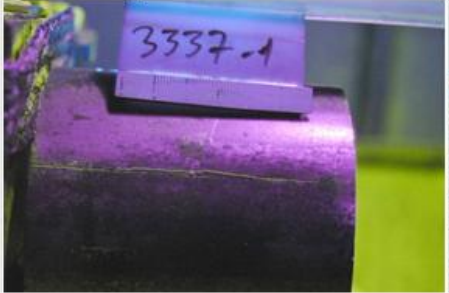
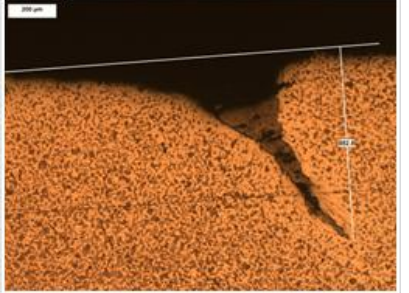
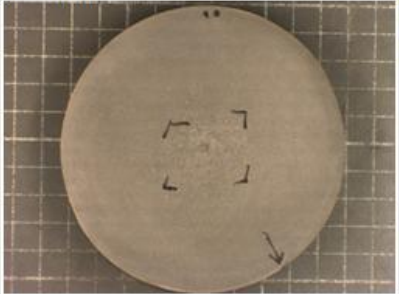

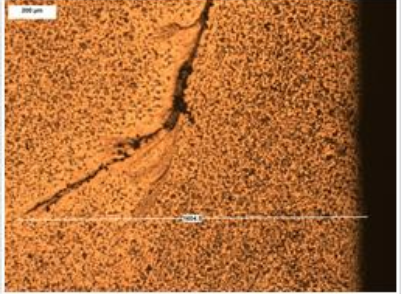
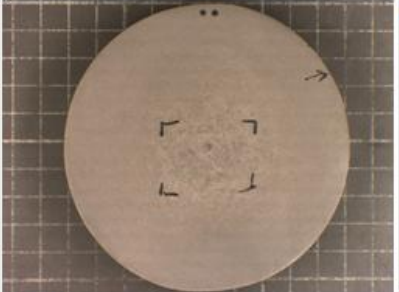
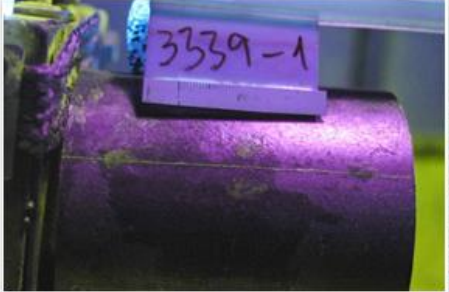
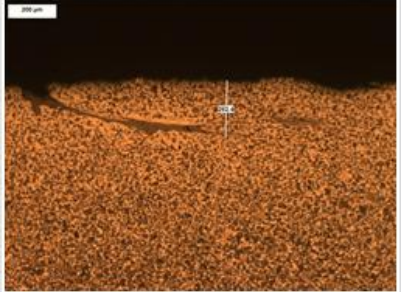
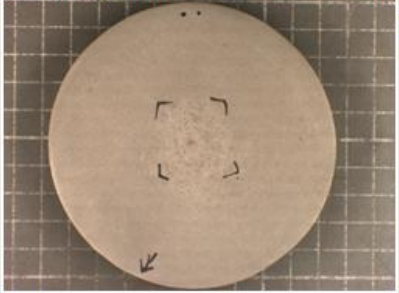
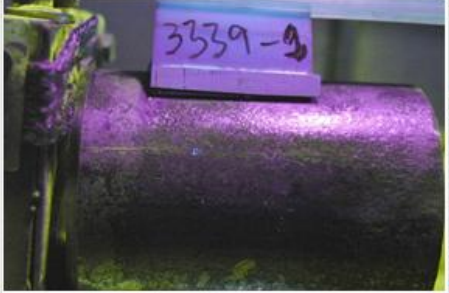
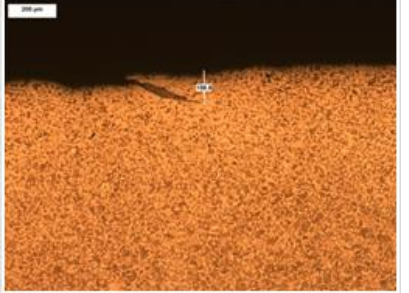
4.4 Análise dos defeitos superficiais encontrados

De forma a ilustrar os defeitos superficiais encontrados nos diversos testes realizados ao longo deste estudo, apresenta-se na tabela 4.5 uma caracterização representativa destes defeitos.

Tabela 4.5: Defeitos superficiais encontrados

Posição no tarugo	Partícula Magnética	Micrografia
		
<p>Análise: Macrografia da barra: Defeito encontra-se no canto do tarugo na zona do raio externo. Magnaflux: Trinca curta. Micrografia: Trinças preenchidas com óxido compacto com descarbonetação forte em seu entorno, com inclinação superior a 45°, típicas de Aciaria.</p>		
		
<p>Análise: Macrografia da barra: Defeito encontra-se na face do tarugo, próximo ao raio externo. Magnaflux: Trinca curta, associada a trinças finas e longas. Micrografia: Trinças preenchidas com óxido compacto e ramificação de óxidos fragmentados com descarbonetação forte em seu entorno, inclinação superior a 45°, típicas de Aciaria.</p>		
		
<p>Análise: Macrografia da barra: Defeito encontra-se na face do raio externo do tarugo. Magnaflux: Trinca curta. Micrografia: Trinças preenchidas com óxido compacto e ramificação de óxidos fragmentados com descarbonetação média em seu entorno, típicas de Laminação.</p>		

Posição no tarugo	Partícula Magnética	Micrografia
		
<p>Análise: Macrografia da barra: Defeito encontra-se no canto do tarugo na zona do raio externo. Magnaflex: Trinca contínua de formato serrilhado, típica de dobra de laminação. Micrografia: Trincas preenchidas com óxido compacto e ramificação de óxidos fragmentados com descarbonetação média em seu entorno, com inclinação próxima a 45°, típicas de dobra de laminação.</p>		
		
<p>Análise: Macrografia da barra: Defeito encontra-se no canto do tarugo, na zona do raio interno. Magnaflex: Trinca contínua de formato serrilhado, típica de dobra de laminação. Micrografia: Trincas preenchidas com óxido compacto e ramificação de óxidos fragmentados com descarbonetação média em seu entorno, com inclinação menor que 45°, típicas de dobra de laminação.</p>		
		
<p>Análise: Macrografia da barra: Defeito encontra-se na face do tarugo, próxima ao raio interno. Magnaflex: Trinca contínua de formato serrilhado, típica de dobra de laminação. Micrografia: Trincas preenchidas com óxido compacto com descarbonetação média em seu entorno, típicas de dobra de laminação.</p>		
		
<p>Análise: Macrografia da barra: Defeito encontra-se na face do tarugo. Magnaflex: Trinca contínua de formato serrilhado, típica de dobra de laminação. Micrografia: Trincas preenchidas com óxido compacto e ramificação de óxidos fragmentados com descarbonetação média em seu entorno, típicas de dobra de laminação.</p>		

Posição no tarugo	Partícula Magnética	Micrografia
		
<p>Análise: Macrografia da barra: Defeito encontra-se no canto do tarugo na zona do raio interno. Magnaflex: Trinca curta. Micrografia: Trinca preenchida com óxido compacto com descarbonetação forte em seu entorno, com inclinação superior a 45°, típicas de Aciaria.</p>		
		
<p>Análise: Macrografia da barra: Defeito encontra-se no canto do tarugo na zona do raio externo. Magnaflex: Trinca contínua de formato serrilhado, típica de dobra de Laminação. Micrografia: Trinca preenchida com óxido compacto e ramificação de óxidos fragmentados com descarbonetação média em seu entorno, com inclinação próxima a 45°, típicas de dobra de Laminação.</p>		
		
<p>Análise: Macrografia da barra: Defeito encontra-se na face do tarugo. Magnaflex: Trinca contínua de formato serrilhado, típica de dobra de Laminação. Micrografia: Trinca preenchida com óxido compacto e ramificação de óxidos fragmentados com descarbonetação média em seu entorno, com inclinação menor que 45°, típicas de dobra de Laminação.</p>		
		
<p>Análise: Macrografia da barra: Defeito encontra-se na face do tarugo. Magnaflex: Trinca contínua de formato serrilhado, típica de dobra de Laminação. Micrografia: Trinca preenchida com óxido compacto e ramificação de óxidos fragmentados com descarbonetação média em seu entorno, com inclinação próxima a 45°, típicas de dobra de Laminação.</p>		

4.5 Sínteses dos Resultados

Na tabela 4.6 plota-se de forma resumida os resultados dos testes realizados durante este estudo, de forma a possibilitar ainda outras análises com respeito aos seus resultados obtidos.

Tabela 4.6: Resumo dos resultados obtidos.

Testes	Parâmetro	Rejeição superficial	Quant. defeitos/peça	Profund. média	Tipos de defeitos
Condicionamento superficial dos tarugos	Esmerilhamento total	61,7%	3,1	0,34 mm	Escamas, trincas de Laminação e dobra*
	Sem condicionamento	70,2%	2,2	0,70 mm	Escamas e trincas de Laminação
Temperatura de laminação	880°C	84,6%	4,3	0,55 mm	Trincas de Aciaria
	930°C	80,1%	6,2	0,68 mm	Trincas de Aciaria
	840°C	87,5%	3,7	0,41 mm	Trincas de Laminação e dobra
	915°C	60,8%	2,6	0,32 mm	Trincas de Aciaria e Laminação
Remoção de carepa	175 Bar	70,8%	5,3	0,35 mm	Escamas
	209 Bar	68,7%	4,1	0,11 mm	Trincas de Laminação e dobra
	85 mm	77,8%	2,1	1,24 mm	Trincas de Laminação e dobras
	140 mm	88,9%	3,9	0,42 mm	Trincas de Laminação
	85 mm	83,3%	2,8	0,21 mm	Trincas de Aciaria e Laminação
	140 mm	89,6%	8,7	0,46 mm	Trincas de Laminação

*Gerou uma barra sucateada.

Fica evidente a importante influência de cada parâmetro testado no desempenho superficial do material, observando-se que o condicionamento superficial dos tarugos resultou em um dos menores índices de rejeição superficial.

As temperaturas mais baixas no trem acabador apresentaram rejeições superficiais maiores, quando comparadas com tarugos da mesma corrida laminados em temperaturas mais elevadas.

Os dois testes realizados com relação à remoção superficial de carepa demonstraram o impacto da efetiva eliminação do óxido formado durante o reaquecimento, visto que maiores pressões e menores distâncias corresponderam à importante redução de rejeição superficial.

5. CONCLUSÕES

O condicionamento superficial dos tarugos eliminou a ocorrência de defeitos superficiais com origem na Aciaria e permitiu redução de 12,1% na rejeição superficial;

O processo de retirada da carepa oriunda do reaquecimento tem importante influência na rejeição superficial;

Conforme demonstrado neste estudo, a redução de pressão do jato d'água representou um aumento de 3% na rejeição superficial, reduzindo 22,6% à quantidade média de defeitos por barra;

Ainda no processo de descarepação, a aproximação dos bicos do descarepador com a superfície dos tarugos representou uma redução média de 9,5% na rejeição superficial dos defeitos, e 55% de redução da quantidade média de defeitos superficiais por barra, considerando-se os dois testes realizados na variação deste parâmetro, observando-se que tivemos duas corridas de Aciaria envolvidas;

Os resultados obtidos nos testes de variação de temperatura no trem acabador apresentaram redução de rejeição superficial. O primeiro teste reduziu em 5,3% a rejeição superficial, e o segundo teste apresentou redução de 30,5% na condição de temperatura acima de 900°C. Observa-se que, como não houve condicionamento superficial nos tarugos, a diferença de redução da rejeição superficial esta, sem dúvida, influenciada pela condição superficial dos tarugos;

De forma ampla, conclui-se que aplicando condicionamento superficial aos tarugos, aliados a uma descarepação após reaquecimento com pressão de aproximadamente 230 bar e com distância dos bicos de 85 mm com relação à superfície dos tarugos, e adotando-se ações para garantir temperatura no trem acabador acima de 900°C, atinge-se o melhor desempenho superficial do aço em estudo, com redução do percentual de rejeição superficial e quantidade de defeitos por barra.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Importante observar a oportunidade de identificar a interação entre estas variáveis testadas neste estudo.

Utilizando-se a metodologia conhecida como Projeto de Experimentos, fortemente baseada em conceitos estatísticos, poder-se-ia observar e identificar esta interação dos parâmetros, conforme tabela 6.1, através de 8 testes.

Tabela 6.1: Interação dos parâmetros.

Teste	Condicionamento superficial dos tarugos	Distância dos bicos do descarepador	Temperatura de Laminação
1	Sem Acabamento	Menor Distância	Baixa Temperatura
2	Sem Acabamento	Menor Distância	Alta Temperatura
3	Sem Acabamento	Maior Distância	Baixa Temperatura
4	Sem Acabamento	Maior Distância	Alta Temperatura
5	Esmerilhamento Total	Menor Distância	Baixa Temperatura
6	Esmerilhamento Total	Menor Distância	Alta Temperatura
7	Esmerilhamento Total	Maior Distância	Baixa Temperatura
8	Esmerilhamento Total	Maior Distância	Alta Temperatura

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁLBUM DE DEFEITOS, Gerdau - Charqueadas, 2010.

ARAÚJO, L. A. Manual de Siderurgia: Transformação. Editora Arte & Ciência, Vol. 2, São Paulo, 1997.

BENDIG, L.; RAUDENSKÝ, M.; HORSKÝ, J. Descaling with High Pressure Nozzles. Lechler GmbH & Co. KG 06 Set. 2001.

BLAIN, P. Laminação e Forjamento dos Aços. ABM, 1964.

DIETER, G. E. Mechanical Metallurgy, SI Metric Edition. 1988.

Calibração de Produtos Longos, Revisão 0. LAM –507. Charqueadas, 2008.

CASTILHOS, Érica. Contribuição para caracterização de Defeitos Superficiais em Barras Laminadas. Trabalho de Diplomação. Departamento de Metalurgia, UFRGS, 2008.

CODA, R. C. Laminação e Calibração de Produtos Laminados não Planos de Aço. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, ABM, 2005.

CODA, R. C. Laminação: Produtos Longos de Aços Laminados a Quente. Laboratório de Transformação Mecânica, UFRGS, 2006a.

CODA, R.C. Análise de Defeitos de Laminação. Laboratório de Transformação Mecânica, UFRGS, 2006b.

CODA, R. C. Calibração – Produtos Longos de Aço Laminados a Quente. Laboratório de Transformação Mecânica, UFRGS, 2006C.

FRICK, J.W. More Efficient Hydraulic Descaling Header Designs. MPT International, 2004.

FRICK, J.W. Optimisation of Nozzel Arrangements on Descaling Headers. Lechler GmbH&Co. KG, 2009.

GINZBURG, V. B. Steel-Rolling Technology – Theory and Practice, Marcel Dekker Inc., New York, 1989.

GUIDE 76. Continuous Steel Reheating Furnaces: Specification, Design and Equipment. Energy Efficiency Office, Best Practice Programme, 1994.

IM, Y. T.; AWAIS, M.; LEE, H. W.; KWON, S. M.; PARK, H. D. Plastic Work Approach for Surface Defect Prediction in the hot bar Rolling Process. Journal of Materials Processing Technology 201, 2008.

KOTRBÁČEK, P. et al. Influence of Parameters of Hydraulic Descaling on Temperature Losses and Surface Quality of Rolled Material. Suppl. Metal Forming, 2004.

LIM, K.H., KIM, H.S., CHO, Y.K. More efficient operating practices for improving the surface quality of high quality steel wire, 2000.

PADILHA, A.F.; SICILIANO JR. F. Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, ABM, 3. ed. São Paulo, 2005.

RIZZO, E.S. Processos de Laminação dos Aços: uma introdução. ABM, São Paulo, 2007.

VILELA, A.C.F. Processos Siderúrgicos-SID500. Gerdau – Programa de Capacitação Acelerada de Engenheiros, 2007.

VILELA, A. C. F; SOARES, R. B. Lingotamento Contínuo de Blocos e Tarugos. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, ABM, 2005.