

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGE3M

**INFLUÊNCIA DA QUALIDADE E TIPO DE ESMERILHAMENTO DE TARUGOS
NA GERAÇÃO DE DEFEITOS SUPERFICIAIS DE BARRAS LAMINADAS**

LUCAS TADEU AMARANTE BOMBANA

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

Porto Alegre

2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGE3M

**INFLUÊNCIA DA QUALIDADE E TIPO DE ESMERILHAMENTO DE TARUGOS
NA GERAÇÃO DE DEFEITOS SUPERFICIAIS DE BARRAS LAMINADAS**

LUCAS TADEU AMARANTE BOMBANA
Engenheiro Mecânico

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

Porto Alegre

2012

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Profissional e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito

Dr. Eng. Met. Marcio Levi Kramer de Macedo

Prof. Dr. Eng. Wagner Viana Bielefeldt

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGE3M

Porto Alegre, 2012.

Dedico este trabalho a minha esposa Ana Paula,
fonte de inspiração e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A meus pais pela educação e valores.

A minha esposa pelo amor, compreensão e incentivo.

Ao professor Alexandre Rocha pela dedicação em orientar este trabalho.

À equipe do Preparo de Tarugos, sempre dispostos a auxiliar.

À Usina Piratini, pela oportunidade de aprendizado e desenvolvimento profissional

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XII
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1. FATORES QUE INFLUENCIAM A QUALIDADE DO PRODUTO LAMINADO	3
2.2. MACROESTRUTURA DO TARUGO PRODUZIDO NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO.	6
2.3. QUALIDADE DA MATÉRIA PRIMA ORIUNDA DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO	9
2.3.1. Trincas Internas	10
2.3.2. Propriedades mecânicas dos aços a altas temperaturas	13
2.3.3. Efeito da Composição Química do Aço na Solidificação	14
2.4. ESMERILHAMENTO DE TARUGOS.....	16
2.4.1. Qualidade da superfície de esmerilhamento	22
2.4.2. Método de Esmerilhamento	23
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	25
3.1. AÇOS	25
3.2. FLUXO DO PROCESSO	26
3.2.1. Inspeção de tarugos.....	28
3.3. METODOLOGIA.....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1. ESMERILHAMENTO E INSPEÇÃO DOS TARUGOS.....	32
4.1.1. Inspeção superficial	32
4.1.2. Esmerilhamento.....	36
4.1.3. Ensaio Impressão de Baumann na seção do tarugo.....	38
4.2. INSPEÇÃO DE BARRAS LAMINADAS	43
4.2.1. Resultados para o aço SAE 1050.....	44
4.2.2. Resultado para o aço DIN 16MnCr5	47

5. CONCLUSÕES	50
6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo de Produção do Aço na usina siderúrgica onde foram realizados os testes (VIANA, 2009)	3
Figura 2 - Diagrama de causa e efeito em um processo de Laminação (adaptado de ODUGUWA E ROY, 2006).....	4
Figura 3 - Diagrama esquemático da morfologia das zonas de solidificação da seção transversal de um tarugo de aço lingotado. Na parte externa a zona coquilhada, colunar e no centro equiaxial (WON et al, 2000).....	6
Figura 4 - Esquema da solidificação dendrítica. A área escura entre os braços dendríticos representa a concentração de soluto (adaptado de KRAUSS, 2003)	8
Figura 5 - Solidificação dendrítica. Mostra a convecção do material líquido, efeitos da deformação e contração interdendrítica (adaptado KRAUSS, 2003)	8
Figura 6 - Problemas de qualidade em tarugo de lingotamento contínuo (Adaptado de BRIMACOMBE, 1993).....	9
Figura 7 - Trincas internas são muitas vezes observadas próximas aos cantos dos tarugos, denominadas “ <i>off corner</i> ” (PENNA, 2005).....	11
Figura 8 - Diagrama esquemático das propriedades mecânicas próximo à temperatura de fusão durante o lingotamento contínuo do aço (adaptado de WON et al, 2000).....	12
Figura 9 - Dutilidade do aço em função da temperatura (adaptado de BRIMACOMBE, 1999)	13
Figura 10 - Detalhe da região de solidificação dos aços no sistema Fe-C (PENNA, 2005)....	15
Figura 11 - Diagrama representando a seção do tarugo durante o processo de esmerilhamento. Pode ser observada a remoção da camada coquilhada com a exposição da zona colunar.	16
Figura 12 - Esmerilhadeira de alta pressão (RICHTER et al, 2009).....	17
Figura 13 - Fatores que influenciam o esmerilhamento (adaptado de AEGERTER;GUMMERSBACH, 2011).....	18
Figura 14 - Seção transversal do rebolo (adaptado de RICHTER et al, 2009).....	19
Figura 15 - Representação esquemática do ligante e abrasivo (adaptado de SLIPNAXOS, 2008).....	20
Figura 16 - Variáveis do Esmerilhamento (SLIPNAXOS, 2008)	21
Figura 17 - Diagrama de forças do rebolo no esmerilhamento (SLIPNAXOS, 2008)	22
Figura 18 - Representação da superfície esmerilhada do tarugo (RICHTER et al, 2009)	23

Figura 19 – Métodos de Esmerilhamento	24
Figura 20 - Fluxo de Processo	26
Figura 21 – Processo de Esmerilhamento de Tarugo	27
Figura 22 – Fluxograma do procedimento Experimental.....	28
Figura 23 – Inspeção a vista desarmada.	29
Figura 24 – Inspeção por Partícula Magnética.	29
Figura 25 – Macrografia mostrando o ensaio de impressão de Baumann da Seção do Tarugo – Estrutura Bruta de Fusão.....	30
Figura 26 - Esquema das medidas realizadas no ensaio Baumann.	31
Figura 27 - a) Incrustação de Escória e b) Marcas de Oscilação.....	32
Figura 28 – Exemplo de marcas de oscilação.	33
Figura 29 – Exemplo de incrustação de escória.	34
Figura 30 – Condição geral tarugo aço SAE1050, “a” incrustação de escória, “b” marcas de rolo, “c” marcas de oscilação Aço SAE1050.	34
Figura 31 – Incrustação de escória Aço DIN 16MnCr5.	35
Figura 32 - Incrustação de escória Aço DIN 16MnCr5.....	35
Figura 33 – Marcas de oscilação Aço DIN 16MnCr5.	36
Figura 34 – Tarugo com um esmerilhamento total simples.	37
Figura 35 - Tarugo com esmerilhamento total duplo.	37
Figura 36 – Diagrama esquemático de trinca “ <i>off corner</i> ”(PENNA, 2005).....	38
Figura 37 – Macrografia da impressão de Baumann da amostra não esmerilhada Aço SAE1050.	39
Figura 38 – Macrografia da impressão de Baumann da amostra do tarugo com esmerilhamento total simples Aço SAE1050.....	39
Figura 39 – Macrografia da impressão de Baumann da amostra do tarugo com esmerilhamento total duplo Aço SAE1050.....	40
Figura 40 – Seção do tarugo Aço SAE1050.	40
Figura 41 - Macrografia da impressão de Baumann da amostra do tarugo não esmerilhado Aço DIN 16MnCr5.	41
Figura 42 - Macrografia da impressão de Baumann da amostra do tarugo esmerilhamento total simples Aço DIN 16MnCr5.	42
Figura 43 - Macrografia da impressão de Baumann da amostra do tarugo esmerilhamento total duplo Aço DIN 16MnCr5.	42
Figura 44 - Rejeição total barras laminadas aço SAE 1050 e Profundidade de remoção.	45

Figura 45 - Rejeição NI 0,2 barras laminadas do aço SAE 1050 e Profundidade de remoção.	46
Figura 46 - Rejeição NI 0,3 barras laminadas aço SAE 1050 e Profundidade de remoção.....	46
Figura 47 - Rejeição total barras laminadas aço DIN 16MnCr5 e Profundidade de remoção.	48
Figura 48 - Rejeição NI 0,2 barras laminadas para o aço DIN 16MnCr5 e Profundidade de remoção.	48
Figura 49 - Rejeição NI 0,3 barras laminadas aço DIN 16MnCr5 e Profundidade de remoção.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição química aço SAE 1050 (GERDAU MANUAL DE AÇOS ESPECIAIS, AÇOS ALTA LIGA)	25
Tabela 3.2- Composição química do açoDIN 16MnCr5 (GERDAU MANUAL DE AÇOS ESPECIAIS, AÇOS ALTA LIGA)	25
Tabela 4.1 – Dados ensaio Baumann Aço SAE 1050.....	43
Tabela 4.2 - Dados ensaio Baumann Aço DIN 16MnCr5.....	43
Tabela 4.3 - Dados dos testes do Aço SAE 1050.....	44
Tabela 4.4 - Dados dos testes Aço DIN 16MnCr5.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ZST	temperatura de resistência zero
LIT	temperatura de impermeabilidade
ZDT	temperatura de ductilidade zero
ANSI	american national standards institute
P	pressão do rebolo
V _s	velocidade de rotação do rebolo
V _f	velocidade do carro de transporte
S _b	distância entre passes
F _n	força normal
F _t	força tangencial
F _{tot}	força total
f _{esp}	força específica
Z	taxa de remoção de material no esmerilhamento
k _c	constante de ajuste da máquina
R _{max}	rugosidade máxima
SAE	society of automotive engineers
CQ	tamanho da zona coquilhada
CL	tamanho da zona colunar
NI	nível de inspeção

RESUMO

Este trabalho avalia a influência do método e qualidade do esmerilhamento de tarugos na qualidade superficial de barras redondas de aço laminadas. Foi avaliada a rejeição de barras laminadas para três condições diferentes de acabamento superficial de tarugo – não esmerilhado, esmerilhado total simples, e esmerilhamento total duplo. Constatou-se que o esmerilhamento superficial de tarugos melhora a qualidade superficial de barras laminadas e, para os aços testados, o esmerilhamento total simples ofereceu melhor custo benefício entre rendimento metálico e rejeição de barras por defeito superficial. Também se constatou que a profundidade de remoção da camada superficial do tarugo no esmerilhamento não é proporcional à redução de defeitos no produto laminado, sendo a aproximação da camada colunar uma variável com provável influência em tal resultado, assim como a presença de defeitos internos subsuperficiais, que tendem a aflorar com a redução da distância até a superfície da peça.

Palavras-chave: Esmerilhamento de Tarugos, Qualidade Superficial, Laminação a Quente, Aço.

ABSTRACT

This work evaluates the influence of billet grinding method and quality in surface defects of hot rolling steel bars. It was evaluated bar rejection rates due to surface defects for three different billet surface conditions: without grinding, bright grinding of the entire surface and double bright grinding of the entire surface. The results show that the bright grinding of the entire surface with a single pass results in better cost benefit between yield loss and bar rejection rates. It was also observed that the grinding depth of the superficial layer of the billet is not proportional to the reduction of defects in the rolled product. This may occur in consequence of the reduction of the chill zone thickness, or even by the presence of sub superficial defects that can emerge to the surface with the reduction of the defect distance to the billet surface

Key Words: Steel, Surface Quality, hot rolling, billet grinding

1. INTRODUÇÃO

Durante a laminação a quente, falhas e defeitos pontuais superficiais no tarugo podem alongar-se, transformando-se em defeitos contínuos e ou penetrar fundo no produto laminado, dificultando o controle e garantia de qualidade em toda a extensão do produto laminado e acarretando em custos de retrabalho.

Uma das estratégias para garantir um acabamento superficial uniforme no produto intermediário - livre de depressões, trincas e outros defeitos - é a remoção desses utilizando disco abrasivo. O esmerilhamento, também chamado de condicionamento, com equipamento automático tem provado ser o método mais viável e mais efetivo para criar uma superfície livre de defeitos. Isso devido a sua reprodutibilidade, produtividade, flexibilidade e impacto ambiental controlável em comparação ao esmerilhamento manual, robótico ou escarfagem.

Se por um lado o condicionamento oferece ganhos na qualidade por outro implica em custos e perdas no rendimento metálico. Por esse motivo os tipos de aço esmerilhados vêm caindo com a evolução do processo de lingotamento contínuo. Em alguns tipos de aço é aplicado apenas o método pontual, em outros que apresentam um comportamento mais crítico quanto à presença de defeitos superficiais, como aços inoxidáveis, é utilizado o método de esmerilhamento total.

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento dos aços para construção mecânica e médio carbono quanto ao método de esmerilhamento na geração de defeitos superficiais no produto laminado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura é ampla nas abordagens de problemas de qualidade de tarugos e produtos laminados, como por exemplo, Brimacombe (1993), Hidayat et al. (2004), Weisgerber et al. (2002), entre outros. Entretanto, quando se foca nos métodos de preparação e inspeção de tarugos para laminação a quente de produtos longos, o volume de material bibliográfico tem uma grande redução. Focando ainda mais, nos melhores métodos de preparação as referências esvaem-se. Felizmente, se pode buscar correlações nas investigações de defeitos de qualidade.

Na revisão bibliográfica aborda-se a questão da qualidade do produto laminado, sendo este o motivo do processo de preparação do tarugo. São abordados estudos que avaliaram fatores e condições internas do laminador, análise de defeitos e sua origem, e a matéria prima e sua estrutura interna, como a região interdendrítica. Por fim, o próprio processo de esmerilhamento e suas variáveis.

Para iniciar a exposição do processo de esmerilhamento, é necessário situá-lo no fluxo de produção do material laminado, conforme demonstrado na Figura 1, e explorar alguns estudos sobre qualidade superficial no lingotamento contínuo e laminação.

A preparação do tarugo ocorre entre a aciaria e o laminador, em uma área comumente denominada em usinas siderúrgicas de “Preparo de Tarugos”. O objetivo deste processo é reduzir o número de defeitos ou imperfeições na superfície do tarugo. É necessário ter em mente que o padrão de inspeção e remoção de defeitos em tarugos não deve ser mais que o absolutamente necessário para permitir a qualidade superficial desejada no produto final (STEWARTSON; BARTLET; DAVIES; 1965).

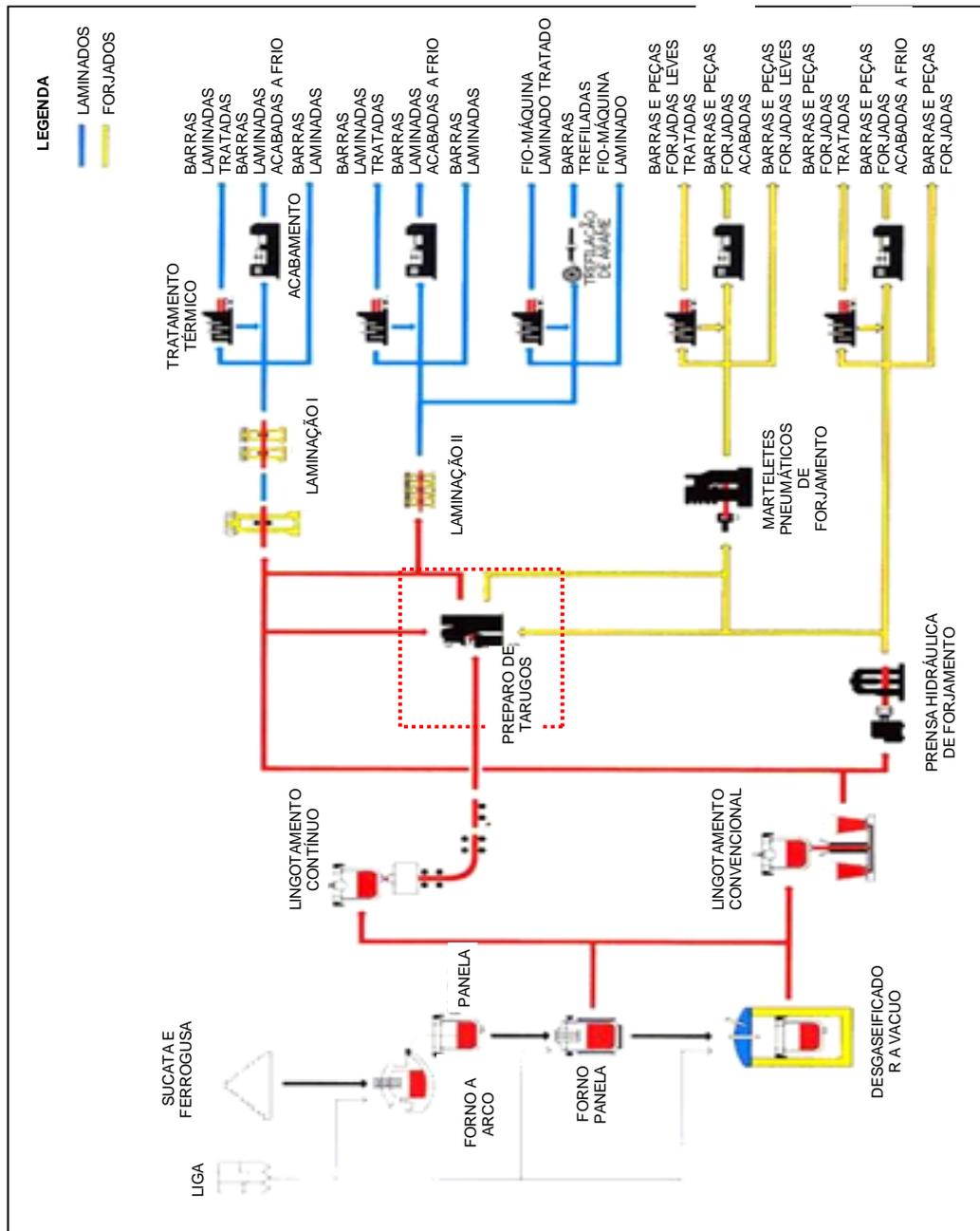


Figura 1 - Fluxo de Produção do Aço na usina siderúrgica onde foram realizados os testes (VIANA, 2009)

2.1. Fatores que Influenciam a Qualidade do Produto Laminado

A produção de barras laminadas a quente é um processo de vários estágios. O primeiro estágio ocorre na aciaria onde o aço é fundido e lingotado em um sistema contínuo na forma de tarugos. Este tarugo pode então passar por uma preparação ou condicionamento, com a remoção de defeitos superficiais ou ir diretamente ao reaquecimento. O que determina qual

rota seguirá o material é a especificação de quantidade e profundidade de defeitos superficiais exigidos pelo cliente final. Segue, então, para o laminador onde o tarugo aquecido passa por uma série de passes de desbaste, intermediários e acabados formando em fim uma barra que pode ser utilizada em processos como forjamento, usinagem, construção mecânica entre outros.

Enfatiza-se que a laminação é um processo importante no sistema de manufatura de peças de aço, fornecendo uma grande gama de produtos para a indústria automobilística, equipamentos mecânicos e construção. Na competição de mercado, procurando a redução de custos e a melhora da qualidade, foram realizados estudos que buscam analisar, classificar e reduzir os defeitos oriundos do processo, alguns desses trabalhos serão abordados a seguir.

Um passo essencial na solução do problema da qualidade superficial do produto laminado é identificar a origem do defeito. No entanto, buscar a origem dos defeitos e classificá-los representa um desafio. Sychkov et al. (2008) conclui que alguns tipos de defeitos são de difícil classificação devido a similaridades morfológicas, não sendo possível definir claramente se sua origem está no processo de laminação ou na fabricação do aço na aciaria. Essa dificuldade está ligada à complexidade do processo siderúrgico e ao grande número de fatores que influenciam o processo de laminação. Oduguwa e Roy (2006) apresentam uma revisão dos métodos para automação e projetos de sistema de laminação. Oferecem, em seu estudo, um diagrama de causa efeito dos fatores que influenciam o processo de laminação. A intenção do autor é mostrar o quão complexa é sua natureza, composto por sistemas e processos que interagem com várias disciplinas, conforme Figura 2.

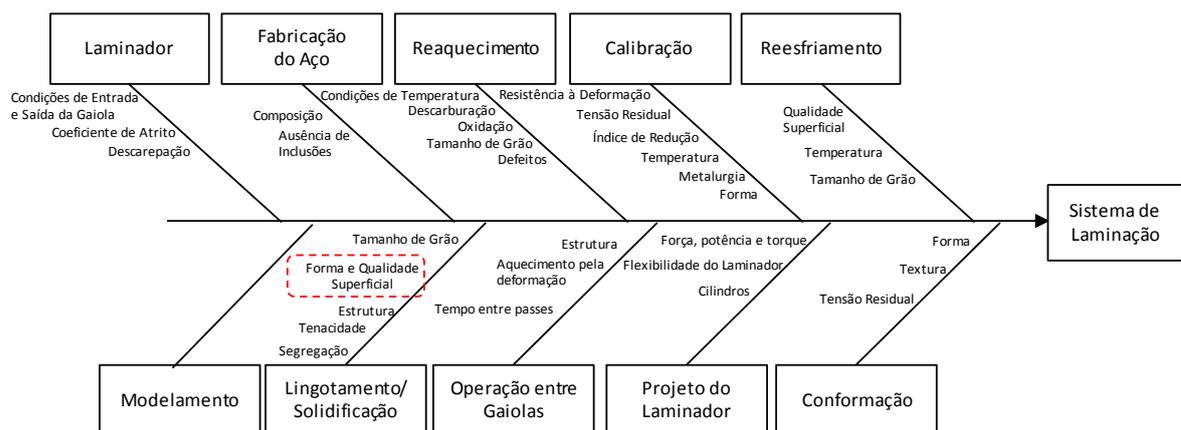


Figura 2 - Diagrama de causa e efeito em um processo de Laminação (adaptado de ODUGUWA E ROY, 2006).

Explorando alguns itens referentes ao processo de laminação, podem ser citados alguns autores que abordam os pontos do diagrama acima – lingotamento e solidificação, reaquecimento, calibração e laminação.

Inicialmente abordando reaquecimento e lingotamento, tem-se Silva (2010), que analisa a origem de defeitos em um laminador avaliando a influência da matéria prima, da temperatura de reaquecimento e uso de descarepador. Segundo a autora, o esmerilhamento do tarugo resulta em melhoria da qualidade superficial, assim como o uso do descarepador e maiores temperaturas de reaquecimento para trens abertos.

Em relação à operação entre gaiolas e calibração, Viana (2009) mostra em seu trabalho defeitos gerados dentro do processo de laminação e suas possíveis origens. Segundo o autor fatores de mão de obra, montagem e manutenção dos equipamentos influenciam diretamente na estabilidade do processo. Através de amostragem e análise de defeitos realizou a correlação dos aspectos operacionais, calibração e de manutenção dos equipamentos com a qualidade superficial do produto final.

Quanto à influência da fabricação do aço e lingotamento, Leuschke (2008), investigando a formação de defeitos superficiais na laminação de aço de usinagem fácil com Pb e S, determinou que mesmo tarugos que não apresentavam defeitos superficiais geravam material laminado com falhas superficiais. As investigações realizadas indicaram três prováveis e principais motivos na geração dos defeitos:

- a presença de pequenos vazios classificados como “*blowholes*” na parte interna do tarugo que afluíram durante a laminação;
- a micro segregação de elementos de liga na linha de solidificação primária entre a zona coquilhada e colunar quando muito próxima à superfície;
- a proximidade destes defeitos ao canto dos tarugos que aparentemente são mais sensíveis à aplicação das forças de laminação.

Mesmo com a evidente influência da qualidade superficial do tarugo na qualidade superficial do produto laminado, quantificar sua relevância ainda apresentava um desafio, Jin e Zhou (2004). Com a evolução dos processos de identificação por imagem, e novas tecnologias que permitem a visualização de defeitos em barras laminadas quentes, finalmente foi possível correlacionar a condição inicial da superfície do tarugo com a condição da superfície do produto laminado. Através da análise de informações de defeitos superficiais de tarugos saídos do reaquecimento e barras, após o último passe de laminação, registrados pelo

sistema de imagens, Jin e Zhou (2004) determinaram que o fator com maior influência na variação do número de defeitos no produto laminado é a corrida da aciaria. Demonstrou-se assim, que a qualidade da matéria prima é o fator com maior impacto no número de defeitos do produto laminado. Desta forma, é necessário explorar a estrutura do tarugo.

2.2. Macroestrutura do tarugo produzido no lingotamento contínuo.

Conforme ilustrado em diversas obras, como por exemplo por Spim (2006), a macroestrutura de um lingote pode ser separada em três zonas: zona coquilhada, zona colunar e zona equiaxial (Figura 3).

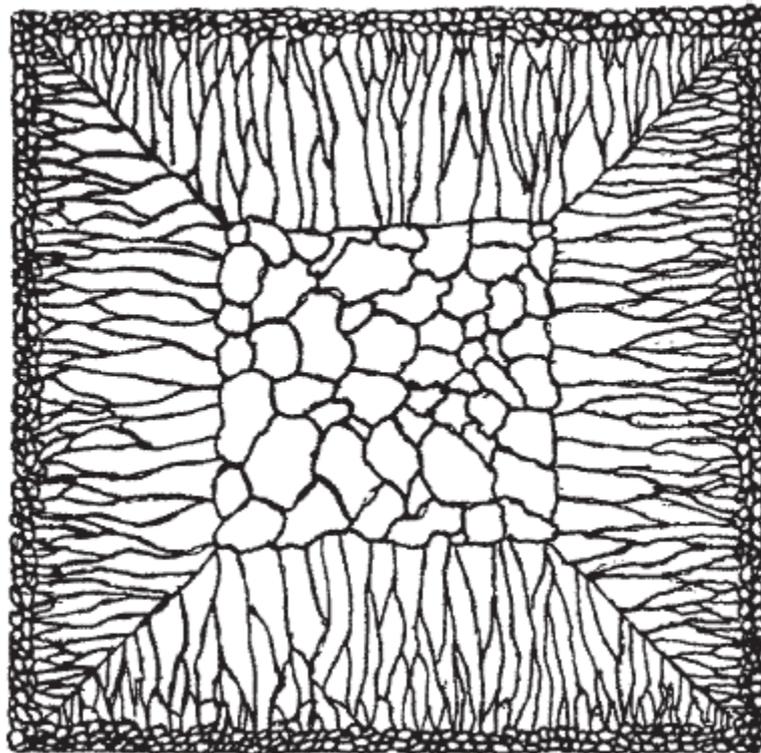


Figura 3 - Diagrama esquemático da morfologia das zonas de solidificação da seção transversal de um tarugo de aço lingotado. Na parte externa a zona coquilhada, colunar e no centro equiaxial (WON et al 2000)

2.2.1.1. Zona Coquilhada

Localizada na superfície, é formada por grãos finos devido ao maior resfriamento do metal em contato com o molde. Nesta camada ocorre uma intensa nucleação de grãos cristalinos com orientação aleatória. Seu tamanho depende de certos fatores como as propriedades termofísicas do material do molde, o coeficiente de transferência de calor metal/molde e a temperatura de vazamento do metal líquido. A quantidade de cristais formados depende do superaquecimento do líquido, da temperatura inicial do molde, das propriedades térmicas do metal e molde.

2.2.1.2. Zona colunar

A zona colunar é formada devido ao crescimento preferencial em direção ao centro do lingote. A transferência de calor do centro do lingote para as paredes e o calor latente de solidificação liberado resulta na rápida diminuição do superesfriamento da superfície. Ocorre então o desenvolvimento dos cristais colunares pelo crescimento seletivo preferencial. Este crescimento é paralelo à direção do fluxo de calor. Observa-se então a redução do número de núcleos e grãos da superfície em direção ao centro do lingote. Nesta região pode ficar mais evidente a segregação interdendrítica.

2.2.1.3. Zona equiaxial

A zona equiaxial é formada por grãos de crescimento aleatório localizados na área central do lingote. Interrompe o crescimento da zona colunar. Em equipamentos de lingotamento contínuo pode encontrar-se deslocado do centro pelo efeito da gravidade.

Segundo Krauss (2003), as zonas equiaxial e colunar são formadas por um mecanismo que produz dendritas. O autor traz a Figura 4 e Figura 5, as quais mostram uma ilustração da solidificação dos cristais dendríticos e alguns dos fenômenos que acompanham este processo. As dendritas possuem um eixo principal de crescimento, mas também crescem na direção ortogonal, braços secundários de solidificação. Na região entre as dendritas, na Figura 4, a área escura mostra maior concentração de soluto. A Figura 5 mostra a direção do fluxo do material líquido para compensar a contração de volume da solidificação. Também mostra a deformação que pode resultar em trincas a quente, e pequenos volumes de material interdendrítico formado quando o crescimento dos braços dendríticos isola uma região.

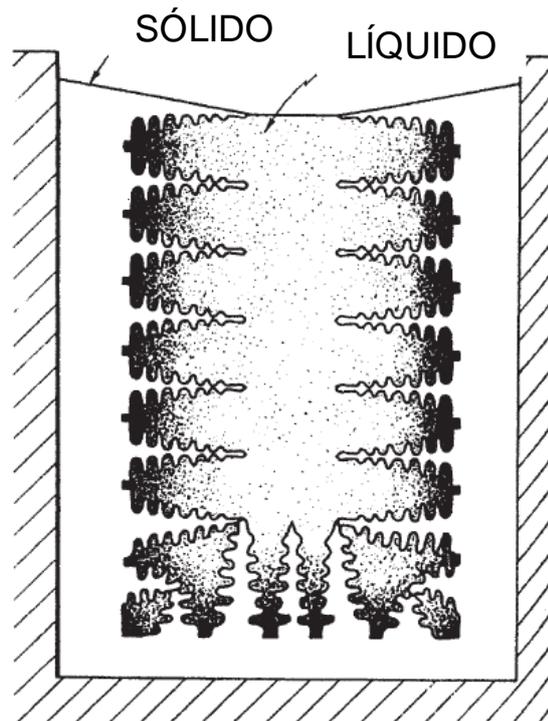


Figura 4 - Esquema da solidificação dendrítica. A área escura entre os braços dendríticos representa a concentração de soluto (adaptado de KRAUSS 2003).

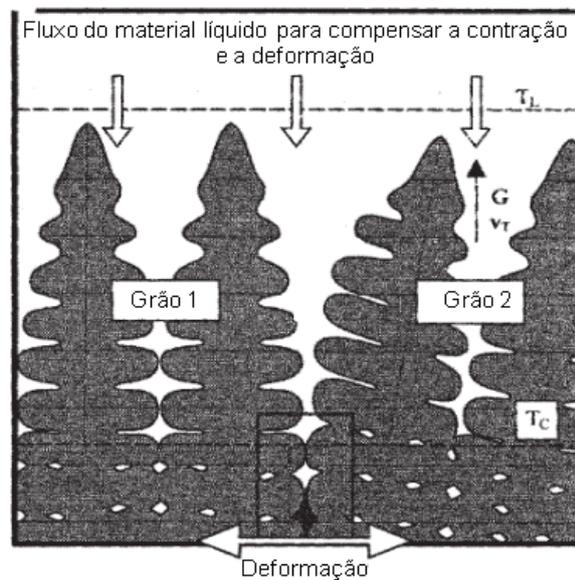


Figura 5 - Solidificação dendrítica. Mostra a convecção do material líquido, efeitos da deformação e contração interdendrítica (adaptado KRAUSS 2003).

2.3. Qualidade da matéria prima oriunda do Lingotamento Contínuo

Existem vários estudos em direção à estabilização do processo de lingotamento contínuo, como Brimacombe (1999), Hidayat e Sutrandi (2004) Weisgerber et al (2002), Kulkarnia e Babub (2005), entre outros, na busca de redução de defeitos superficiais e internos. Para esta revisão bibliográfica foram selecionados alguns em função da relevância para o objetivo do trabalho.

Fernandes (2005) explora detalhadamente o processo de formação de trincas e defeitos superficiais de tarugos de aços microligados e busca a otimização de parâmetros de lingotamento para diminuir trincas superficiais. Segundo o autor os principais tipos de defeitos internos e superficiais no tarugo estão representados na Figura 6.

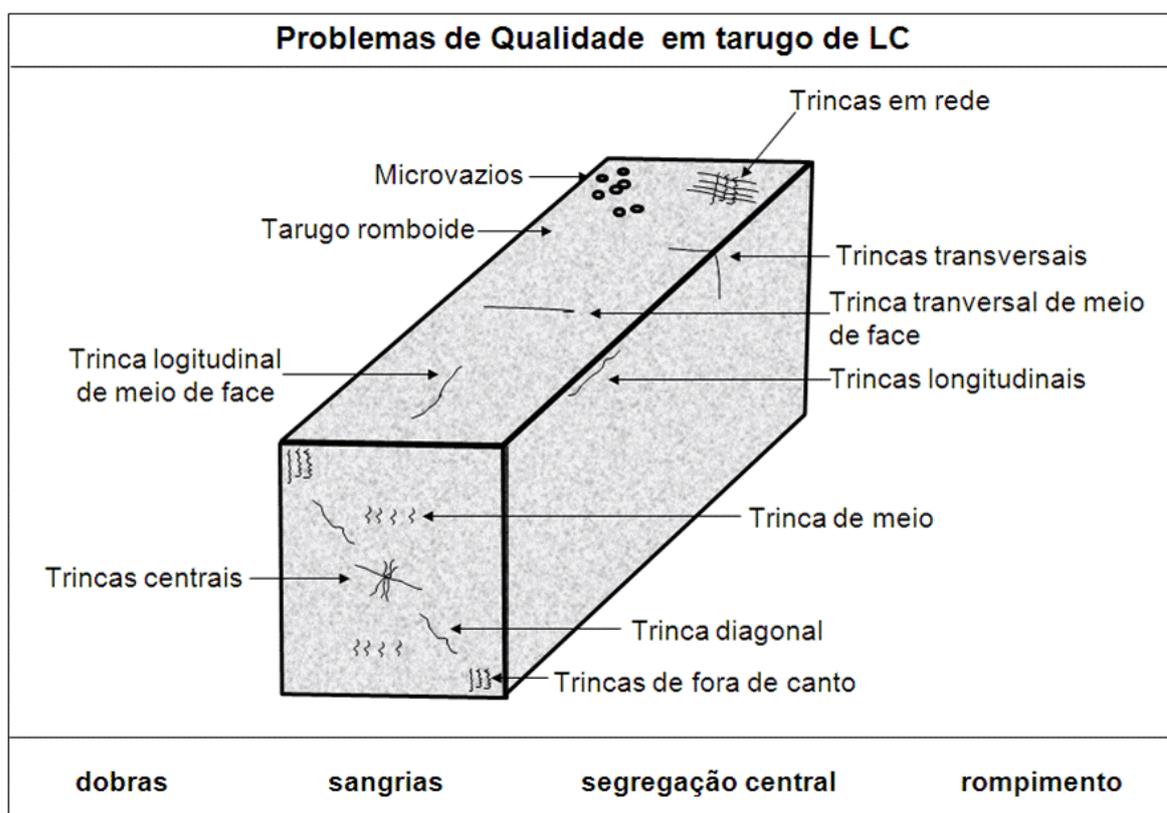


Figura 6 - Problemas de qualidade em tarugo de lingotamento contínuo (Adaptado de BRIMACOMBE 1993)

Penna (2005) apresenta uma revisão bibliográfica sobre a formação de defeitos internos em tarugos de lingotamento contínuo, focando em seu trabalho trincas “*off corner*”,

cujo conceito será abordado no item trincas internas. Informa que em função das medidas do comprimento da trinca e distância em relação à superfície, os tarugos são liberados ou não pela inspeção de qualidade. Esta informação é relevante, pois o processo de esmerilhamento remove material da superfície, reduzindo a distância de defeitos internos em relação à superfície, expondo a zona dendrítica ou até mesmo a colunar.

2.3.1. Trincas Internas

Trincas no processo de lingotamento contínuo estão diretamente relacionadas à estrutura dendrítica. As trincas internas, ao contrário das trincas superficiais que podem ser identificadas a partir de inspeção visual, são identificadas apenas a partir do corte de uma seção transversal (mais comum) ou longitudinal, seguido de um ataque com reagente específico para evidenciar a trinca existente. São comumente usadas na rotina industrial as análises de Baumann e/ou macrografia. A Figura 7 mostra uma macrografia de uma seção transversal do tarugo, ilustrando as trincas internas mais comuns no processo de lingotamento contínuo.

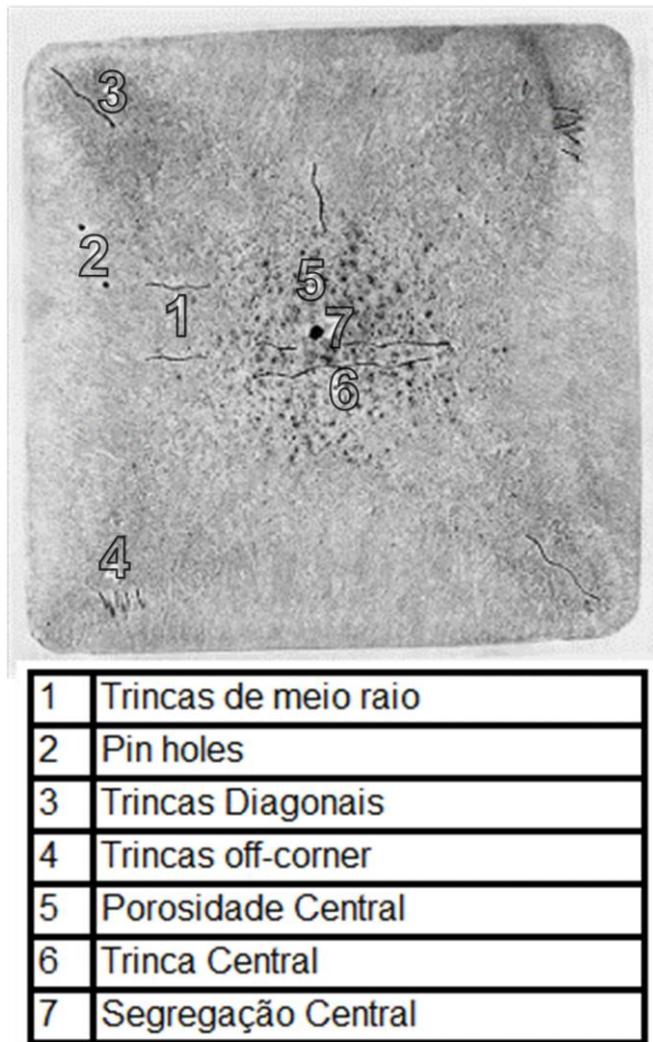


Figura 7 - Trincas internas são muitas vezes observadas próximas aos cantos dos tarugos, denominadas “*off corner*” (PENNA 2005)

Segundo Won et al. (2000), todas as trincas internas observadas no lingotamento contínuo de aços têm origem e propagam-se na direção da zona interdendrítica. Trincas internas tendem a ocorrer em uma faixa de temperatura de fragilização devido a contrações térmicas, deformações mecânicas e transformação de fase. A perda de ductilidade da “*mushy zone*”, região onde as dendritas e a fase líquida coexistem durante a solidificação, está associada à microsegregação de solutos entre as frentes de solidificação das dendritas - Figura 8. Este filme de soluto reduz a temperatura de solidificação e dá origem à temperatura de zero ductilidade abaixo da temperatura de equilíbrio de solidificação.

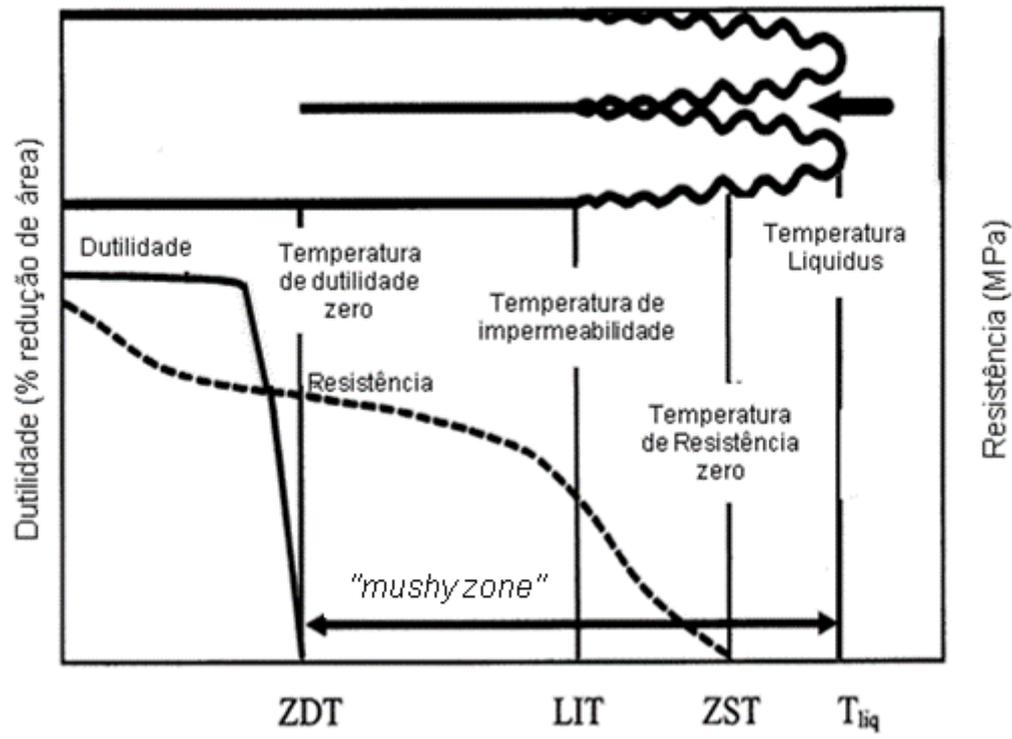


Figura 8 - Diagrama esquemático das propriedades mecânicas próximo à temperatura de fusão durante o lingotamento contínuo do aço (adaptado de WON et al 2000)

A Figura 8 mostra um diagrama esquemático das propriedades mecânicas “*mushy zone*” e a estrutura líquido/sólida correspondente. Acima da temperatura de resistência zero ZST o aço comporta-se como líquido, sem dutilidade ou deformação. Trincas a quente formadas entre a região ZST e LIT podem ser preenchidas com líquido e não levar a trincas internas. Na faixa de temperaturas entre LIT e ZDT, que é conhecida como temperatura de fragilização, o aço apresenta tensões a quente se aplicado um estado de tensões. Este estado de tensões é formado em função da contração térmica, deformação mecânica e transformação de fase. Na região da temperatura de fragilização, o aço passa a comportar-se como sólido, porém ainda muito suscetível a trincas devido à presença de filme interdendrítico líquido gerado pela microsegregação.

2.3.2. Propriedades mecânicas dos aços a altas temperaturas

Estudos demonstram que, apesar de a ductilidade dos aços a altas temperaturas ser excelente, existem faixas específicas de temperatura em que a ductilidade cai consideravelmente, tendo importantes implicações para a formação de trincas.

Na Figura 9 estas faixas de temperatura e seu correspondente mecanismo de fragilização são demonstrados. É possível observar três faixas de temperatura onde o aço apresenta baixa ductilidade, sendo então suscetível ao trincamento.

A zona de alta temperatura é a mais importante das três regiões para o processo de lingotamento contínuo por ser onde se formam as trincas. A perda de ductilidade é causada pela presença de filmes líquidos de elementos segregantes como S e P entre as dendritas. Na zona de temperatura intermediária a perda de ductilidade é influenciada pela relação Mn/S. Na zona de baixa temperatura a baixa ductilidade ocorre pela coexistência de duas fases – austenita e ferrita. Associada à precipitação de nitretos e carbonitretos nos contornos de grãos (PENNA 2005).

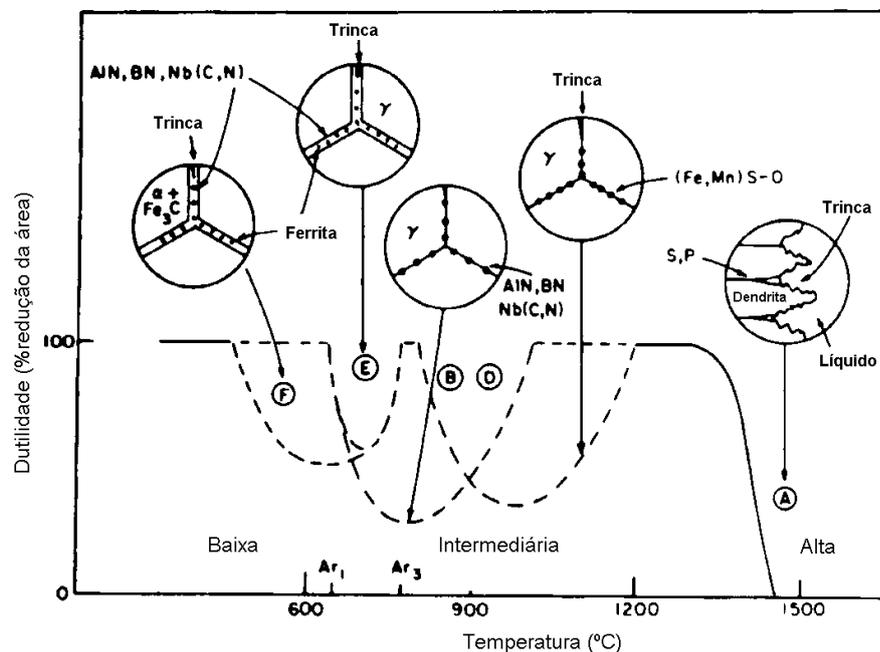


Figura 9 - Dutilidade do aço em função da temperatura (adaptado de BRIMACOMBE 1999)

2.3.3. Efeito da Composição Química do Aço na Solidificação

Vários estudos mostram a diferença de comportamento térmico do aço em função de sua composição química. Esta diferença existe devido às reações de transformação de fase que ocorrem no aço durante a solidificação e após o resfriamento. Os aços podem solidificar seguindo diferentes caminhos, de acordo com sua concentração de carbono, como pode ser observado no diagrama Fe-C, visto na Figura 10, até a formação da austenita.

Com o objetivo de facilitar a análise do efeito da composição química na solidificação é possível classificar os aços em grupos, conforme abaixo:

- a) Grupo 1: aços com teor de carbono menor ou igual a 0,09%. Têm a temperatura *liquidus* acima de 1530°C e, à medida que a temperatura diminui, ocorre a formação da fase sólida denominada ferrita delta não ocorrendo nenhuma outra transformação até a solidificação completa.
- b) Grupo 2: aços com teor de carbono entre 0,09% e 0,53%, onde a solidificação ocorre na região da reação peritética, que se caracteriza pela reação da ferrita delta com o líquido gerando austenita e ocorre a 1493°C. Este grupo pode ser subdividido em 2 outros subgrupos em função do tipo de estrutura resultante da reação peritética.
 - b.1.) Grupo 2.1: aços com teor de carbono entre 0,09 e 0,17%. Nesse caso, a estrutura resultante da reação peritética é ferrita delta e austenita. Este grupo, com comportamento peritético, apresenta máxima contração após a solidificação, possuindo maior tendência à formação de superfície irregular rugosa e com depressão. Também chamados de aços peritéticos ou aços críticos são mais suscetíveis à ocorrência de defeitos superficiais tais como trincas.
 - b.2.) Grupo 2.2 aços com teor de carbono acima de 0,17%, que, após a reação peritética, apresentam ainda, fase líquida e austenita.
- c) Grupo 3: é composto por aços com teores de carbono acima de 0,53%, onde a solidificação acontece apenas com as fases líquida e austenita presentes. Com o resfriamento, o percentual de austenita aumenta.

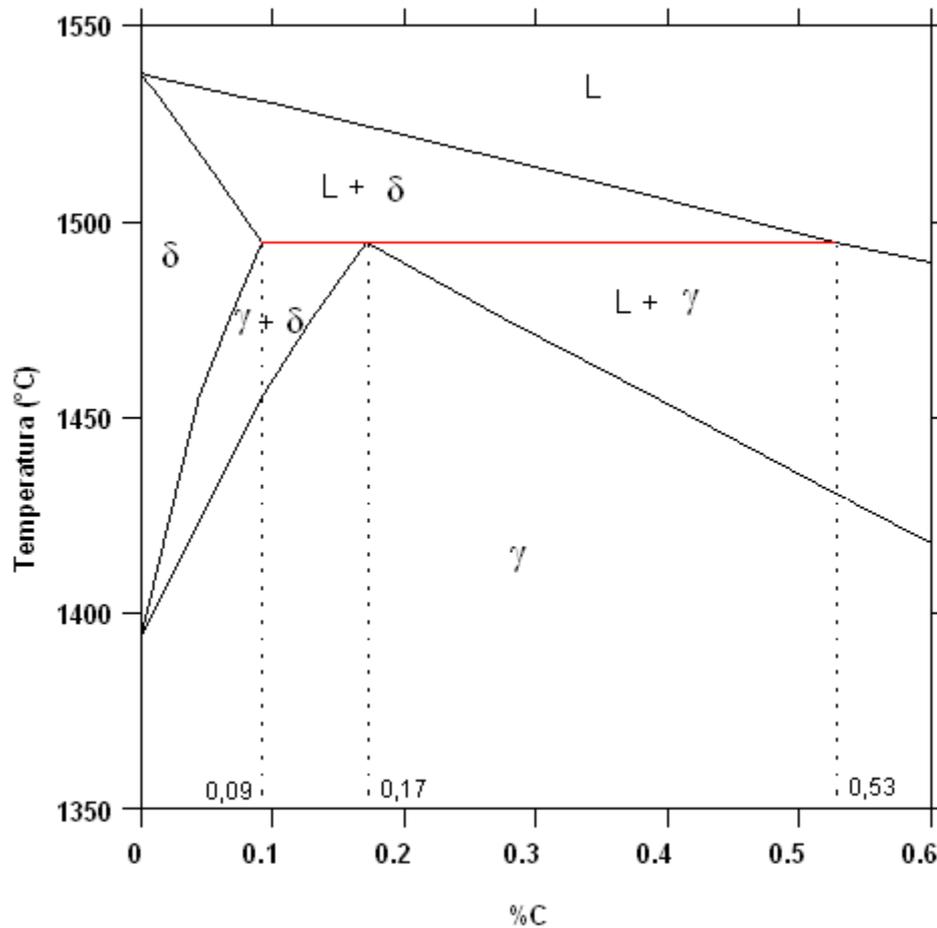


Figura 10 - Detalhe da região de solidificação dos aços no sistema Fe-C (PENNA 2005)

Estes dados foram apresentados, pois trincas localizadas no interior do lingote podem aflorar para a superfície durante os processos de lingotamento contínuo e de laminação, dependendo do grau de sollicitação mecânica (SPIM 2006). E, durante o processo de esmerilhamento, dependendo da profundidade de remoção, a região coquilhada pode ser total ou quase totalmente removida expondo a região colunar, Figura 11, que durante a laminação a quente é tensionada a temperaturas próximas as de baixa ductilidade.

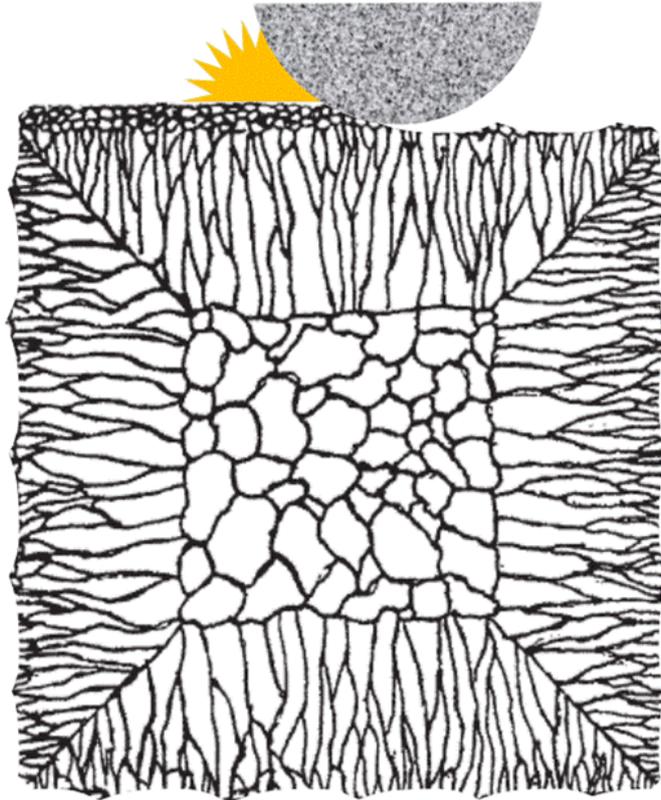


Figura 11 - Diagrama representando a seção do tarugo durante o processo de esmerilhamento. Pode ser observada a remoção da camada coquilhada com a exposição da zona colunar.

2.4. Esmerilhamento de Tarugos

O esmerilhamento, Figura 12, é considerado um processo de usinagem com ferramenta com gume de geometria indefinida. A remoção de material ocorre através da ação de grãos abrasivos de alta dureza, unidos por um ligante. Estes grãos devem ser muito duros, termicamente estáveis e quimicamente estáveis (STEMMER 1995).



Figura 12 - Esmerilhadeira de alta pressão (RICHTER et al, 2009).

Na indústria siderúrgica são utilizadas máquinas de alto rendimento, para remoção de defeitos superficiais. Com motores de grande potência e com alta pressão de ataque do rebolo sobre a peça, resultando em grande volume de material removido (NUSSBAUM 1988). O conceito básico do processo consiste em um carro que realiza movimento reverso onde o material a ser esmerilhado é preso. Um cabeçote fixo, que pode ser observado na Figura 12, realiza o movimento de avanço do passe. Neste cabeçote é montado o rebolo. Os fatores que influenciam o esmerilhamento podem ser vistos na Figura 13, a seguir serão abordados aspectos sobre os fatores – rebolos, parâmetros de processo e esmerilhamento.

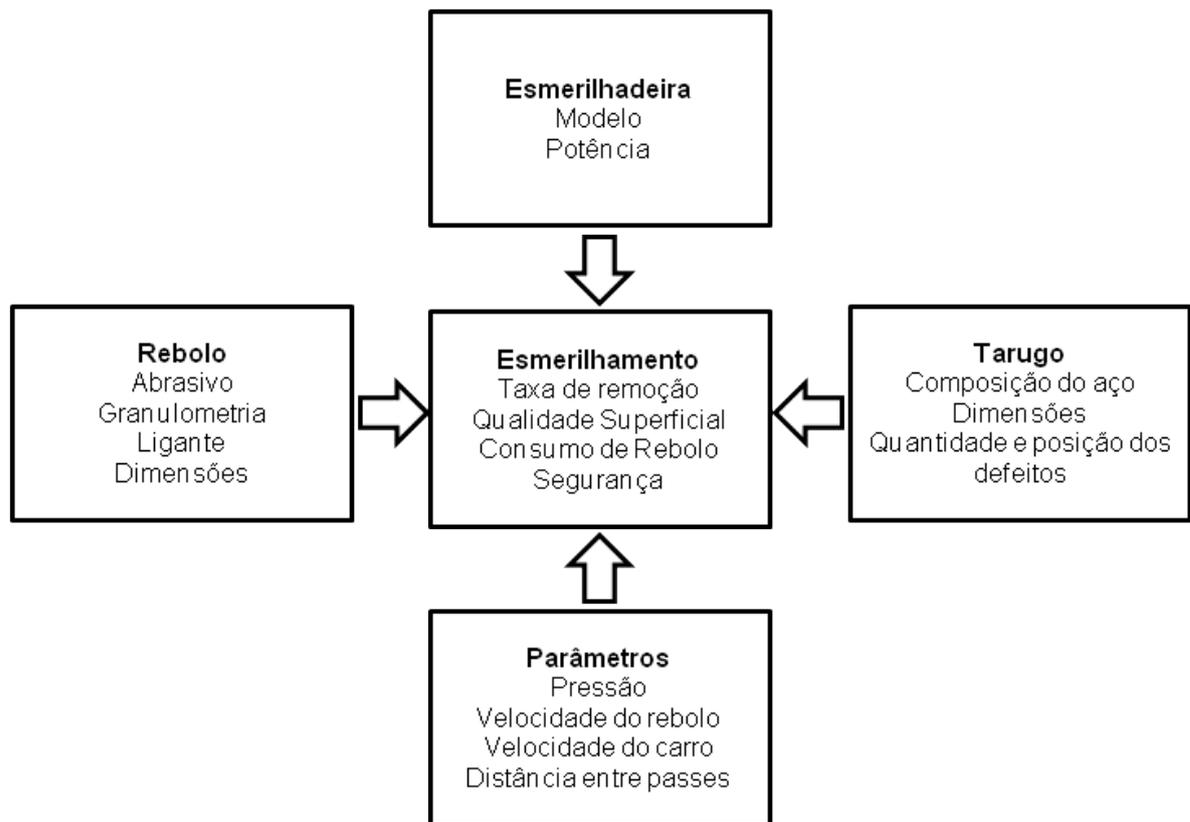


Figura 13 - Fatores que influenciam o esmerilhamento (adaptado de AEGERTER;GUMMERSBACH 2011)

Os rebolos utilizados em equipamentos de alta pressão são prensados a quente, conforme Figura 14, seus componentes básicos são o anel central com anéis de aço para reforço e a camada de abrasivos. O rebolo consiste em grãos abrasivos em uma matriz de resina como ligante. O tipo de abrasivo e matriz podem variar de acordo com o aço a ser processado. Um componente comum presente nestas ferramentas é algum tipo de óxido de alumínio. A matéria prima básica é bauxita pelletizada que, posteriormente, é sinterizada a temperaturas de 1400°C. Abrasivos contendo óxido de alumínio e óxido de zircônio são utilizados para condicionamento de praticamente todos os tipos de aços.

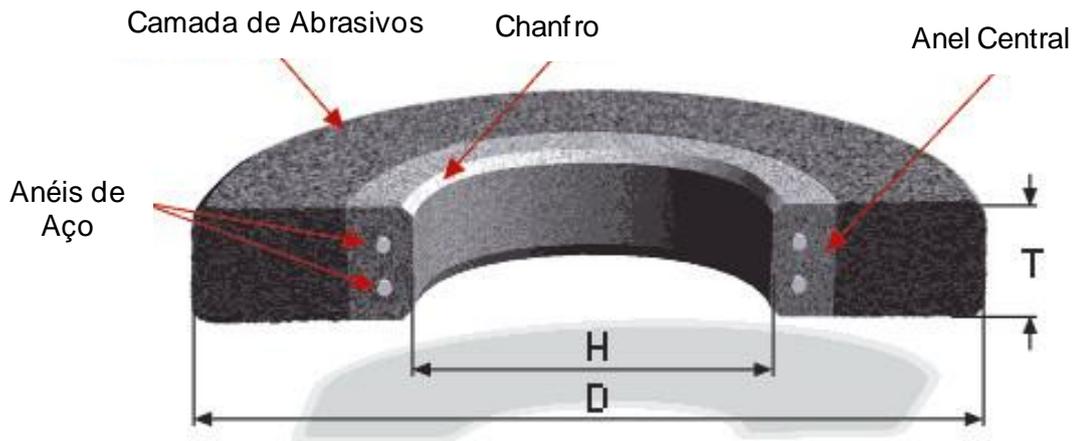


Figura 14 - Seção transversal do rebolo (adaptado de RICHTER et al 2009).

As dimensões dos grãos e sua uniformidade são uma característica importante. A classificação mais usual é a da norma norte americana “ANSI - *Specification for Size of Abrasive Grain*”, que especifica o tamanho do grão em “mesh”, que representa o número de fios por polegada linear da peneira na qual os grãos ficam retidos no processo de seleção. Para condicionamento de aços são utilizados grãos entre 6 a 30 mesh. Nos últimos anos, com a demanda de melhor qualidade superficial para aços inox, existe uma tendência de utilização de grãos mais finos, para melhor acabamento.

O ligante ou aglutinante tem a função de unir os grãos entre si, Figura 15, e para obtenção de certas propriedades como resistência a flexão, estabilidade térmica, eliminação de vazios etc. Para condicionamento de tarugos são utilizados apenas ligantes orgânicos resinóides, desenvolvidos a partir de resinas sintéticas com ou sem material de enchimento. Estes aglutinantes são sensíveis a umidade e a luz, portanto deve-se ter cuidados especiais para armazenamento do rebolo.

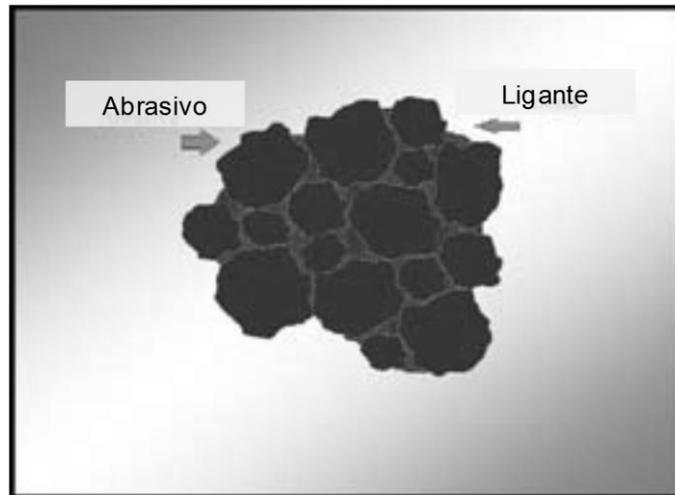


Figura 15 - Representação esquemática do ligante e abrasivo (adaptado de SLIPNAXOS, 2008).

As variáveis do processo de esmerilhamento, como demonstra a Figura 16, consistem em:

- a) Pressão (P): deve ser mantida alta o suficiente para permitir uma boa taxa de remoção de material. Pode ser reduzida para um acabamento mais fino, mas não muito, pois o material de remoção pode acumular entre os grãos, reduzindo o volume de material extraído e aumentando a temperatura podendo danificar o ligante. Quanto mais constante a pressão, melhor o resultado do processo.
- b) Velocidade de rotação do rebolo ou velocidade periférica (V_s): deve ser a maior possível, dentro da capacidade da ferramenta, para a melhor remoção de material.
- c) Velocidade do carro de transporte (V_f): quanto maior a velocidade da mesa melhor, não apenas pela maior taxa de remoção, mas também pela dissipação do calor. Caso a velocidade relativa entre mesa e rebolo for muito baixa, a peça pode sofrer superaquecimento em um ponto. Isto é crítico para aços com alto teor de carbono, podendo causar descarbonetação ou endurecimento pontual.
- d) Distância entre passes (S_b): uma distância entre passes menor significa um melhor acabamento superficial, porém maior tempo de processamento. A distância entre passes também define o número de passes sobre a superfície da peça.

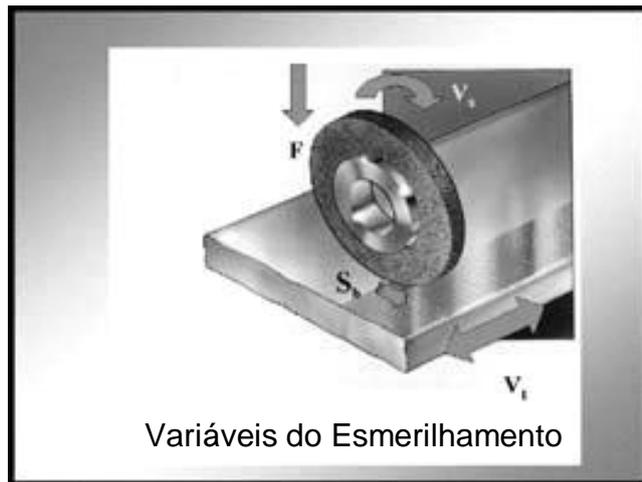


Figura 16 - Variáveis do Esmerilhamento (SLIPNAXOS 2008).

A correlação de pressão e distância entre passes é muito importante para atingir os resultados desejados no esmerilhamento. Para um acabamento mais fino aplica-se uma menor pressão com menor distância entre passes. Se o desejado é uma maior taxa de remoção, aplica-se alta pressão e maior distância entre passes.

A profundidade de remoção deve ser a menor possível, pois, quanto menos material removido, melhor o rendimento metálico. Porém, para defeitos mais profundos ou na busca de maior qualidade superficial para o produto laminado, tende-se a realizar uma maior remoção superficial, que dependendo da estrutura interna do material pode trazer resultados indesejados na qualidade superficial.

A pressão de esmerilhamento fornece uma força normal (F_n) equivalente na direção oposta e quando o rebolo inicia o corte uma força tangencial é gerada (F_t). Esta força é sempre muito menor que a normal. A força resultante é chamada de força total (F_{tot}).

Como um grande número de grãos está cortando ao mesmo tempo, a força total estará distribuída por cada um. Cada fração desta força distribuída é chamada força específica (f_{spec}). Esta força pode ser expressa na Equação 1 (SLIPNAXOS 2008).

$$\text{Equação 1 - } f_{spec} = k_c \times \frac{Z}{V_s}$$

O diagrama dos esforços está representado na Figura 17, onde Z significa a taxa de remoção (kg/h), V_s velocidade do rebolo e k_c é uma constante que depende dos ajustes da máquina e qualidade do aço.

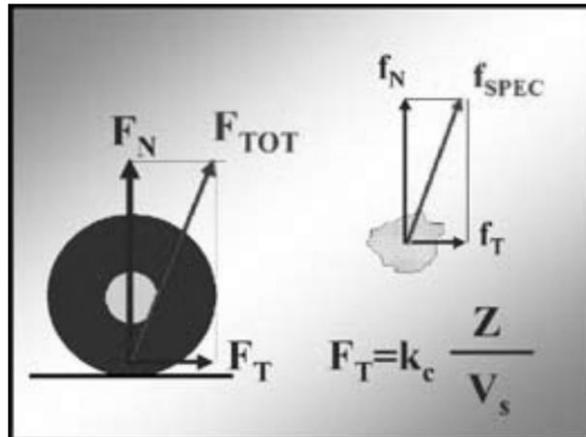


Figura 17 - Diagrama de forças do rebolo no esmerilhamento (SLIPNAXOS 2008).

Desta fórmula pode-se deduzir que com aumento da pressão de trabalho, a força tangencial específica também aumenta. Isto significa que o grão irá ser removido do rebolo mais facilmente. A periferia permanece aberta, expondo mais grãos, o equipamento trabalha de forma mais “macia” e a vida do rebolo cai. Uma velocidade maior do rebolo (V_s) reduz a força tangencial específica (F_t), o rebolo trabalha de maneira mais “dura”. Coordenando estes dois parâmetros é possível otimizar o tempo e a taxa de remoção, também a vida do rebolo.

2.4.1. Qualidade da superfície de esmerilhamento

A questão sobre qualidade superficial no esmerilhamento recai sobre a rugosidade superficial adequada. A seguir são apresentados os dados indicados por um fabricante de rebolo de esmerilhamento sobre o estudo da rugosidade utilizando o parâmetro R_{max} adotado como medida de rugosidade pelo fabricante. Na Figura 18 é possível visualizar a representação da superfície esmerilhada de um tarugo.

A grandeza utilizada para determinar o acabamento superficial é o R_{max} , o fabricante afirma que está diretamente relacionado com a taxa de remoção Z , quanto maior a taxa de remoção maior a rugosidade, e também está correlacionada com a profundidade de corte de um grão abrasivo, de maneira similar, quanto maior a profundidade de corte do grão maior a rugosidade.

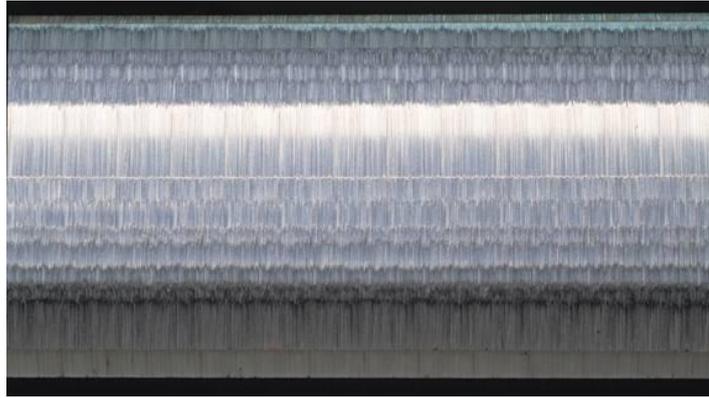


Figura 18 - Representação da superfície esmerilhada do tarugo (RICHTER et al 2009).

Quando uma alta taxa de remoção é necessária, juntamente com a demanda por um acabamento superficial mais fino, o condicionamento do tarugo pode ser feito com uma operação de remoção dupla. A primeira com abrasivo de alta remoção, resultando em um acabamento grosseiro, o segundo com abrasivo com baixa taxa de remoção e melhor acabamento superficial. O esmerilhamento em dois tempos é recomendado apenas quando é exigida uma especificação de defeitos superficial bastante restrita para justificar o preço do condicionamento.

Resultados práticos mostram que a distância entre passes S_b tem forte influência no acabamento superficial. Parece existir uma correlação linear entre rugosidade máxima e taxa de remoção (R_{max}/Z), e distância entre passes (S_b). Segundo o fabricante, é possível combinar este dado com o fato de que, quando a distância entre passes é pequena, na maioria dos casos, todos os defeitos superficiais podem ser removidos com uma única operação. Sendo assim, é possível afirmar que esmerilhar com pequena distância entre passes, alta velocidade da mesa e pressão de rebolo adequada oferece o melhor custo benefício.

Também a velocidade de corte (V_s) afeta o acabamento superficial devido ao fato de que a profundidade do corte de um grão abrasivo individual é reduzido pelo aumento da velocidade periférica do rebolo.

2.4.2. Método de Esmerilhamento

Conforme Richter et al (2009) são utilizados hoje três tipos básicos de esmerilhamento:

- Esmerilhamento total da superfície – remoção de toda camada.
- Esmerilhamento de canto – remoção da camada superior nos cantos.

- Esmerilhamento parcial ou pontual – remoção após inspeção apenas de defeitos indicados.

O que define a aplicação de um ou outro método é a especificação de qualidade do produto final. Para fabricação de fio máquina, por exemplo, opta-se normalmente por aplicar o esmerilhamento total, entre outros motivos pela dificuldade de inspeção do material laminado.

Na Figura 19, segue representação esquemática, região escura, da área removida em cada método de esmerilhamento.

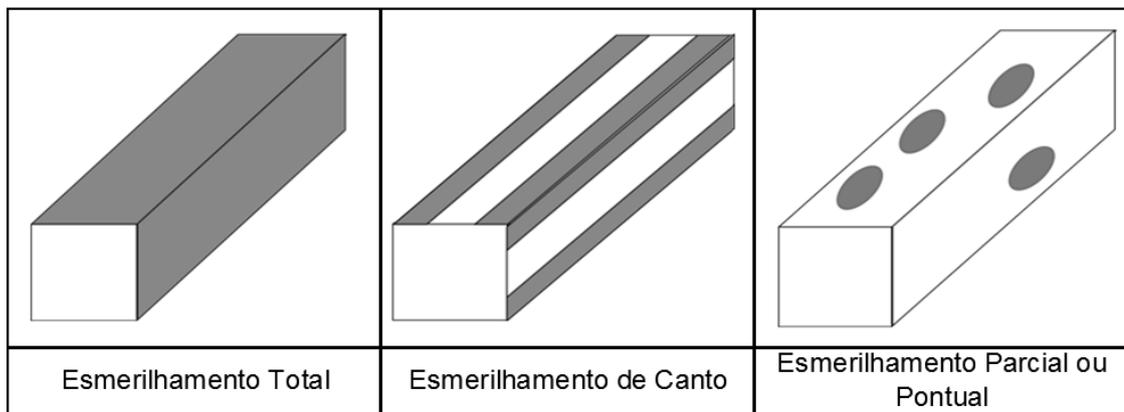


Figura 19 – Métodos de Esmerilhamento.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos conduzidos neste trabalho tiveram por objetivo avaliar a influência da profundidade de material removido no processo de esmerilhamento e o ganho de qualidade do produto final, barras de aço redondas nas bitolas 57,17 mm e 55,00 mm.

3.1. Aços

Os materiais utilizados foram os aços SAE 1050 e aço DIN 16MnCr5, com composição química dadas na Tabela 3.1, e na Tabela 3.2, respectivamente.

Tabela 3.1 - Composição química aço SAE 1050 (GERDAU MANUAL DE AÇOS ESPECIAIS, AÇOS ALTA LIGA).

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Min	0,500	0,150	0,650		0,010			
Max	0,550	0,300	0,800	0,025	0,025	0,200	0,250	0,060

Tabela 3.2- Composição química do açoDIN 16MnCr5 (GERDAU MANUAL DE AÇOS ESPECIAIS, AÇOS ALTA LIGA).

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Min	0,150	0,170	1,050		0,020	0,950		0,030
Max	0,170	0,270	1,200	0,025	0,035	1,100	0,250	0,060

O aço SAE 1050 encontra larga aplicação na fabricação de eixos de quaisquer tamanhos. Pode ser usado tanto na fabricação de eixos para máquinas pesadas como na de eixos para pequenos motores, é comumente empregado na fabricação de peças forjadas (BORSA 2009).

O aço DIN 16MnCr5 apresenta como características média temperabilidade, ser forjável. Utilizado na fabricação de eixos ranhurados, componentes internos de juntas homocinéticas (BORSA 2009) e em componentes mecânicos que necessitem de melhor resposta à penetração de dureza na camada cementada e principalmente no núcleo. Suas aplicações típicas são: engrenagens, eixos, virabrequins, pinos guia, anéis de engrenagem, colunas, catracas, capas.

3.2. Fluxo do processo

Todos os testes foram conduzidos em uma usina siderúrgica focada em aços para construção mecânica e aços ferramenta seguindo o seguinte fluxo de processo, conforme Figura 20. O lingotamento contínuo ocorre na aciaria, a inspeção dos tarugos ocorreu em uma linha de inspeção onde realizou-se avaliação da superfície dos tarugos e retirada de amostras. Neste trabalho todos os testes realizados com esmerilhamento utilizaram esmerilhamento total simples ou duplo, onde o último consiste em aplicar o esmerilhamento total duas vezes no mesmo tarugo. A laminação ocorreu em um laminador de barras na mesma campanha. A inspeção superficial de barras forneceu a variável resposta dos testes: a rejeição por defeito superficial em diferentes níveis de inspeção.



Figura 20 - Fluxo de Processo

No lingotamento contínuo utilizou-se máquina de lingotamento contínuo, tarugos na seção quadrada de 155 mm. Para preparação superficial do tarugo, ou condicionamento do tarugo, foi utilizada uma esmerilhadeira automática da marca Centro Maskin com remoção via rebolo abrasivo com pressão de trabalho de aproximadamente 100 MPa, Figura 21.



Figura 21 – Processo de Esmerilhamento de Tarugo.

O material foi laminado em um laminador misto (aberto e contínuo) constituído das seguintes etapas:

1. Forno de reaquecimento tipo “*walking beam*”, combustível gás natural. Este forno possui 8 zonas de aquecimento e 36 queimadores.
2. Descarepador na saída do forno para remoção de carepa, operando na pressão de 24 MPa e vazão de 3,6 l/s.
3. Desbaste em gaiola duo reversível tipo “Baby Blooming”, velocidade variável máxima de 2,5 m/s.
4. Passes intermediários ainda em trem aberto com gaiola trio, com velocidade variável máxima de 1,8m/s, seguindo para trem contínuo com duas gaiolas duo dispostas na horizontal e vertical com velocidade variável de 0,3 a 1,0 m/s.
5. Passes acabadores realizados em bloco acabador composto por três gaiolas duo em seqüência horizontal-vertical-horizontal.

3.2.1. Inspeção de tarugos

Para inspeção de tarugos foi utilizada linha de inspeção equipada com Magissflux MG Danieli, que consiste em um teste contínuo por partícula magnética com marcação manual de defeitos.

Para inspeção de produto laminado, a inspeção foi realizada em 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.

3.3. Metodologia

A metodologia empregada consistiu-se no isolamento de uma única variável do processo de esmerilhamento – a profundidade de remoção. Foram separados três lotes de uma mesma corrida de aço na Aciaria – no primeiro lote não se realizou esmerilhamento, no segundo realizou-se um esmerilhamento total, e, no terceiro, realizou-se esmerilhamento total duas vezes, Figura 22.

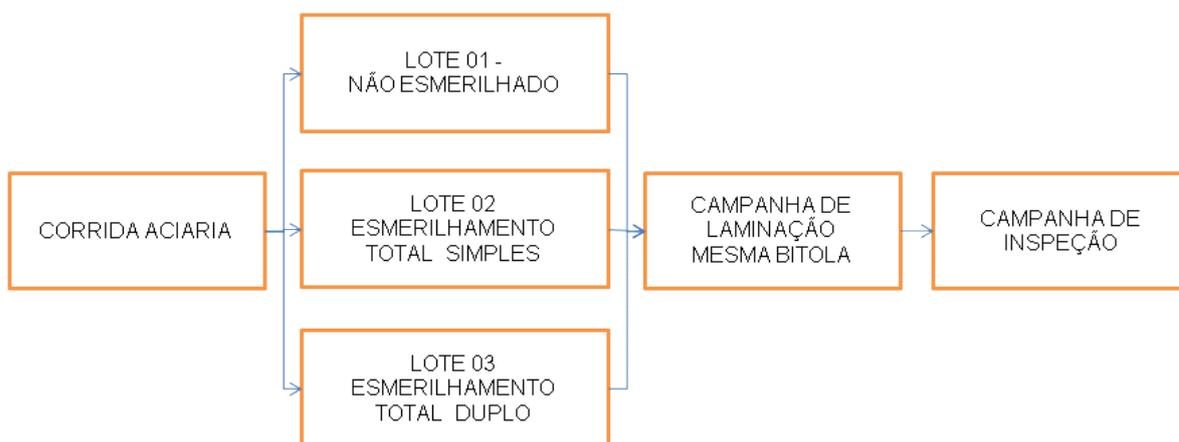


Figura 22 – Fluxograma do procedimento Experimental.

Para caracterização dos defeitos superficiais dos tarugos foi realizada inspeção visual dos defeitos a vista desarmada, conforme

Figura 23, e inspeção por partículas magnéticas conforme Figura 24.



Figura 23 – Inspeção a vista desarmada.

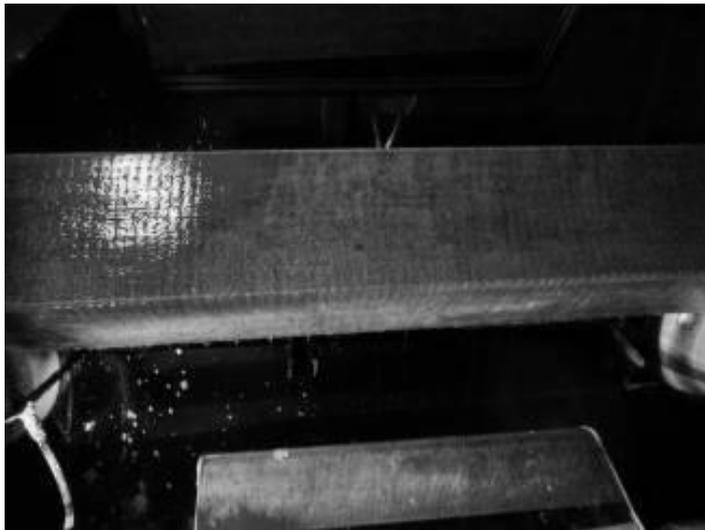


Figura 24 – Inspeção por Partícula Magnética.

Foi realizado ensaio Baumann na seção do tarugo, em amostras de cada lote, para a caracterização da estrutura de solidificação e mensuração da quantidade de material removido no esmerilhamento, Figura 25.

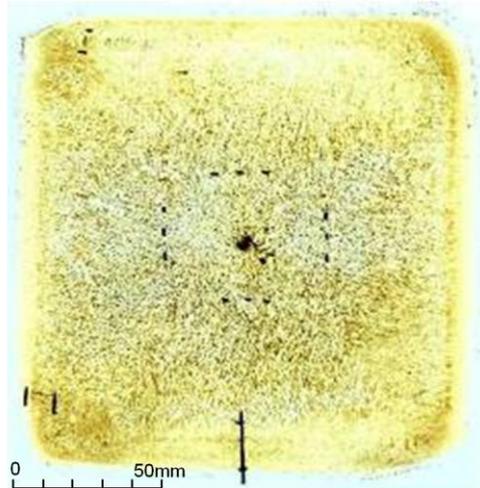


Figura 25 – Macrografia mostrando o ensaio de impressão de Baumann da Seção do Tarugo – Estrutura Bruta de Fusão.

A prática para impressão de Baumann segue um procedimento, em conformidade com Norma ASTM (E 1180 “Practice for Preparing Sulfur Prints for Macrostructural Examination”). Ela consiste em mergulhar um papel fotográfico em uma solução de impressão (água + ácido sulfúrico) seguido de contato com a superfície previamente preparada da amostra do tarugo. Após isto, o papel fotográfico é mergulhado em uma solução fixadora (água + tiosulfato de sódio + sulfito de potássio + sulfito anidro) por 10 a 15 minutos, seguido de lavagem com água e secagem (PENNA 2005).

Ao analisar a impressão de Baumann foram feitas as medidas indicadas na Figura 26, tamanho da zona coquilhada (CQ) e colunar (CL), verificação do tamanho da seção (S1 x S2), o que mostra a quantidade de material removido no esmerilhamento, além da caracterização de defeitos internos

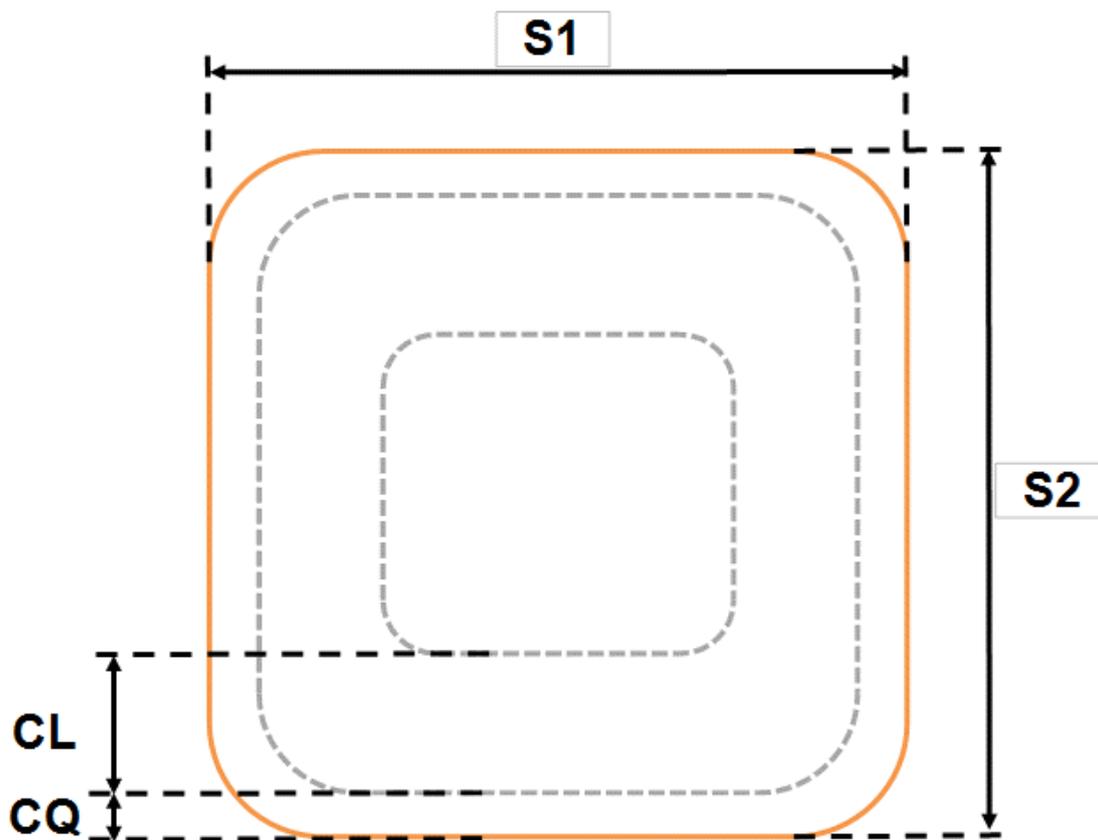


Figura 26 - Esquema das medidas realizadas no ensaio Baumann.

No esmerilhamento foi utilizada esmerilhadeira automática com rebolo de grão 12 e realização de 6 passes por face. Com o intuito de reduzir a influência das variáveis do processo de laminação nos testes, bem como isolar as variáveis do processo de esmerilhamento, os lotes de mesma corrida foram laminados na mesma campanha para o mesmo diâmetro final, sendo a bitola 57,15 mm para o aço DIN 16MnCr5, e bitola 55,00 mm para o aço SAE 1050.

Os lotes de barras foram inspecionados para defeitos superficiais por correntes parasitas, com dois níveis de inspeção distintos simultaneamente. O nível de inspeção é o indicador de ajuste para a maior profundidade de defeito aceita. Por exemplo, para um nível de inspeção de 0,2 significa que defeitos com profundidade maior de 0,2 mm serão identificados.

Os resultados dos testes foram comparados plotando-se em um gráfico de Pareto e agrupando a incidência de defeitos conforme a profundidade para cada lote.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Esmerilhamento e Inspeção dos tarugos

4.1.1. Inspeção superficial

As qualidades testadas apresentaram características similares durante a inspeção da condição superficial.

Na Figura 27 estão caracterizados os defeitos superficiais nos tarugos evidenciados na inspeção por partículas magnéticas e inspeção a olho nu. Podem ser vistos alguns pontos com incrustação de escória indicadas pelas setas na Figura 27 “a”, e marcas de oscilação bem definidas indicadas na Figura 27 “b”.

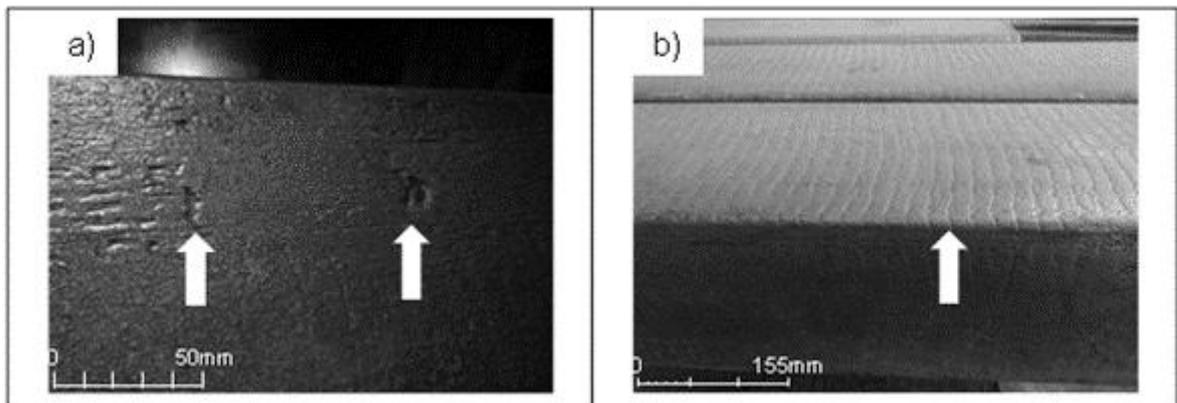


Figura 27 - a) Incrustação de Escória e b) Marcas de Oscilação.

Marcas de oscilação profundas podem ser descritas como defeitos superficiais em forma de oscilações com diferentes profundidades e perpendiculares ao eixo. A distância entre as marcas é em função da frequência e da amplitude das oscilações do molde. Têm como causas básicas: o ajuste entre a oscilação do molde e a velocidade de extração do aço líquido no molde, temperatura de lingotamento baixa, lubrificação insuficiente no molde, temperatura alta da água de refrigeração logo após o molde (FURTUNATO 2008). A Figura 28 apresenta um exemplo genérico deste defeito, conforme indicam as setas na figura.

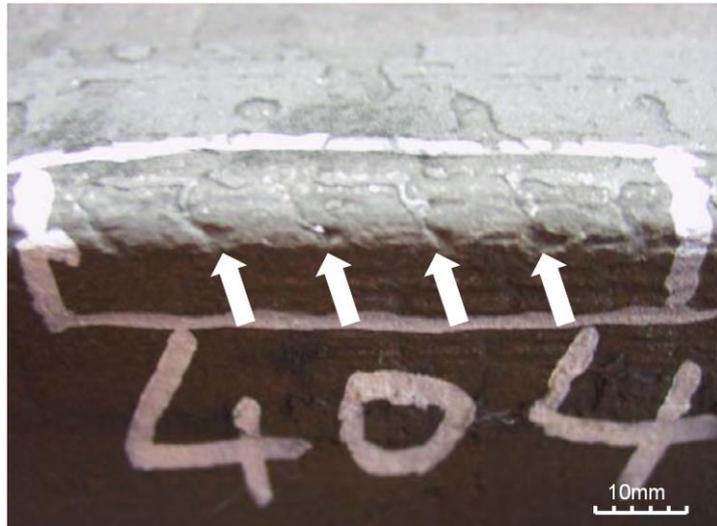


Figura 28 – Exemplo de marcas de oscilação.

Incrustação de escória pode ser definida como incrustações de materiais não metálicos de aspecto vítreo ou arenoso na superfície dos tarugos, de origem endógena, re-oxidações, ou exógena, arrastamento de refratários e/ou pó de lingotamento. Tem como causas desgaste da superfície interna do molde, marcas mecânicas, refratários de má qualidade, fluxo de lingotamento turbulento, uso incorreto do pó de lingotamento e temperatura do aço muito baixa (FURTUNATO 2008). A Figura 29 apresenta um exemplo genérico de incrustação de escória.

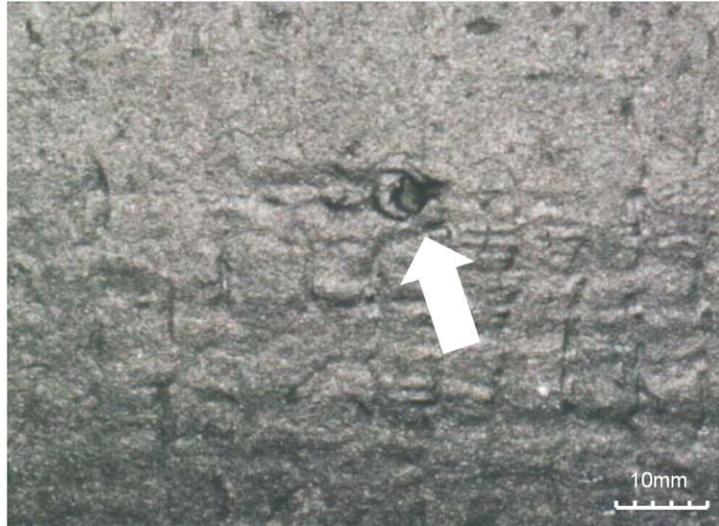


Figura 29 – Exemplo de incrustação de escória.

As amostras do aço SAE 1050 apresentaram marcas de oscilação na inspeção visual, no teste por partículas magnéticas apresentaram marcas de rolos e incrustação de escória. A Figura 30 mostra a condição geral da superfície do tarugo deste aço na campanha testada, “a” incrustação de escória, “b” marcas de rolo, “c” marcas de oscilação.

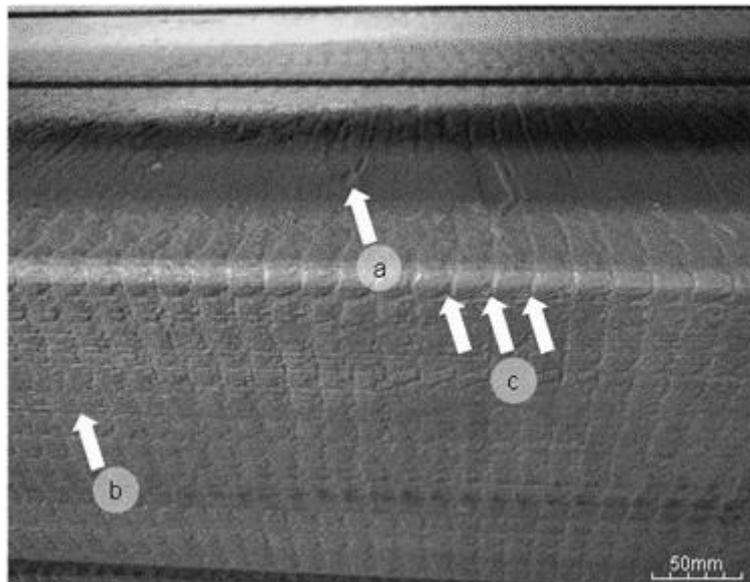


Figura 30 – Condição geral tarugo aço SAE1050, “a” incrustação de escória, “b” marcas de rolo, “c” marcas de oscilação Aço SAE1050.

O resultado da inspeção dos tarugos do aço DIN 16MnCr5 apresentou maior predominância de incrustação de escória que pode ser observada na Figura 31 e Figura 32, e marcas de oscilação mais suaves em relação ao aço SAE 1050, Figura 33.

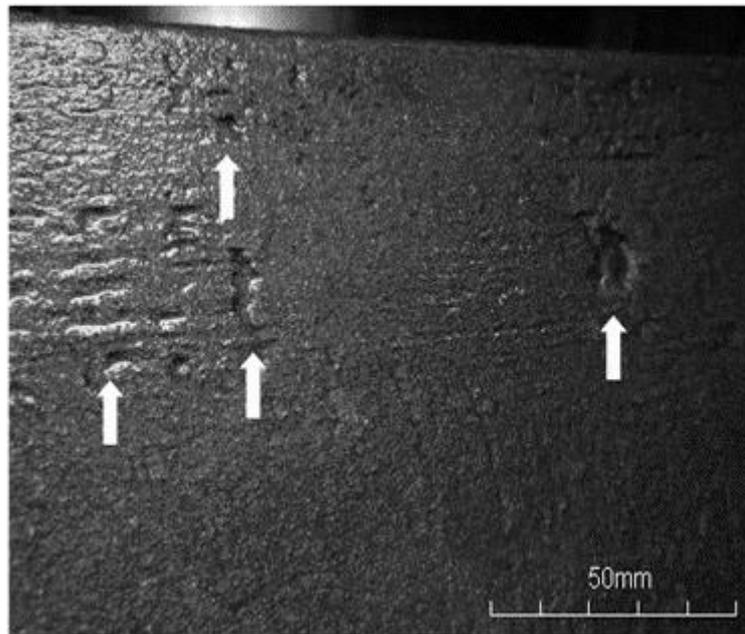


Figura 31 – Incrustação de escória Aço DIN 16MnCr5.

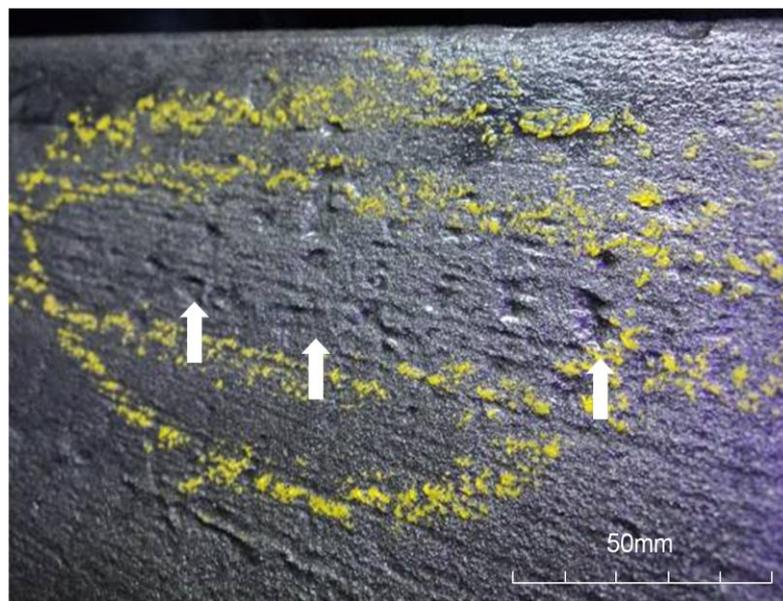


Figura 32 - Incrustação de escória Aço DIN 16MnCr5.

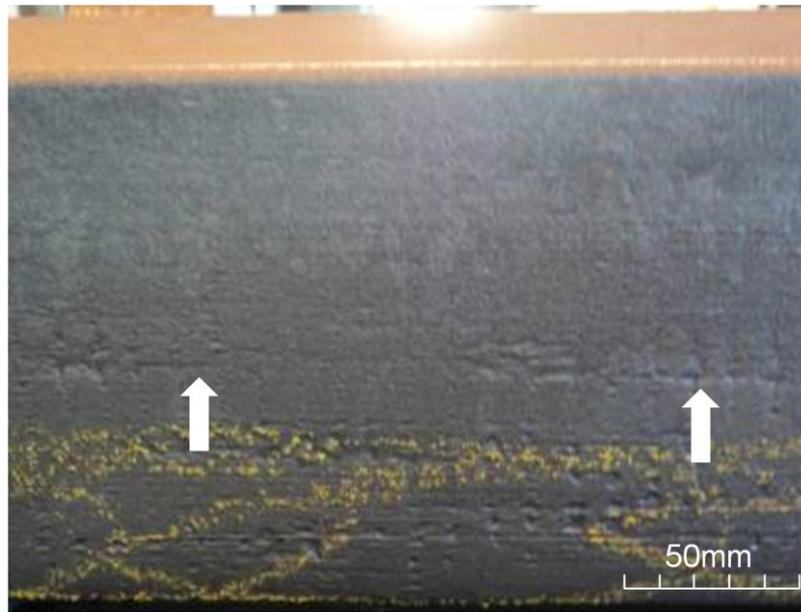


Figura 33 – Marcas de oscilação Aço DIN 16MnCr5.

4.1.2. Esmerilhamento

O aspecto geral do tarugo após o esmerilhamento está representado na Figura 34. Seis passes paralelos com distância média de 25mm entre um e outro. Quebra de cantos vivos e pressão constante em todas as peças indica uma boa qualidade no esmerilhamento. Não é possível distinguir uma peça com um esmerilhamento total, Figura 34, de outra com dois esmerilhamentos, Figura 35.



Figura 34 – Tarugo com um esmerilhamento total simples.

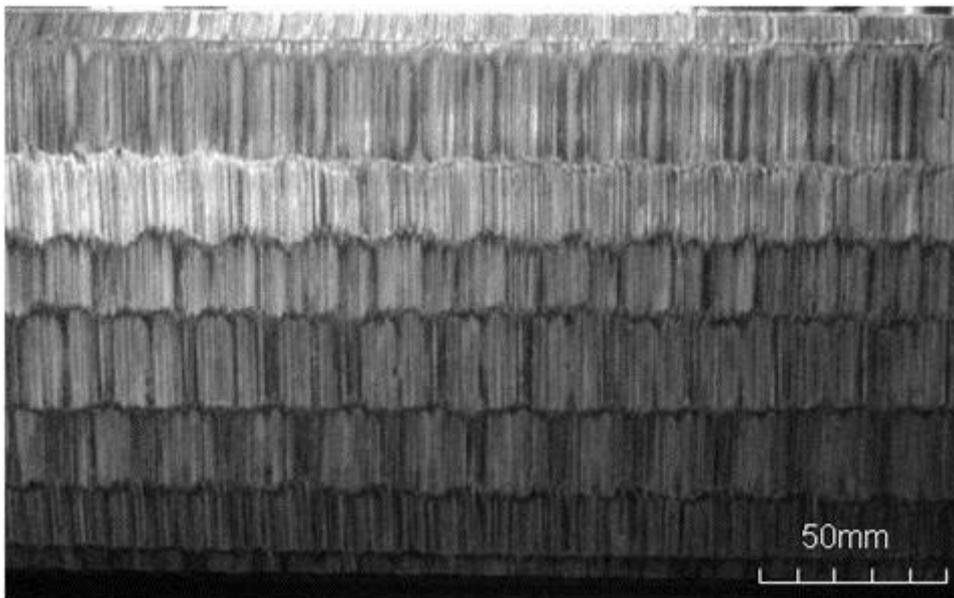


Figura 35 - Tarugo com esmerilhamento total duplo.

4.1.3. Ensaio Impressão de Baumann na seção do tarugo

Os ensaios de impressão de Baumann de amostras do aço SAE 1050 indicaram trincas denominadas de “*off corner*” ou *trincas de tensão*. Essas se formam no molde, na primeira pele solidificada, e propagam-se para o interior do tarugo, podem aflorar na superfície durante a laminação. Estando afastadas da superfície, existe a possibilidade de fechamento das mesmas (PENNA 2005). A Figura 36 apresenta um diagrama esquemático da aparência do defeito, indicado por setas. Na amostra não esmerilhada, Figura 37, os defeitos estão a uma distância maior da superfície em comparação com as amostras com esmerilhamento total simples, Figura 38, e total duplo, Figura 39. Na análise das figuras anteriormente citadas, que demonstram os ensaios de impressão de Baumann, deverão ser desconsideradas as marcações não indicadas por setas.

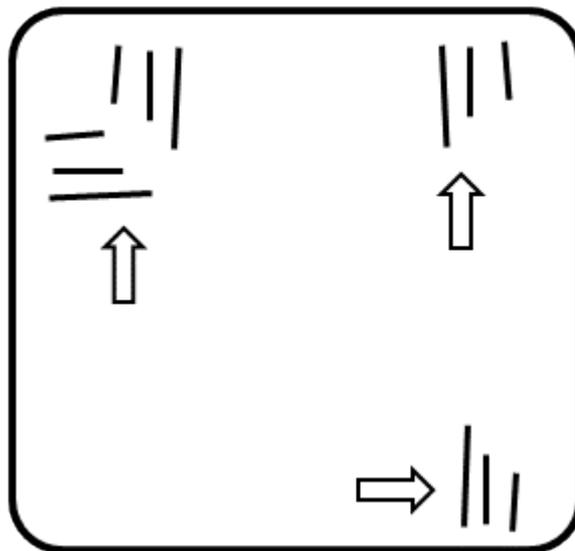


Figura 36 – Diagrama esquemático de trinca “*off corner*”(PENNA 2005).

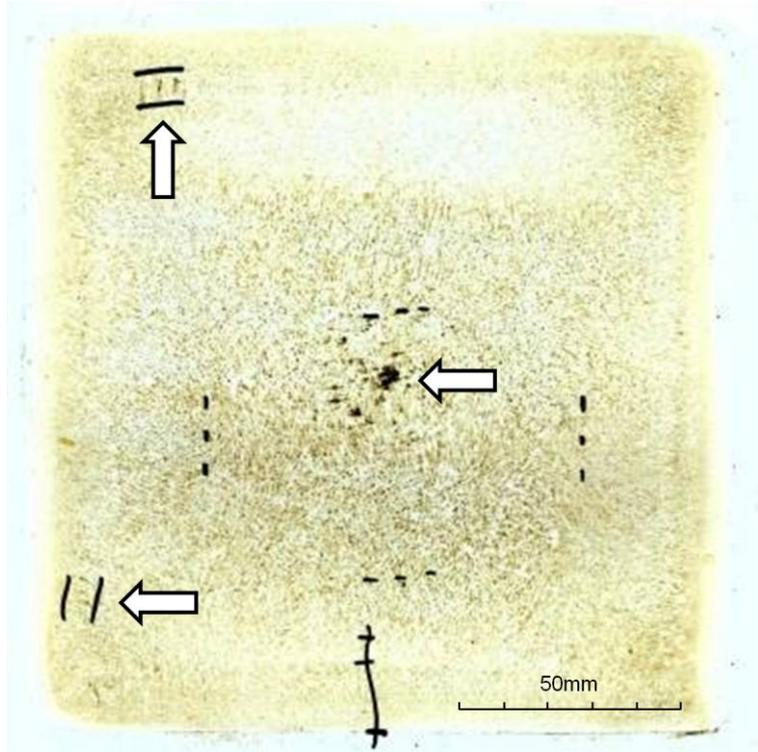


Figura 37 – Macrografia da impressão de Baumann da amostra não esmerilhada Aço SAE1050.

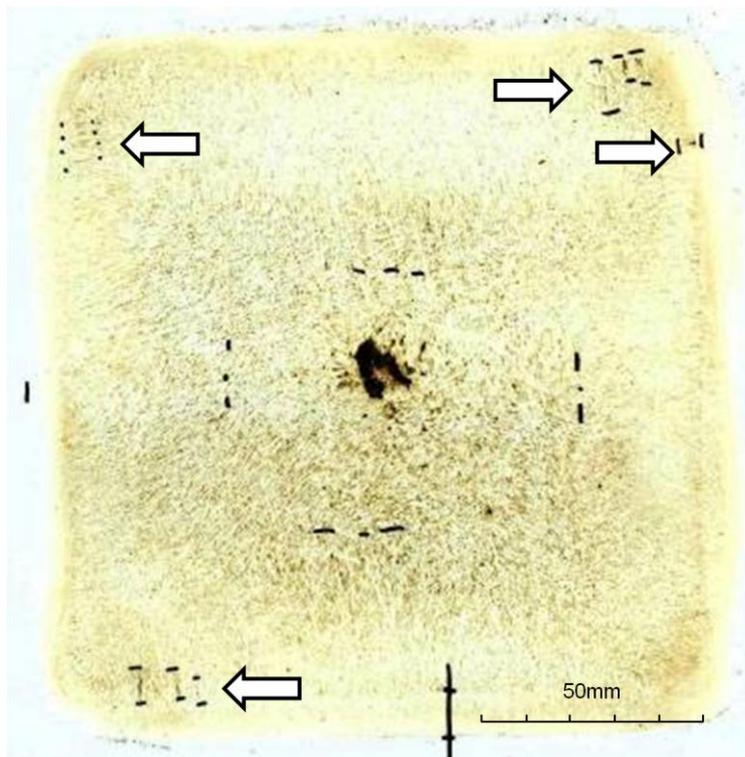


Figura 38 – Macrografia da impressão de Baumann da amostra do tarugo com esmerilhamento total simples Aço SAE1050.

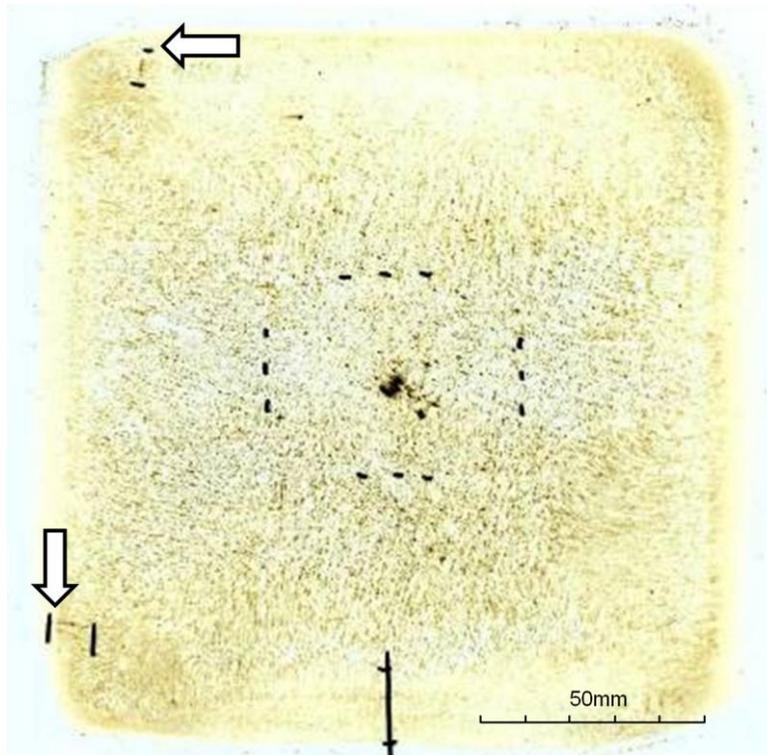


Figura 39 – Macrografia da impressão de Baumann da amostra do tarugo com esmerilhamento total duplo Aço SAE1050.

Outro defeito detectado na impressão Baumann foi denominado, conforme a literatura consultada, como rechupe. Esse se localiza no centro do tarugo. Seu aspecto varia desde um único vazio central até uma região porosa de tamanho variável. Durante a laminação, com o grau de redução adequado, esse defeito pode fechar totalmente, deixando uma mancha ou segregação central. A Figura 40 mostra o aspecto do defeito no tarugo testado.



Figura 40 – Seção do tarugo Aço SAE1050.

Os ensaios Baumann de amostras do aço DIN 16MnCr5 apresentaram também vazio central denominado rechupe. A Figura 41 apresenta a seção sem esmerilhamento, a Figura 42, a seção com um esmerilhamento total, e a Figura 43, a seção com esmerilhamento total duplo.

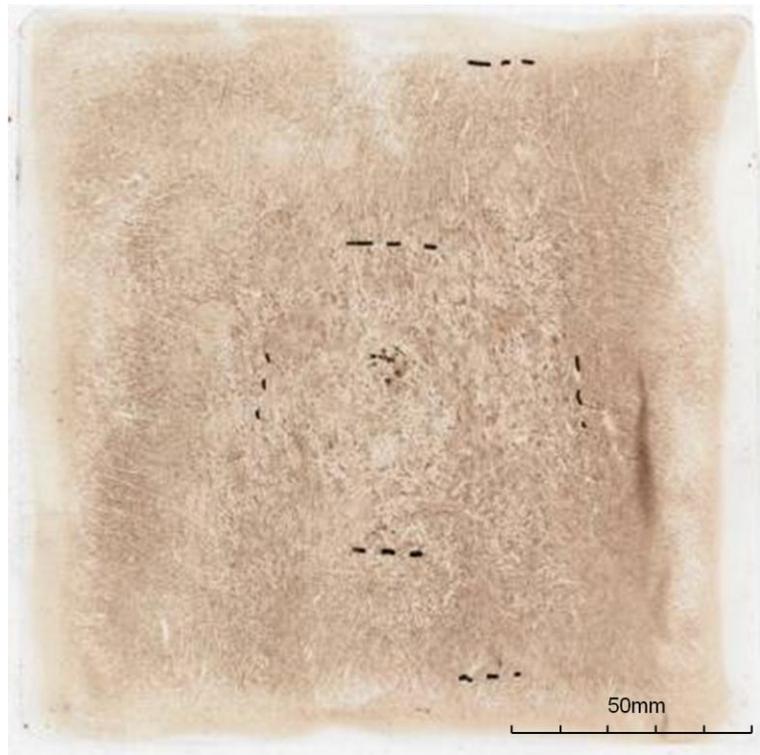


Figura 41 - Macrografia da impressão de Baumann da amostra do tarugo não esmerilhado Aço DIN 16MnCr5.

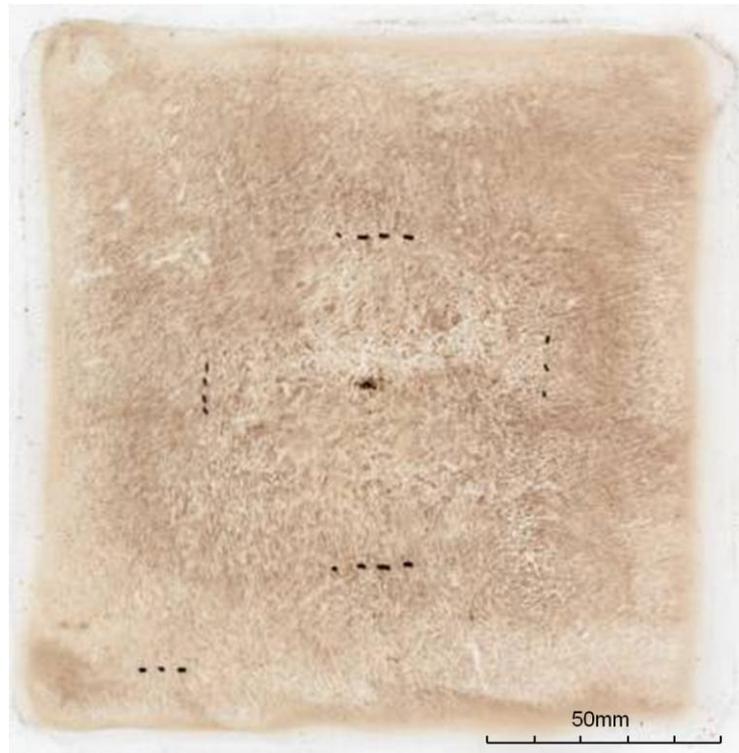


Figura 42 - Macrografia da impressão de Baumann da amostra do tarugo esmerilhamento total simples Aço DIN 16MnCr5.

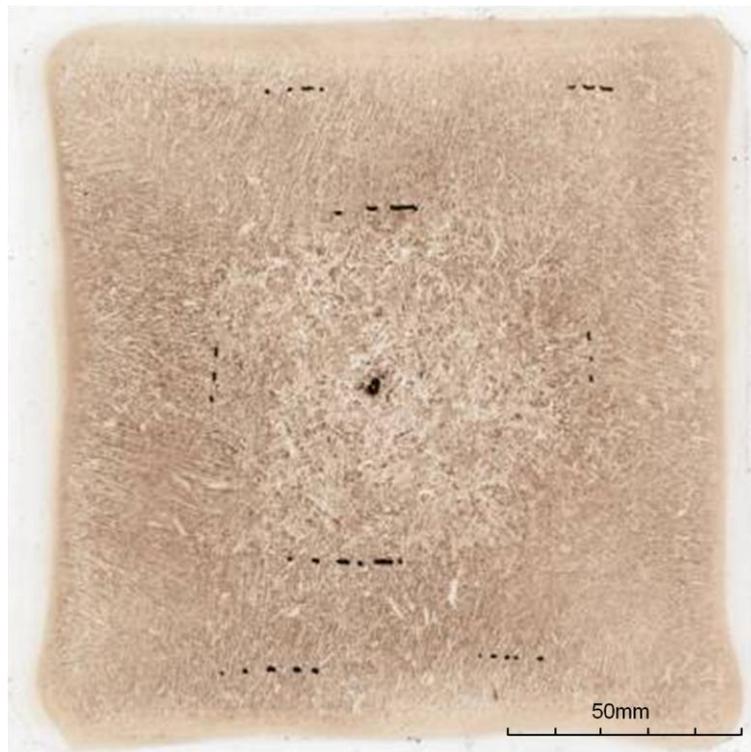


Figura 43 - Macrografia da impressão de Baumann da amostra do tarugo esmerilhamento total duplo Aço DIN 16MnCr5.

Os dados dos ensaios são mostrados na Tabela 4.1 e Tabela 4.2. As medições do tamanho da seção demonstraram com clareza a redução das dimensões do tarugo durante o esmerilhamento. Para o aço SAE 1050 foram removidos em média 1,2 mm por passe, totalizando 2,4mm da superfície bruta entre o não esmerilhado e o duplo. Para o aço DIN 16MnCr5 foram removidos 1,5 mm em média por passe, totalizando 3mm da superfície bruta entre o não esmerilhado e o duplo.

Realizada a análise dos dados, foi evidenciado que o teste Baumann não foi eficiente para determinação do tamanho da zona coquilhada pela baixa resolução da imagem na região de interesse, sendo possível apenas uma aproximação do valor.

Tabela 4.1 – Dados ensaio Baumann Aço SAE 1050.

SAE 1050		ESMERILHAMENTO TOTAL		
		NÃO	SIMPLES	DUPLO
Seção [mm]	S1	155,54	152	150,19
	S2	154,05	151,4	150,31
Zona Coquilhada [mm]		15	9,98	4,27

Tabela 4.2 - Dados ensaio Baumann Aço DIN 16MnCr5.

AÇO DIN 16MnCr5		ESMERILHAMENTO TOTAL		
		NÃO	SIMPLES	DUPLO
Seção [mm]	S1	154	152	147,5
	S2	153	150	147
Zona Coquilhada [mm]		10	8	5

4.2. Inspeção de barras laminadas

A variável resposta do experimento foi o índice de rejeição de defeitos superficiais para diferentes níveis de inspeção (NI= nível de inspeção) em mm. O nível de inspeção representa a profundidade do defeito. No experimento realizado foram aplicados dois níveis sendo:

- a) NI 0,2 defeitos com profundidade maior de 0,2 mm e;
- b) NI 0,3 defeitos com profundidade maior de 0,3 mm.

O somatório da rejeição observada aplicados os dois níveis de inspeção, NIs, representa a rejeição total do lote testado. A rejeição é quantificada como a quantidade de barras que,

após a inspeção em linha automática, não são aprovadas e necessitam ser submetidas ao processo de inspeção por partículas magnéticas. Nesses casos, o ensaio de partículas magnéticas constitui em um retrabalho, isto é, repetir o processo anterior para corrigir defeitos no produto, visto que o material já foi inspecionado uma primeira vez na linha de inspeção automática. A rejeição é controlada através do indicador % Rejeição, representado pela Equação 2.

$$\text{Equação 2 - \%Rejeição} = \frac{\text{Número de barras rejeitadas}}{\text{Número de barras inspecionadas}} \times 100$$

4.2.1. Resultados para o aço SAE 1050

A

Tabela 4.3 correlaciona os valores obtidos no ensaio Baumann com os resultados dos testes das barras.

Tabela 4.3 - Dados dos testes do Aço SAE 1050.

SAE 1050		ESMERILHAMENTO TOTAL		
		NÃO	SIMPLES	DUPLO
Rejeição [%]	Rejeição Total	34,88	16,69	34,62
	NI 0,2	5,81	9,28	28,85
	NI 0,3	29,07	7,41	5,77
Seção [mm]	S1	154,05	151,40	150,19
	S2	155,54	152,00	150,31
Profundidade de Remoção [mm]		0,00	1,55	2,27

Como pode ser observado na Figura 44, a rejeição com esmerilhamento total simples foi 50% inferior ao não esmerilhado e ao duplo. Comprova-se que o esmerilhamento melhora a qualidade superficial do produto laminado, e conclui-se que o processo com remoção simples obteve melhor resultado para o aço testado, com melhor relação custo benefício entre rendimento metálico e rejeição por defeitos superficiais.

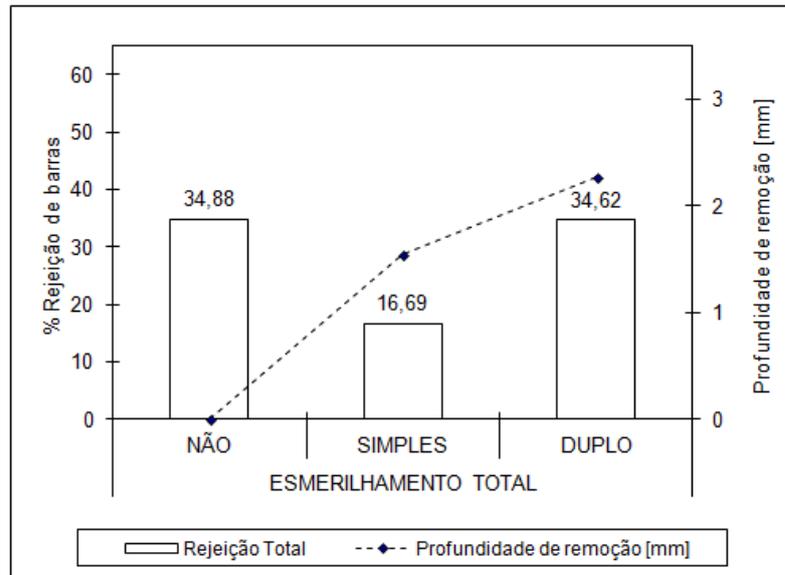


Figura 44 - Rejeição total barras laminadas aço SAE 1050 e Profundidade de remoção.

A verificação dos dados de inspeção de defeitos com profundidade maior de 0,2mm mostrou aumento da rejeição tanto no esmerilhamento total simples como no duplo.

No esmerilhamento simples, comparando os dados da Figura 45 e da Figura 46, é possível avaliar que esse aumento está relacionado a redução da profundidade dos defeitos maiores de 0,3mm pelo esmerilhamento do tarugo pois o % Rejeição total diminuiu.

No esmerilhamento duplo observou-se aumento ainda maior na rejeição em 68% com relação ao simples. Analisando os dados da

Tabela 4.3 é possível observar que a remoção extra da superfície do tarugo gerou ou permitiu a geração de defeitos superficiais no produto laminado, pois o % de Rejeição total aumentou, igualando ao do tarugo com superfície bruta, com a proporção de defeitos com profundidade maior de 0,2mm e 0,3mm invertida. O motivo para o fenômeno descrito pode estar relacionado aos defeitos sub-superficiais identificados no teste Baumann, onde, com a maior remoção de material superficial, as trincas “*off corner*” estão mais próximas da superfície podendo aflorar durante o processo de laminação.

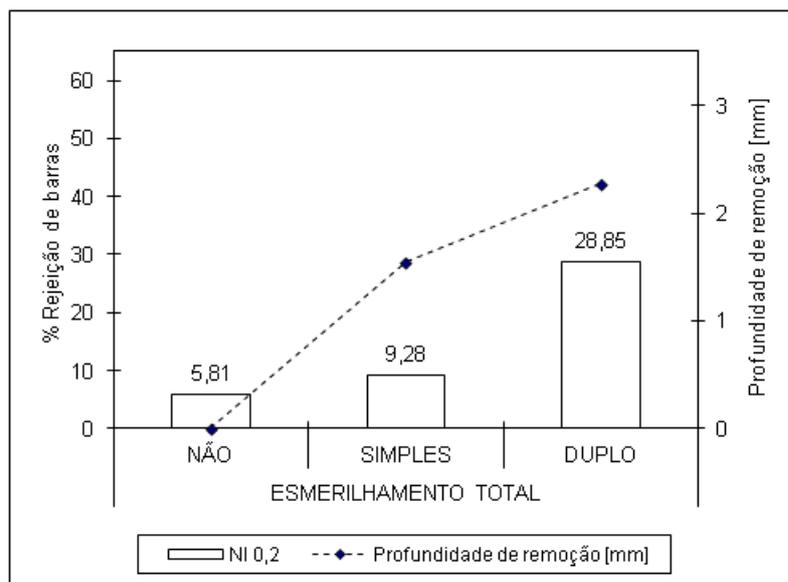


Figura 45 - Rejeição NI 0,2 barras laminadas do aço SAE 1050 e Profundidade de remoção.

Em contrapartida, avaliando a inspeção de defeitos maiores de 0,3 mm, foi observada queda de 75% no %Rejeição do esmerilhado total simples em relação ao não esmerilhado, Figura 46, apesar de indicar queda também no duplo o ganho foi de aproximadamente 1,6%. Conclui-se então que maior profundidade de remoção no esmerilhamento não é proporcional a redução na rejeição de barras laminadas e pelo contrário, pode não exercer influência significativa.

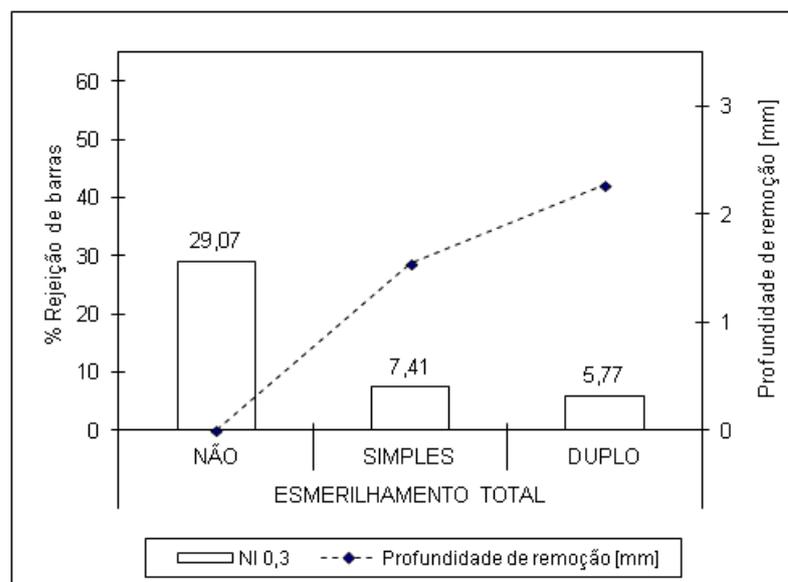


Figura 46 - Rejeição NI 0,3 barras laminadas aço SAE 1050 e Profundidade de remoção.

4.2.2. Resultado para o aço DIN 16MnCr5

A Tabela 4.4 apresenta os resultados de inspeção e ensaios realizados no aço DIN 16MnCr5.

Tabela 4.4 - Dados dos testes Aço DIN 16MnCr5.

DIN 16MnCr5		ESMERILHAMENTO TOTAL		
		NÃO	SIMPLES	DUPLO
Rejeição [%]	Rejeição Total	56,20	32,90	32,00
	NI 0,2	11,80	12,70	11,50
	NI 0,3	44,40	20,20	20,50
Seção [mm]	S1	154,00	152,00	147,50
	S2	153,00	150,00	147,00
Profundidade de Remoção [mm]		0,00	1,25	3,13

Como pode ser observado na Figura 47, o esmerilhamento total simples reduziu em 41% a rejeição de barras em comparação ao material não esmerilhado. Comprova-se que o esmerilhamento melhora a qualidade superficial do produto laminado.

O aumento da profundidade de remoção, com passe duplo, não resultou em ganho de qualidade em comparação ao esmerilhamento total simples para este aço, assim como foi visto para o aço SAE 1050, porém neste caso não houve piora. Isto se deve à ausência de defeitos internos próximos à superfície, como as trincas “off corner”, identificadas no aço SAE 1050. Concluindo-se novamente que a maior profundidade de remoção no esmerilhamento não reduz proporcionalmente a rejeição de barras laminadas, não obtendo ganho significativo. Com um esmerilhamento total obteve-se melhor relação custo benefício entre rendimento metálico e rejeição por defeitos superficiais.

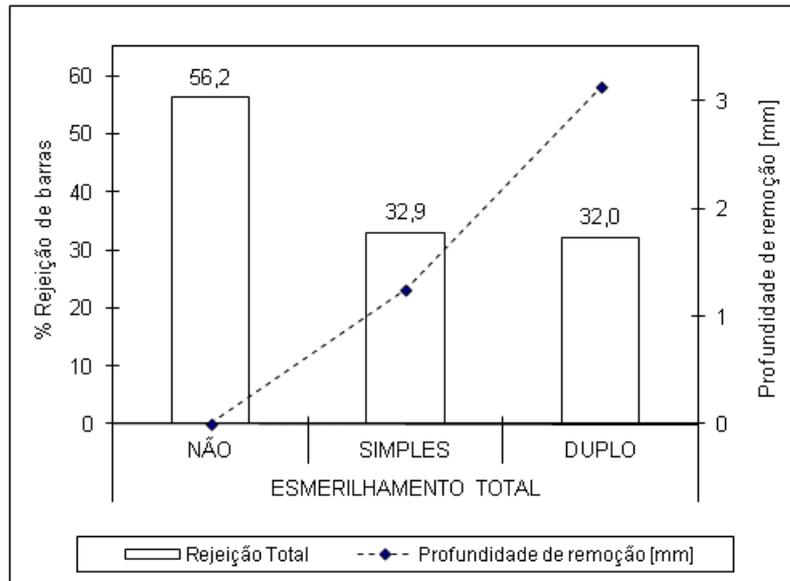


Figura 47 - Rejeição total barras laminadas aço DIN 16MnCr5 e Profundidade de remoção.

A verificação dos dados de inspeção de defeitos com profundidade maior de 0,2mm mostrou que não houve alteração significativa na rejeição em nenhum grau de esmerilhamento, como é mostrado na Figura 48.

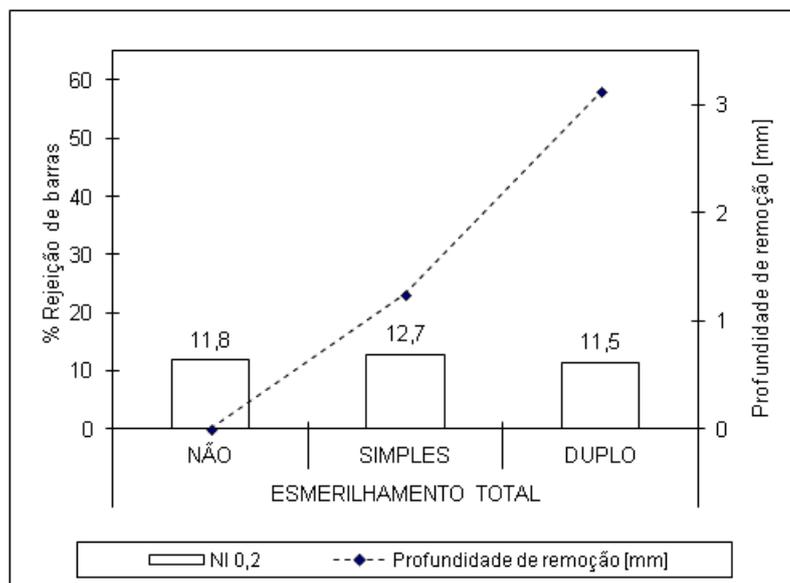


Figura 48 - Rejeição NI 0,2 barras laminadas para o aço DIN 16MnCr5 e Profundidade de remoção.

Por outro lado, avaliando a inspeção de defeitos maiores que 0,3 mm, Figura 49, foi observada queda de 50% no %Rejeição do esmerilhado total simples em relação ao não esmerilhado. Com a aplicação do passe duplo não houve alteração no resultado de rejeição. Diferentemente da qualidade SAE 1050 a proporção de defeitos com profundidade 0,2 e 0,3

manteve-se a mesma. Conclui-se que, para o aço testado, o ganho de qualidade superficial ocorreu no esmerilhamento total simples com a redução dos defeitos com profundidade igual ou maior a 0,3mm.

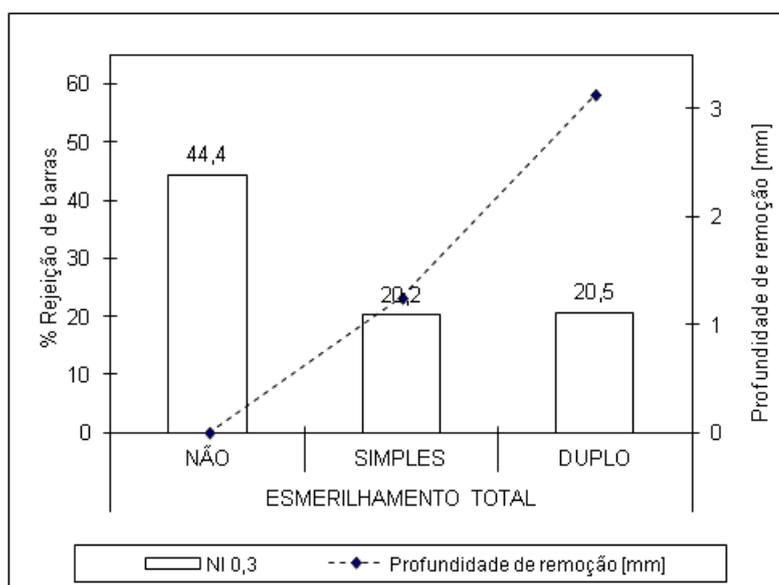


Figura 49 - Rejeição NI 0,3 barras laminadas aço DIN 16MnCr5 e Profundidade de remoção.

Em resumo, em ambos os aços testados, o esmerilhamento total simples mostrou o melhor custo benefício. O esmerilhamento total duplo causou dois efeitos: ou aumentou a rejeição por defeito superficial, ou manteve números muito próximos ao do simples. Esses resultados para o esmerilhamento total duplo podem estar associados à exposição de defeitos sub-superficiais ou à maior proximidade da zona colunar à superfície do tarugo, pois, mesmo onde o duplo mostrou o mesmo resultado do simples, era esperada melhoria na condição superficial do laminado – o que não foi evidenciado nos testes.

Conforme Leuschke (2008), a segregação de elementos na zona interdendrítica é fonte de defeitos subsuperficiais. Sendo assim, uma possibilidade para o aumento da rejeição ou a não redução, é a maior aproximação do limite das zonas coquilhadas e colunar, expondo a fronteira da solidificação primária e região intergranular da zona colunar. Ocorre também, como indicado na discussão anterior, a exposição de defeitos internos que tendem a aflorar quando muito próximos a superfície.

5. CONCLUSÕES

- O esmerilhamento superficial de tarugos melhora a qualidade superficial de barras laminadas.
- Para os tarugos com dimensões e composição de aços testadas neste estudo, o esmerilhamento total simples ofereceu melhor custo benefício entre rendimento metálico e rejeição de barras por defeito superficial, em comparação aos outros métodos abordados nos experimentos.
- A profundidade de remoção da camada superficial do tarugo no esmerilhamento não é proporcional à redução de defeitos no produto laminado, neste estudo a profundidade atingida com esmerilhamento duplo não apresentou melhora em relação ao esmerilhamento simples. Duas possibilidades são apresentadas:
 - a) Exposição de defeitos internos que tendem a aflorar durante a laminação não sendo então caldeados no processo;
 - b) Exposição da região intergranular da zona colunar.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar testes aprofundando a remoção superficial do tarugo para avaliar a exposição da camada colunar com maior intensidade.
- Realizar testes com menor e maior distância entre passes na superfície para avaliar a influência do acabamento superficial do material esmerilhado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, **ANSI B74**, Specification for the Size of Abrasive Grain - Grinding Wheels, Polishing and General Industrial Uses, 2001.

AEGERTER, D.; GUMMERSBACH, j. **Innovation in Fully Automatic Billet Crack Detection and Removal Through Advanced Optical Recognition System and High Pressure Grinding**. In: SEASIS Quarterly Journal, 2011, v40 n 2, 10p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM E-381**, Standard method of Macroetch Testing Steel Bars, Billets, Blooms, and Forgings, 2006.

BRIMACOMBE, J.K.; **Empowerment with knowledge toward the intelligent mould for the continuous casting of steel billets, the center of metallurgical process engineering**. In: The University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada V6T 1Z4, 1993.

BRIMACOMBE, J. K. **The Challenge of Quality in Continuous Casting Processes**. In: metallurgical and materials transactions b, 1999, v 30b, august.

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

GERDAU; Manual de Aços Especiais, Aços Alta Liga.
<http://www.gerdau.com.br/produtos-e-servicos/produtos-linhas-de-produtos.aspx>

HIDAYAT, M; SUTRANDI, D. **Improvement of surface quality of continuously casted slab of medium carbon steel**, In: Seaisi Quarterly, 2004 V 33 n 3.

JIN, N; ZHOU, S. **Identification of impacting factors of surface defects In hot rolling processes using multi-level regression analysis**. In: Department of Industrial Engineering University of Wisconsin, Madison, 2004.

KULKARNIA, M.S.; BABUB, A. S. **Managing quality in continuous casting process using product quality model and simulated annealing**, In: Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166, p 294–306.

KRAUSS, George. **Solidification, Segregation, and Banding in Carbon and Alloy Steels.** In: Metallurgical and materials transactions b, 2003, v 34b, december.

NUSSBAUM, G. C. **Rebolos e abrasivos: tecnologia básica.** São Paulo: Ícone, 1988, v 1, 2 e 3.

ODUGUWA V.; ROY R. **A review of rolling system design optimisation.** In: International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, n 46 p 912-928.

PENNA, L. V. **Trinca de solidificação off-corner no lingotamento contínuo de tarugos.** Minas Gerais, 2005. Dissertação. Programa Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais UFMG.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Cortes II.** Florianópolis: Editora da UFSC, 1995, 2 ed

SILVA, F. L. **Melhoria da qualidade superficial em barras laminadas.** Porto Alegre, 2010. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais UFRGS.

STEWARTSON, R.; MIMechE, MA.; BARTLETT, V. H.; DAVIES, L. L. **Quality Control of Rod and Bar Products.** In: The production engineer, 1965.

SPIM, J. ALVARES. et al. **Lingotamento contínuo de aços.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e materiais, 2006.

SYCHKOV, A. B et al. **The transformation of defects in continuous-cast emifinished products into surface defects on rolled products.** In: Metallurgist, Vol. 50, Nos. 1–2, 2006

VIANA, M. **Análise de defeitos superficiais com origem no processo de laminação de aços especiais para a cadeia automotiva e implementação de soluções.** Porto Alegre, 2009. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais UFRGS.

WEISGERBER, B. et al. **Improvement of surface quality on peritectic steel slabs.** In: Steel Research, 2002, 73, n1.

WON, Y. M. **A New Criterion for Internal Crack Formation in Continuously Cast Steels.** In: Metallurgical and materials transactions b, 2000, v 31b, august.