

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

PPGEM

MELHORIA DA QUALIDADE SUPERFICIAL EM BARRAS LAMINADAS

Fabiana Lopes da Silva

Dissertação para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2010

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

PPGEM

MELHORIA DA QUALIDADE SUPERFICIAL EM BARRAS LAMINADAS

FABIANA LOPES DA SILVA
Engenheira Metalúrgica

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

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2010

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

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Dr. Luis Augusto Colebergue Klujszo

Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Dr. Thomas Gabriel Rosauro Clarke

Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann
Coordenador do PPGEM

“Nunca é alto o preço a pagar pelo privilégio de pertencer a si mesmo... Ninguém pode construir em teu lugar as pontes que precisarás para atravessar o rio da vida, ninguém exceto tu, só tu... É preciso ter um caos dentro de si para dar à luz uma estrela cintilante... O inimigo mais perigoso que você poderá encontrar será sempre você mesmo... **Tudo que não me mata me fortalece...**

(Friedrich Nietzsche)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pela educação de qualidade que me proporcionaram pela preparação para vida, pelos valores a mim transmitidos, pela credibilidade em mim depositada e pelo amor e dedicação com que me educaram.

A minha mãe pelo exemplo de força e coragem, por me mostrar todos os dias que nada é impossível quando uma pessoa sonha, trabalha e possui humildade.

Ao meu noivo Rossano pelo incentivo e paciência que demonstrou nesta etapa final.

A Gerdau Aços Especiais Piratini pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Aos colegas da Laminação pelo apoio na realização dos testes, pelas sugestões e pelos ensinamentos. Em especial aos colegas Adalberto de Oliveira e Pedro Lanzarini e ao Eng. Lourival Kersting Amorim pela confiança em mim depositada.

Ao amigo Msc. Rogério Alves Oliveira pela paciência e disposição que teve para me ensinar e me orientar na execução deste trabalho. Pelas palavras amigas e pela credibilidade profissional em mim depositada.

Ao Prof. Dr. Afonso Reguly pela orientação neste trabalho.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo ensino público, gratuito e de qualidade.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XIII
RESUMO.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Laminação.....	3
2.1.1. Histórico.....	3
2.1.2. Processos de Laminação.....	4
2.1.3. Classificação dos Laminadores.....	5
2.1.4. Fluxo de do processo de Laminação.....	12
2.1.5. Matérias-primas do processo de Laminação.....	12
2.1.6. Reaquecimento para Laminação.....	14
2.1.7. Carepa.....	18
2.1.8. Descarepador.....	20
2.1.9. Calibração.....	23
2.2. Defeitos Superficiais.....	27
2.2.1. Escamas.....	28
2.2.2. Carepa Incrustada.....	28
2.2.3. Dobras.....	28

2.2.4.	Trincas	29
2.2.5.	Trincas com origem em Aciaria.....	29
2.2.6.	Trincas com origem em Laminação.....	31
2.2.7.	Mecanismos de formação de trincas na Laminação	31
2.2.8.	Ductilidade a quente	33
3.0	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	35
3.1	Material	35
3.2	Equipamentos.....	36
3.3	Metodologia	37
3.3.1.	Definição do problema.....	38
3.3.2.	Desdobramento do problema	41
3.3.3.	Identificação das causas.....	44
3.3.4.	Realização de testes e implementação de melhorias.....	45
4.0	RESULTADOS	48
4.1	Teste de temperatura versus condicionamento do tarugo	48
4.2	Teste de temperatura versus remoção de carepa.....	59
4.3	Teste de temperatura em escala de produção.....	63
5.0	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	68
5.1	Influência do condicionamento do tarugo.....	68
5.2	Influência da remoção de carepa.....	68
5.3	Influência da temperatura	69
6.0	CONCLUSÕES	71
7.0	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	72
8.0	REFERÊNCIAS.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Arranjo de um trem contínuo composto apenas por gaiolas horizontais. (CODA 2006a).....	6
Figura 2.2	Arranjo de um trem contínuo composto por gaiolas horizontais e verticais. (CODA 2006a).....	7
Figura 2.3	Arranjo de um trem aberto. (CODA 2006a).....	7
Figura 2.4	Arranjo de um trem aberto-contínuo. (CODA 2006a).....	8
Figura 2.5	Configuração de gaiolas duo horizontais. (CODA 2006a).....	9
Figura 2.6	Configuração de gaiolas duo verticais. (CODA 2006a).....	9
Figura 2.7	Configuração de gaiolas duo horizontais não-reversível (a) e reversível (b). (VILELA 2007).....	10
Figura 2.8	Configuração de gaiola trio. (VILELA 2007).....	11
Figura 2.9	Configuração de gaiola universal. (VILELA 2007).....	11
Figura 2.10	Fluxo simplificado do processo de laminação a quente.	12
Figura 2.11	Preparação da superfície de um tarugo proveniente de lingotamento contínuo. (VILELA 2007).....	13
Figura 2.12	Forno de reaquecimento para laminação tipo pusher. (GUIDE 1994).....	16
Figura 2.13	Forno de reaquecimento para laminação tipo walking hearth. (GUIDE 1994)	17
Figura 2.14	Forno de reaquecimento para laminação tipo walking beam. (GUIDE 1994)	17
Figura 2.15	Representação esquemática da carepa sobre a superfície metálica após a oxidação em altas temperaturas. (CASTILHOS 2008).....	19
Figura 2.16	Arranjo dos bicos de um descarepador hidráulico. (FRICK 2009).....	22

Figura 2.17	Exemplo de passes utilizados nas sequências de calibração aplicadas nas operações de desbaste, intermediário e acabador. A) Canal caixa; B) Canal quadrado; C) Canal redondo; D) Canal oval e E) Canal diamante. (Calibração de Produtos Longos 2007).....	24
Figura 2.18	Exemplo da distribuição de tensões sob a largura comum para duas sequências de calibração: A) quadrado – oval; B) oval – quadrado. (Calibração de Produtos Longos 2007).....	25
Figura 2.19	Principais defeitos superficiais presentes em tarugos de lingotamento contínuo. (EMI 2003).....	30
Figura 2.20	Diagrama de causa e efeito para formação de trincas de laminação. (LIM 2000).....	32
Figura 2.21	Relação entre aumento da temperatura de reaquecimento e ocorrência de defeitos superficiais. (LIM 2000).....	32
Figura 2.22	Relação entre uso de descarepador e ocorrência de defeitos superficiais. (LIM 2000).....	33
Figura 3.1	Fluxo do DMAIC adotado como metodologia para o estudo do problema. (RASIS 2002).....	38
Figura 3.2	Pareto do sucateamento por bitola de laminação nos laminadores 1 e 2.	40
Figura 3.3	Participação dos três tipos de defeitos mais representativos no sucateamento nos laminadores (Laminador 1 – LAM 1 e Laminador 2 – LAM 2).	41
Figura 3.4	Pareto do sucateamento por laminador (Laminador 1 – LAM 1 e Laminador 2 – LAM 2).....	42
Figura 3.5	Pareto do sucateamento por bitola no Laminador 1 – LAM 1.....	42
Figura 3.6	Pareto do sucateamento por grupo de qualidade na bitola 76,20 mm no Laminador 1 – LAM 1.	43
Figura 3.7	Pareto do sucateamento por qualidades pertencentes ao grupo G4 na bitola 76,20 mm no Laminador 1 – LAM 1.	44
Figura 4.1	Valores da temperatura de câmara nas zonas de reaquecimento para a condição 1.....	49
Figura 4.2	Valores da temperatura média de reaquecimento para o teste a condição 1.....	49

Figura 4.3	Valores da temperatura de câmara nas zonas de reaquecimento para a condição 2.....	50
Figura 4.4	Valores da temperatura média de reaquecimento para a condição 2.....	51
Figura 4.5	Valores da temperatura de câmara nas zonas de reaquecimento para a condição 3.....	51
Figura 4.6	Valores da temperatura média de reaquecimento para a condição 3.....	52
Figura 4.7	Valores da temperatura de câmara nas zonas de reaquecimento para a condição 4.....	53
Figura 4.8	Valores da temperatura média de reaquecimento para a condição 4.....	53
Figura 4.9	Evolução da temperatura de laminação ao longo da sequência de desbaste para as duas condições de temperaturas de reaquecimento testadas.....	54
Figura 4.10	Evolução da temperatura de laminação ao longo da sequência do intermediário para as duas condições de temperaturas de reaquecimento testadas.....	55
Figura 4.11	Evolução da temperatura de laminação ao longo da sequência do acabador para as duas condições de temperaturas de reaquecimento testadas.....	56
Figura 4.12	Resultados de rejeição para o teste combinando as variáveis temperatura de reaquecimento e condicionamento de tarugo.....	57
Figura 4.13	Percentual de rejeição para as diferentes condições testadas variando temperatura de reaquecimento e uso de descarepador.....	60
Figura 4.14	Quantidade média de defeitos por barra para as diferentes condições testadas variando temperatura de reaquecimento e uso de descarepador.....	60
Figura 4.15	Tipos de defeitos encontrados e respectivas profundidades médias em cada uma das diferentes condições testadas variando temperatura de reaquecimento e uso de descarepador.....	61
Figura 4.16	Evolução dos percentuais de rejeição e sucateamento por campanha de laminação da bitola 76,20 mm.....	64
Figura 4.17	Percentual médio de sucateamento para as condições de 1200 e 1280°C.....	64
Figura 4.18	Percentual médio de rejeição para as condições de 1200 e 1280°C.....	65
Figura 4.19	Curva de ductilidade a quente para a qualidade DIN 20MnCr5.....	66

Figura 4.20 Curva de tensão deformação a quente para a qualidade DIN 20MnCr5.....66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Exemplos de processos e respectivos defeitos superficiais. (MADIAS 2004)...	27
Tabela 2.2:	Exemplos de taxas qualitativas de trabalho a quente para aços especiais e superligas. (ASM 2004).....	48
Tabela 3.1:	Composição química nominal do aço DIN 20MnCr5. (DIN EN 10084)	34
Tabela 3.2:	Condições teste de temperatura versus condicionamento do tarugo.....	44
Tabela 3.3:	Condições teste de temperatura versus utilização do descarepador.....	46
Tabela 4.1:	Defeitos encontrados no teste de temperatura x condicionamento do tarugo.....	57
Tabela 4.2:	Defeitos encontrados no teste de temperatura x remoção de carepa.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- A – Comprimento do jato
- B – Espessura do jato
- C – Espessura do jato na direção do jato
- D – Sobreposição de dois jatos
- E – Distância entre bicos
- H – Distância do centro do tubo até o material descarepado
- ε – Espessura do material descarepado
- d – Diâmetro do tubo
- h_1 – Altura do bico
- h_2 – Altura do jato
- α – Ângulo do jato
- β – Ângulo de inclinação
- SAC – Sem acabamento/esmerilhamento superficial do tarugo
- ECA – Com acabamento/esmerilhamento nos cantos do tarugo
- EPA – Com acabamento/esmerilhamento parcial do tarugo
- RA – Redução em área

RESUMO

Defeitos superficiais em barras laminadas representam inúmeros transtornos durante o processo produtivo, pois dependendo de sua profundidade, característica e morfologia podem gerar uma elevada rejeição de barras laminadas durante o processo de inspeção em linha automática. A fim de reduzir a rejeição e o retrabalho por defeitos superficiais foram realizadas melhorias no processo de reaquecimento de materiais para laminação. Em um trem laminador aberto as perdas de temperatura durante o processo são mais elevadas quando comparadas com as de um trem contínuo. Conseqüentemente, a susceptibilidade ao surgimento de pequenos defeitos superficiais aumenta, pois o material perde mais temperatura tendo sua ductilidade a quente reduzida. O objetivo de se elevar a temperatura de reaquecimento é favorecer a remoção de pequenos defeitos presentes no tarugo através da oxidação e proporcionar um material mais aquecido durante as etapas de laminação, reduzindo a susceptibilidade ao surgimento e/ou propagação de defeitos superficiais. O incremento nas temperaturas de reaquecimento levou a uma redução na rejeição devido a defeitos superficiais.

ABSTRACT

Surface defects in hot rolled bars represent a lot of problems during the productive process, because depending on their depth, characteristic and morphology, they can result in higher rejection of rolling bars during the inspection process in an automatic line. In order to reduce rejection and rework due to surface defects, improvements were done in the reheating temperature for rolling mill process. In an open train, the temperature losses during the rolling process are higher than that ones in a continuous train. Hence, the susceptibility to appear small defects increases because the material loses more temperature leading to a reduction in material ductility. The aim of increasing the reheating temperature is to promote the removal of small defect presents on the billet surface and to increase the ductility of the material for rolling, thus reducing the susceptibility to appear and/or to propagate the surface defects. The increase in reheating temperature leads to reduction in rejection due to surface defects.

1.0 INTRODUÇÃO

Os aços destinados à aplicação na indústria automotiva possuem exigências de qualidade bastante criteriosas. Dentre estas exigências estão requisitos de qualidade relacionados à isenção de defeitos tanto internos quanto superficiais.

A qualidade superficial das barras laminadas é caracterizada pela presença ou isenção de defeitos superficiais. Em se tratando de barras laminadas destinadas à aplicação na indústria automotiva, este é um requisito fundamental para garantir a qualidade e a vida útil de componentes mecânicos.

Este trabalho dissertará sobre melhorias na qualidade superficial de barras laminadas destinadas à fabricação de componentes automotivos. Os experimentos aqui apresentados foram realizados na Gerdau Aços Especiais Piratini, uma unidade do Grupo Gerdau especializada na fabricação de aços construção mecânica carbono e ligados destinados à aplicação na indústria automotiva.

Durante o processo produtivo do aço existem etapas que constituem potenciais geradores de defeitos superficiais, seja durante o processo na Aciaria, seja durante o processo na Laminação. A presença de defeitos superficiais do tipo trincas, dobras, escamas, dentre outros, compromete o desempenho do processo de fabricação de barras laminadas, pois implica em retrabalho e/ou sucateamento.

Defeitos do tipo trincas estão normalmente relacionados com o processo de fabricação do aço em aciaria, especificamente atrelados a etapa de solidificação do aço. Já defeitos do tipo dobras, escamas e riscos estão frequentemente relacionados com o processo de laminação.

O fato de as trincas superficiais estarem relacionadas ao processo de solidificação não significa que estas também não possam ter sua origem durante o processo de laminação. Porém, a probabilidade maior é de que nesta etapa – quando o material é reaquecido e conformado a quente – trincas pré-existent sejam propagadas ou reduzidas, dependendo de

alguns parâmetros de laminação como, por exemplo: temperatura, seqüência de passes e taxa de deformação.

A detecção dos defeitos superficiais ocorre na etapa subsequente ao processo de laminação chamada inspeção. Nesta etapa, as barras laminadas são inspecionadas e os defeitos superficiais são detectados através de ensaios em uma linha de inspeção automática ou de partículas magnéticas em uma linha de inspeção *off line*. É nesta etapa do processo que os defeitos superficiais são detectados e as barras onde estes se apresentam são direcionadas para a remoção (retrabalho) e/ou sucateamento.

Em cada uma destas etapas, principalmente nos processos em Aciaria e em Laminação, é possível identificar oportunidades de melhorias que levam a redução da incidência de defeitos superficiais nas barras. Estas melhorias trazem como resultados a redução da rejeição nas linhas de inspeção e também do sucateamento por defeitos superficiais. Conseqüentemente, obtém-se uma melhora na qualidade superficial que traz como benefício uma redução no custo com a não qualidade do produto.

O foco de atuação deste trabalho foi o processo de laminação, pois, além da possibilidade de serem gerados defeitos superficiais, este processo exerce uma influência importante sobre os defeitos superficiais pré-existentes na matéria-prima oriunda da Aciaria, fazendo com que estes defeitos aumentem ou diminuam durante a conformação.

A fim de se estudar o processo de laminação e identificar oportunidades de melhorias, foram realizados testes para avaliar a influência do condicionamento superficial da matéria-prima (tarugo), da temperatura de reaquecimento e do uso de descarepador na geração e/ou propagação de defeitos.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Laminação

2.1.1. Histórico

Os primórdios da laminação são bastante antigos. A mais antiga ilustração de um laminador é uma gravura de Leonard da Vinci, em torno de 1486, o qual se destinava, provavelmente, à laminação a frio de barras chatas de ouro ou prata para cunhagem de moedas. A primeira referência de laminação a quente data de 1590, para dividir barras de ferro, em Danford, Kent, Inglaterra. (ARAUJO 1997).

Cilindros de ferro fundido coquilhado foram usados em 1697, por John Hanbury em Pontypool, Inglaterra e John Payne, em 1728, obteve patente para um laminador com cilindros com canais para redondos. Cristopher Polhem, em 1746, no seu Patriotiska Testamente, já mencionava a laminação de quadrados e redondos em Stiernsundsbruk, Suécia. (ARAUJO 1997).

As primeiras cadeiras do tipo Trio surgiram na Inglaterra em 1817. Zorés, na França, em 1848, desenvolveu as primeiras vigas. A utilização do laminador Trio para trilhos e perfis começou em Johnstown, Pensilvânia, com John Fritz, em 1855. (ARAUJO 1997).

Os laminadores em linha (tipo Belga) para produzir redondos finos fizeram a sua primeira apresentação em 1883. (ARAUJO 1997).

A idéia de um laminador contínuo com cadeiras alternadamente horizontais e verticais, patenteadas por John Hazledine em 1798, foi reapresentada por George Bedson de Manchester, Inglaterra, em 1862, juntamente com a utilização de dobradeiras. Alguns anos mais tarde, nos Estados Unidos, Charles H. Morgan construía o seu laminador contínuo com cadeiras horizontais e guias de torção entre elas. (ARAUJO 1997).

A obtenção de barras retas para concreto armado no leito de resfriamento foi atingida por V. E. Edwards em 1906, com o sistema de calhas oscilantes com bordas dentadas. (ARAUJO 1997).

2.1.2. Processos de laminação

Laminação é um processo de conformação no qual o material sofre esforços que proporcionam a sua deformação plástica. A deformação plástica de metais é um dos inúmeros processos de manufatura de produtos até a forma e tamanho desejado e consiste em aplicar forças compressivas em magnitude apropriada sobre o material a ser conformado. (WUSATOWSKI 1969).

O processo de deformação plástica de metais através de sua passagem entre dois cilindros é conhecido como laminação. Este é o processo mais amplamente utilizado para transformação de metais, pois proporciona aumento de produtividade. O processo de laminação pode ser classificado, dependendo da temperatura de trabalho, como laminação a quente ou a frio. Em ambos os casos, o objetivo principal é a redução da seção do material, conferindo-lhe a forma e as propriedades mecânicas desejadas. (DIETER 1976).

Durante o processo de laminação, o material a ser conformado passa mais de uma vez entre os cilindros que giram em sentidos opostos. A cada passagem do material entre os cilindros, a sua espessura é reduzida e o seu comprimento é aumentado. (VILELA 2007). Em alguns casos, pode ocorrer o alargamento da seção transversal, porém, na maioria das vezes, este alargamento é indesejado, pois implica em tensões trativas que podem nuclear defeitos como será abordado mais adiante.

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

As matérias-primas do processo de laminação podem ser tarugos, placas ou blocos, provenientes do lingotamento contínuo ou, ainda, lingotes provenientes de lingotamento convencional.

2.1.3. Classificação dos laminadores

Condições de trabalho

Laminação a frio

É o processo de conformação do aço no qual o material é laminado a temperatura ambiente ou em temperatura em que não ocorre recristalização. Neste caso, o material fica encruado e é possível a obtenção de dimensões de estreitas tolerâncias e melhor acabamento superficial.

A laminação a frio desenvolveu-se com a demanda por material com características mecânicas bem determinadas e às exigências cada vez maiores de uniformidade de bitola. Antes do trabalho a frio, é necessário remover a camada de óxidos por meio de decapagem, com o objetivo de obter-se boa superfície no produto acabado.

O trabalho a frio tem como consequência um aumento da dureza e da resistência à tração, ao mesmo tempo em que reduz a ductilidade e o tamanho de grão do aço. A profundidade até onde a estrutura é alterada depende da seção, tamanho da peça e redução em área. (ARAUJO 1997)

Laminação a quente

É o processo de conformação do aço no qual o material é laminado a altas temperaturas, normalmente entre 1000 e 1200°C. Essa faixa de temperatura é determinada pelo fenômeno de recristalização que ocorre no aço durante a deformação.

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).

A laminação a quente permite o menor emprego de esforço mecânico, refina a estrutura do aço, elimina porosidades e deforma mais profundamente que a laminação a frio. (VILELA 2007).

Arranjo ou disposição das gaiolas

Contínuo

O arranjo contínuo possui uma série de gaiolas duo com cilindros girando no mesmo sentido dispostos ao longo de um mesmo eixo de laminação e com pequeno afastamento entre as gaiolas. O material é trabalhado sucessivamente entre vários pares de cilindros, cuja velocidade periférica aumenta proporcionalmente para compensar a diminuição da seção. (ARAUJO 1997).

O arranjo contínuo pode ser composto apenas por gaiolas horizontais, neste caso a operação se dá com torções do material laminado, ou por gaiolas horizontais e verticais intercaladas. (CODA 2006a).

A figura 2.1 apresenta o arranjo de um trem contínuo composto apenas por gaiolas horizontais.

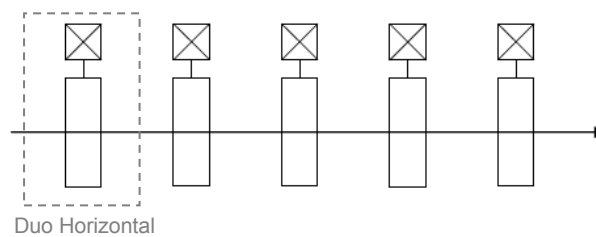


Figura 2.1 Arranjo de um trem contínuo composto apenas por gaiolas horizontais. (CODA 2006a)

Na figura 2.1, cada retângulo representa uma gaiola duo horizontal e a seta indica o sentido de laminação. Em um trem com a configuração apresentada na figura 2.1, faz-se necessária a torção do material para evitar alargamento excessivo e possível nucleação de defeitos nesta região.

A figura 2.2 apresenta o arranjo de um trem contínuo composto por gaiolas horizontais e verticais intercaladas.

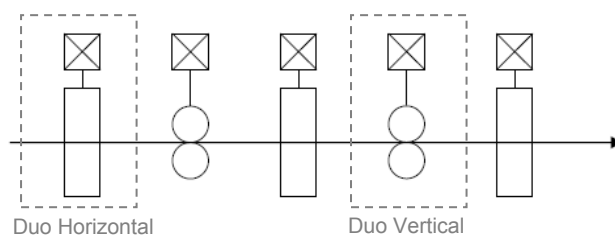


Figura 2.2 Arranjo de um trem contínuo composto por gaiolas horizontais e verticais. (CODA 2006a)

Na figura 2.2, cada retângulo representa uma gaiola duo horizontal, cada conjunto de dois círculos representa uma gaiola duo vertical e a seta indica o sentido de laminação. Em um trem com a configuração apresentada na figura 2.2, não é necessária a torção do material, pois as gaiolas estão dispostas de forma a conformar alternadamente a região do alargamento.

Aberto

O arranjo aberto possui uma série de gaiolas trio ou duo – reversíveis ou não – com acionamento único. Em alguns casos, a ponta da peça laminada, ao sair de um passe, é “dobrada” para entrar no passe seguinte do mesmo lado do laminador de onde saiu. Em outros casos a ponta não é “dobrada” e a ponta oposta é que entra no passe seguinte do mesmo lado do laminador. (ARAUJO 1997).

A figura 2.3 apresenta o arranjo de um trem aberto com mais de uma gaiola.

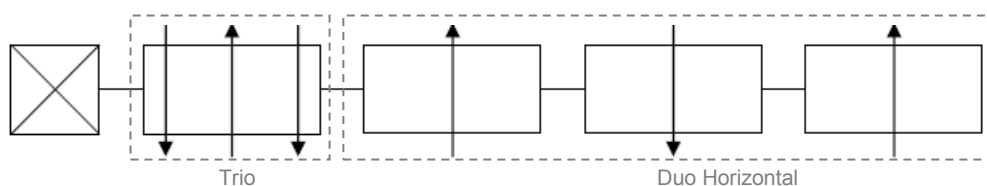


Figura 2.3 Arranjo de um trem aberto. (CODA 2006a)

Na figura 2.3, o primeiro retângulo representa uma gaiola trio, os últimos três retângulos representam cada um uma gaiola duo horizontal e as setas indicam o sentido de laminação. Um trem com a configuração apresentada na figura 2.3, permite uma maior perda de temperatura do material laminado, o que nem sempre é desejado.

Aberto - Contínuo

A figura 2.4 apresenta o arranjo de um trem aberto-contínuo (misto).

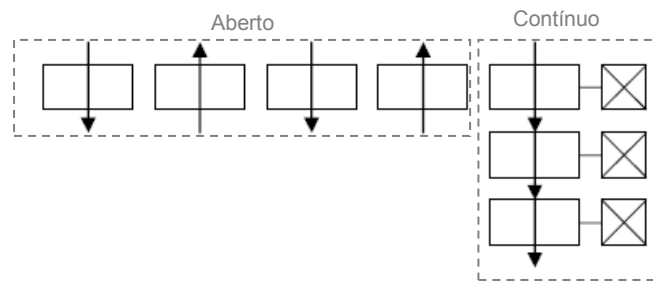


Figura 2.4 Arranjo de um trem aberto-contínuo. (CODA 2006a)

A figura 2.4 apresenta esquematicamente a configuração de um trem de laminação com arranjo aberto-contínuo composto de uma seqüência de quatro gaiolas duos dispostas uma ao lado da outra (trem aberto) seguida de uma seqüência de três gaiolas duos dispostas em linha (trem contínuo). Nesta figura, cada retângulo representa uma gaiola duo horizontal e as setas indicam o sentido de laminação. A configuração apresentada na figura 2.4 pode ocorrer em laminadores que passaram por alguma reforma/investimento, onde se optou por manter as gaiolas antigas (aberto) e adicionar as gaiolas do trem novo (contínuo).

Gaiolas de laminação

As gaiolas ou cadeiras são componentes principais de um trem laminador independentemente de sua configuração/arranjo. Estes equipamentos possuem a função de comportar os cilindros de laminação e podem apresentar diferentes configurações, a saber: gaiolas duo, gaiolas trio e gaiolas universais.

Gaiolas duo

Trata-se de dispositivos compostos de dois cilindros paralelos horizontais ou verticais utilizados em arranjos de trem aberto, contínuo e aberto-contínuo.

A figura 2.5 apresenta a configuração de uma gaiola duo horizontal.

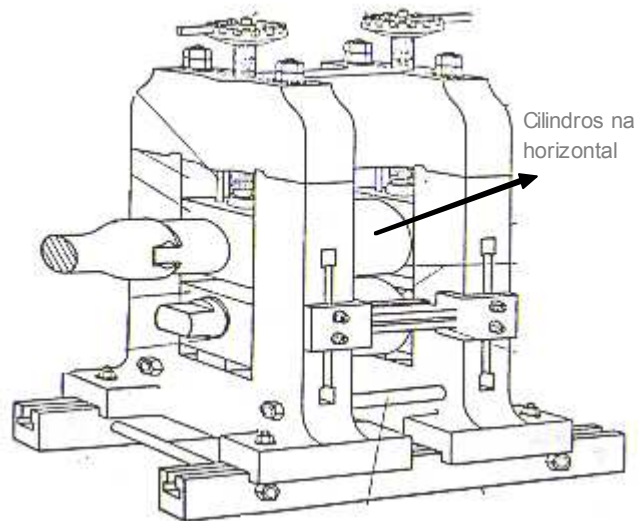


Figura 2.5 Configuração de gaiolas duos horizontais. (CODA 2006a)

Através da figura 2.5 percebe-se que este tipo de gaiola se caracteriza pela posição dos cilindros na horizontal.

A figura 2.6 apresenta a configuração de uma gaiola duo vertical.

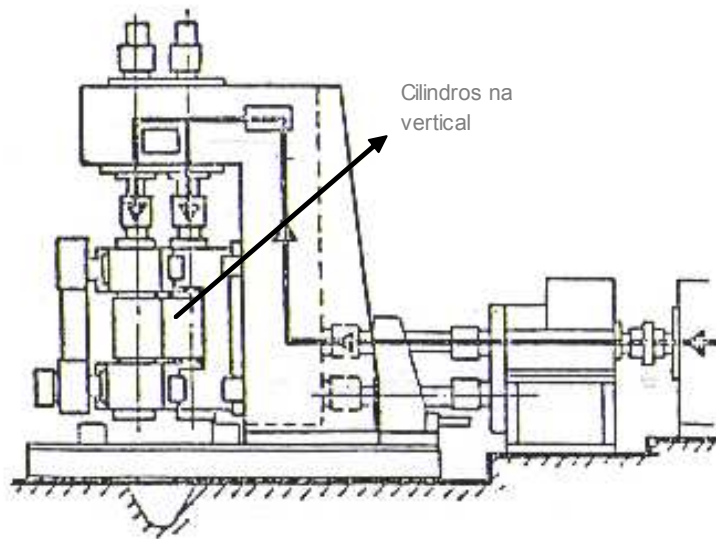


Figura 2.6 Configuração de gaiolas duos verticais. (CODA 2006a)

Através da figura 2.6 percebe-se que este tipo de gaiola se caracteriza pela posição dos cilindros na vertical.

Na posição horizontal, o sentido de rotação pode, em alguns casos, ser alterado (reversível ou não-reversível). A figura 2.7 apresenta esquematicamente a configuração de uma gaiola duo horizontal não-reversível (a) e de uma gaiola duo horizontal reversível (b).

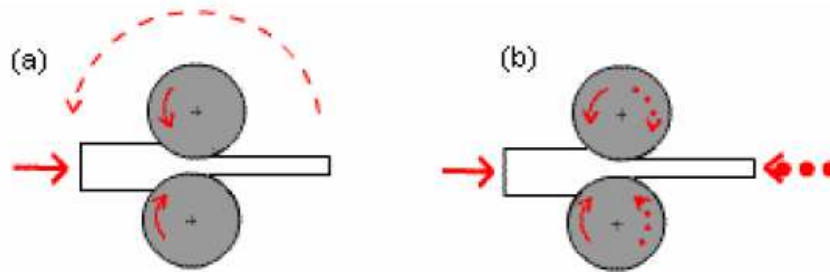


Figura 2.7 Configuração de gaiolas duo horizontais não-reversível (a) e reversível (b). (VILELA 2007)

Percebe-se pela configuração apresentada na figura 2.7 que em uma gaiola duo horizontal não-reversível (a) o material possui apenas um sentido de laminação, já em uma gaiola duo reversível (b), o material pode ser laminado em dois sentidos.

Gaiolas trio

As gaiolas do tipo trio são compostas de três cilindros paralelos horizontais, com sentidos alternados em cada par. Apresenta a vantagem de não ser necessária a reversão do sentido de rotação dos cilindros. Entretanto, exigem grande precisão de calibração já que os canais não podem ser regulados independentemente. É necessária a utilização de mesas elevatórias ou basculantes. São usadas em trens abertos de perfis ou barras (grandes e médios) e como gaiola desbastadora de trens de perfis e barras (pequenos).

A figura 2.8 apresenta esquematicamente a configuração de uma gaiola trio.

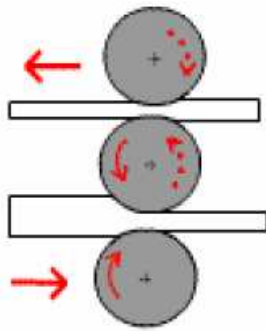


Figura 2.8 Configuração de gaiola trio. (VILELA 2007)

Percebe-se pela configuração apresentada na figura 2.8 que, em uma gaiola trio, o material pode ser laminado em dois sentidos sem que seja necessária a inversão da rotação dos cilindros e o ajuste de luz.

Gaiolas universais

A configuração de uma gaiola Universal é composta de um par de cilindros na horizontal e outro na vertical. Os quatro cilindros, geralmente, possuem acionamento independente, mas sincronizado. Podem ser usadas na produção de perfis pesados tais como vigas de abas paralelas. Também podem ser utilizadas para laminação de tubos de seção retangular e barras de seção redonda. (VILELA 2007)

A figura 2.9 apresenta esquematicamente a configuração de uma gaiola universal.

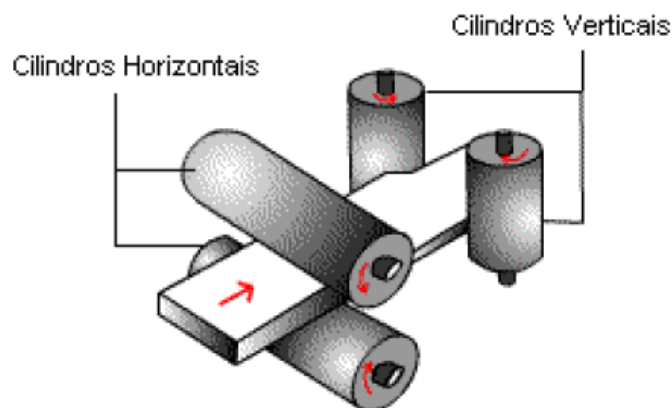


Figura 2.9 Configuração de gaiola universal. (VILELA 2007)

Percebe-se pela configuração apresentada na figura 2.9 que esta é uma configuração indicada para a laminação de perfis.

2.1.4. Fluxo de do processo de laminação

A figura 2.10 apresenta o fluxo simplificado de um processo de laminação a quente.

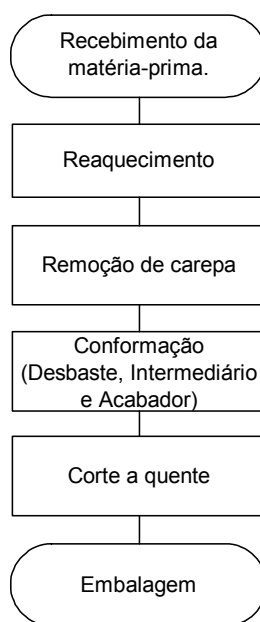


Figura 2.10 Fluxo simplificado do processo de laminação a quente.

Através da figura 2.10 constata-se que o processo de laminação tem início com a preparação e recebimento da matéria-prima e encerra-se com o enfeixamento e despacho do produto para as etapas subsequentes do processo na usina. Cabe ressaltar que o processo de laminação compreendido como um processo de conformação se restringe unicamente as etapas de desbaste, intermediário e acabador.

2.1.5. Matérias-primas do processo de laminação

As matérias-primas utilizadas no processo de laminação podem ser tarugos, placas ou blocos provenientes do processo de lingotamento contínuo ou lingotes provenientes do lingotamento convencional. As etapas seguintes dissertarão sobre um processo cuja matéria-prima é o tarugo proveniente do lingotamento contínuo.

O fluxo do processo de laminação para um produto com origem em lingotamento contínuo tem início com o recebimento da matéria-prima que pode ter sido preparada anteriormente ou ter vindo diretamente do lingotamento.

A preparação da matéria-prima se dá através do condicionamento do tarugo via processo de remoção total ou parcial da superfície. Esta preparação faz-se necessária quando o tarugo apresenta sua superfície comprometida superficialmente devido à presença de defeitos com origem do processo de solidificação.

O tipo de inspeção e condicionamento é definido em função do tipo de aço, sua aplicação, rota de produção e eventos de qualidade durante o lingotamento.

Os tipos de condicionamento podem ser classificados como, por exemplo, esmerilhamento, escarfagem, lixamento, etc. Escarfagem é a retirada de uma pequena parte da superfície do material empregando-se maçaricos. Esmerilhamento é a retirada de uma pequena parte da superfície através do uso de discos abrasivos. (VILELA 2007)

A figura 2.11 apresenta o processo de esmerilhamento total da superfície de um tarugo.

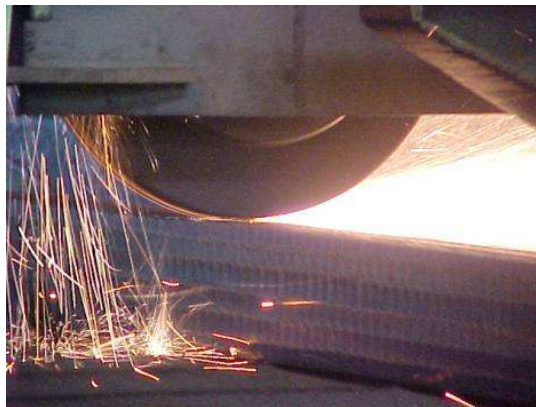


Figura 2.11 Preparação da superfície de um tarugo proveniente de lingotamento contínuo. (VILELA 2007)

Através da figura 2.11 percebe-se que o esmerilhamento remove a superfície bruta proveniente do processo de solidificação.

2.1.6. Reaquecimento para laminação

A etapa de reaquecimento do tarugo é de fundamental importância para o processo de laminação a quente uma vez que proporciona menor emprego de esforço mecânico durante as etapas de conformação.

O reaquecimento dos tarugos antes da laminação a quente exerce um papel importante tanto para o bom desenvolvimento da laminação quanto para a qualidade dos produtos laminados. (BLAIN 1964)

A etapa de reaquecimento da matéria-prima é necessária para que o aço apresente uma alta plasticidade, tanto no início, quanto no fim do processo de laminação. Tem que ocorrer de forma segura, homogênea e econômica.

O reaquecimento consiste no aquecimento do tarugo até uma faixa de 1000 a 1200 °C. Essa operação é realizada em fornos de reaquecimento e os tarugos devem ser aquecidos uniformemente em toda a seção e em todo o comprimento, para evitar rupturas internas ou uma variação tanto na seção quanto na microestrutura do produto acabado. Uma zona mais fria em uma região da peça pode levar a quebra dos cilindros de laminação.

O reaquecimento dos tarugos é realizado em fornos contínuos que devem atender requisitos e objetivos específicos em termos de taxa de aquecimento por razões de produtividade e propriedades metalúrgicas. Nestes fornos o material é aquecido gradualmente à medida que avança no forno.

Estes fornos apresentam um bom funcionamento se algumas condições forem satisfeitas, a saber: (HAUCK 2007)

- Garantia de uma temperatura de desenformamento adequada ao processo de laminação, com boa homogeneidade térmica;
- Controle adequado da temperatura e do ambiente do forno a fim de assegurar a formação e remoção da carepa de forma otimizada ao processo;
- Garantia da uniformidade de temperatura dos materiais durante o processo de laminação;
- Minimização das diferenças de temperatura provocadas pelo resfriamento localizado na região de contato dos *skids* com os tarugos;

- Controle adequado da pressão interna dos fornos visando uma melhor distribuição de temperaturas e evitando-se a entrada de ar frio nas câmaras de combustão, etc.

Tipos de fornos de reaquecimento

Dentre alguns aspectos que definem a especificação de um forno de reaquecimento, podem ser citados:

- a) a forma e o tamanho da matéria-prima a ser aquecida;
- b) a temperatura de enformamento e desenformamento da matéria-prima;
- c) a homogeneidade desejada da matéria-prima quando desenformada;
- d) taxa de desenformamento;

e) propriedades metalúrgicas (máxima diferença de temperatura aceitável durante o aquecimento, a máxima taxa de aquecimento admissível, descarbonetação e carepa).

Estes aspectos influenciarão na escolha do tipo de forno que poderá ser do tipo *pusher*, *walking beam* ou *walking hearth*.

Pusher

Caracteriza-se pelo fato de que para cada peça carregada uma é descarregada, por isso este tipo de forno não pode ser completamente esvaziado. Marcas de *skid* ou diferenças de temperatura ao longo do comprimento do tarugo podem ocorrer devido ao contato com as superfícies refrigeradas com água o que pode ocasionar redução dos níveis de qualidade do material. Este tipo de forno apresenta aquecimento superior e inferior e com isto apresenta algumas vantagens, como, por exemplo: redução do tempo de residência, rápido aquecimento e encharque, baixa diferença de temperatura entre as faces, dentre outras. (GUIDE 1994)

A figura 2.12 apresenta esquematicamente a estrutura de forno do tipo *pusher*.

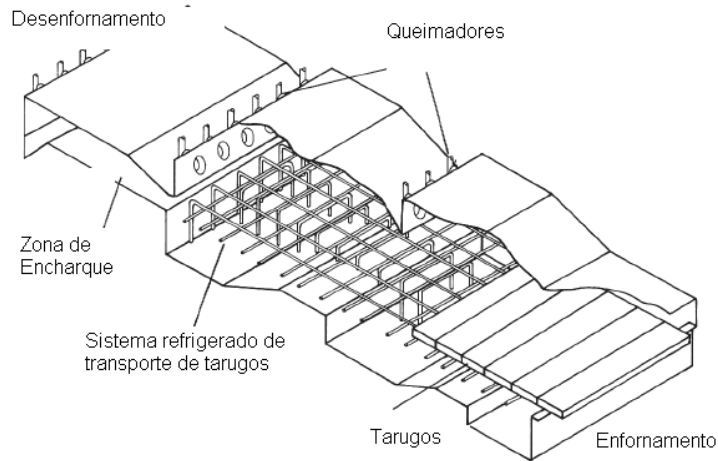


Figura 2.12 Forno de reaquecimento para laminação tipo *Pusher*. (GUIDE 1994)

Pela figura 2.12 é possível identificar as vigas que sustentam o material dentro do forno, as quais são refrigeradas e é a partir delas que podem se formar as marcas de skid. Além disso, percebe-se também a principal característica deste tipo de forno: não há espaço entre o material, o que prejudica o aquecimento pelas laterais do tarugo.

Walking hearth

Caracteriza-se pelo fato de que o reaquecimento se dá por aquecedores presentes na parte superior do forno. Apresenta soleiras fixas e móveis que são responsáveis pela movimentação das peças no forno desde o enfornamento até o desenformamento.

A principal desvantagem deste tipo de forno reside no fato de que o material não pode ser aquecido a partir da superfície inferior, apenas da superior. Este problema pode ser minimizado através do espaço que é deixado entre os tarugos. Caso este espaço seja muito pequeno, as diferenças de temperatura entre núcleo e superfície podem ser inaceitáveis, impactando em aumento no tempo de residência dos tarugos no forno a fim de homogeneizar a temperatura. (GUIDE 1994)

A figura 2.13 apresenta esquematicamente a estrutura de forno do tipo *walking hearth*.

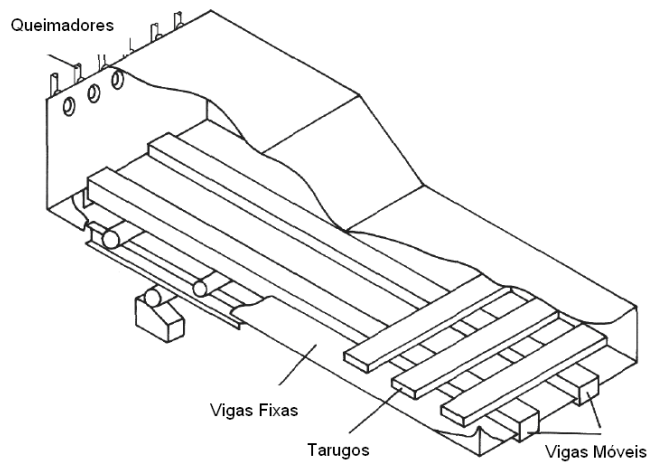


Figura 2.13 Forno de reaquecimento para laminação tipo *Walking hearth*. (GUIDE 1994)

Pela figura 2.13 é possível identificar as soleiras fixas e móveis responsáveis pela movimentação dos tarugos dentro do forno. Além disso, fica evidente o espaço deixado entre os tarugos no intuito melhorar a homogeneidade do aquecimento.

Walking beam

Este tipo de forno superou todas as dificuldades presentes no forno *pusher* e permitiu o aquecimento do material através do uso de queimadores tanto na parte superior quanto na parte inferior do forno. Este fato permitiu a redução do tempo de permanência e do comprimento do forno além de melhorar o controle das taxas de aquecimento, proporcionar aquecimento uniforme com material aquecido homogeneamente no desenformamento e flexibilidade operacional. (GUIDE 1994)

A figura 2.14 apresenta esquematicamente a estrutura de forno do tipo *walking beam*.

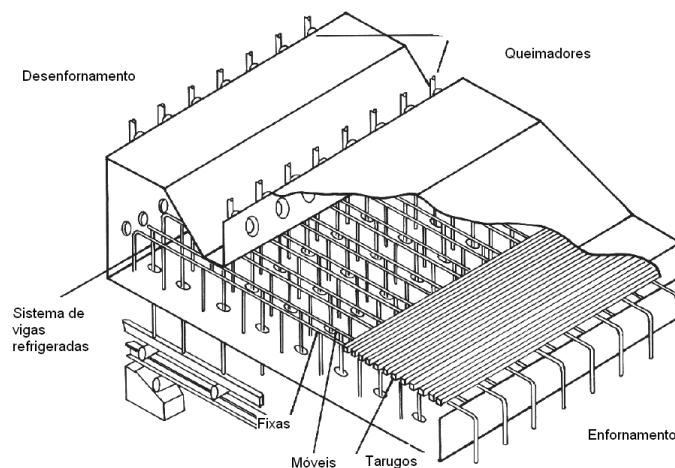


Figura 2.14 Forno de reaquecimento para laminação tipo *Walking Beam*. (GUIDE 1994)

Pela figura 2.14 é possível perceber que este forno apresenta o aquecimento similar ao de um *pusher* com aquecimento superior e inferior, porém, a maior parte da estrutura do forno encontra-se abaixo do nível da laminação. As vigas que sustentam o material são refrigeradas com água o que acarreta uma grande desvantagem em termos de perdas de energia quando comparado ao *walking hearth* (aumento de cerca de 15% da energia específica). (GUIDE 1994)

2.1.7. Carepa

A carepa é gerada pela oxidação do ferro, ou seja, pela nucleação de óxidos na superfície do aço. Quando o aço é exposto a altas temperaturas em atmosfera oxidante, ocorre a formação de uma camada de óxidos sobre a superfície metálica. Esta carepa geralmente é constituída de três fases distintas, wustita, magnetita e hematita, cada uma com suas próprias propriedades termofísicas e taxas de crescimento dependentes da temperatura e do tempo de permanência do aço nestas temperaturas.

A wustita (FeO) é o óxido de mais baixa valência, tem uma estrutura cristalina cúbica e existe em uma larga faixa de composições e não somente a estequiométrica. A dureza deste óxido está entre 250 – 350 HV.

A magnetita (Fe₃O₄) é uma fase com uma estrutura cristalina cúbica e uma composição que é aproximadamente estequiométrica, mas pode apresentar um leve excesso de oxigênio. Sua dureza está entre 450 – 550 HV.

A hematita (Fe₂O₃) apresenta uma estrutura cristalina romboédrica e é o óxido de mais alta valência. Possui uma leve deficiência de íons oxigênio e sua dureza é acima de 1000 HV. (CASTILHOS 2008)

A figura 2.15 apresenta a representação esquemática da carepa sobre a superfície metálica após a oxidação em altas temperaturas.

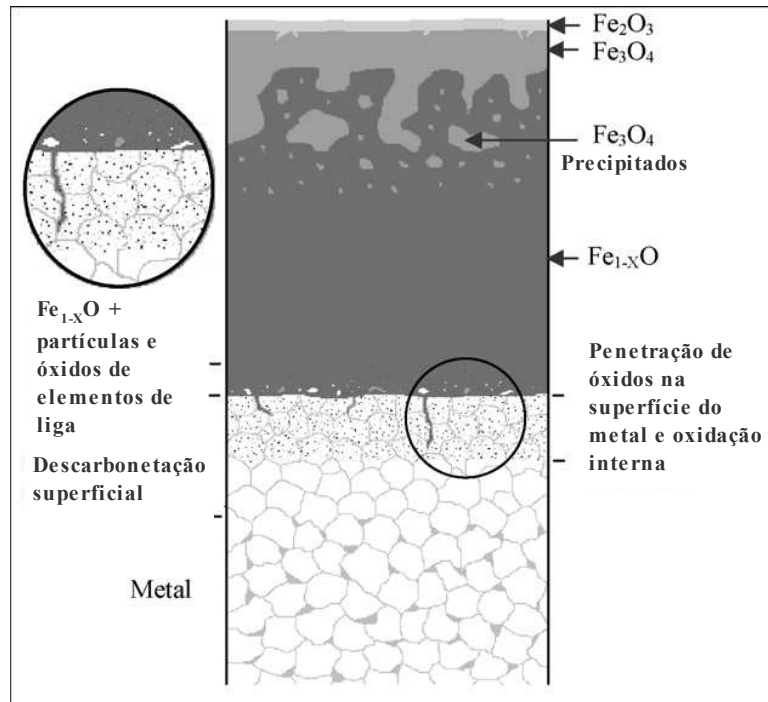


Figura 2.15 Representação esquemática da carepa sobre a superfície metálica após a oxidação em altas temperaturas. (CASTILHOS 2008)

Através da figura 2.15 é possível identificar a presença dos três tipos de óxidos: wustita (FeO), magnetita (Fe_3O_4) e hematita (Fe_2O_3).

A formação de carepa é influenciada pela composição química do aço, atmosfera do forno de reaquecimento, tempo e temperatura de reaquecimento, tempo e temperatura de laminação e condição superficial do material antes do reaquecimento.

Durante a laminação a quente, três tipos de carepa podem ser formados (PAUWLITZKI 2007):

Primária: formada durante o processo de reaquecimento;

Secundária: formada durante o processo de laminação;

Terciária: formada entre os passes finais da laminação e leito de resfriamento.

A morfologia e a composição da carepa variam conforme a espessura da camada formada aumenta e vazios vão se formando na interface carepa/aço. Após esta barreira física para a difusão ter se formado, a carepa muda de uma camada aderente composta por uma relação de 95 FeO / 4 Fe_3O_4 / 1 Fe_2O_3 para uma que contém significativamente mais Fe_2O_3 .

A aderência da carepa primária pode ser fortemente dependente da composição química do aço. A presença de níquel, por exemplo, aumenta a aderência da camada de carepa, desfavorecendo a sua remoção no processo de descarepação. A incompleta remoção da carepa primária ou secundária leva ao surgimento de defeitos superficiais no material laminado. (NELSON 2006)

A atividade de oxidação do ferro não é determinada somente pela composição química, mas também pela temperatura e pelo tempo em que o material é submetido a uma atmosfera contendo oxigênio. Sob circunstâncias de alta temperatura e exposição ao ar, a camada original de wustita (FeO) continuará a reação de oxidação para formar magnetita (Fe₃O₄) e hematita (Fe₂O₃). (YU 2008)

Durante o processo de formação da carepa, tensões compressivas estão presentes na camada de óxido. A tensão gerada pelas mudanças de temperatura ocorre devido às diferenças nas propriedades térmicas (coeficiente de expansão térmica) entre o metal e os componentes individuais da camada de óxido (wustita, magnetita e hematita). Os óxidos de ferro presentes na carepa diferem na estrutura cristalina, densidade, propriedades térmicas, propriedades termodinâmicas, propriedades mecânicas e aderência sobre o metal. Portanto, torna-se relevante a quantidade de cada fase presente na carepa.

A quantidade de fases presentes na carepa sofre uma influência extremamente relevante da temperatura e do percentual de oxigênio presente na atmosfera do forno de reaquecimento. Como exemplo, é possível citar estudos feitos onde um aumento no percentual de oxigênio livre em uma mistura de gás de 1% para 5% proporciona um aumento no percentual das fases magnetita e hematita. (BASABE 2006)

Conforme já comentado anteriormente, durante a laminação a quente, a carepa pode ser laminada ocasionando o surgimento de defeito superficial no material laminado. Para prevenir este tipo de defeito a carepa, deve ser removida através do uso de um descarepador.

2.1.8. Descarepador

Descarepador é um tipo de equipamento auxiliar utilizado na laminação, principalmente de aços especiais. A remoção da carepa (óxido de ferro formado a altas temperaturas) é realizada através do uso de um sistema hidráulico que opera a alta pressão

podendo ser utilizado nas etapas intermediárias do processo de laminação: na saída do forno de reaquecimento e em diversas posições ao longo do trem de laminação.

A remoção da carepa é necessária, pois a mesma afeta significativamente a qualidade superficial do material laminado a quente e reduz a vida dos cilindros de laminação. (SCHÜRMAN 2009)

O uso de descarepadores é o método mais utilizado na remoção das carepas primária (formada durante o processo de reaquecimento) e secundária (formada após a remoção da carepa primária durante o processo de laminação). (KERMANPUR 2007)

O descarepador hidráulico promove uma intensa extração de calor da superfície do material submetido ao seu jato d'água. Esta extração de calor promove uma perda térmica que deverá ser compensada já no forno de reaquecimento.

Neste processo, a carepa é removida da superfície pela ação de dois mecanismos:

Têmpera local da superfície, ocasionando tensões térmicas entre a camada de óxido e o material;

Força dinâmica imposta pelo jato 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 de válvula utilizado, pressão de água, temperatura da água, posição do bico (altura do jato) e velocidade com que o material passa sob o jato. O valor da força de impacto local desempenha o papel principal no processo de remoção da carepa. (KOTRBÁČEK 2004)

Conforme comentado acima, o impacto é o parâmetro mais característico do processo de remoção da carepa. Este parâmetro é expresso pelo quociente entre a força do jato e a área sob a qual esta força é aplicada $[N/mm^2]$. A equação 1 sugere que quanto menor a área maior o impacto. O ângulo e a largura do jato são, portanto, os parâmetros de design do bico que afetam a área de impacto. (FRICK 2004)

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

A partir da seleção de um determinado tipo de bico (tamanho e ângulo do jato), a força 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 2009)

O impacto depende dos seguintes parâmetros: tipo de bico, ângulo do jato, vazão, pressão, altura do jato. Todos estes parâmetros apresentam um efeito linear sobre o impacto, com exceção da altura do jato que exerce influência exponencial. Pode-se concluir, portanto, que devido a esta influência exponencial, a altura do jato é o parâmetro mais efetivo. (FRICK 2009)

Isso significa que para a otimização de custos e eficiência, a distância do jato ao material deverá ser a menor possível. Porém, na prática, as perdas térmicas, a velocidade do material e as irregularidades de forma e geometria do material deverão ser consideradas.

A figura 2.16 sistema de bicos de um descarepador hidráulico indicando a localização dos parâmetros do sistema.

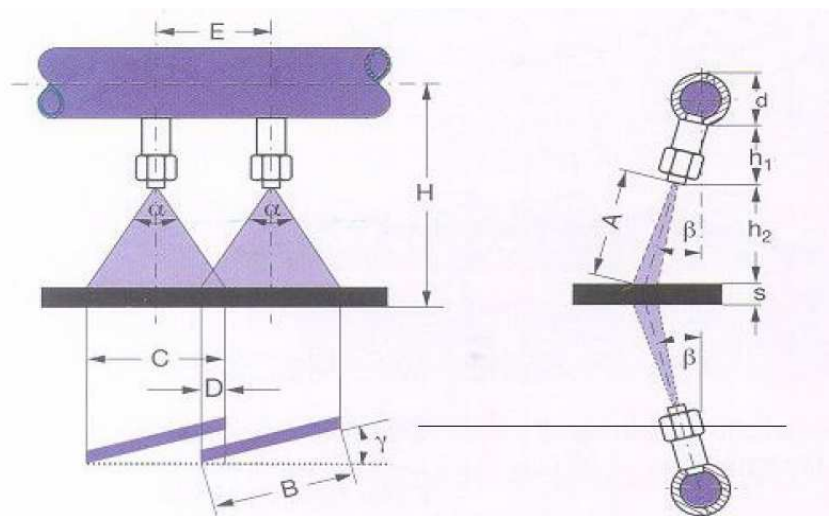


Figura 2.16 Arranjo dos bicos de um descarepador hidráulico. (FRICK 2009)

A partir da figura 2.16, é possível identificar, conforme símbolos, os seguintes parâmetros do sistema de bicos de um descarepador hidráulico: A – Comprimento do jato; B – Espessura do jato; C – Espessura do jato na direção do jato; D – Sobreposição de dois jatos; E – Distância entre bicos; H – Distância do centro do tubo até o material descarepado; ϵ – Espessura do material descarepado; d – Diâmetro do tubo; h_1 – Altura do bico; h_2 – Altura do jato; α – Ângulo do jato e β – Ângulo de inclinação. (FRICK 2009)

De maneira geral estes parâmetros são estudados e definidos durante a posta-em-marcha do equipamento. No entanto, acompanhamentos, novos estudos, manutenções e auditorias devem ser realizados periodicamente a fim de garantir a eficácia da descarepação hidromecânica instalada, pois alterações neste processo influenciarão na qualidade dos diferentes produtos laminados. Para estabelecer e comparar uma situação operacional existente a fim de fazer uma recomendação fundamentada, é necessário recorrer a relatórios de performance e de qualidade e, também, aos históricos de processo. O uso de questionários e registros padronizados contribui com este tipo de análise. (FRICK 2006)

2.1.9. Calibração

A calibração de um produto ou perfil é o projeto do conjunto de canais sucessivos que garantam a obtenção de um produto final com as formas desejadas e com as dimensões geométricas corretas.

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 alcançados através da escolha das seqüências de calibração ideais para cada tipo de produto e do dimensionamento correto dos canais destas seqüências. Sendo assim, é possível dizer que a calibração consiste na distribuição uniforme das deformações, utilizando-se corretamente a aplicação e o potência de redução de cada seqüência. (CODA 2005)

Seqüências de calibração

As seqüências de calibração são indicadas para funções distintas no laminador.

Assim sendo, para as operações de desbaste são indicados canais que trabalham bem com grandes seções tais como caixa ou diamantes, pois estas seqüências permitem atingir uma redução razoável. O tipo de mecanização também pode ser importante na definição da seqüência quando se leva em conta o manejo do material. Nas operações do intermediário, onde são executados passes de redução, são aconselhadas seqüências que possuam uma grande capacidade de redução tais como quadrado – oval – quadrado ou ovais suecos em seções maiores. No trem acabador, onde são necessários precisão e qualidade, os passes recomendados são o redondo – oval – redondo.

A figura 2.17 apresenta exemplos dos principais canais utilizados nas sequências de calibração aplicadas ao desbaste, intermediário e acabador.

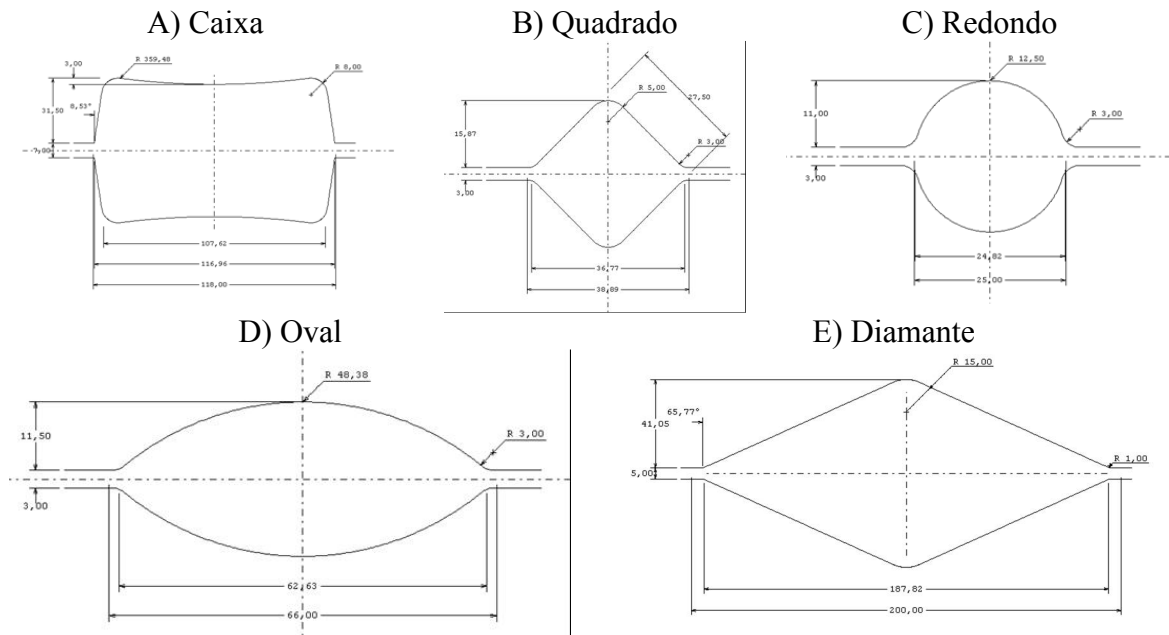


Figura 2.17 Exemplo de passes utilizados nas sequências de calibração aplicadas nas operações de desbaste, intermediário e acabador. A) Canal caixa; B) Canal quadrado; C) Canal redondo; D) Canal Oval e E) Canal diamante. (Calibração de Produtos Longos 2007)

A figura 2.17 apresenta alguns exemplos de canais utilizados nas sequências do processo de laminação: desbaste, intermediário e acabador.

A distribuição das tensões no material varia de acordo com o desenho do canal. Por isso, a calibração terá um papel importante na redução e/ou propagação de alguns tipos de defeitos pré-existentes como, por exemplo, trincas.

A figura 2.18 apresenta dois exemplos onde é possível identificar as diferenças das tensões aplicadas ao material em função da calibração através da análise da distribuição de tensões sob a largura comum ao canal e a seção de entrada.

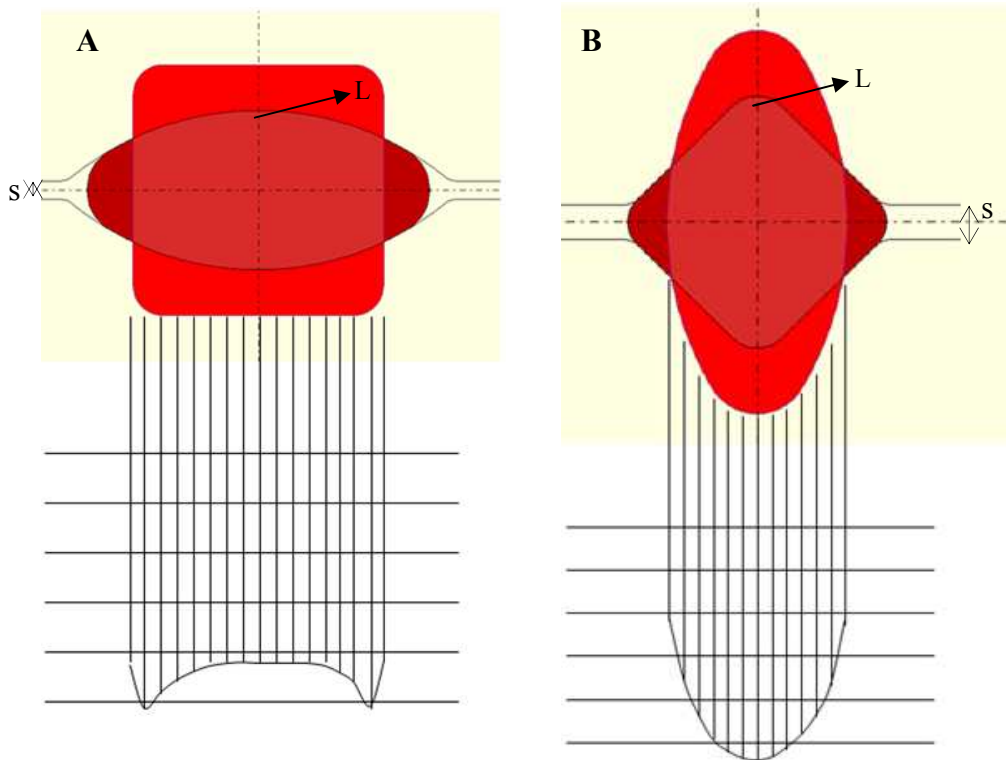


Figura 2.18 Exemplo da distribuição de tensões sob a largura comum para duas sequências de calibração: A) quadrado – oval; B) oval – quadrado. (Calibração de Produtos Longos 2007)

A partir da figura 2.18 é possível identificar a presença de dois tipos de distribuição de tensões: área côncava (A) e área convexa (B). Além disso, nesta figura estão identificadas as regiões do fundo do canal (L) e da abertura entre os cilindros mais conhecida como luz (S).

Uma distribuição de tensões caracterizada por uma área côncava (A) corresponde a uma deformação não uniforme. As trincas que estiverem presentes no material de partida e que forem submetidas ao fundo do canal irão diminuir. Já as trincas que forem submetidas à região do alargamento (na luz do canal) tenderão a aumentar. (CODA 2006b)

Uma distribuição de tensões caracterizada por uma área convexa (B) também corresponde a uma deformação não uniforme. As trincas que estiverem presentes no material de partida e que forem submetidas ao fundo do canal irão diminuir e o mesmo poderá acontecer com as trincas que forem submetidas à região do alargamento (na luz do canal). Este seria um exemplo de um tipo de laminação recomendada para prevenir trincas. (CODA 2006b)

Sequência de passes do desbaste

Esta sequência inicia com o tarugo reaquecido e tem por finalidades refinar e compactar a estrutura bruta de fusão característica do tarugo bem como reduzir a área da sua seção original.

Como exemplo de canais que podem ser utilizados na sequência de desbaste é possível citar: caixa, caixa quadrada, oval hexagonal, oval, oval chato, quadrado, falso redondo, diamante e redondo.

A sequência de desbaste apresenta como características a deformação de seções robustas, a necessidade de maiores esforços de laminação e a aplicação de reduções médias em área por passe. (CODA 2005)

Sequência de passes do intermediário

Esta sequência é executada logo após o desbaste e tem por finalidades preparar progressivamente a forma e as dimensões do material laminado visando às características do produto acabado.

Como exemplo de canais que podem ser utilizados na sequência de intermediário é possível citar: oval hexagonal, oval, oval chato, quadrado, falso redondo e redondo.

A sequência do intermediário apresenta como características a deformação de seções médias, a necessidade de esforços moderados de laminação e a aplicação de reduções maiores em área por passe. (CODA 2005)

Sequência de passes do acabador

Esta sequência contempla os passes finais do processo de laminação. Através desses passes são obtidas formas, dimensões, tolerâncias e acabamento superficial para os produtos acabados. Nesta etapa do processo as reduções aplicadas ao material são menores que nas sequências de desbaste e intermediário.

Como exemplo de canais que podem ser utilizados na sequência de acabador é possível citar: oval, oval chato, quadrado, falso redondo, redondo, diamante pré-acabador, quadrado acabador.

A sequência do acabador apresenta como características a deformação de seções pequenas, a necessidade de menores esforços de laminação e a aplicação de reduções menores em área por passe. (CODA 2005)

2.2. Defeitos superficiais

Defeitos superficiais são defeitos que podem ser localizados, identificados e visualizados na superfície externa dos produtos laminados. Sua identificação é auxiliada pelo uso de equipamentos de inspeção que fazem uso de técnicas de ensaios não destrutivos tais como, partículas magnéticas, campo de fuga, etc.

Os defeitos superficiais podem ter sua origem relacionada aos processos de lingotamento/solidificação, conformação a quente ou a frio, tratamento térmico e/ou manuseio. A tabela 2.1 relaciona o processo e o tipo de defeito superficial que pode ocorrer durante sua execução.

Tabela 2.1: Exemplos de processos e respectivos defeitos superficiais. (MADIAS 2004)

Origem	Tipo de defeito
Solidificação	Trincas superficiais, pinholes, blowholes, vazios e inclusões.
Conformação	Dobras, escamas, frisos, riscos, marcas, trincas, falta de material, porosidade e marca de carepa.
Forno	Queima e descarbonetação.
Tratamento térmico	Trincas e descarbonetação.
Decapagem	Manchas, porosidade, ataque químico e resto de óxidos.
Usinagem	Riscos, marcas, rugosidade e queima por retífica.
Manuseio	Marcas, empenamento, riscos e oxidação.

Como se pode observar na tabela 2.1, há uma variedade de defeitos superficiais que estão relacionados às diferentes etapas de processo do material. O foco do presente trabalho será no processo de conformação, buscando minimizar os efeitos da presença de trincas com origem em aciaria e reduzir a ocorrência de trincas com origem em laminação.

Independentemente do foco do trabalho, faz-se relevante dissertar a cerca de alguns outros tipos de defeitos serão citados ao longo do trabalho. Estes defeitos serão abordados nos itens que seguem.

2.2.1. Escamas

Escamas 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. Geralmente, o intervalo entre o material e a escama está preenchido com óxidos. Podem ter diversas origens, desde a Aciaria (profundas, descarbonetadas, com presença de óxidos e de oxigênio) até a Laminação (participação dos fornos de reaquecimento, dos passes intermediários e até mesmo do acondicionamento dos tarugos).

Eventualmente, pode ocorrer um tipo especial de escama com origem nas operações de manuseio, onde descontinuidades superficiais são sobrepostas na superfície do material formando uma escama encruada e sem a presença de óxidos. (Álbum de Defeitos Superficiais 2000)

2.2.2. Carepa incrustada

Carepas incrustadas são incrustações dos óxidos do material durante o processo de laminação. A carepa 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 no laminado. Se a carepa não é eliminada nos descarepadores a pressão exercida pelos cilindros pode provocar a sua incrustação, dificultando sua remoção posterior. Além disso, a carepa que não é removida pode incrustar e nuclear outro defeito. (Álbum de Defeitos Superficiais 2000)

2.2.3. Dobras

São descontinuidades que em geral penetram obliquamente da superfície para o interior do material, são longas e uniformes. Quase sempre são paralelas ao eixo longitudinal e uniformemente distribuídas na periferia da barra. Algumas vezes aparecem também como linhas duplas paralelas. A causa mais freqüente da ocorrência de dobras é o excesso de material no canal que é forçado para fora na luz do cilindro 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 o perfil laminado “magro” demais vira no canal. Quando aparecem em apenas um lado do produto, podem ser causadas por guias mal alinhadas. (Álbum de Defeitos Superficiais)

2.2.4. Trincas

Trincas são descontinuidades que penetram no produto de forma perpendicular ou oblíqua em relação à superfície do material, variam no comprimento e normalmente são retilíneas na superfície das barras. Podem ser originadas em qualquer parte do ciclo de produção, desde a Aciaria até as operações de acabamento final do produto.

Podem ser detectadas a olho nu ou com pequena ampliação após decapagem mecânica ou química da superfície do material e também no teste de partículas magnéticas. Para resultados mais precisos, são analisadas na metalografia.

Na Aciaria, ocorrem devido a defeitos superficiais ou sub-superficiais existentes nos tarugos, e são classificadas como possível origem de Aciaria quando: há ocorrência de descarbonetação ao longo do defeito, está localizada em uma região mais descarbonetada em relação ao restante da amostra, tem inclusões ou óxidos associados ao defeito, presença de oxigênio junto ao defeito, tem profundidade elevada e geralmente apresentam-se defeitos não alinhados.

No processo de laminação as trincas podem surgir devido a rugosidades excessivas na superfície desgastada ou danificada dos cilindros, por marcas de guias, forma imprópria do canal e por temperaturas incorretas de reaquecimento. São classificadas como possível origem de Laminação quando: há pequena ocorrência ou ausência de descarbonetação e de oxigênio ao longo do defeito, possuem pequena profundidade, ocorrem várias trincas numa mesma amostra, estão localizados em regiões simétricas da barra e o croqui apresenta defeitos alinhados e contínuos. (Álbum de Defeitos Superficiais)

2.2.5. Trincas com origem em Aciaria

O tarugo apresenta uma estrutura bruta de fusão, portanto repleta de defeitos internos do tipo vazios, inclusões, trincas, etc. Estes defeitos podem abrir durante a laminação caso a sequência de deformação não tenha sido adequadamente projetada (baixas reduções nos passes iniciais do desbaste e altas reduções nos passes intermediários) dando origem a defeitos superficiais no produto final. (CODA 2006b)

Além dos defeitos relatados acima, o tarugo proveniente de lingotamento contínuo pode apresentar defeitos superficiais do tipo trincas longitudinais e transversais nas faces ou nos cantos, depressões longitudinais e transversais, marcas de oscilação, blowholes e pinholes, etc. (VILELA 2005)

A figura 2.19 apresenta os principais tipos de defeitos superficiais presentes no tarugo proveniente do lingotamento contínuo. Nesta figura é possível identificar a presença dos seguintes defeitos: 1) Trincas longitudinais na face; 2) Trincas longitudinais de canto; 3) Trinca transversal na face; 4) Trinca transversal de canto; 5) Trinca estrela; 6) Depressão transversal e 7) Inclusões. (EMI 2003)

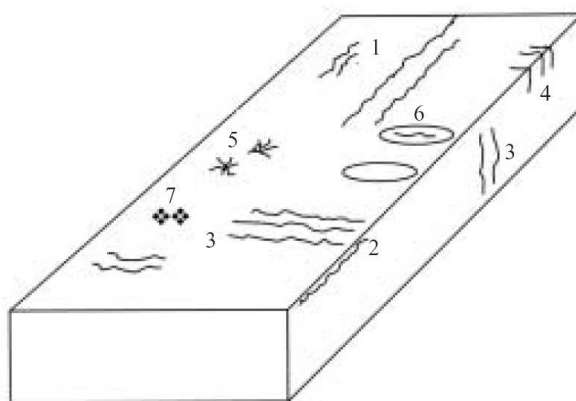


Figura 2.19 Principais defeitos superficiais presentes em tarugos de lingotamento contínuo. (EMI 2003)

Estes são alguns exemplos de possíveis defeitos superficiais presentes no tarugo. Certamente um dos defeitos que mais se destaca em termos de qualidade superficial de tarugos de lingotamento contínuo são as trincas superficiais.

A formação de trincas é reconhecida como um problema cuja principal origem está no processo de lingotamento contínuo de aços. A razão para a profusão de tipos de trincas reside na própria natureza do processo de lingotamento contínuo. Este processo atingiu grande popularidade devido à sua extraordinária taxa de extração de calor através da combinação de molde, sprays e resfriamento radiante.

O rápido resfriamento, porém, resulta em um excessivo gradiente de temperatura na casca sólida que pode mudar rapidamente e gerar tensões térmicas conforme a casca expande

ou contrai. Adicionalmente, devido à seção semi-sólida que é necessária para que ocorra o movimento através da máquina, a casca também é submetida a tensões mecânicas induzidas devido à fricção no molde, pressão dos rolos extratores, pressão ferrostática, desalinhamento da máquina, curvatura e operação de endireitamento. Dependendo da sua magnitude, qualquer uma destas tensões e deformações pode resultar na formação de trincas.

A presença de trincas no tarugo não está relacionada apenas aos pontos mencionados acima, mas também às propriedades mecânicas do aço nas diferentes temperaturas atingidas durante o processo de lingotamento contínuo. (BRIMACOMBE 1977)

2.2.6. Trincas com origem em Laminação

Durante o processo de conformação também podem surgir defeitos superficiais. Por outro lado, os defeitos presentes no tarugo podem ser reduzidos ou propagados dependendo das condições de laminação. Estas condições incluem temperatura, formação de carepa, sequência de passes, etc.

As trincas em materiais laminados geralmente estão relacionadas a defeitos da matéria-prima que ao serem laminados causam trincas devido ao excessivo alongamento. Estes defeitos podem ser trincas superficiais presentes no tarugo e também defeitos internos do tipo inclusões, segregação, impurezas, tensões e esforços no resfriamento.

As trincas com origem na laminação podem ser causadas por uso de canais com formas inadequadas para determinada etapa do processo de conformação, reduções excessivas, cilindros com canais danificados, carepa laminada (incrustada), riscos de guias, dentre outros. (WIRE ROD DEFECTS 1973)

Um tipo característico de trincas de laminação são as trincas rasas que se apresentam no produto laminado, também conhecidas como “Wrinkles”. Este tipo de trinca pode durante o processo servir de núcleo para a propagação de um defeito de maior profundidade.

2.2.7. Mecanismos de formação de trincas na Laminação

Os principais fatores que influenciam o surgimento de trincas na laminação são a sequência de calibração e a temperatura de laminação. Porém, a influência de outros fatores também deve ser considerada como, por exemplo, a condição superficial do tarugo. Durante a laminação, fatores como calibração, temperatura, carepa, tensão, dentre outros, exercem influência no surgimento de trincas. (LIM 2000)

A figura 2.20 relaciona as principais causas nos processos para o surgimento de trincas na laminação.

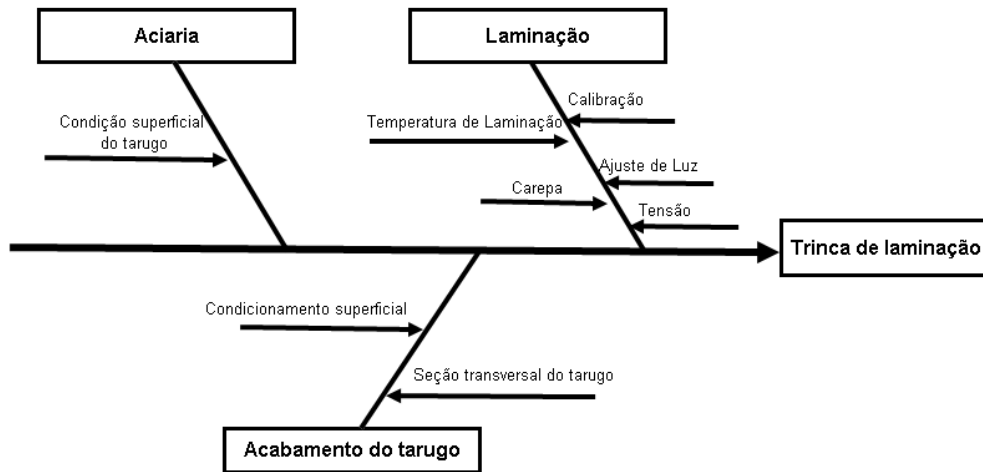


Figura 2.20 Diagrama de causa e efeito para formação de trincas de laminação. (LIM 2000)

A figura 2.20 expressa bem quais os principais pontos que podem impactar na formação de trincas durante o processo de laminação.

Estudos realizados por LIM et al [2000] demonstram que, atuando em alguns destes fatores, diretamente no processo de laminação, é possível reduzir a ocorrência de trincas.

A figura 2.21 mostra que através do aumento da temperatura de reaquecimento é possível reduzir a ocorrência de trincas.

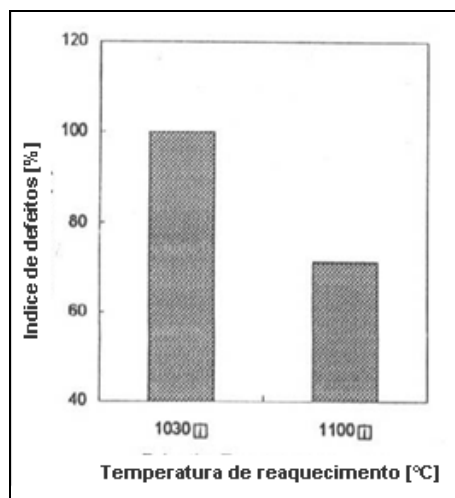


Figura 2.21 Relação entre aumento da temperatura de reaquecimento e ocorrência de defeitos superficiais. (LIM 2000)

Percebe-se pela figura 2.21 que um aumento de 70°C na temperatura de reaquecimento proporcionou uma redução na ocorrência de defeitos superficiais. A temperatura de reaquecimento é o fator mais relevante no controle da temperatura de laminação. Um aumento na temperatura de reaquecimento propicia que o material seja laminado a uma temperatura mais alta, o que corresponde a deformações em regiões nas quais o material apresenta uma melhor ductilidade a quente, reduzindo as chances de surgimento de trincas por esforços em zonas de baixa ductilidade.

O uso de descarepadores também teve sua influência sobre os defeitos superficiais avaliada. A figura 2.22 apresenta resultados obtidos com testes de uso de descarepador.

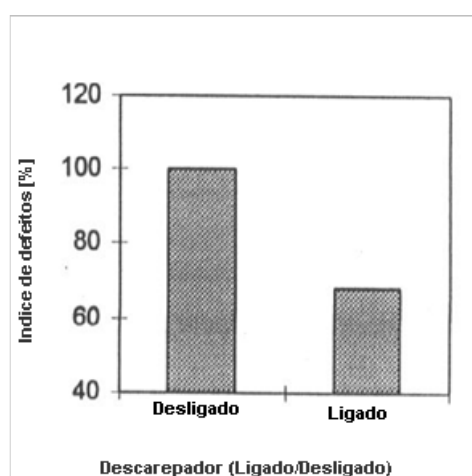


Figura 2.22 Relação entre uso de descarepador e ocorrência de defeitos superficiais. (LIM 2000)

A figura 2.22 demonstra que o uso do descarepador apresenta uma influência bastante relevante em termos de defeitos superficiais no sentido que o seu uso proporciona uma condição melhor, reduzindo a profundidade e possivelmente reduzindo a ocorrência de defeitos superficiais. O não uso de descarepador faz com que a carepa permaneça aderida a superfície e seja laminada propiciando a nucleação de defeitos superficiais.

2.2.8. Ductilidade a quente

Um passo importante na especificação apropriada das práticas de trabalho a quente é determinar as condições de trabalho adequadas. Em particular, a ductilidade e a tensão de escoamento podem ser estabelecidas em função da temperatura e da taxa de deformação.

A ductilidade de um material pode ser medida através percentual de alongamento (% El) ou pelo percentual de redução de área (% RA). A curva de ductilidade versus temperatura ou taxa de deformação demonstra qual o grau de deformação que o material pode tolerar sem falhar. Por outro lado, um gráfico da tensão de escoamento versus a temperatura, juntamente com a taxa de deformação, indica o nível de força requerido do equipamento que executa o trabalho a quente.

A redução de área (RA) e a resistência são os parâmetros chave medidos nos testes de tensão com máquina Gleeble. Como a redução em área é bastante sensível as propriedades de estruturas, ela pode ser utilizada para detectar pequenas variações no material, de baixa a moderada ductilidade.

O teste de tensão a quente reflete a ductilidade a quente inerente ao material, a qual representa a sua habilidade natural de deformar sob determinadas condições de deformação.

A tabela 2.2 traz exemplos estudados na literatura com relação ao desempenho qualitativo do material trabalhado a quente.

Tabela 2.2: Exemplos de taxas qualitativas de trabalhabilidade a quente para aços especiais e superligas. (ASM 2004)

RA (%)	Trabalhabilidade a quente	Ocorrência de trincas
< 30	Baixa	Abundante
30 a 40	Marginal	Numerosa
40 a 50	Aceitável	Baixa
50 a 60	Boa	Muito baixa.
60 a 70	Excelente	Ocasional
> 70	Superior	Rara

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos conduzidos neste trabalho tiveram por objetivo avaliar oportunidades de melhoria no processo de laminação que resultassem na redução do sucateamento e da rejeição em barras laminadas na bitola 76,20 mm. Os testes realizados buscaram avaliar a influência de parâmetros de processo importantes para garantia da integridade superficial de barras laminadas tais como: condicionamento do tarugo, pressão do descarepador e temperatura de reaquecimento.

3.1 Material

O material utilizado foi o aço DIN 20MnCr5 e sua composição química nominal é apresentada na tabela 3.1. Este aço foi escolhido em função do desdobramento realizado para o sucateamento na bitola 76,20 mm.

Este aço pertence a família de aços para cementação conforme DIN EN 10084 muito utilizado na produção de engrenagens de caixas de câmbio. O mesmo já foi estudado quanto a sua susceptibilidade a ocorrência de trinca em aciaria (FERNANDES 2005).

Tabela 3.1: Composição química nominal do aço DIN 20MnCr5. [DIN EN 10084].

	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr
Mínimo	0,17	-	1,10	-	-	1,00
Máximo	0,22	0,40	1,40	0,035	0,035	1,30

3.2 Equipamentos

Forno de Reaquecimento

Os testes variando temperatura de reaquecimento foram realizados em um forno de reaquecimento industrial do tipo walking beam da marca Bendotti, cujo combustível utilizado é gás natural. Este forno possui 8 zonas de aquecimento com um total de 36 queimadores.

Remoção de carepa

Nos testes variando a condição de carepa do material foi utilizado um descarepador hidráulico da marca Procome modelo PF-190/50 com pressão 240 Bar, vazão 220 L/min.

Condicionamento de tarugos

Para o teste variando a condição superficial do tarugo através do condicionamento dos cantos foi utilizada uma esmerilhadeira automática da marca Centro Maskin com remoção via rebolo abrasivo com força de 1000 kg.

Laminação

O material foi laminado em trem de laminação aberto constituído das etapas que seguem:

- Os passes de desbaste foram realizados em uma gaiola duo reversível marca M&N/GKN do tipo Baby Blooming compressão máxima de laminação de 400 toneladas e velocidade variável com máximo de 2,5 m/s

- Os passes do intermediário foram realizados em duas gaiolas trio horizontais marca M&N/GKN com pressão máxima de laminação de 200 toneladas e velocidade variável com máximo de 1,8 m/s. O processo teve sequência em duas gaiolas duo horizontais marca Danieli com velocidade variável de 0,3 a 1,0 m/s.

- Os passes acabadores foram realizados em um bloco acabador composto de três gaiolas marca Danieli dispostas na sequência horizontal-vertical-horizontal com velocidade variável de 0,8 m/s a 11,0 m/s.

Inspeção

O material foi inspecionado em uma linha de inspeção automática constituída de equipamento para detecção de defeitos superficiais via princípio de campo de fuga aplicado para a detecção de descontinuidades superficiais e sub-superficiais em materiais magnetizáveis.

Laboratório Metalúrgico

As análises dos defeitos foram realizadas no laboratório metalúrgico fazendo uso do microscópio ótico: Olympus modelo BX60M.

3.3 Metodologia

O trabalho foi realizado tomando como base princípios da metodologia 6 Sigma.

O Seis Sigma é uma metodologia que busca a redução da variação em todos os processos críticos que impactam nos índices de uma organização e aumentam a satisfação e lealdade dos clientes. É uma iniciativa organizacional projetada para criar processos de manufatura, serviço ou administrativo que gerem no máximo 3,4 defeitos por milhão de oportunidade. A ferramenta de melhoria empregada na implantação dos projetos Seis Sigma é o DMAIC, acróstico que representa: Definir-Medir-Analisar-Implementar-Controlar. (RASIS 2002)

O uso da metodologia 6 Sigma neste trabalho não teve como objetivo o atendimento de 3,4 defeitos por milhão de oportunidades, mas sim, o uso de uma sequência lógica que guiasse as análises e proporcionasse, através do uso de ferramentas estatísticas básicas, a redução nos índices de sucateamento e rejeição. Sendo assim, todas as ações de análise e teste serão baseadas no fluxo do DMAIC conforme representado na figura 3.1.

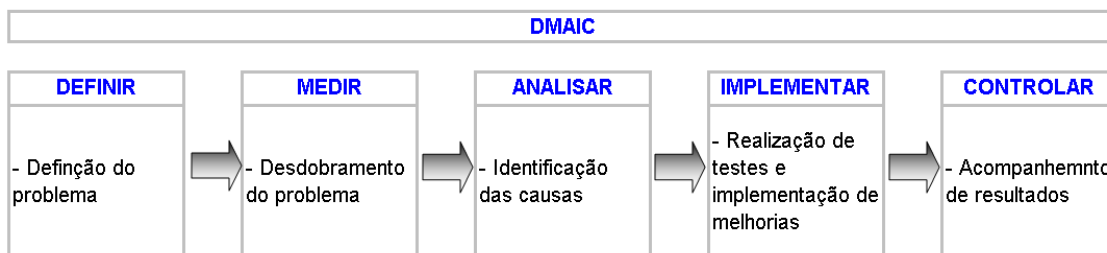


Figura 3.1 Fluxo do DMAIC adotado como metodologia para o estudo do problema. (RASIS 2002)

Conforme apresentado no fluxo da figura 3.1, o problema será estudado em 5 etapas que constituem em definir o problema, desdobrá-lo, identificar suas causas, realizar testes e implementar melhorias e acompanhar os respectivos resultados.

3.3.1. Definição do problema

Os produtos provenientes do processo de laminação podem ser fornecidos tanto no estado laminado quanto no estado acabado, onde sofre processos subseqüentes como, por exemplo, descascamento, retífica, trefilação, etc.

Neste trabalho serão abordados apenas produtos cuja condição de fornecimento é no estado laminado.

Sabe-se que o processo de laminação é um processo de conformação onde o material proveniente do lingotamento contínuo é reaquecido e submetido a uma sequência de deformações através de cilindros com formas de canais previamente definidas. Neste processo defeitos presentes na matéria-prima podem propagar-se e, em alguns casos, reduzir de tamanho. Porém, não é possível garantir que estes defeitos irão desaparecer durante o processo de laminação, ou seja, pode-se afirmar que o material na condição laminado não é isento de defeitos.

O mercado já é conhecedor desta limitação e para tanto escolhe o seu produto de acordo com a necessidade/exigência das solicitações em campo.

Dentre as especificações de um produto laminado há uma que faz referência ao limite de profundidade aceitável para um defeito conhecida como nível de inspeção (NI). Este limite também varia de acordo com a aplicação do material e não é válido para defeitos contínuos.

É com base neste limite que são definidos a rejeição e o sucateamento de um material.

Após o processo de laminação, o material passa por um processo de inspeção onde são realizados ensaios não destrutivos com o objetivo de identificar a presença de defeitos superficiais acima do NI.

A identificação das barras laminadas que apresentam defeitos acima do NI é realizada em um equipamento de inspeção automática que, ao identificar a presença de defeitos, desvia automaticamente a barra defeituosa para uma inspeção minuciosa através do ensaio de partículas magnéticas. As barras que passam por este processo de desvio para o ensaio de partículas são consideradas como rejeitadas e é o percentual de barras que passa por esta operação que compõe o índice de rejeição.

A seguir tem-se as definições para rejeição e sucata:

Rejeição: é quantidade de barras que, após a inspeção em linha automática, não são aprovadas e necessitam ser submetidas ao processo de inspeção por partículas magnéticas. Nestes casos, o ensaio de partículas magnéticas constitui em um retrabalho visto que o material já foi inspecionado. A rejeição é controlada através do indicador % Rejeição que corresponde ao número de barras rejeitadas dividido pelo número de barras inspecionadas, multiplicado 100 vezes.

Sucata: é todo material que, após a reinspeção, é constatado que os defeitos não poderão ser removidos, portanto a barra deverá ser sucateada. O sucateamento pode ser controlado tanto pelo peso sucateado [kg ou toneladas] como pelo percentual. Neste trabalho, será considerado o % Sucata que corresponde ao peso sucateado dividido pelo peso laminado multiplicado 100 vezes.

O ponto de partida para as ações e testes realizados neste trabalho será o sucateamento de material. A rejeição será um indicador importante, porém, num primeiro momento, secundário.

Através da análise do sucateamento em materiais laminados, se chegou a definição que o trabalho deveria ser focado nos materiais laminados na bitola de 76,20 mm produzidos no Laminador 1 (LAM 1). Esta bitola foi escolhida em função do seu volume de produção e de seu percentual de sucateamento por defeitos superficiais. A figura 3.2 apresenta a relevância do sucateamento na bitola 76,20 mm frente às demais laminadas nos dois trens de laminação (LAM 1 e LAM 2).

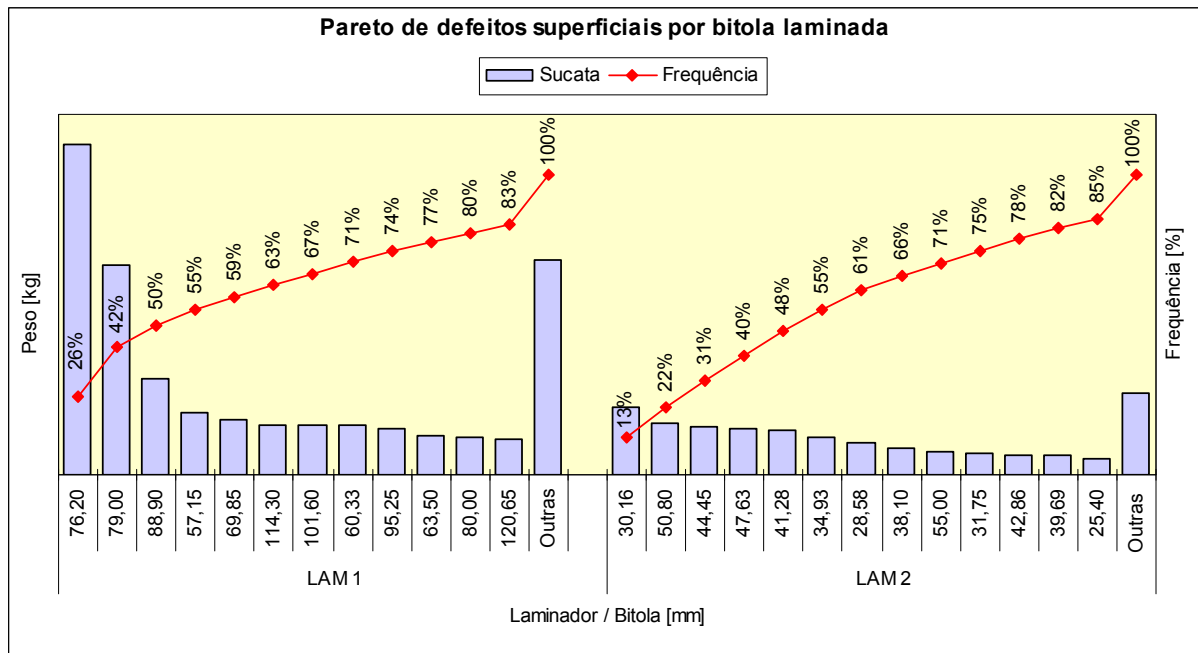


Figura 3.2 Pareto do sucateamento por bitola de laminação nos Laminadores 1 e 2.

Percebe-se pela figura 3.2 que a bitola 76,20 mm apresentava um sucateamento correspondente a 26% do volume sucateado por defeitos superficiais no Laminador 1. Quando comparado este resultado com o resultado do Laminador 2, percebe-se que a bitola 76,20 mm (primeira no Pareto de sucateamento do Laminador 1) apresenta o dobro do percentual sucateado pela bitola 30,16 mm (primeira do Pareto de sucateamento do Laminador 2).

O sucateamento na bitola 76,20 mm era maior que o da bitola 30,16 mm tanto em percentual quanto em peso sucateado. Ou seja, mais um fator que aponta para o fato de que esta bitola deveria passar por um trabalho diferenciado, pois representava uma parcela importante da produção da usina.

Definindo-se o foco de trabalho na bitola 76,20 mm se estava definindo também que o foco seria o Laminador 1. Este laminador é constituído fundamentalmente de um trem aberto com movimentação de material através de arrastadores, o que acarreta perdas de temperatura e marcas no material, dentre outros problemas.

Outra análise necessária para a definição do problema foi a dos tipos de defeitos envolvidos no sucateamento. A figura 3.3 apresenta os principais defeitos que geravam sucateamento nos Laminadores 1 e 2.

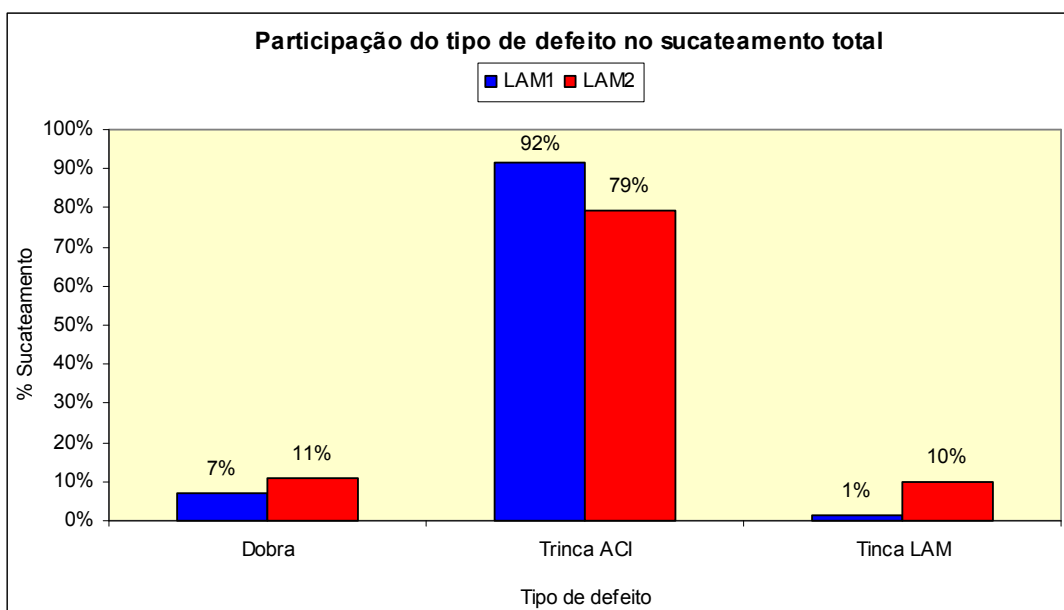


Figura 3.3 Participação dos três tipos de defeitos mais representativos no sucateamento nos laminadores (Laminador 1 – LAM 1 e Laminador 2 – LAM 2).

Percebe-se a relevância que há na participação de defeitos do tipo trincas com origem em Aciaria no sucateamento tanto do Laminador 1 quanto do Laminador 2. Ou seja, mais de 90% do sucateamento no Laminador 1 correspondia a defeitos do tipo trincas com origem em Aciaria. Para este tipo de defeito, as causas fundamentais estão relacionadas ao processo em Aciaria, o qual não é o foco deste trabalho. As ações que serão apresentadas durante este desenvolvimento buscam formas de minimizar o efeito destes defeitos através de melhorias nos parâmetros do processo de laminação.

3.3.2. Desdobramento do problema

Nesta etapa foi utilizada a ferramenta estatística de diagrama de Pareto. O Princípio de Pareto foi criado no Séc. XIX por um economista italiano chamado Alfredo Pareto que estabeleceu o designado método de análise de Pareto, também conhecido como dos 20-80% e que significa que um pequeno número de causas (geralmente 20%) é responsável pela maioria dos problemas (geralmente 80%).

Esta ferramenta auxilia a analisar o problema e a focar as ações no material que apresenta maior impacto sobre o resultado. Ou seja, os testes poderão ser realizados no material mais representativo para sucateamento e, posteriormente, as ações tomadas neste material poderão ser aplicadas aos demais materiais por abrangência.

A figura 3.4 apresenta o Pareto de sucateamento por laminador.

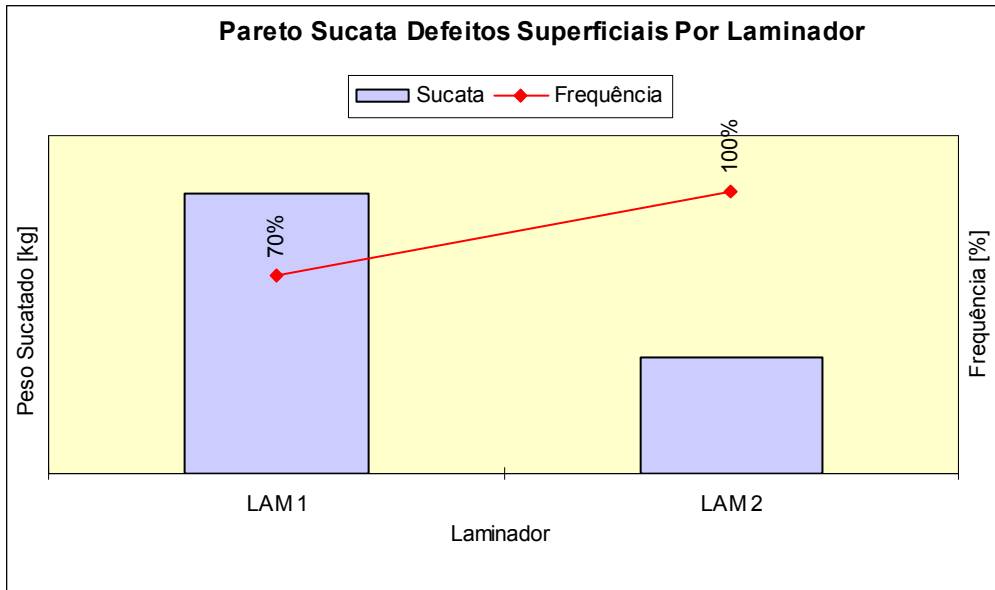


Figura 3.4 Pareto do sucateamento por laminador (Laminador 1 – LAM 1 e Laminador 2 – LAM 2).

A análise da figura 3.4 torna evidente que 70% do sucateamento por defeitos superficiais ocorriam em materiais laminados no Laminador 1 (LAM 1).

Desdobrando este sucateamento no Laminador 1 por bitola se obtém o Pareto representado na figura 3.5.

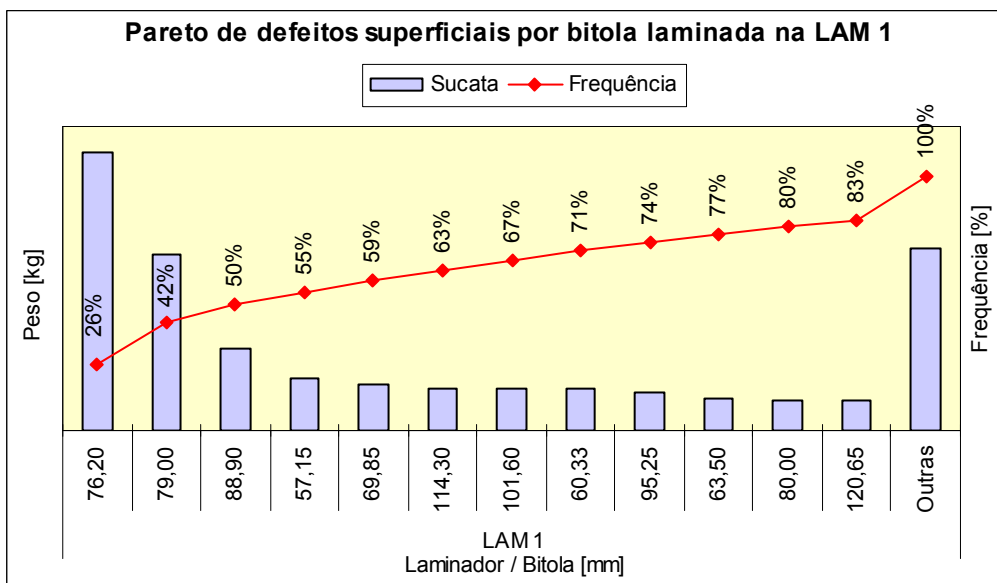


Figura 3.5 Pareto do sucateamento por bitola no Laminador 1 – LAM 1.

Desdobrando-se o sucateamento da bitola 76,20 mm por grupo de qualidades se obtém o Pareto da figura 3.6.

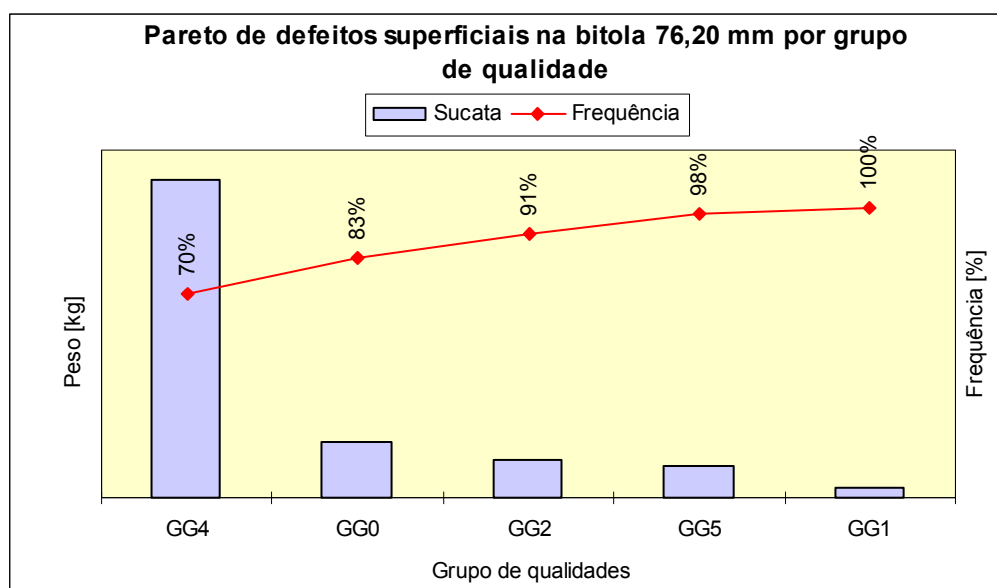


Figura 3.6 Pareto do sucateamento por grupo de qualidade na bitola 76,20 mm no Laminador 1 – LAM 1.

Percebe-se que cerca de 70% do sucateamento por defeitos superficiais na bitola 76,20 mm no Laminador 1 está relacionado a qualidades do grupo G4. Este grupo contempla qualidades da linha construção mecânica ligados ao Cr e Mo.

Com base nas análises apresentadas nos Paretos das figuras 3.4 a 3.6, é possível definir que o foco de atuação deve ser no laminador 1 (LAM 1), na bitola 76,20 mm em qualidades pertencentes ao grupo G4.

Neste nível de estratificação já se poderia dizer que o problema está focado. Porém, a fim de favorecer a realização dos testes, optou-se por estender a análise abrindo em mais um nível, o qual é apresentado na figura 3.7. Nesta figura tem-se a estratificação no nível de qualidades pertencente ao grupo G4.

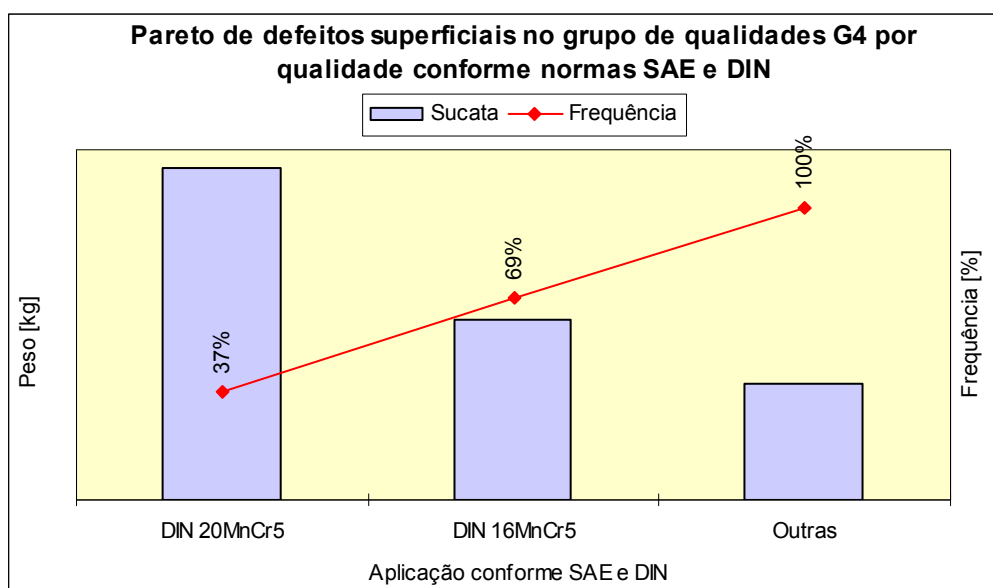


Figura 3.7 Pareto do sucateamento por qualidades pertencentes ao grupo G4 na bitola 76,20 mm no Laminador 1 – LAM 1.

A partir da figura 3.7 é possível identificar que as qualidades com maior representatividade no sucateamento por defeitos superficiais na bitola 76,20 mm são as qualidades DIN 20MnCr5 e DIN 16MnCr5, ambas com aplicação para cementação conforme DIN EN 10084.

Sendo assim, todos os testes realizados neste trabalho foram focados na qualidade DIN 20MnCr5 e, posteriormente, as padronizações advindas dos resultados destes testes foram estendidas às demais qualidades.

3.3.3. Identificação das causas

As causas estudadas foram definidas tomando por base dados de literatura conforme os apresentados na figura 2.22. Foram considerados 3 parâmetros principais para estudo:

- Temperatura de laminação;
- Condicionamento superficial do tarugo;
- Carepa.

O estudo da influência destes parâmetros no processo foi desenvolvido conforme será descrito nos itens que seguem.

3.3.4. Realização de testes e implementação de melhorias

A variável base dos testes foi a temperatura de laminação.

Para LIM et al [2000], a temperatura de reaquecimento é o fator mais relevante no controle da temperatura de laminação. Com base neste conhecimento, os testes foram planejados variando as temperaturas de reaquecimento.

Com base em dados históricos e de *benchmarking*, as temperaturas testadas foram 1200 e 1280°C. Estes dois valores foram selecionados buscando avaliar a pior e a melhor condição respectivamente.

As demais variáveis testadas, a saber: condicionamento do tarugo, carepa e calibração, foram testadas em conjunto com a variação de temperatura entre 1200 e 1280°C.

O primeiro teste realizado utilizou a combinação das variáveis temperatura de reaquecimento e condicionamento de tarugo. Neste teste foram utilizadas as 4 condições conforme descrito na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Condições teste de temperatura versus condicionamento do tarugo.

Condição teste	Condicionamento do tarugo	Temperatura de reaquecimento
01	ECA	1200°C
02	SAC	1200°C
03	ECA	1280°C
04	SAC	1280°C

Foram utilizadas duas condições de condicionamento de tarugos, a saber:

ECA: condicionamento apenas nos cantos dos tarugos. Entende-se que nesta condição defeito presentes nos cantos dos tarugos – região crítica para defeitos superficiais devido às taxas de extração de calor – serão removidos melhorando o desempenho no produto laminado.

SAC: sem condicionamento (nem nos cantos, nem nas faces). Entende-se que nesta condição todos os defeitos com origem em Aciaria permanecerão no material influenciando no desempenho do material laminado.

Portanto, conforme se observa pela tabela 3.2, foram testadas as quatro condições que seguem:

Condição 01: Os tarugos sofreram condicionamento apenas nos cantos e foram submetidos a uma temperatura de reaquecimento de 1200°C.

Condição 02: Os tarugos não sofreram nenhum tipo de condicionamento e foram submetidos a uma temperatura de reaquecimento de 1200°C.

Condição 03: Os tarugos sofreram condicionamento apenas os cantos e foram submetidos a uma temperatura de reaquecimento de 1280°C.

Condição 04: Os tarugos não sofreram nenhum tipo de condicionamento e foram submetidos a uma temperatura de reaquecimento de 1280°C.

Neste teste, o objetivo foi avaliar qual a melhor condição de produção, ou seja, qual das quatro condições de teste apresentaria o melhor desempenho em termos de sucateamento e rejeição.

As quatro condições foram produzidas em uma mesma campanha de laminação, ou seja, foram reaquecidas e laminadas em sequência.

Após a execução dos testes em laminação, os materiais foram inspecionados em linha de inspeção automática. Os defeitos foram avaliados nas barras rejeitadas tendo sido retiradas amostras para posterior análise e caracterização dos defeitos.

Numa segunda etapa, foram realizados testes utilizando a combinação temperatura de reaquecimento e remoção de carepa através do uso do descarepador. Neste teste, foram utilizadas as 4 condições conforme descrito na tabela 3.3. Vale ressaltar, que neste teste foi fixada a condição superficial de tarugo EPA, tendo sido avaliadas apenas as condições descritas na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Condições teste de temperatura versus utilização do descarepador.

Condição teste	Uso do descarepador	Temperatura de reaquecimento
01	SIM	1200°C
02	NÃO	1200°C
03	SIM	1280°C
04	NÃO	1280°C

Conforme se observa pela tabela 3.3, neste teste foram utilizadas quatro condições, a saber:

Condição 01: O descarepador foi utilizado com pressão 200Bar e a temperatura de reaquecimento foi de 1200°C.

Condição 02: O descarepador não foi utilizado (pressão 0 Bar) e a temperatura de reaquecimento foi de 1200°C.

Condição 03: O descarepador foi utilizado com pressão 200Bar e a temperatura de reaquecimento foi de 1280°C.

Condição 04: O descarepador não foi utilizado (pressão 0 Bar) e a temperatura de reaquecimento foi de 1280°C.

Neste teste, o objetivo foi avaliar qual a melhor condição de produção, ou seja, qual das quatro condições de teste apresentaria o melhor desempenho em termos de sucateamento e rejeição.

As quatro condições foram produzidas em uma mesma campanha de laminação, ou seja, foram reaquecidas e laminadas em sequência.

Após a execução dos testes em laminação, os materiais foram inspecionados em linha de inspeção automática. Os defeitos foram avaliados nas barras rejeitadas, tendo sido retiradas amostras para posterior análise e caracterização dos mesmos.

4.0 RESULTADOS

4.1 Teste de temperatura versus condicionamento do tarugo

O objetivo deste teste foi avaliar a influência das variáveis de processo temperatura e condicionamento de tarugo. Conforme apresentado na tabela 3.2, foram testadas 4 condições distintas de processo:

Condição 1: Condicionamento ECA + Temperatura de 1200°C (ECA 1200°C)

Condição 2: Condicionamento SAC + Temperatura de 1200°C (SAC 1200°C)

Condição 3: Condicionamento ECA + Temperatura de 1280°C (ECA 1280°C)

Condição 4: Condicionamento SAC + Temperatura de 1280°C (SAC 1280°C)

O parâmetro condicionamento é uma variável qualitativa, ou seja, ou o material sofreu o condicionamento ou não sofreu. Já a variável temperatura é uma variável quantitativa que pode ser medida através de termopares que medem a temperatura das zonas no forno de reaquecimento e de pirômetros que medem a temperatura do material ao longo do processo.

Sendo assim, as figuras que seguem apresentarão os valores obtidos para temperatura no forno de reaquecimento. Conforme citado acima, para o teste foram utilizados dois valores de temperatura de reaquecimento. Estes foram os valores programados para temperatura de câmara nas zonas do forno de reaquecimento.

A figura 4.1 apresenta o resultado das medições de temperatura de câmara para o teste na condição 1 (ECA 1200°C)

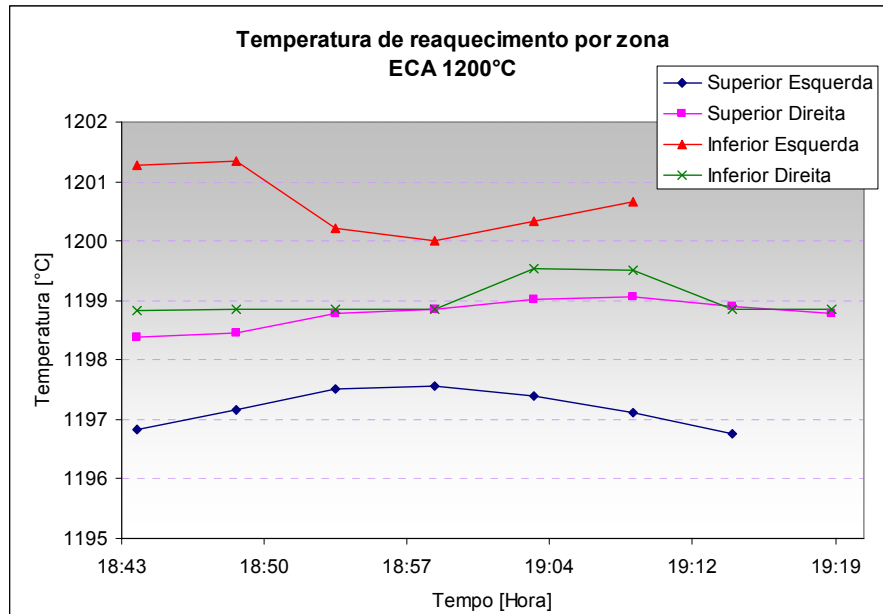


Figura 4.1 Valores da temperatura de câmara nas zonas de reaquecimento para a condição 1 .

Observa-se pela figura 4.1 que para uma temperatura de câmara programadas em 1200°C, os valores obtidos variam de 1197 a 1201°C, sendo possível considerar que a condição estipulada para o teste foi atendida. Esta constatação torna-se mais evidente através da figura 4.2, na qual é apresentado o valor médio da temperatura de câmara para o teste na condição 1.

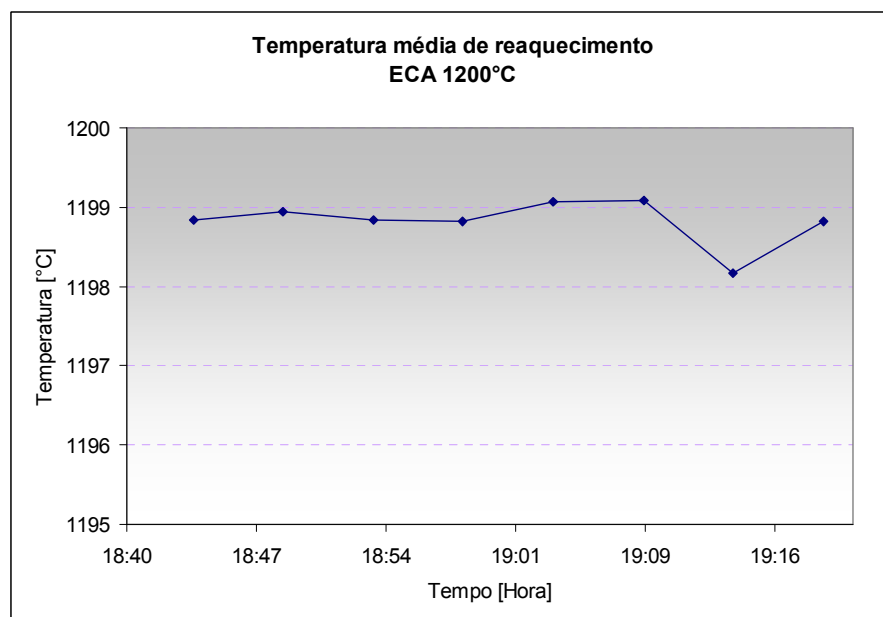


Figura 4.2 Valores da temperatura média de reaquecimento para o teste a condição 1.

Observa-se que a temperatura média durante o teste foi de da ordem de 1199°C, atendendo a condição do teste.

A figura 4.3 apresenta o resultado das medições de temperatura de câmara para o teste na condição 2 (SAC 1200°C)

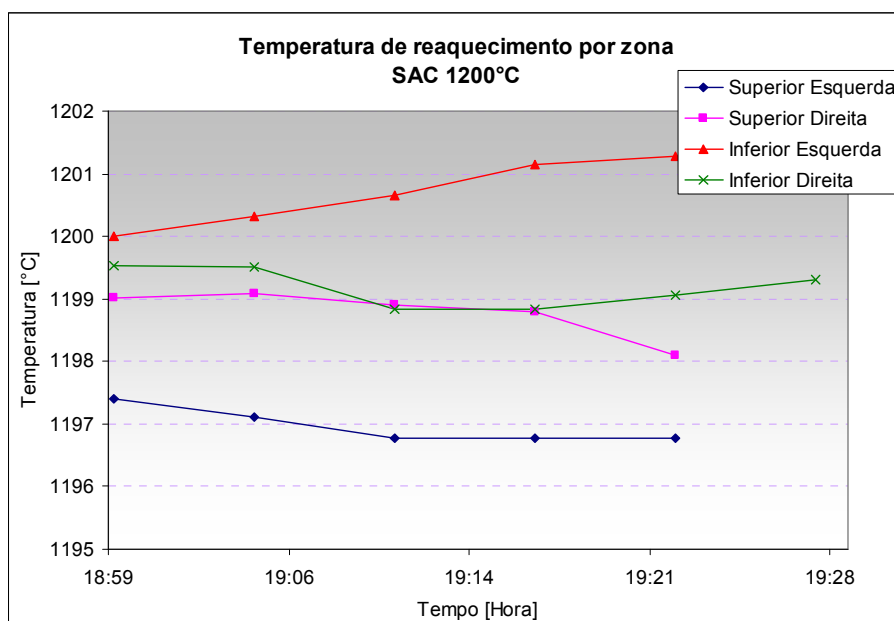


Figura 4.3 Valores da temperatura de câmara nas zonas de reacimento para a condição 2 .

Observa-se pela figura 4.3 que para uma temperatura de câmara programada em 1200°C, os valores obtidos variam de 1197 a 1201°C, sendo possível considerar que a condição estipulada para o teste foi atendida. Esta constatação torna-se mais evidente através da figura 4.4, na qual é apresentado o valor médio da temperatura de câmara para o teste na condição 2.

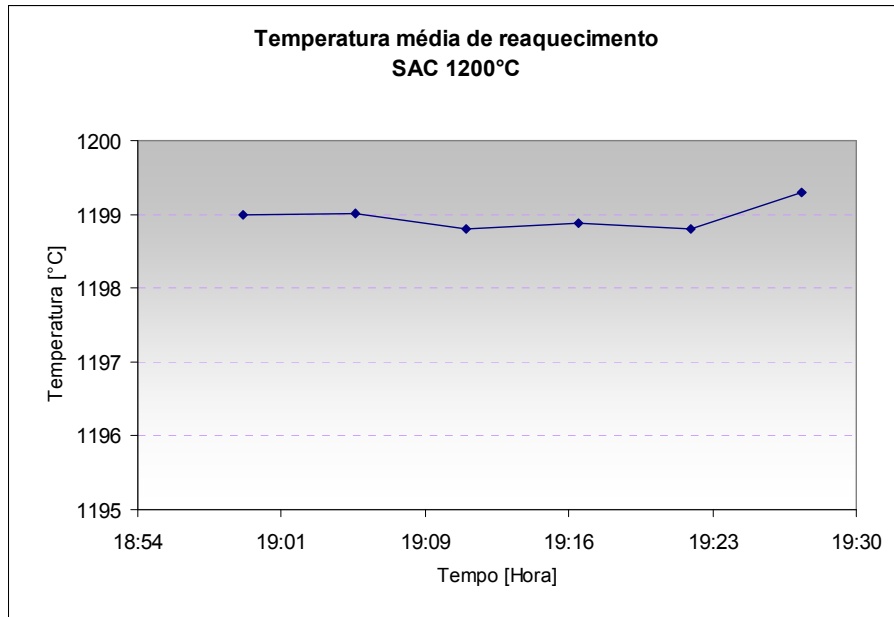


Figura 4.4 Valores da temperatura média de reaquecimento para o teste a condição 2.

Observa-se que a temperatura média durante o teste foi de da ordem de 1199°C, atendendo a condição do teste.

A figura 4.5 apresenta o resultado das medições de temperatura de câmara para o teste na condição 3 (ECA 1280°C)

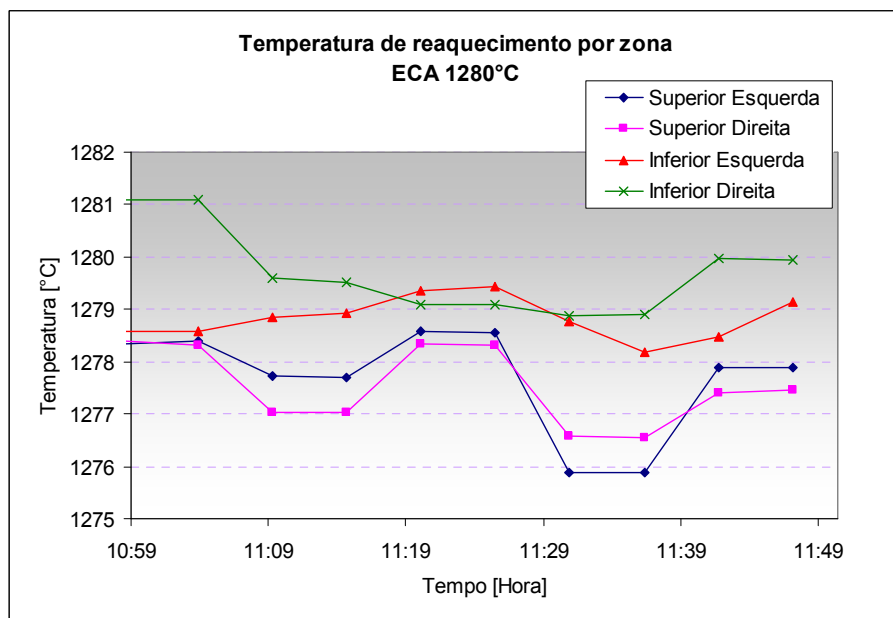


Figura 4.5 Valores da temperatura de câmara nas zonas de reaquecimento para a condição 3 .

Observa-se pela figura 4.5 que, para uma temperatura de câmara programada em 1280°C os valores obtidos variam de 1276 a 1281°C, sendo possível considerar que a condição estipulada para o teste foi atendida. Esta constatação torna-se mais evidente através da figura 4.6, na qual é apresentado o valor médio da temperatura de câmara para o teste na condição 3.

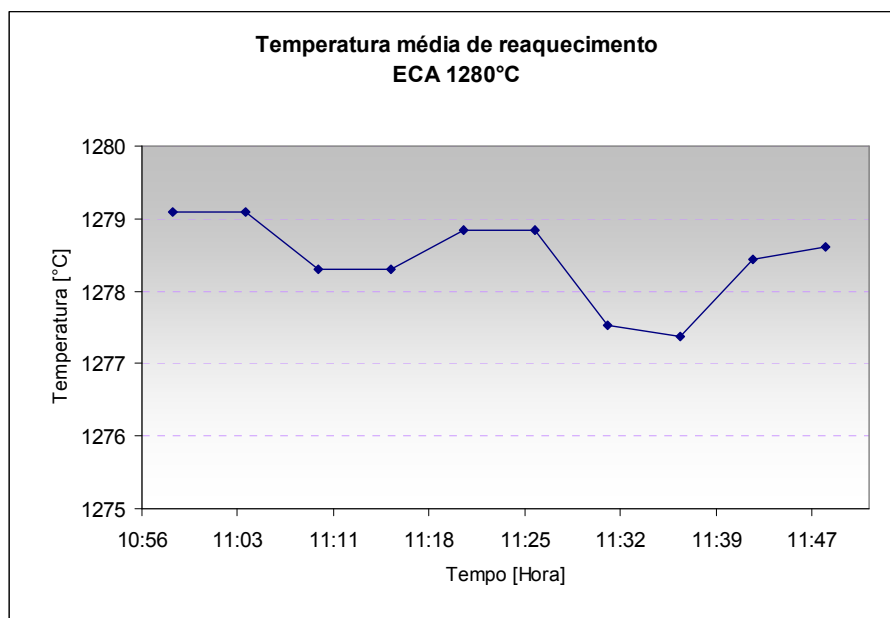


Figura 4.6 Valores da temperatura média de reaquecimento para o teste a condição 3.

Observa-se que a temperatura média durante o teste foi de da ordem de 1278°C, atendendo a condição do teste.

A figura 4.7 apresenta o resultado das medições de temperatura de câmara para o teste na condição 4 (SAC 1280°C)

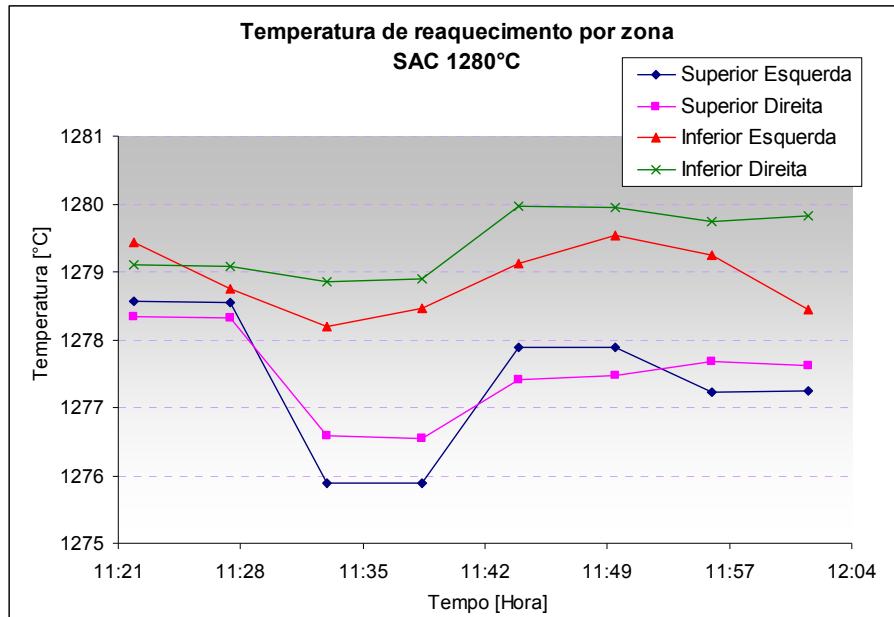


Figura 4.7 Valores da temperatura de câmara nas zonas de reaquecimento para a condição 4 .

Observa-se pela figura 4.7 que, para uma temperatura de câmara programada em 1280°C os valores obtidos variam de 1276 a 1280°C, sendo possível considerar que a condição estipulada para o teste foi atendida. Esta constatação torna-se mais evidente através da figura 4.8, na qual é apresentado o valor médio da temperatura de câmara para o teste na condição 4.

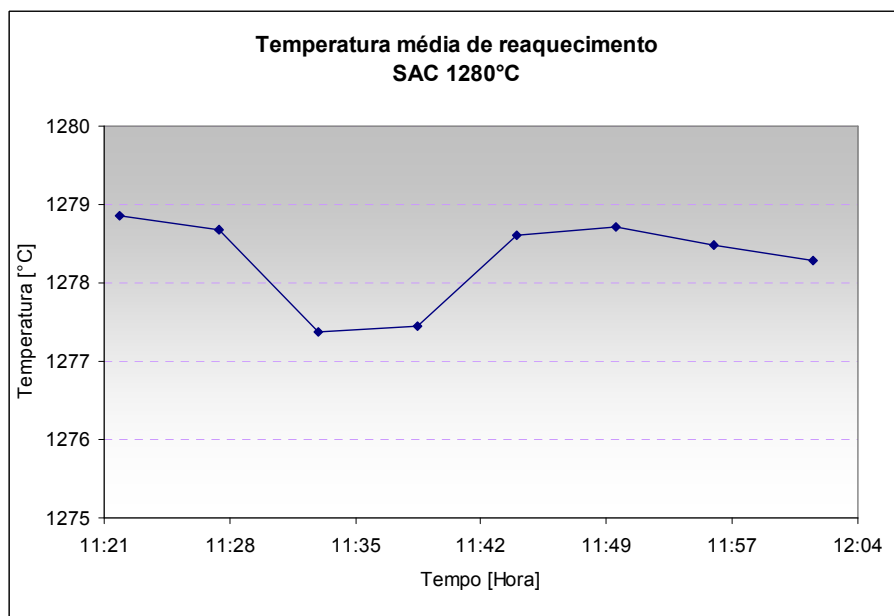


Figura 4.8 Valores da temperatura média de reaquecimento para o teste a condição 4.

Observa-se que a temperatura média durante o teste foi de da ordem de 1278°C, atendendo a condição do teste.

A temperatura seguiu sendo uma variável de controle ao longo de todo processo. A comparação entre a influência das duas condições de temperatura de reaquecimento foi avaliada através da média da temperatura ao longo do tarugo após o quarto passe e após o último passe do desbaste. A figura 4.9 apresenta um comparativo entre as médias de 9 tarugos submetidos a condição de reaquecimento a 1200°C e as médias de 9 tarugos submetidos a condição de reaquecimento a 1280°C.

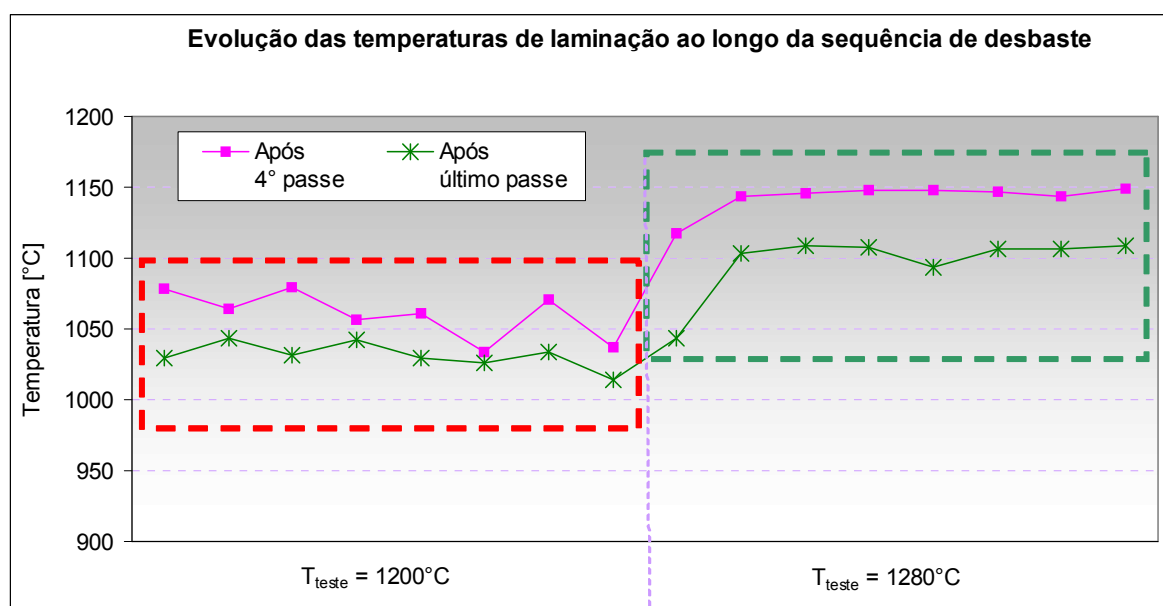


Figura 4.9 Evolução da temperatura de laminação ao longo da sequência de desbaste para as duas condições de temperaturas de reaquecimento testadas.

Percebe-se pela figura 4.8 que a diferença de temperatura da ordem de 80°C nas condições de teste impactou em uma diferença 50°C durante a sequência de desbaste para estas mesmas condições de teste. Há uma queda de cerca de 30°C entre a temperatura de reaquecimento e a temperatura de laminação devido ao material passar pelo processo de descarepação hidráulica, onde ocorre perda de temperatura devido ao contato com a água.

Além disso, ao longo do processo de laminação, ocorrem perdas de temperatura por contato do material com a água de refrigeração dos cilindros e irradiação para o meio. Porém, algumas destas perdas são compensadas pelo ganho devido ao processo de conformação. Estas perdas podem ocorrer para materiais reaquecidos tanto a 1200°C quanto a 1280°C.

De fato é possível concluir que as condições de teste se mantêm distintas ao longo do processo de laminação, permitindo que seja realizada uma avaliação dos resultados vinculados à diferença de temperatura tanto de reaquecimento como de laminação. Ou seja, confirmam-se os dados da literatura que dissertam a cerca de a temperatura de reaquecimento ser uma variável de influência significativa sobre a temperatura de laminação. (LIM 2000)

A figura 4.10 apresenta a variação de temperatura na sequência do intermediário para as duas condições testadas no reaquecimento.

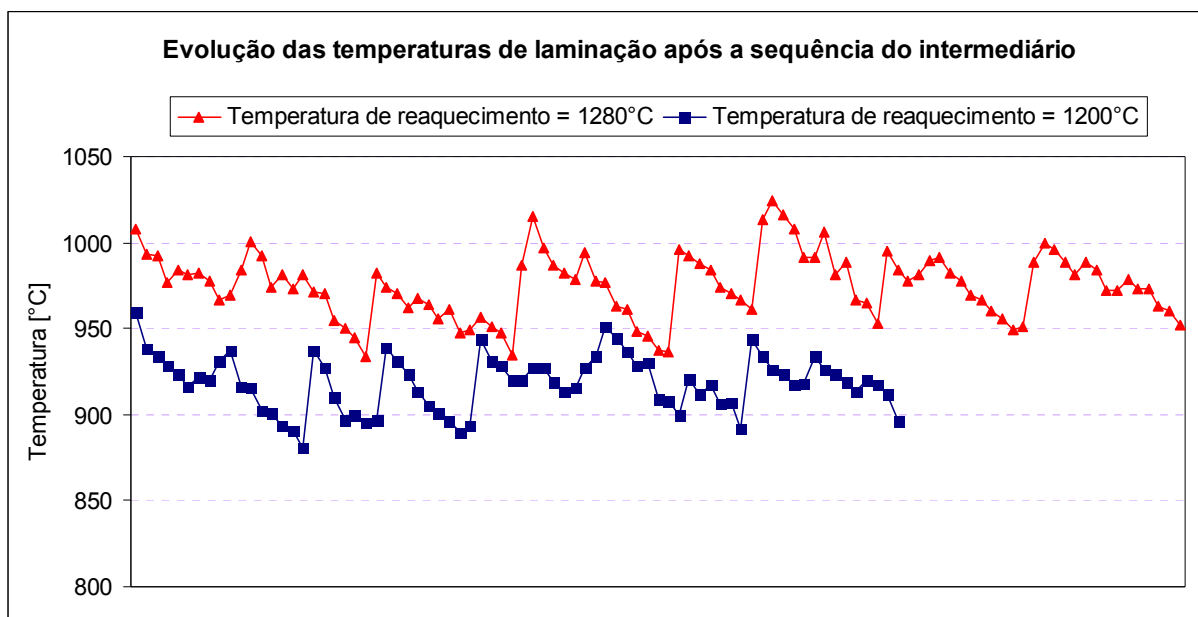


Figura 4.10 Evolução da temperatura de laminação ao longo da sequência do intermediário para as duas condições de temperaturas de reaquecimento testadas.

Percebe-se pela figura 4.10 que a diferença de temperatura entre as duas condições testadas se mantém durante a sequência de passes do intermediário. Para a condição em que o material foi submetido a uma temperatura de reaquecimento de 1280°C, a temperatura de laminação ao longo desta sequência de passes se manteve na faixa de 950 a 1000°C. Já para o material submetido a uma temperatura de reaquecimento de 1200°C, a temperatura de laminação ao longo desta sequência de passes se manteve na faixa de 900 a 950°C. Ainda persiste a diferença de temperatura de laminação da ordem 50°C entre as suas condições testadas.

A figura 4.11 apresenta a variação de temperatura na sequência acabadora para as duas condições testadas no reaquecimento.

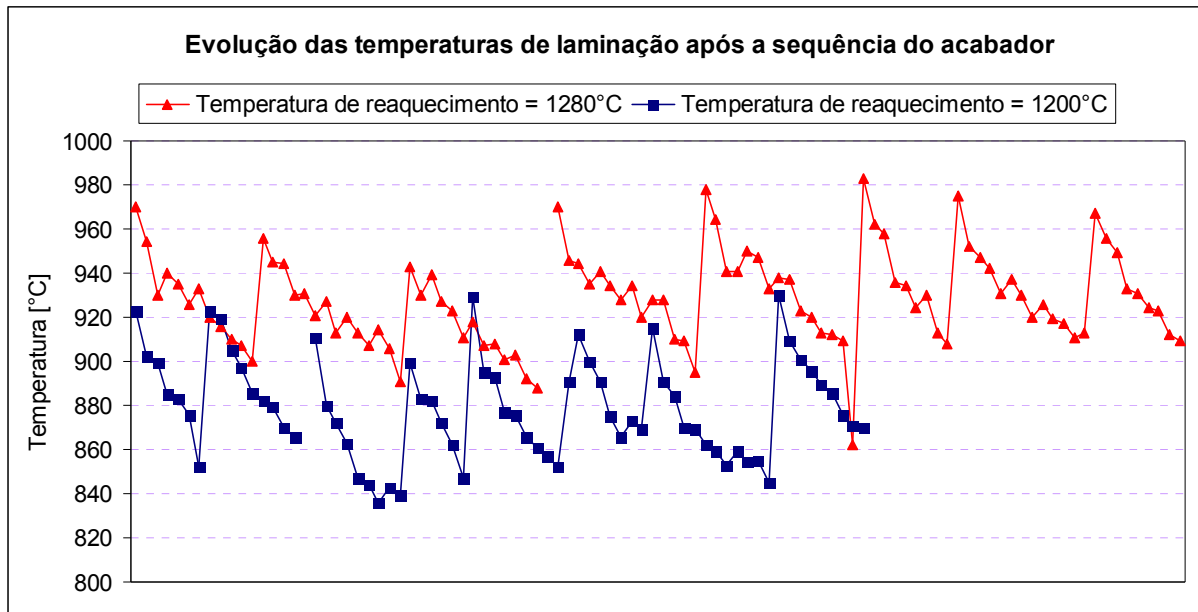


Figura 4.11 Evolução da temperatura de laminação ao longo da sequência do acabador para as duas condições de temperaturas de reaquecimento testadas.

Percebe-se pela figura 4.11 que a diferença de temperatura entre as duas condições testadas se mantém durante a sequência de passes acabador. Para a condição em que o material foi submetido a uma temperatura de reaquecimento de 1280°C, a temperatura de laminação ao longo desta sequência de passes se manteve na faixa de 900 a 960°C. Já para o material submetido a uma temperatura de reaquecimento de 1200°C, a temperatura de laminação ao longo desta sequência de passes se manteve na faixa de 840 a 900°C. Ainda persiste a diferença de temperatura de laminação entre as suas condições testadas.

Após a laminação, as barras testadas foram submetidas ao processo de inspeção em linha automática, onde o equipamento foi programado para rejeitar defeitos com profundidade superior ao NI.

Os resultados de rejeição, ou seja, o percentual de barras com defeitos acima do NI é apresentado na figura 4.12.

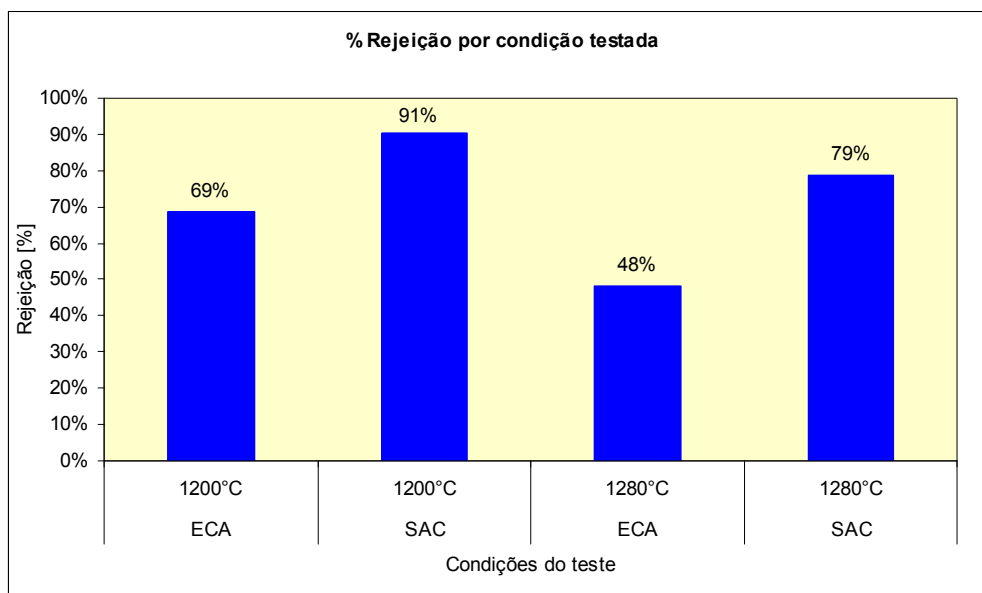


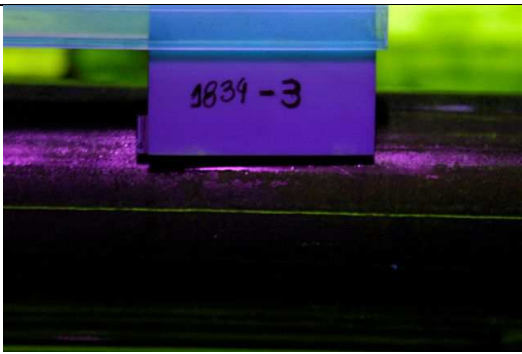
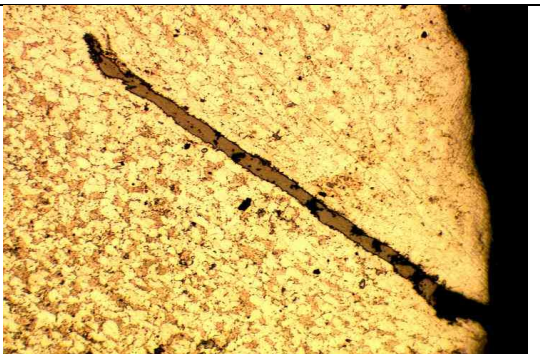






Figura 4.12 Resultados de rejeição para o teste combinando das variáveis temperatura de reauecimento e condicionamento de tarugo.

Através da figura 4.12, é possível identificar que os melhores resultados de rejeição e sucateamento foram obtidos para o teste na condição 3 (ECA 1280°C).

Se a variável temperatura for avaliada individualmente, percebe-se que, para uma mesma condição de condicionamento de tarugo, os resultados a temperatura mais elevada de 1280°C foram melhores frente as resultados de rejeição e sucateamento obtidos para a temperatura de 1200°C.

A tabela 4.1 apresenta a característica morfológica dos defeitos encontrados em cada uma das 4 condições testadas.

Tabela 4.1: Defeitos encontrados no teste de temperatura x condicionamento do tarugo.

Condição teste	Ensaio de partículas magnéticas	Microestrutura
01 ECA 1200°C		
Trinca de Aciaria – Profundidade 0,42 mm (Ataque Nital 3% Aumento 100 X)		
02 SAC 1200°C		
Trinca de Aciaria – Profundidade 0,60 mm (Ataque Nital 3% Aumento 100 X)		
03 ECA 1280°C		
Trinca de Aciaria – Profundidade 0,36 mm (Ataque Nital 3% Aumento 100 X)		
04 SAC 1280°C		
Trinca de Aciaria – Profundidade 0,62 mm (Ataque Nital 3% Aumento 50 X)		

Pela análise da tabela 4.1, é possível perceber que não há diferença significativa entre a morfologia dos defeitos das quatro condições. De uma maneira geral, percebem-se uma tendência as menores profundidades para as condições em que o tarugo sofreu condicionamento nos cantos (ECA).

4.2 Teste de temperatura versus remoção de carepa

Uma segunda etapa de testes foi realizada para avaliar a influência da remoção da carepa formada durante o reaquecimento frente às mesmas condições de temperatura dos testes realizados anteriormente.

Como os parâmetros de temperatura utilizados serão os mesmos, ou seja, 1200°C e 1280°C, não serão reapresentados neste item os resultados de temperatura, visto que já se demonstrou no item 4.1 que os parâmetros programados no forno de reaquecimento foram atendidos e que a diferença de temperatura estipulada no reaquecimento se mantém a longo do processo de laminação.

Sendo assim, será dada ênfase às análises de rejeição, sucateamento, tipo e quantidade de defeitos encontrados no teste.

O objetivo deste teste foi avaliar a influência das variáveis de processo temperatura e remoção de carepa. Conforme apresentado na tabela 3.3, foram testadas 4 condições distintas de processo:

Condição 01: Pressão 200 Bar + Temperatura de 1200°C. (200 Bar 1200°C)

Condição 02: Pressão 0 Bar + Temperatura de 1200°C. (0 Bar 1200°C)

Condição 03: Pressão 200 Bar + Temperatura de 1280°C. (200 Bar 1280°C)

Condição 04: Pressão 0 Bar + Temperatura de 1280°C. (0 Bar 1280°C)

A figura 4.13 apresenta os resultados de rejeição para as quatro condições testadas.

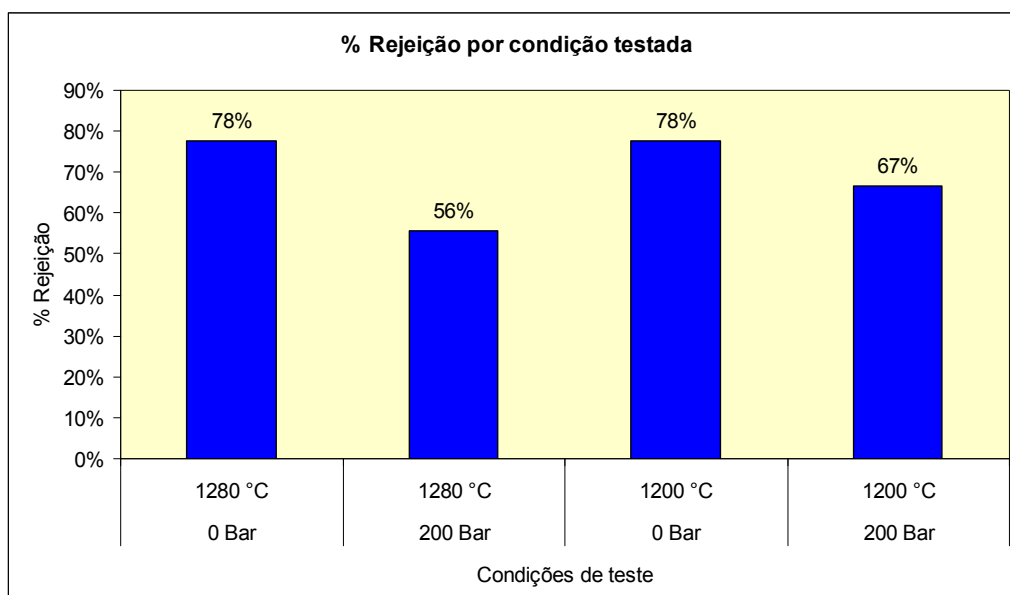


Figura 4.13 Percentual de rejeição para as diferentes condições testadas variando temperatura de reauecimento e uso de descarepador.

Pela figura 4.13, é possível perceber que o menor nível de rejeição é atingido quando utilizando-se condição de temperatura de reauecimento mais elevada aliada ao uso do descarepador. (200 Bar 1280°C)

A figura 4.14 apresenta a quantidade média de defeitos por barra para cada uma das condições testadas.

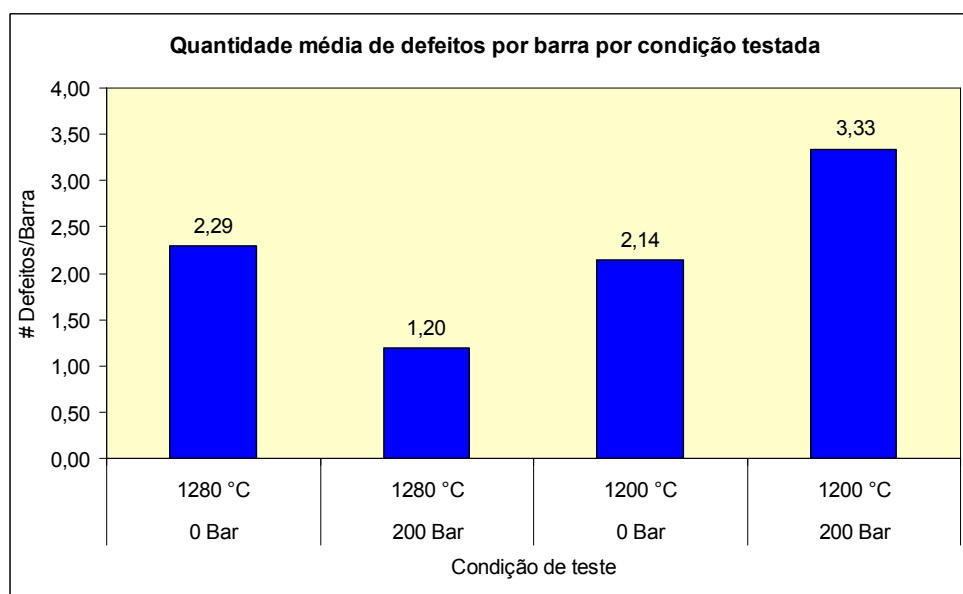


Figura 4.14 Quantidade média de defeitos por barra para as diferentes condições testadas variando temperatura de reauecimento e uso de descarepador.

Pela figura 4.14, novamente é possível perceber que a menor quantidade média de defeitos por barra é registrada quando se utilizando condição de temperatura de reaquecimento mais elevada aliada ao uso do descarepador. (200 Bar 1280°C)

A figura 4.15 apresenta os defeitos característicos em cada uma das condições testadas.

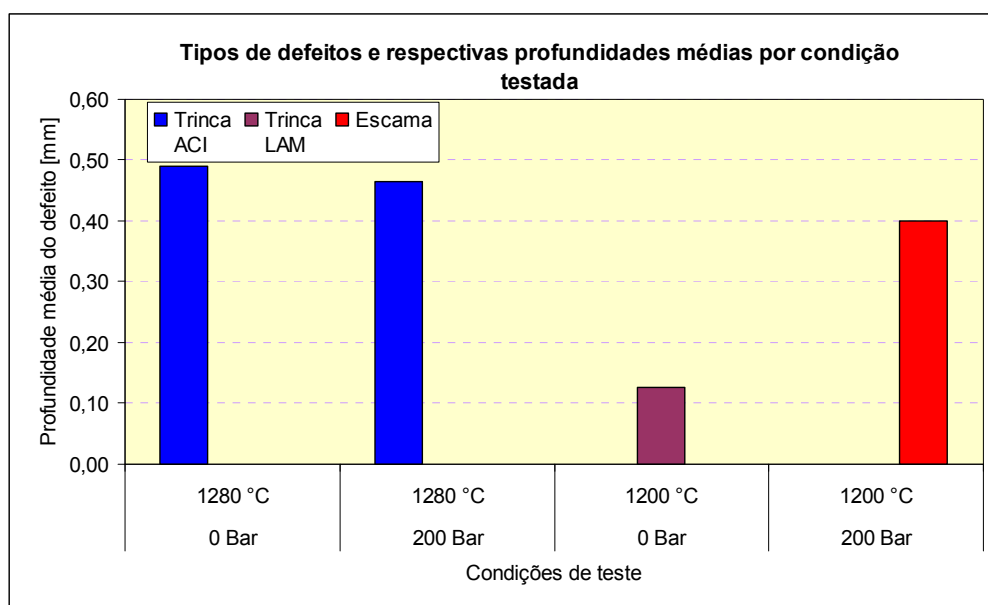
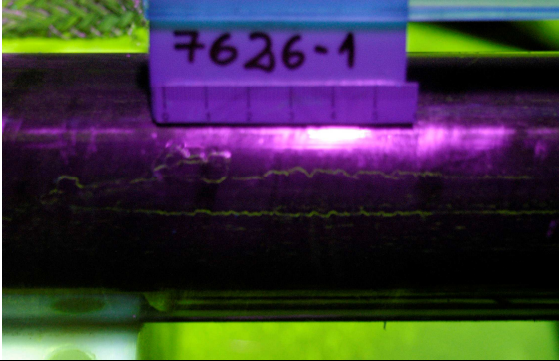
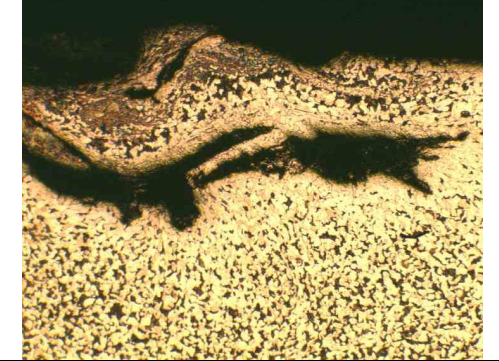
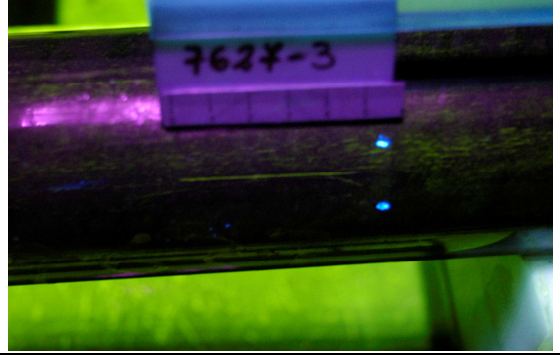
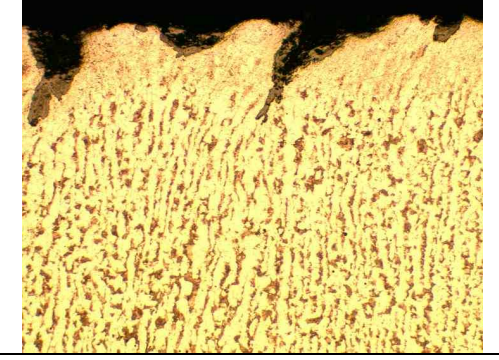
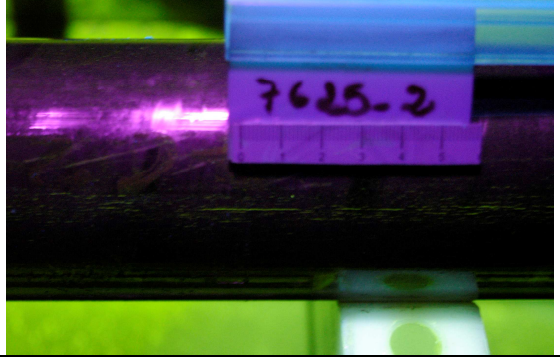
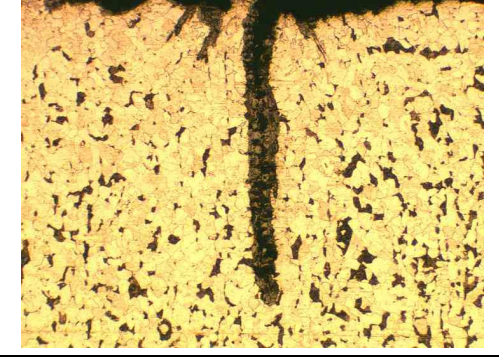
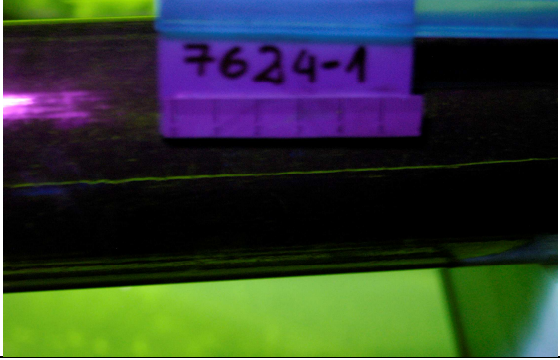
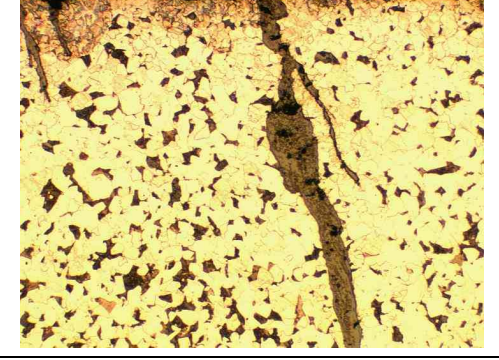


Figura 4.15 Tipos de defeitos encontrados e respectivas profundidades médias em cada uma das diferentes condições testadas variando temperatura de reaquecimento e uso de descarepador.

Pela figura 4.15, percebe-se que, independentemente do uso ou não do descarepador, os defeitos presentes no material reaquecido a 1280°C são apenas trincas com origem em Aciaria (Trinca ACI). Já no material reaquecido a 1200°C, evidencia-se o aparecimento de defeitos cuja origem pode ser definida como sendo Laminação.

A tabela 4.2 apresenta a característica morfológica dos defeitos encontrados em cada uma das 4 condições testadas.

Tabela 4.2: Defeitos encontrados no teste de temperatura x remoção de carepa.

Condição teste	Ensaio de partículas magnéticas	Microestrutura
01 200 Bar 1200°C		
Escama de Laminação – Profundidade 0,55 mm (Ataque Nital 3% Aumento 50 X)		
02 0 Bar 1200°C		
Trinca de Laminação – Profundidade 0,13 mm (Ataque Nital 3% Aumento 100 X)		
03 200 Bar 1280°C		
Trinca de Aciaria – Profundidade 0,41 mm (Ataque Nital 3% Aumento 100 X)		
04 0 Bar 1280°C		
Trinca de Aciaria – Profundidade 0,49 mm (Ataque Nital 3% Aumento 100 X)		

Pela análise da tabela 4.2, é possível perceber que, para as condições testadas, defeitos do tipo trincas de Laminação ocorrem apenas para a condição de não uso do descarepador (0 Bar) e temperatura de reaquecimento baixa (1200°C). A condição de temperatura baixa favorece também a presença de defeitos do tipo escamas.

Após a conclusão dos testes descritos nos itens 4.1 e 4.2, foi possível definir as melhores condições de laminação, ou seja, as condições que mais favorecem uma melhoria na qualidade superficial do material, a saber: temperatura de reaquecimento 1280°C e uso do descarepador. Definidas estas condições e parâmetros de controle, os testes passaram a ser então realizados em escala de produção.

A questão referente ao condicionamento dos cantos do tarugo também exerce uma influência positiva, porém, por ser uma condição que agrega custo ao material a ser laminado, ela não foi escolhida como parâmetro de controle para a realização de testes em escala.

O uso do descarepador foi definido como um parâmetro fixo a ser controlado pela operação, ou seja, foram definidos critérios de aceitação para variação de pressão e fornecido um *checklist* diário de verificação das condições de funcionamento do equipamento a fim de se evitar a ocorrência de falhas mecânicas.

4.3 Teste de temperatura em escala de produção

A temperatura de reaquecimento foi padronizada como sendo 1280°C e passou a ser controlada durante a operação do equipamento. Como variável resposta, permaneceu-se utilizando o % de sucateamento e o % de rejeição.

A figura 4.16 apresenta a evolução dos percentuais de sucateamento e rejeição para a bitola 76,20 mm por campanha de laminação. Nesta figura, também é possível identificar o desempenho, tanto do % de sucateamento quanto do % de rejeição, antes e depois da mudança na temperatura de reaquecimento de 1200°C para 1280°C.

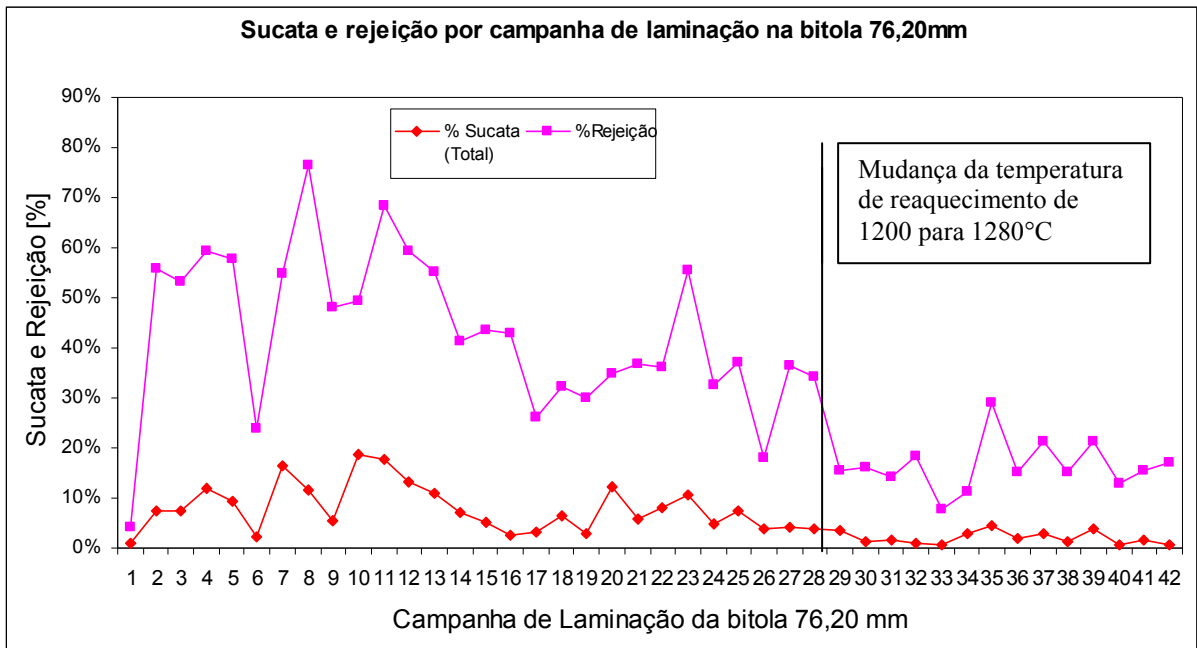


Figura 4.16 Evolução dos percentuais de rejeição e sucateamento por campanha de laminação da bitola 76,20 mm.

A figura 4.16 evidencia que houve uma redução nos percentuais de rejeição e sucateamento após a alteração da temperatura de reauecimento de 1200°C para 1280°C.

A figura 4.17 apresenta os percentuais médios de sucateamento para as condições de 1200°C e 1280°C.

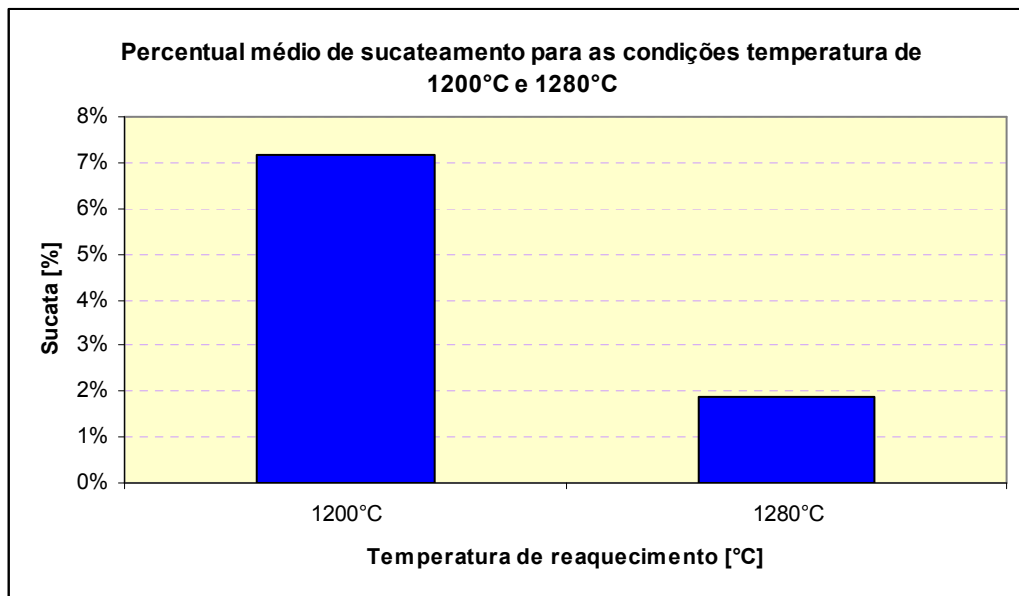


Figura 4.17 Percentual médio de sucateamento para as condições de 1200 e 1280°C.

A figura 4.17 demonstra que o aumento em 80°C na temperatura de reaquescimento resultou em uma redução média de 5% no percentual de sucateamento.

A figura 4.18 apresenta os percentuais médios de rejeição para as condições de 1200°C e 1280°C.

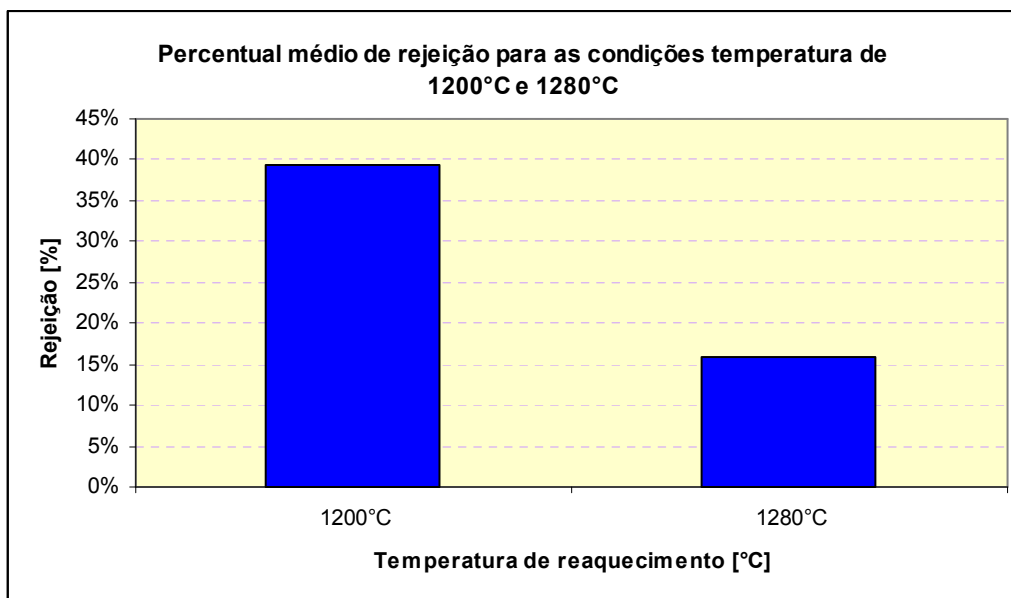


Figura 4.18 Percentual médio de rejeição para as condições de 1200 e 1280°C.

A figura 4.18 demonstra que o aumento em 80°C na temperatura de reaquescimento resultou em uma redução média de 25% no percentual de rejeição.

Conforme verificado pela análise das temperaturas ao longo das sequências de laminação, os materiais submetidos a temperatura de reaquescimento de 1200°C apresentaram temperatura de laminação cerca de 50°C mais baixa que a apresentada pelos materiais submetidos a temperatura de reaquescimento de 1280°C.

O impacto desta diferença sobre o processo de conformação pode ser avaliado através da análise da curva de ductilidade e da curva de tensão x deformação a quente específicas da qualidade testada. Estas curvas são apresentadas nas figuras 4.19 e 4.20, respectivamente. (FERNANDES 2005)

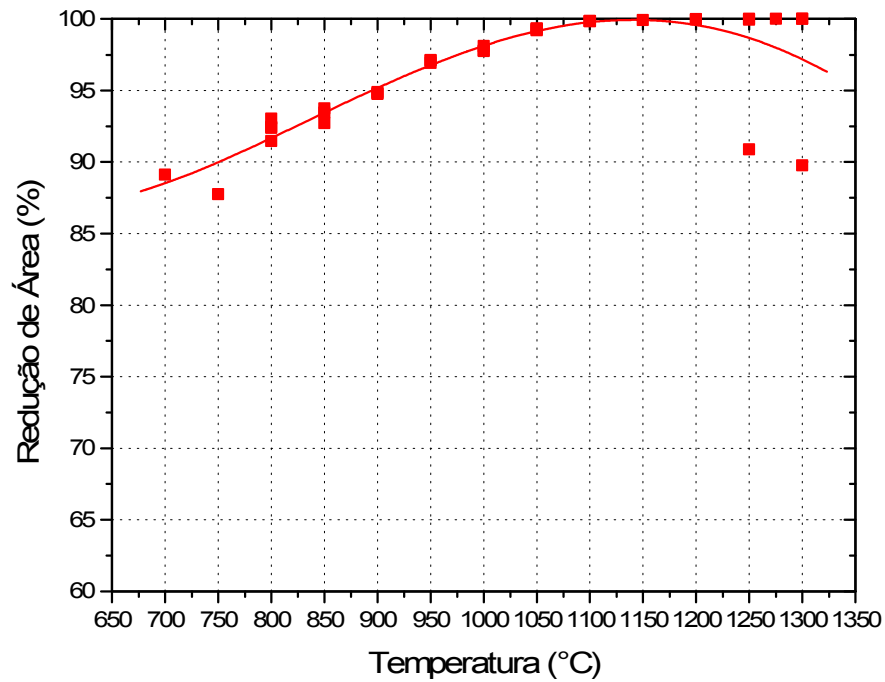


Figura 4.19 Curva de ductilidade a quente para a qualidade DIN 20MnCr5. (FERNANDES 2005)

A figura 4.19 demonstra que quando a temperatura do material cai abaixo de 1050°C ocorre uma queda da ductilidade a quente do material a qual acompanha a queda de temperatura.

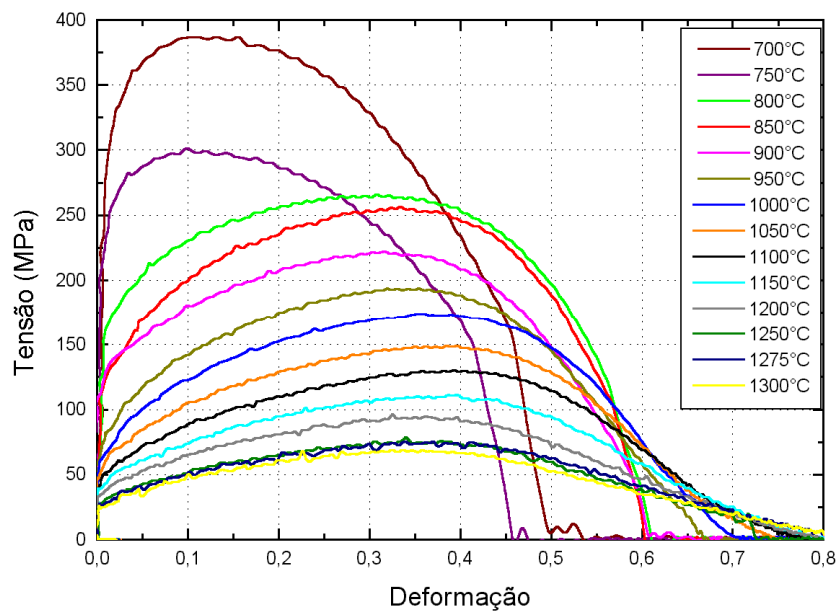


Figura 4.20 Curva de tensão deformação a quente para a qualidade DIN 20MnCr5.(FERNANDES 2005)

A figura 4.20 demonstra que, para se obter um mesmo valor de deformação no material, é necessária uma tensão maior conforme a temperatura do material diminui. Ou seja, relacionando com os testes realizados neste trabalho, o aumento da temperatura favorece a deformação e reduz as chances de surgimento e/ou propagação de defeitos.

Em resumo, mesmo que as diferenças de temperatura de laminação entre uma condição e outra sejam pequenas, há uma maior resistência a conformação para temperaturas mais baixas, o que pode favorecer o surgimento ou a propagação de pequenos defeitos. Ou seja, esforços maiores são exercidos sobre um material que está sob uma condição de ductilidade reduzida.

5.0 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Influência do condicionamento do tarugo

A variável condicionamento do tarugo demonstrou exercer influência relativamente positiva sobre os resultados de qualidade superficial, comprovando-se os dados da literatura que definem esta condição como um modo de falha para o surgimento de defeitos superficiais (LIM 2000). Ou seja, os tarugos que sofreram condicionamento nos cantos apresentaram índices de rejeição inferiores aos apresentados pelos tarugos que não sofreram nenhum tipo de condicionamento. Esta afirmação é válida quando analisados os resultados para uma mesma condição de temperatura de reaquecimento.

Em resumo, para a temperatura de 1200°C, as barras laminadas a partir de tarugos ECA apresentaram rejeição de 69% frente a uma rejeição de 91% apresentada pelas barras laminadas a partir de tarugos SAC. O mesmo acontece se comparadas as condições ECA e SAC na temperatura de 1280°C, onde as barras laminadas a partir de tarugos ECA apresentaram rejeição de 48% frente a uma rejeição de 79% apresentada nas barras laminadas a partir de tarugos SAC.

Apesar de ser evidente a melhoria da qualidade superficial na condição ECA frente a condição SAC, não se justifica implementar de uma maneira geral esta condição, pois o condicionamento agrega custo e gera um maior *lead time* de produção que não se justificam para os níveis de rejeição apresentados. Ou seja, para estes níveis de rejeição, ainda seria necessário retrabalho nas barras laminadas.

5.2 Influência da remoção de carepa

A influência da remoção da carepa foi um modo de falha estudado através do uso ou não do descarepador após o forno de reaquecimento.

Os resultados dos testes demonstram que, para a condição de uso do descarepador e alta temperatura (200 Bar 1280°C), ocorre a menor rejeição, a menor quantidade de defeitos por barra e, também, a presença exclusiva de defeitos característicos do processo em Aciaria.

Se fixada a variável uso do descarepador (200 Bar), percebe-se que, para esta mesma condição, o material reauecido a uma temperatura de 1280°C apresenta menor rejeição que o reauecido a 1200°C. Isto demonstra que o uso de uma temperatura de reauecimento mais alta favorece a formação de carepa menos aderente que pode ser removida mais facilmente através do uso do descarepador.

Ainda considerando as condições acima citadas, fica evidente que quando utilizado o descarepador e a temperatura de 1280°C, há uma influência no tipo de defeito presente no material. Nesta condição, apenas trincas pré-existentes permaneceram na barra laminada, ou seja, trincas que já estavam no tarugo antes do mesmo ser reauecido para a laminação. Já na outra condição, com o uso do descarepador e temperatura de 1200°C, evidencia-se a presença de escama típica de laminação que pode ter se formado a partir de uma marca deixada por uma carepa não removida que ao laminar soltou-se da barra deixando uma impressão que no final do processo foi caracterizada como uma escama.

A condição de não uso do descarepador (0 Bar) apresentou rejeição e quantidade de defeitos por barra bastante semelhantes tanto para a temperatura de 1200°C quanto para a de 1280°C. Isso demonstra a importância do uso do descarepador para uma melhor qualidade superficial, pois, apesar de a temperatura 1280°C favorecer o surgimento de uma carepa menos aderente, se o descarepador não for utilizado, a carepa permanecerá no material potencializando a nucleação de defeitos do tipo trincas de laminação e escamas. Vale lembrar que as escamas geram um sinal maior durante o processo de inspeção representando um ruído danoso a este processo, pois, mesmo dentro dos níveis aceitáveis, irá demandar retrabalho na inspeção *off line*.

Outro fato que confirmou os dados de literatura foi o de que a condição de temperatura mais baixa (1200°C) e não uso do descarepador (0 Bar) foi a única que apresentou a presença de trincas de laminação. Ou seja, a exemplo da variável condicionamento de tarugo, a variável carepa também se confirma como prejudicial à qualidade superficial do material. (LIM 2000)

5.3 Influência da temperatura

Os efeitos da temperatura puderam ser avaliados nos testes descritos nos itens anteriores. A partir destes resultados, foi possível definir a temperatura ideal de trabalho como sendo 1280°C.

O uso desta temperatura foi padronizado e passou a ser utilizado em toda linha de aço construção mecânica carbono e ligado, ou seja, em escala.

Foram acompanhadas 13 campanhas de laminação e verificou-se que os resultados obtidos com temperatura de reaquecimento de 1280°C se confirmaram quando aplicados em escala de produção. Fica evidente o impacto do aumento da temperatura principalmente sobre a rejeição, onde houve uma redução de 40 para 15% na rejeição média. Com esse resultado, foi possível contribuir para a redução do retrabalho o qual era ocasionado pelo excesso de rejeição que implicava no desvio de material para reinspeção *off line*.

Conseqüentemente, o aumento da temperatura impactou também na redução de sucateamento de material devido à presença de defeitos acima do nível aceitável. Esta redução de 7 para 2% no sucateamento sofre a influência de outro fator importante para melhora da qualidade superficial que é a redução dos esforços para laminação. Ou seja, o aumento da temperatura de reaquecimento implica em um aumento da ductilidade a quente do material, o que favorece sua laminação e diminui o risco potencial de nucleação e propagação de defeitos superficiais.

Os resultados de rejeição e sucateamento obtidos para o aumento da temperatura de laminação, na produção em escala, são até mais significativos que na produção-teste. Isso ocorre em função de que na produção em escala há uma estabilização do processo de reaquecimento, não ocorrendo a influência da inércia térmica decorrente das mudanças nas curvas de aquecimento, necessárias durante os testes a fim de se laminar o material em uma mesma campanha de laminação.

6.0 CONCLUSÕES

- O condicionamento do tarugo, mesmo que sendo apenas nos cantos (região crítica devido às altas taxas de extração de calor), representa uma melhoria no que tange à qualidade superficial de barras laminadas, conforme identificado na condição ECA 1280°C, onde se obteve a menor rejeição (48% de rejeição) nos testes com temperatura e condicionamento de tarugo. Porém, a aplicação prática deste processo esbarra em capacidade produtiva, não se tornando viável de ser aplicada em escala. Neste caso, há de se optar por esta prática apenas em aços críticos.

- A remoção de carepa através do uso do descarepador faz-se extremamente relevante para a melhoria da qualidade superficial de barras laminadas, uma vez que contribui, principalmente, para a redução da rejeição durante o processo de inspeção conforme identificado na condição 200 Bar 1280°C, onde se obteve a menor rejeição para os testes com temperatura e uso do descarepador (58% de rejeição). O uso do descarepador já era padrão e os testes realizados serviram para reforçar a importância do funcionamento e utilização adequada deste equipamento.

- No presente trabalho, fica evidente a importância de se trabalhar com temperaturas mais elevadas na laminação em um trem aberto, na tentativa de se minimizar os efeitos causados pelas perdas térmicas, que são maiores neste processo quando comparadas com a de um processo em trem de laminação contínuo. Um aumento de 80°C na temperatura de reaquecimento representou também um aumento na temperatura de laminação de cerca de 50°C em média.

- O aumento da temperatura de reaquecimento implicou em uma redução média de 25% no percentual de rejeição e de 5% no percentual de sucateamento, o que levou a padronização da temperatura de reaquecimento de 1280°C para o processo de laminação da bitola 76,20 mm no Laminador 1 para todas as qualidades de aço construção mecânica ao carbono e ligado.

7.0 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Testar influência da atmosfera do forno, mais oxidante ou mais redutora, sobre a melhoria da qualidade superficial;
- Estudar influência condição superficial dos cilindros de laminação sobre a formação e propagação de defeitos superficiais;
- Realizar testes com defeitos artificiais no intuito de avaliar o seu comportamento frente a sequência de calibração utilizada;

8.0 REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, L.A. **Manual de Siderurgia: Transformação.** Editora Arte & Ciência, Vol.2, São Paulo, 1997.
- WUSATWSKI. Z. **Fundamentals of Rolling.** Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Braunschweig, 1969.
- DIETER, G.E. **Mechanical Metallurgy**, 2.ed., 1976.
- VILELA. A.C.F. **Processos Siderúrgicos – SID-500.** Gerdau, Programa de Capacitação Acelerada de Engenheiros, 2007.
- CODA, R.C. **Laminação: Produtos Longos de Aços Laminados a Quente.** Laboratório de Transformação Mecânica, UFRGS, 2006^a.
- 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.
- BLAIN P. **Laminação e Forjamento dos Aços.** Associação Brasileira de Metais, p.87, 1964.
- HAUCK, G.A.C.; LAIA, L.L. **Fornos de Reaquecimento.** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, ABM, 2007.
- GUIDE 76. **Continuous Steel Reheating Furnaces: Spacification, Design and Equipment.** Energy Efficiency Office, Bets Parctice Programme, 1994.
- CASTILHOS, Érica. **Contribuição para a Caracterização de Defeitos Superficiais em Barras Laminadas.** Trabalho de Diplomação. Departamento de Metalurgia, UFRGS, 2008.
- PAWLITZKI, P. **Sophisticated Solutions for Descalers.** MPT International , p.54-58, 2007.
- NELSON, B.D..et al. **Design Criteria for Descaling at Dofasco’s N° 2 Hot Mill.** Iron & Steel Technology, p.72-79, 2006.
- YU, Q. **An Effective Descaling System for Hot Rolling.** Iron & Steel Technology, Vol.5, N° 10, p.94-107, 2008.
- BASABE, V.V.; SZPUNAR, J.A. **Phase Composition of Oxide Scale during Reheating in Hot Rolling of Low Carbon Steel.** Steel Reseach International, Vol.77, N° 11, p.818-824, 2006.
- SCHÜRMAN, Stefan. **Measurement and Mathematical Approximation of the Impact of Descaling Nozzles.** Lechler GmbH & Co. KG 07 Set. 2009.
http://www.lechler.de/pdf/measurement_matematical_approximation.pdf

KERMANPUR, A.; EBNONNASIR, A.; HEDAYATI, M. **A Novel Analytical-Artificial Neural Network Model to Improve Efficiency of High Pressure Descaling Nozzles in Hot Strip Rolling of Steel.** Materials Science and Technology Vol.23, N° 08, p.951-957, 2007.

KOTRBÁČEK, P. et al. **Influence of Parameters of Hydraulic Descaling on Temperature Losses and Surface Quality of Rolled Material.** Suppl. Metal Forming, p.367-370, 2004.

FRICK, J.W. **More Efficient Hydraulic Descaling Header Designs.** MPT International, p.90-94, 2004.

FRICK, Jürgen W. **Optimisation of Nozzel Arrangements on Descaling Headers.** Lechler GmbH & Co. KG 07 Set. 2009. < http://www.lechler.de/pdf/descaling_headers.pdf>

FRICK, J.W.; STEIN, A. **Auditoria de uma Descarepação Hidromecânica numa Laminação de Tiras a Quente como Método Eficaz para Melhorar a Qualidade do Produto.** 43° Seminário de Laminação: Processos e Produtos Laminados e Revestidos, p.165-175, 2006.

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

Calibração de Produtos Longos – LAM 507. Gerdau, Programa de Capacitação Acelerada de Engenheiros, 2007.

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

MADIAS, J.; REDA, L. **Defeitos em Produtos Longos de Aços ao Carbono e Baixa Liga.** Instituto Argentino de Siderurgia, IAS, 2004.

Gerdau Aços Especiais Brasil Charqueadas. **Álbum de Defeitos Superficiais.**

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

EMI, T. **Surface Defects on Continuously Cast Strands.** The AISE Steel Foundation, 21, p.1-58, 2003.

BRIMACOMBE, J.K.; SORIMACHI, K. **Crack Formation in the Continuous Casting of Steel.** Metallurgical Transactions B. Vol.8B, p.489-505, 1977.

Verlag Stahleisen M. B. H. Düsseldorf. **Wire Rod Defects**, 1973.

LIM, K.H. et al. **More Efficient Operating Practices for Improving the Surface Quality of High Quality Steel Wire.** SEAI SI Quarterly, 29-3, p. 42-49, 2000.

Tensile Testing. The Materials Information Society, ASM International, 2004.

FERNANDES, Paulo Carvalho. **Otimização dos Parâmetros de Lingotamento Contínuo para Minimizar a Ocorrência de Trincas Superficiais no Aço DIN 20MnCr5 Mod.** Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais UFRGS, 2005.

RASIS, D., GITLOW, H.S., POPOVICH, E. **Paper Organizers International: A Fictitious Six Sigma Green Belt Case Study I.** *Quality Engineering*, 15 (1), p.127-145, 2002.

DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG. EURUPÄISCHE NORM. **DIN EN 10084:1998**
Abril 2008. pg.162.