

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

METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DO DEFEITO SUPERFICIAL TIPO
ESCAMA EM BARRAS TREFILADAS

Leoneros Acosta Barbosa

Dissertação para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2006

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

METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DO DEFEITO SUPERFICIAL TIPO
ESCAMA EM BARRAS TREFILADAS

LEONEROS ACOSTA BARBOSA
Engenheiro Metalúrgico

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

Área de Concentração: Tecnologia e Ciência dos Materiais

Porto Alegre
2006

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

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Ronaldo Froelich, UNISINOS
Prof. Dr. Juan Garcia de Blas, COPE-UFRJ
Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker, PPGEM-UFRGS

Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela

Coordenador do PPGEM

Dedico este trabalho a minha mãe,
Nórcia Acosta Barbosa,
a meu pai, Leoneros Alcides Barbosa
e ao meu filho Harrison Leoneros da S. Barbosa.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Dr. Afonso Reguly e Dr. Telmo Roberto Strohaecker devo meus agradecimentos pela confiança, orientação prestada e paciência por terem me agüentado todo este tempo.

Aos membros da banca examinadora pelas importantes contribuições elevando a qualidade do trabalho.

Meu agradecimento especial ao Engenheiro Antônio Ricardo Stadtländer pelo grande apoio, orientação e estímulo neste trabalho.

Aos colegas que colaboraram na realização deste trabalho: Tiago Giordani, Pedro Craidy, Claudia Fanezi, Vagner Gobbi, Daniel Rodrigues, Vinicius Milani Santos e a todos os colegas do LAMEF que me receberam como amigo e me acompanharam durante esses anos.

Á Aços Especiais Piratini, em nome de Luis Augusto Colembergue Klujszo, Geraldo Fagundes, Leila Teichmann, Ayumi Yoshioka, Rogério Mahl, Jair Leopoldo Janoski e outros pelo auxílio técnico sem o qual este trabalho não seria possível.

Ao LASID (Laboratório de Siderurgia da UFRGS) pelas contribuições técnicas para elaboração da dissertação.

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

Aos meus pais, Leoneros Alcides Barbosa e Nórcia Acosta Barbosa; ao meu filho, Harrison Leoneros da S. Barbosa e a minha irmã, Dra. Karina Acosta Barbosa pelo grande apoio e incentivo para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

À minha Tia Noemia Acosta pelo grande incentivo e pelo carinho.

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

À Deus.

RESUMO

O objetivo do trabalho é criar uma metodologia de caracterização para analisar a origem de defeitos superficiais tipo escama, procurando definir sua origem, de forma a estabelecer medidas para sua minimização.

Para o desenvolvimento desta metodologia de caracterização do defeito superficial tipo escama foram analisadas 104 barras trefiladas (total de barras) das qualidades de aços ABNT 9254 (88 barras) e ABNT 1045 (16 barras), que não obtiveram aprovação na etapa de inspeção realizada na empresa Aços Especiais Piratini. Foram adquiridas amostras de 9 corridas de produção, sendo que 8 da qualidade de aço ABNT 9254 e 1 corrida da qualidade de aço ABNT 1045.

Neste trabalho são revisadas as metodologias para estudar a origem dos defeitos superficiais tipo escama, os diferentes reagentes metalográficos que podem ser utilizados e a informação que é capaz de ser obtida das observações das amostras polidas e atacadas com esses reagentes. Além disso, são discutidas as suas prováveis origens.

A determinação da origem de defeitos superficiais tipo escama inclui a observação dos aspectos gerais, tais como, a frequência, localização e preferência por algum posicionamento na barra. Também a realização de um estudo detalhado através da análise utilizando o microscópio eletrônico de varredura com microsonda por espectroscopia de dispersão de energia (EDS) acoplado a ele para a determinação da composição química de inclusões encontradas próximo ou afastadas ao defeito superficial.

Como resultado, determinou-se que o defeito superficial tipo escama na sua maior parte é oriundo do tarugo e em menor parte devido a práticas inadequadas de laminação.

ABSTRACT

This work aims the development of a methodology for the determination of the root cause of the slivers type defect in hot rolled bars in order to determine actions for its mitigation.

During this work 104 steel bars produced from ABNT 9254 (88 bars) and ABNT 1045 (16 bar), which were not approved during the non destructive testing at Aços Especiais Piratini were analyzed. Those samples were taken from 9 different production heat being 8 from ABNT 9254 and 1 from ABNT 1045.

In this work different methodologies proposed in the literature for the evaluation of slivers defect were tested. The different metallographic etchants and the information that can be obtained from the optical metallographic examination are discussed. Besides that, the probable origin of those defects is presented.

The determination of the origin of the superficial slivers type defects included the observation of the frequency, and positioning of the defect in the bars. A scanning electron microscope with EDS capabilities were also used for the chemical analysis of the inclusion observed at and close to the defects.

The results of this work indicated that the majority of the slivers type defect analyzed originated from the slab with only a minor part being introduced during the hot rolling of the bars.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XV
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Processo de Fabricação.....	4
2.1.1 Aciaria.....	4
2.1.2 Forjaria – Seções Grandes.....	5
2.1.3 Preparo.....	5
2.1.4 Laminação.....	5
2.1.5 Transformação Mecânica.....	7
2.1.6 Tratamento Térmico.....	7
2.2 Tipos de Defeitos Superficiais em Barras Trefiladas.....	10
2.2.1 Trincas.....	10
2.2.2 Dobras.....	10
2.2.3 Riscos.....	12
2.2.4 Carepa Incrustada.....	12
2.2.5 Marcas de Manuseio.....	13
2.2.6 Escama.....	14
2.3 Contramedidas.....	36
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	38
3.1 Material.....	38
3.2 Metodologia de Análise.....	39
3.2.1 Macroanálise.....	42
3.2.2 Microanálise.....	43
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52

4.1	Aço ABNT 9254.....	52
4.2	Aço ABNT 1045.....	63
5.0	CONCLUSÕES.....	74
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES	76
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Diagrama apresenta a quantidade de barras sucata em função do tipo de defeito superficial. No período de janeiro de 2004 a janeiro de 2005. (Fonte: Gerdau – Aços Especiais Piratini).	1
Figura 1.2	Irregularidades nas barras trefiladas causadas pelo defeito superficial tipo escama.	2
Figura 1.3	Aspecto micrográfico da seção transversal da barra trefilada com o defeito tipo escama. Ataque nital 2%.	2
Figura 2.1	Fluxograma de produção da usina GERDAU – Aços Especiais Piratini.	8
Figura 2.2	Fluxograma do processo produtivo demonstrando os locais onde são realizadas as inspeções para detecção dos defeitos superficiais.	9
Figura 2.3	Micrografia demonstrando o defeito superficial tipo (a) trinca com óxidos ao longo de defeito, em região descarbonetada, (b) trinca preenchidas com óxidos de forma contínua, descarbonetada e (c) trinca preenchida por óxidos alongados, óxidos globulares na continuidade e descarbonetado. Ataque nital 2%. [Álbum de defeitos Superficiais GERDAU – Aços Especiais Piratini]	10
Figura 2.4	Micrografia demonstrando o defeito superficial tipo dobra. Ataque nital 2%. [Álbum de defeitos Superficiais GERDAU – Aços Especiais Piratini]	11
Figura 2.5	Micrografia demonstrando o defeito superficial tipo risco. Ataque nital 2%. [Álbum de defeitos superficiais GERDAU – Aços Especiais Piratini]	12
Figura 2.6	Micrografia demonstrando o defeito superficial tipo carepa incrustada. Ataque nital 2%. [Álbum de defeitos Superficiais GERDAU – Aços Especiais Piratini]	13
Figura 2.7	Análise realizada com Magnaflux e micrografia mostrando o defeito superficial tipo marcas de manuseio. [Álbum de defeitos Superficiais GERDAU – Aços Especiais Piratini].	14
Figura 2.8	Micrografia demonstrando o defeito superficial tipo escama. (a) Origem Aciaria, (b) origem laminação e (c) origem marcas de manuseio. Ataque nital 2%. [Álbum de defeitos Superficiais GERDAU – Aços Especiais Piratini]	16
Figura 2.9	Modelo físico de uma panela siderúrgica agitada com gás. Visualização dos fenômenos: a) da abertura do “olho” da coluna de bolhas; b) emulsificação de escória. Posição de injeção de gás central. Simulador de escória: querosene pigmentado. [Morales Et al. (2006)].	18
Figura 2.10	Esquema de uma injeção de gás de uma panela. [Mazumdar (1995) citado por Sicorski (2006)].	19
Figura 2.11	- Desenho esquemático: a) princípio de emulsificação de escória na panela de aço b) equilíbrio entre as forças de inércia F_p , força de empuxo $F_g \cos \alpha$, e força superficial F_σ no ponto de desprendimento da gota. [Wei, Oeters (1992) citado por Morales Et al.(2006)].	20
Figura 2.12	Ilustração esquemática da panela e do distribuidor (Thomas e Cai 2002).	20
Figura 2.13	Ilustração do arraste de inclusões com o borbulhamento de gás inerte (Bonilla 1995).	21
Figura 2.14	Representação esquemática do mecanismo proposto, por Chakraborty e Hill (1994), para geração de alumina.	23

Figura 2.15	Fenômenos que acontecem no lingotamento contínuo segundo Thomas e Cai (2002).	25
Figura 2.16	Esquema demonstrando o ponto de captura de inclusões/gás por bolhas no na região curva do lingotamento contínuo de placas, segundo Emling e Waugaman (1994).	26
Figura 2.17	Ilustração de como o defeito subsuperficial pode empolar após recozimento devido à presença de gás capturado, segundo Emling e Waugaman (1994).	26
Figura 2.18	Ilustração do mecanismo de arraste de partículas do pó fluxante para o aço líquido, segundo Emling e Waugaman (1994).	27
Figura 2.19	Ilustração do mecanismo de arraste de partículas da escória do molde devido alta velocidade de lingotamento, segundo Emling e Waugaman (1994).	27
Figura 2.20	Esquema demonstrando o fluxo inclinado na lingoteira causando vórtices e arraste do pó fluxante, segundo Bommaraju (1992).	28
Figura 2.21	Ilustração da (a e b) formação de marcas de oscilação por dobramento de camada e fluxo de metal sobre o menisco, segundo Quaresma J. e Garcia M (1982).	29
Figura 2.22	Esquema demonstrando a formação do gancho no menisco e adesão do pó fluxante no aço líquido, segundo Bommaraju (1992).	30
Figura 2.23	Contramedidas para minimizar o defeito tipo escama, segundo Tsai (1990).	37
Figura 3.1	Descrição da composição e freqüência dos defeitos existentes nas barras analisadas.	40
Figura 3.2	Metodologia utilizada para o corte das barras.	41
Figura 3.3	Macroanálise com magnaflux mostrando barras com o defeito tipo (a) escama e (b) com o defeito tipo dobra.	42
Figura 3.4	Macro análise mostrando barras com o defeito tipo escama analisada com lupa estereoscópica.	43
Figura 3.5	Micrografia da secção transversal de uma barra apresentando defeito tipo escama. Sem ataque químico. MO.	43
Figura 3.6	Micrografia secções transversais de barras com defeito tipo escama atacadas com o reagente nital 2%. MO.	44
Figura 3.7	Micrografias do defeito tipo escama atacadas (a) com reagente Stead e (b) com reagente Oberhoffer. MO.	46
Figura 3.8	Interpretação de Morgan citado por IAS, sobre o resultado do ataque com cromato sódico alcalino.	47
Figura 3.9	Micrografias exemplificando o resultado do ataque com o reagente cromato alcalino. As regiões mais claras, em forma de pluma, identificam a região de penetração de oxigênio. MO.	47
Figura 3.10	Ilustração das áreas utilizadas para realização das análises nas regiões próximas e afastadas ao defeito.	49
Figura 3.11	Método utilizado para determinação do dimensional dos defeitos analisados.	49
Figura 3.12	Exemplos de Análise por microscopia de varredura em região apresentando defeito, juntamente com seu EDS.	50
Figura 4.1	Origem dos defeitos tipo escama para o aço ABNT 9254.	52
Figura 4.2	Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de escória na amostra G1 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b) macrografia utilizando magna flux, (c e d) micrografia em microscópio ótico e (e) de varredura juntamente com o (f) espectro de freqüência na seção longitudinal da barra trefilada.	54
Figura 4.3	Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de espinélio na amostra F2 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b) macrografia utilizando magnaflux, (c) micrografia em microscópio ótico sem ataque, (d) micrografia com o reagente nital 2%, (e) microscopia de varredura juntamente com o (f) espectro de freqüência nas seções: longitudinal e transversal da barra trefilada.	55

Figura 4.4	Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de escória da panela ou do distribuidor na amostra A3 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b) micrografia em microscópio ótico (reagente nital 2%) e de (c) varredura (transversal), (e e f) varredura (longitudinal) juntamente com o (d) espectro de frequência nas seções: longitudinal e transversal da barra trefilada.....	56
Figura 4.5	Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de pó fluxante na amostra B14 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b) macrografia utilizando magnaflux, (c e d) micrografia em microscópio ótico e de (e) varredura juntamente com o (f) espectro de frequência nas seção transversal da barra trefilada.....	57
Figura 4.6	Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de trinca de solidificação na amostra E2 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b e c) micrografia em microscópio ótico, sendo em (a) sem ataque e em (b) atacada com nital, e de (d) varredura na seção transversal da barra trefilada.....	58
Figura 4.7	Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de dobra de laminação na amostra A7 através da macrografia em (a) lupa de baixo aumento, (b) macrografia utilizando magnaflux, (c) micrografia em microscópio ótico sem ataque, (d) micrografia com o reagente Stead e (e) como o reagente Nital 2% na seção transversal da barra trefilada.....	59
Figura 4.8	Distribuição das inclusões encontradas próximas e do lado oposto ao defeito tipo escama para cada corrida analisada do aço ABNT 9254.....	61
Figura 4.9	Diâmetro médio de inclusões encontradas nas proximidades do defeito, para cada corrida analisada para o aço ABNT 9254.....	61
Figura 4.10	Pareto demonstrando o número de inclusões x diâmetro das inclusões nas proximidades do defeito, para o aço ABNT 9254.....	62
Figura 4.11	Dimensões dos defeitos tipo escama analisado pra o aço ABNT 9254.....	62
Figura 4.12	Dimensões dos defeitos tipo escama analisado para o aço ABNT 9254.....	63
Figura 4.13	Origem dos defeitos tipo escama para no aço ABNT 1045.....	64
Figura 4.14	Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de escória na amostra 7 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b) micrografia em microscópio ótico (ataque nital 2%) e de (c) micrografia ataque Stead, (d) MEV (seção longitudinal) (e) MEV (seção transversal) e (f) o espectro de frequência nas seções: longitudinal e transversal da barra trefilada.....	65
Figura 4.15	Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de espinélio na amostra 8 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b) micrografia em microscópio ótico (ataque nital 2%), (c) MEV (seção longitudinal), (d) MEV (seção transversal) juntamente com o (f) espectro de frequência na seção transversal da barra trefilada.	66
Figura 4.16	Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de escoria da panela e do distribuidor na amostra 4 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b) micrografia com os reagentes nital, (c) reagente Stead, (d) MEV juntamente com o (e) espectro de frequência na seção: longitudinal da barra trefilada.....	67
Figura 4.17	Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de pó fluxante na amostra 9 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b e c) micrografia com os reagentes nital e Cromato alcalino, (d e e) MEV juntamente com o espectro de frequência na seção: longitudinal da barra trefilada.....	68
Figura 4.18	Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de trinca de solidificação na amostra 13 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b) micrografia em microscópio ótico com o reagente nital, (c) com o reagente cromato Alcalino e (d) com o reagente picral na seção transversal da barra trefilada.....	69
Figura 4.19	Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de dobras de laminação na amostra 14 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b)	

	micrografia em microscópio ótico com os reagentes Stead e (c) com o reagente nital 2% na seção transversal da barra trefilada.....	70
Figura 4.20	Diagrama representando a distribuição das inclusões encontradas próximas e do lado oposto do defeito tipo escama para a qualidade de aço ABNT 1045.	71
Figura 4.21	Representação do tamanho médio de inclusões encontradas para cada amostra com defeito pra a qualidade de aço ABNT 1045.....	72
Figura 4.22	Pareto demonstrando o número de inclusões x diâmetro das inclusões para a qualidade de aço ABNT 1045.	72
Figura 4.23	Dimensões dos defeitos tipo escama analisados para amostras do aço ABNT 1045. 73	
Figura 4.24	Dimensões dos defeitos tipo escama analisados para amostras do aço ABNT 1045. 73	

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Identificação das amostras analisadas.	38
Tabela 3.2	Faixa de composição química exigida para a qualidade de aço ABNT 9254.....	39
Tabela 3.3	Faixa de composição química exigida para a qualidade de aço ABNT 1045.....	39
Tabela 3.4	Identificação das análises realizadas para determinação da origem do defeito tipo escama através da caracterização microestrutural.	41
Tabela 3.5	Composição e preparação do reagente Nital 2%.	44
Tabela 3.6	Composição e preparação do reagente Oberhoffer.....	45
Tabela 3.7	Composição e preparação do reagente Stead.	45
Tabela 3.8	Composição e preparação do reagente Cromato alcalino.....	46
Tabela 3.9	Composição e preparação do reagente Picral.	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AEP – Empresa GERDAU - Aços Especiais Piratini

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

t - toneladas

mm – milímetros

FEA – forno elétrico a arco

VD/VOD – degaseificadores

LC – lingotamento contínuo

LCV – lingotamento convencional

L1 – laminação 1

L2 – laminação 2

TAE – tecnologia de aços especiais

EPP – engenharia de processos e produtos

P e D – pesquisa e desenvolvimento

EI – engenharia de inspeção

MSA – estudo para avaliar a confiabilidade

ABENDE – Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção

AISI – American Iron and Steel Institute

IAS – Instituto Argentino de Siderurgia

Ca – cálcio

Pb – chumbo

S – enxofre

Na – sódio

O – oxigênio

FeO – wüstita

MgO – óxido de magnésio

MnO – óxido de manganês

Al₂O₃ – alumina

Na₂O – óxido de sódio

SiO₂ – sílica

TiO₂ – óxido de titânio

HNO₃ – ácido nítrico

FeCl₃ – cloreto férrico

CuCl₂ – cloreto cúprico

SnCl₂ – cloreto estanoso

CuCl₂ – cloreto cúprico

MgCl₂ – cloreto magnésio

CrO₃ – óxido crômico

NaOH – hidróxido de sódio

mm² – milímetros quadrados

µm – micrometros

CNI'S – inclusões complexas

EDS - espectroscopia de energia dispersiva

1.0 INTRODUÇÃO

Este trabalho visa contribuir para a diminuição do sucateamento de produtos por defeitos superficiais em barras trefiladas criando uma metodologia de caracterização destes defeitos e procurando definir a sua origem. Análises preliminares demonstraram que existem vários tipos de perdas no processo produtivo. Das perdas relacionadas à qualidade, como visto na Figura 1.1, o defeito do tipo escama mostrou ser o mais expressivo na quantidade de sucateamento final de barras trefiladas. Por isso foi priorizado para ser o escopo do trabalho.

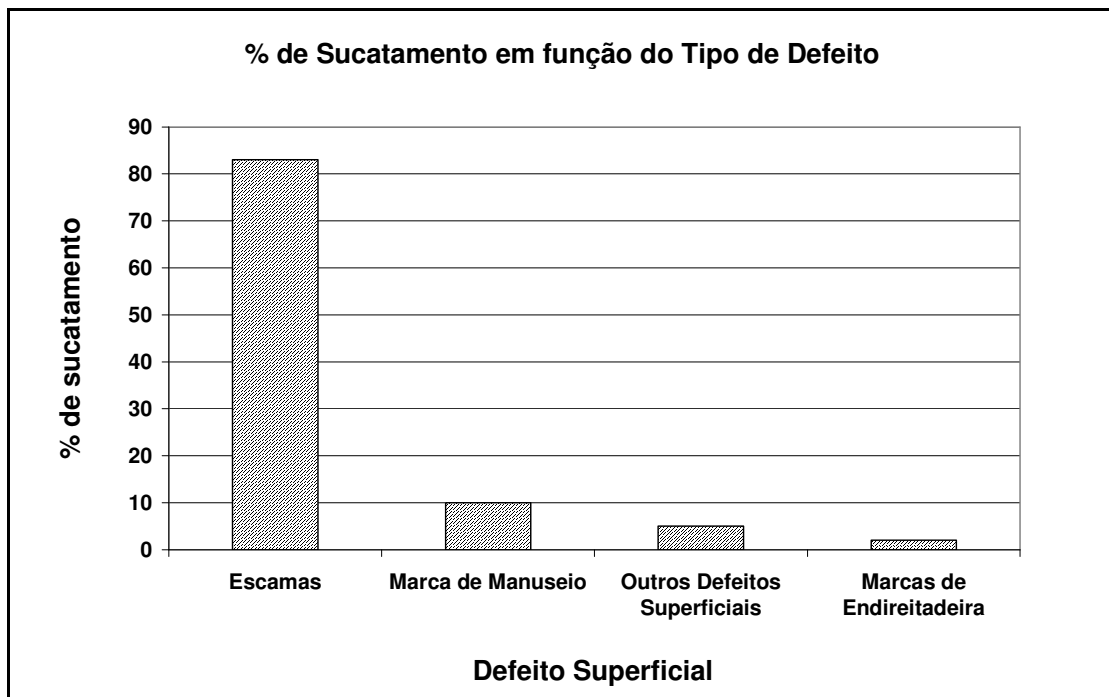


Figura 1.1 Diagrama apresenta a quantidade de barras sucataadas em função do tipo de defeito superficial. No período de janeiro de 2004 a janeiro de 2005. (Fonte: Gerdau – Aços Especiais Piratini).

As escamas, por serem menos coesas ao fio máquina do que outros tipos de defeitos superficiais (dobras), com mais forte razão tenderão a se destacarem durante a trefilação.

A prática tem mostrado que o consumo de fieiras e o número de arrebentamentos durante a trefilação estão intimamente ligados à presença de escamas no fio máquina.

Em barras trefiladas revestidas a presença de defeitos no revestimento pode ser facilmente explicada pela existência de escamas no fio máquina utilizado. Na Figura 1.2 observa-se irregularidades nas barras trefiladas, o que foi provocado por escama. A Figura 1.3 mostra aspecto micrográfico da escama em seções transversais de barras trefiladas.

Nos produtos finais as escamas além de afetar as propriedades mecânicas das barras e arames, tornam-se relevantes na medida em que comprometem o aspecto superficial do produto.

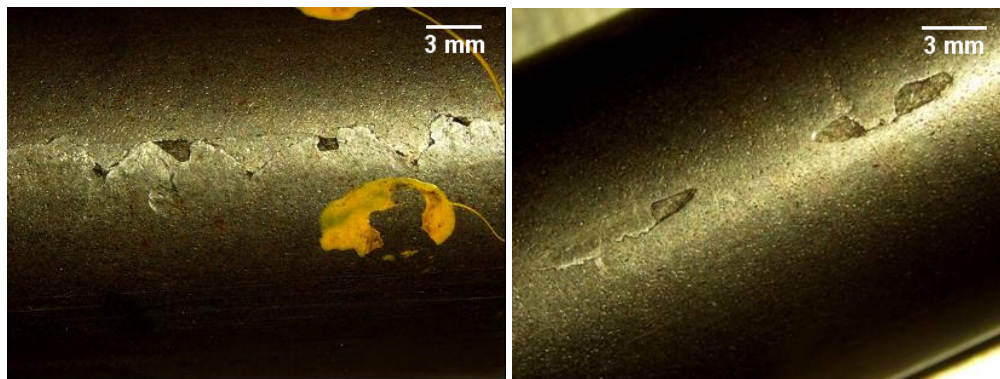


Figura 1.2 Irregularidades nas barras trefiladas causadas pelo defeito superficial tipo escama.

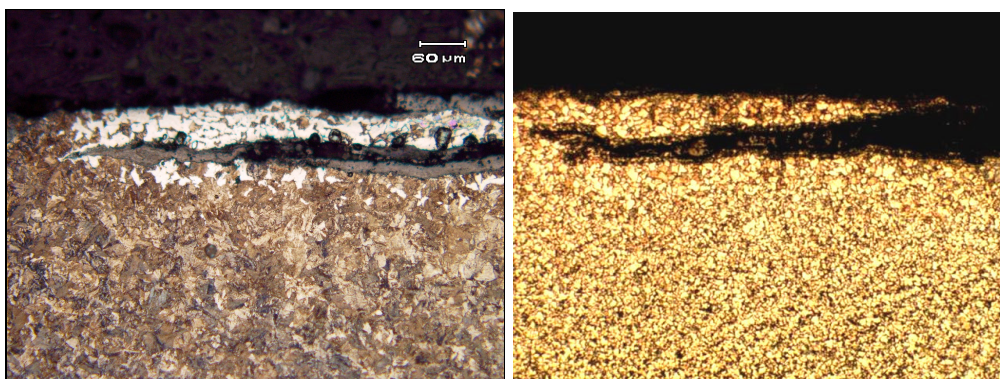


Figura 1.3 Aspecto micrográfico da seção transversal da barra trefilada com o defeito tipo escama. Ataque nital 2%.

As qualidades de aços escolhidas para análise se devem ao volume de material sucitado e disponibilidade dos mesmos neste período. Logo, as qualidades de aços analisadas foram: o aço ABNT 9254 e o aço ABNT 1045.

A avaliação da abordagem inicial do trabalho foi estruturada visando analisar eventuais defeitos nas barras trefiladas para determinar as suas prováveis origens. Foram analisadas amostragens de barras trefiladas polidas reprovadas na inspeção em linha por correntes parasitas. Em paralelo houve um trabalho minucioso de revisão bibliográfica relacionado a defeito superficial, além de um intenso aprendizado do processo produtivo para conhecer a rota de cada produto estudado dentro dos processos de fabricação da empresa para melhor compreensão das origens dos defeitos.

Desta forma, o objetivo principal do trabalho é dar ferramentas para analisar a origem de defeitos superficiais tipo escama, criando uma metodologia para a caracterização destes defeitos e procurando definir sua origem de modo a dar subsídios para sua minimização. Para alcançar este objetivo foi realizado um estudo do processo produtivo da empresa, uma revisão bibliográfica, um procedimento experimental para caracterização do defeito, discussão dos resultados obtidos e conclusões.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foi realizada uma descrição sumária do processo fabricação de aços na empresa GERDAU - Aços Especiais Piratini e uma revisão da bibliografia existente sobre o defeito superficial tipo escama e suas prováveis origens segundo diversos pesquisadores e institutos de pesquisa.

2.1 Processo de Fabricação

2.1.1 Aciaria

A Aciaria é uma das principais áreas da usina, sendo a responsável pela produção do aço. Seus produtos, tarugos ou lingotes são as matérias primas das demais áreas de produção.

A Aciaria da Aços Especiais Piratini é uma Aciaria Elétrica com capacidade de operação de 300.000 t/ano, estando dividida nos seguintes setores: Pátio de Sucata, Forno Elétrico a Arco (FEA), Forno Panela e Desgaseificadores (VD/VOD) e Lingotamento Contínuo (LC) e Convencional (LCV).

O processo da Aciaria tem início no pátio de sucata, responsável pelo armazenamento, corte (tesoura de sucata) e seleção da sucata utilizada durante a fabricação do aço. No FEA com 65 t de capacidade são realizadas basicamente três operações: carregamento (sucata, gusa e insumos, através de cestões), fusão e refino oxidante. O FEA funde ferroligas, sucata e gusa. O aço líquido é vazado para panela onde há nova adição de ferroligas. A panela é transferida ao forno panela, onde é feito o refino secundário, ajuste de temperatura e escória. A seguir a panela é transferida para o desgaseificador a vácuo (VD/VOD) tipo tanque onde os gases são removidos e o último ajuste de temperatura e composição química é feito. Finalmente é realizada a solidificação do aço líquido via lingotamento convencional ou na máquina de lingotamento contínuo, este último responsável por aproximadamente 90% da produção.

2.1.2 Forjaria – Seções Grandes

A matéria prima utilizada pela Forjaria são lingotes, produzidos pelo Lingotamento Convencional. Estes são conformados em prensa hidráulica, cuja capacidade é de 1000 t, ou marteletes de 1000, 600 e 250 kg. Também são realizados serviços de usinagem e tratamento térmico nos seus produtos.

2.1.3 Preparo

Nesta área, os tarugos provenientes de Lingotamento Contínuo são inspecionados a fim de detectar possíveis defeitos superficiais e removê-los através de esmerilhamento. Este esmerilhamento pode ser total (ETO), parcial (EPA) e sem acabamento (SAC).

No preparo também são inspecionadas, barras laminadas redondas, bitolas maiores do que 76,20 mm e, através de inspeção manual, barras quadradas maiores que 80,00 mm.

2.1.4 Laminação

Seções Médias (Laminação 1)

A Laminação 1 (L1) é composta por um laminador desbastador, 2 gaiolas de laminação de 600 mm para barras quadradas e redondas, 1 trem de laminação em linha, composto por 2 gaiolas (horizontal e vertical) e 1 bloco acabador (3 passes), além de um Forno Walking Beam, responsável pelo aquecimento dos tarugos antes da laminação.

As bitolas laminadas podem ser redondas de 46,04 a 203,20 mm ou quadradas, de 37,00 a 127,00 mm.

Seções Pequenas (Laminação 2)

A Laminação 2 (L2) possui um desbastador trio, um trem intermediário composto por 9 gaiolas (horizontais / verticais), bloco Danielli e bloco finalizador Kocks, permitindo que sejam laminadas bitolas redondas de 5,50 mm até 60,33 mm. O sistema possui caixas de resfriamento para controle de temperatura de laminação dos últimos passes. Possui

também, um Forno “Walking Beam”, responsável pelo aquecimento dos tarugos, com capacidade de 30 t/h.

Processo de Laminação (Obtenção do Fio-Máquina)

O processo de laminação consiste na transformação por conformação mecânica de aços em barras e fios-máquina. É realizado pela aplicação de compressão direta sobre o aço, juntamente com a aplicação de força na superfície deste, resultando no conseqüente alongamento na direção perpendicular ao sentido da força (Hernandez 2003).

Para a realização da laminação é necessário o pré-aquecimento do tarugo a ser conformado. Este pré-aquecimento é feito em fornos e tem por finalidade diminuir a energia necessária para a sua deformação com o conseqüente aumento da ductilidade.

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

Com a obtenção da dimensão final no trem de laminação, o fio-máquina é então resfriado em duas etapas: o resfriamento primário e o resfriamento secundário.

O resfriamento primário ocorre após a saída do último rolo laminador, com o fio-máquina passando através de duas caixas de resfriamento munidas com injetores de água. Através da variação da pressão de água nestas caixas é possível controlar a temperatura final de laminação.

Laminado na bitola final e tendo passado pelo resfriador primário, o fio-máquina é bobinado em espiras que posteriormente servirão de matéria-prima para fabricação de barras trefiladas de diferentes bitolas.

2.1.5 Transformação Mecânica

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

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

2.1.6 Tratamento Térmico

Junto a Transformação Mecânica está localizada a célula de Tratamento Térmico.

Devido à diversidade dos produtos e aplicações, à área está equipada com nove fornos, com capacidade de executar os seguintes tratamentos térmicos: normalização; solubilização; têmpera em óleo ou água; revenido; recozimento e esferoidização.

Na Figura 2.1 é possível visualizar o fluxo de processo existentes na GERDAU - Aços Especiais Piratini.

Engenharia de Inspeção (EI)

Esta célula é a responsável pelo apoio as áreas de inspeção, controle de todo sistema de medição da usina (equipamentos, análises, inspeções, etc.) e realização dos estudos de MSA (estudo para avaliar a confiabilidade do sistema de medição).

A esta célula está vinculado o equipamento para detecção em linha de defeitos superficiais pelo ensaio não destrutivo por correntes parasitas em barras trefiladas. Esta inspeção é realizada em linha após os processos de trefilação conforme o fluxograma apresentando na Figura 2.2. O ensaio por correntes parasitas utiliza o equipamento Circograph do fabricante Forster que utiliza cabeçotes rotativos. Sua capacidade detectiva é influenciada pela morfologia do defeito que se deseja selecionar. Já para maiores informações sobre as técnicas de inspeção por correntes parasitas, partículas magnéticas e inspeção visual recomendam-se o site da Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção (ABENDE 2006).

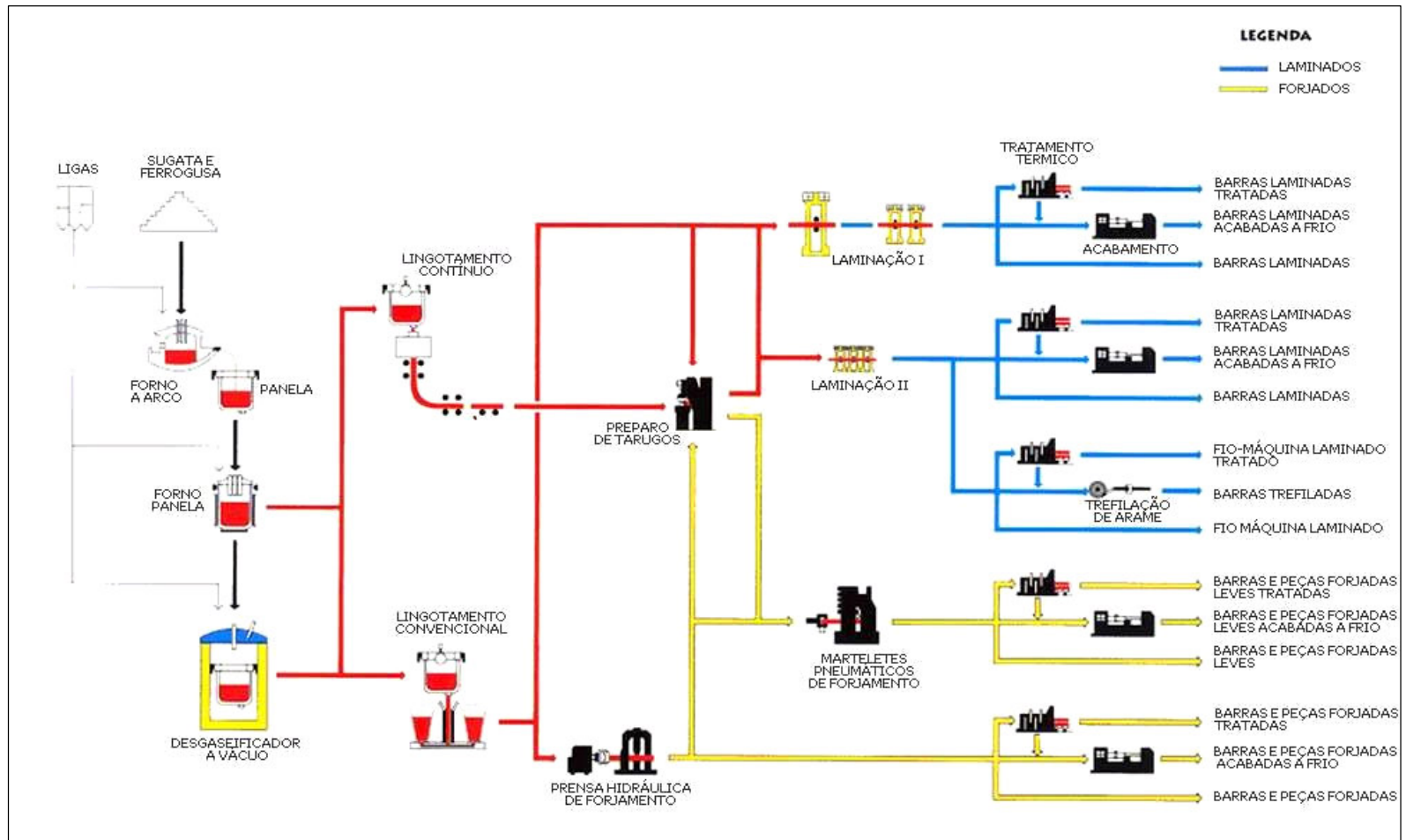


Figura 2.1 Fluxograma de produção da usina GERDAU – Aços Especiais Piratini.

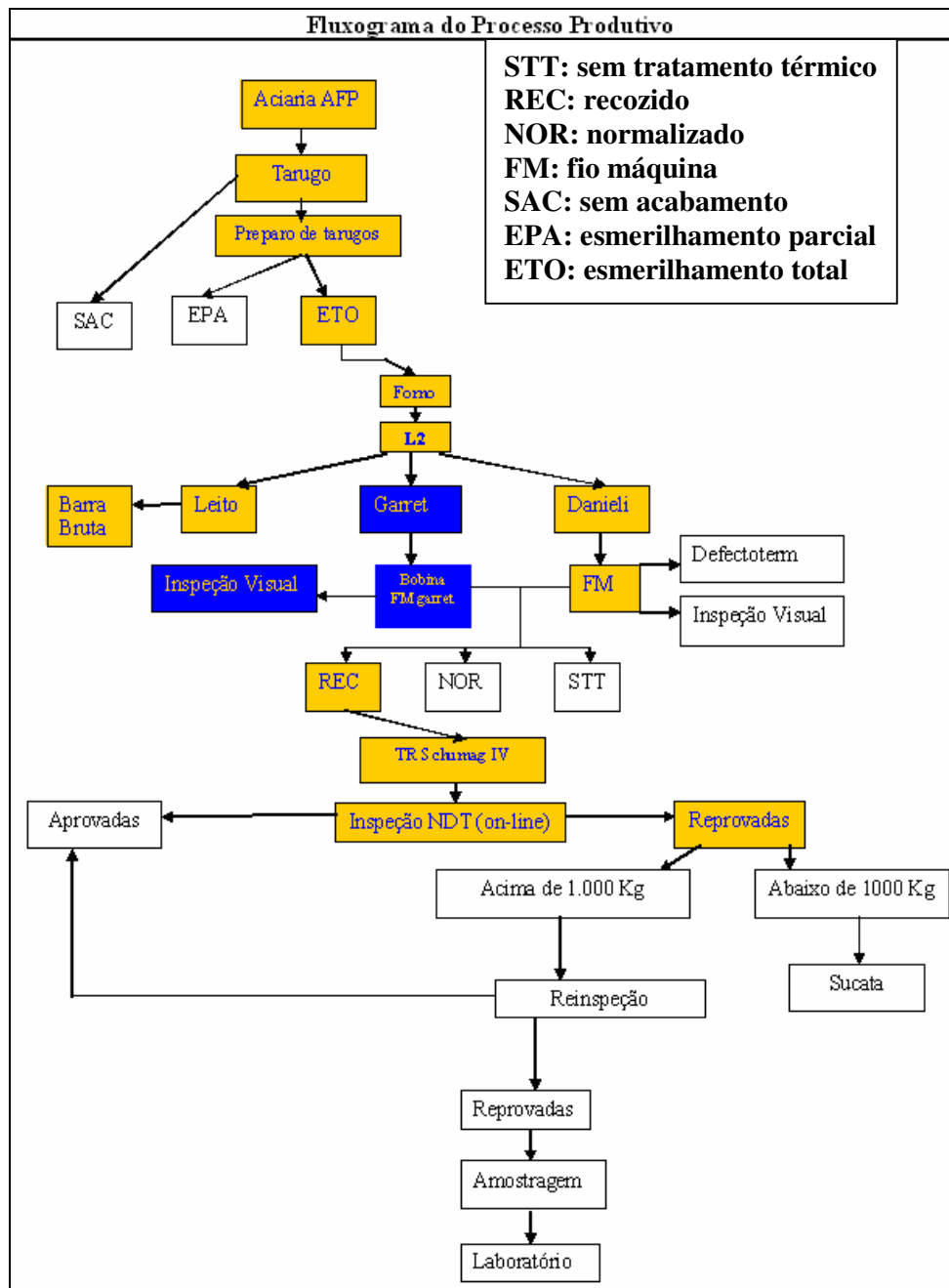


Figura 2.2 Fluxograma do processo produtivo demonstrando os locais onde são realizadas as inspeções para detecção dos defeitos superficiais.

2.2 Tipos de Defeitos Superficiais em Barras Trefiladas

Após o acompanhamento de várias inspeções para se detectar os defeitos superficiais e através índice de sucateamento, pode-se concluir que os principais defeitos superficiais encontrados nas barras trefiladas são os seguintes: trincas, dobras, riscos, carepa incrustada, marcas de manuseio e escamas. E segundo American Iron and Steel Institute – (AISI) os defeitos citados têm a seguinte definição.

2.2.1 Trincas

São descontinuidades que penetram no produto de forma perpendicular ou oblíqua em relação à superfície do material, conforme a Figura 2.3, variam no comprimento e normalmente são retilíneos 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.

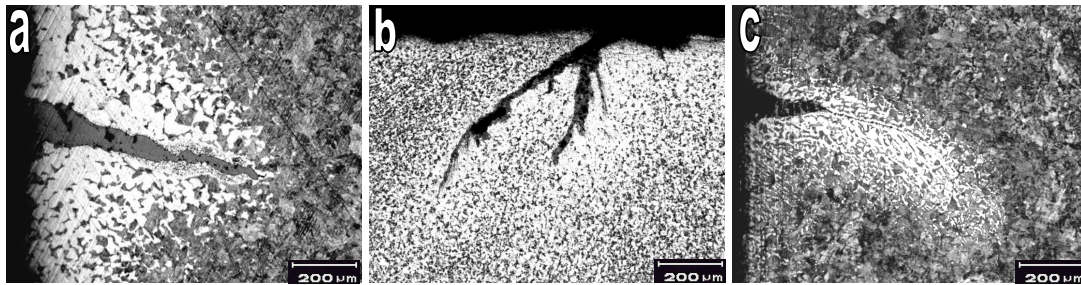


Figura 2.3 Micrografia demonstrando o defeito superficial tipo (a) trinca com óxidos ao longo de defeito, em região descarbonetada, (b) trinca preenchidas com óxidos de forma contínua, descarbonetada e (c) trinca preenchida por óxidos alongados, óxidos globulares na continuidade e descarbonetado. Ataque nital 2%. [Álbum de defeitos Superficiais GERDAU – Aços Especiais Piratini]

2.2.2 Dobras

Dobras conforme visto na Figura 2.4, são fendas longitudinais inclinadas pelo menos 30° em relação aos planos radiais, criadas por laminação durante o trabalho a quente. Uma descontinuidade longitudinal na barra, pode existir antes desta laminação, mas o defeito é usualmente originado mesmo no seu processamento mecânico. As dobras são descontinuidades que se desenvolvem na superfície de produtos laminados, penetrando de maneira mais ou menos oblíqua para o interior. São normalmente compridas (ao longo do fio-máquina) e às vezes aparecem como linhas duplas paralelas. É um defeito essencialmente ligado à laminação.

Faz-se detecção visual das superfícies decapadas, jateadas ou laminadas a quente. Dobras exibem aparências irregulares, longitudinais e, ocasionalmente, curvas. Lixando-se a seção com o defeito, as dobras “deslocam-se” ao redor da circunferência com profundidade cada vez maior. As dobras geralmente ocorrem unitariamente ou em pares separados em ângulos de 180°, ou ainda como uma linha dupla de dobras adjacentes. Um exame microestrutural mostra a natureza oblíqua do defeito, com descarbonetação maior na porção superior. A determinação da profundidade, comprimento, orientação e forma do defeito dão uma indicação mais precisa da origem da dobra. Se duas dobras estão separadas a 180°, a profundidade da dobra pode indicar em que ponto da laminação o “overfill” (enchimento excessivo) ocorreu. Ensaio de compressão axial do material dobrado geram um entalhe longitudinal. Ensaio de torção podem detectar dobras com pequeno número de ciclos.

Qualquer descontinuidade longitudinal abrupta pode transformar-se numa dobra na laminação. “Overfill”, riscos ou marcas de acondicionamento são fontes típicas que devem ser eliminadas. Alargamento não-uniforme resulta em rugas que podem se transformar em dobras. Ações corretivas incluem aquecimento mais uniforme, redução da forma romboédrica do produto a ser laminado, seleção de seqüências de laminação menos severas e redução da tensão entre passes. Para se evitar a formação das dobras os seguintes fatores devem ser observados: qualidade do produto a ser laminado, evitando defeitos internos e de acondicionamento; calibragem e regulagem do trem (perfis, guias, cilindros, tubos, etc.); regularidade na velocidade de laminação e na distribuição de temperaturas.

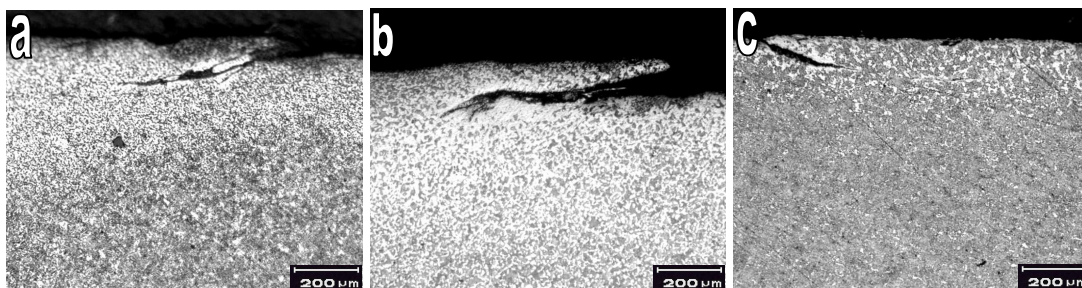


Figura 2.4 Micrografia demonstrando o defeito superficial tipo dobra. Ataque nital 2%. [Álbum de defeitos Superficiais GERDAU – Aços Especiais Piratini]

Dobras não são causadas pela composição química do aço, sendo geralmente resultado de práticas inadequadas de laminação. A geometria da seção do tarugo usado é um fator importante na prevenção desse defeito. Devem ser evitadas arestas vivas no perfil

a ser laminado, proveniente, por exemplo, de um condicionamento imperfeito do semiproduto e riscos profundos no produto provocados por guias, tubos, etc.

2.2.3 Riscos

São depressões de formato irregular, conforme a Figura 2.5, contínuos na direção longitudinal, tem forma e dimensões variáveis de acordo com a origem dos defeitos. Forma-se quando o produto quente raspa sob pressão em cantos vivos que podem ser superfícies não planas dos condutos de guias nas quais se depositam carepas ou partículas de produto laminado, guias mal usinadas, gastas ou quebradas. Podem se observados a olho nu ou com pequeno aumento mesmo com carepa e melhor ainda no produto decapado. Na metalografia os riscos são visualizados na forma de cavidades na superfície do corpo de prova. Contrariamente às trincas e dobras, os riscos raramente provocam rupturas em testes de recalçamento a quente ou a frio.

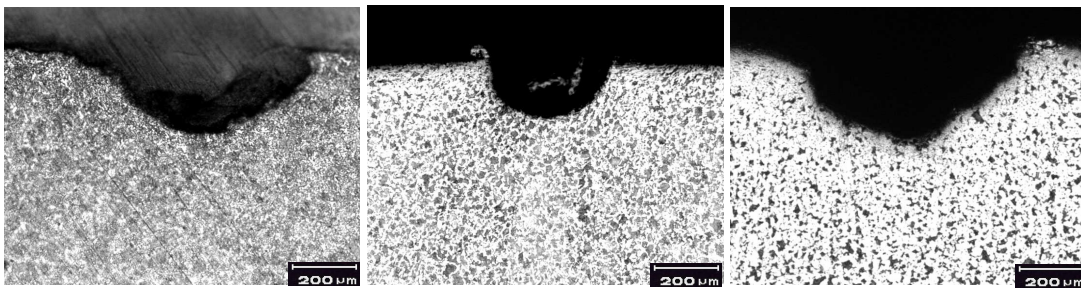


Figura 2.5 Micrografia demonstrando o defeito superficial tipo risco. Ataque nital 2%. [Álbum de defeitos superficiais GERDAU – Aços Especiais Piratini]

2.2.4 Carepa Incrustada

Carepa incrustada, vista na Figura 2.6, forma uma impressão irregular na superfície de uma barra e é causada por decapagem incompleta depois do reaquecimento. O defeito tem largura considerável e aparece irregularmente quanto à forma e dimensões. Se a carepa incrustada for desalojada da superfície, pode dar lugar a uma superfície cheia de pites nas barras laminadas a quente. Frequentemente, uma barra exibirá ambas as condições.

Depois da detecção visual de carepa incrustada, fricciona-se uma ferramenta abrasiva para remover uma espessura de carepa uniforme, revelando-se abaixo uma

superfície irregular. A carepa é frágil; se o material for dúctil, pode-se tratar de gota fria. Análise microscópica confirmará a natureza arredondada da impressão. Análises por microsonda em microscopia eletrônica de varredura podem ser usadas para verificar a composição química do material incrustado.

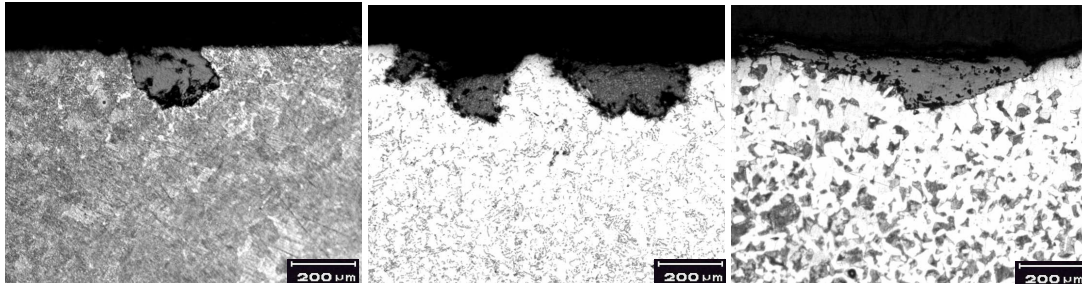


Figura 2.6 Micrografia demonstrando o defeito superficial tipo carepa incrustada. Ataque nital 2%. [Álbum de defeitos Superficiais GERDAU – Aços Especiais Piratini]

A ocorrência de carepa incrustada é mais dependente da aderência e não da quantidade de carepa primária produzida. A aderência da carepa é uma função da composição química do aço, das práticas de aquecimento e da condição superficial inicial dos tarugos a serem laminados. A minimização do tempo em elevadas temperaturas usualmente reduz a quantidade total de carepa, mas não impactará, necessariamente, na aderência da carepa produzida. Modificações no “design” dos cilindros podem promover quebra e remoção mais completa da carepa.

Carepas incrustadas resultam em irregularidade larga, arredondada e pouco profunda, em comparação com os pites de corrosão.

2.2.5 Marcas de Manuseio

São defeitos com descontinuidades, conforme a Figura 2.7. Podem ser sobrepostos na superfície formando uma escama encruada e sem a presença de óxidos. Portanto, indicações de deformação a frio (deformação plástica) devem ser observadas.

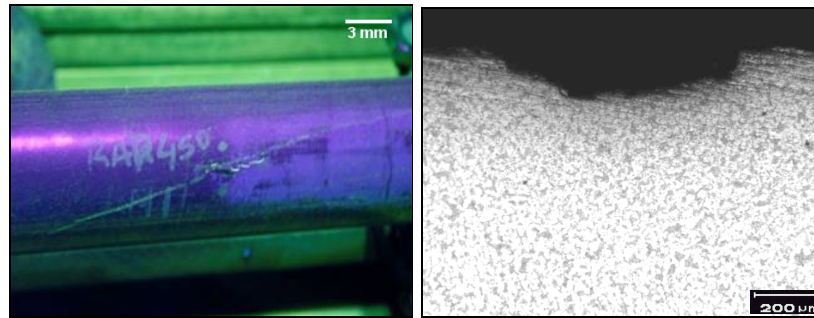


Figura 2.7 Análise realizada com Magnaflux e micrografia mostrando o defeito superficial tipo marcas de manuseio. [Álbum de defeitos Superficiais GERDAU – Aços Especiais Piratini].

2.2.6 Escama

Nesta parte do trabalho foi realizada uma avaliação das caracterizações utilizadas para definir o defeito superficial tipo escama por dois institutos de pesquisa (American Iron and Steel Institute -AISI e o Instituto Argentino de Siderurgia -IAS) e pela empresa GERDAU - Aços Especiais Piratini.

American Iron and Steel Institute - AISI

Escamas são segmentos alongados de metal ligados ao metal-base por uma extremidade apenas. Normalmente que foram aderidos por trabalho a quente à superfície, sendo comuns em aços de baixa resistência (facilmente deformáveis), com altos teores de S, Pb ou Cu.

Escamas são geralmente detectadas visualmente. Podem ser detectadas também passando uma toalha de papel pela superfície do produto polido. Se o papel for agarrado pela superfície, escamas estão presentes. A análise microscópica revela anomalias: como óxidos, inclusões não-metálicas, pits de escória presentes no defeito ocasionando a ruptura da superfície. Retificação pode expor uma escama a superfície e torná-la mais proeminente.

Escamas podem se originar de defeitos pontuais curtos na laminação ou por defeitos que não foram removidos no condicionamento de tarugos. Rebarbas ou estrias profundas do tarugo condicionado podem causar escamas e devem ser evitados. Qualquer

esmerilhamento profundo deve ser executado gradualmente. Goivamento mecânico severo nos cilindros de laminação podem se transformar em escamas com laminação adicional. Escamas parecem ser mais comuns com maiores velocidades de laminação. Tornando a operação de laminação mais lenta, pode-se ajudar um pouco na redução da frequência de escamas. As escamas observadas em semiprodutos são, normalmente, evoluções de defeitos em lingotes ligados à fabricação e lingotamento do aço. Há, também, casos de escamas provenientes da exposição e oxidação de bolhas sub-superficiais nos fornos de reaquecimento. Os fatores que durante a laminação são apontados como suscetíveis de originar as escamas são principalmente: riscos no produto laminado e calibragem defeituosa. Picos nos cilindros em passes primários e temperatura de laminação incorreta também podem ser citados.

Indícios da origem das escamas no processo de laminação podem vir do processamento prévio do material, da configuração dos cilindros, da composição química e das práticas de aquecimento. Variações na frequência de escamas de ordem a ordem ou de aquecimento a aquecimento indicam que as escamas provavelmente não se originam na laminação.

Instituto Argentino de Siderurgia - IAS

Escamas são pequenos segmentos de metal ligados ao material em apenas um dos lados. Trabalhados a quente para dentro da superfície. Acontecem comumente em aços com baixa resistência (com alto teor de enxofre, chumbo ou cobre). A sua detecção é visualmente fácil. Exame microscópico pode revelar anomalias (inclusões não-metálicas, bolsas de óxidos, etc.) que causaram ruptura superficial. O endireitamento pode expor a escama a superfície.

- São defeitos pontuais e podem ser originados por laminação a quente;
- São saliências profundas pelo acondicionamento de tarugos;
- Arrancamentos mecânicos severos no laminador podem se tornar escamas após laminação subsequente;
- Estes defeitos parecem ser mais prováveis em laminadores com maiores velocidades.

O defeito tipo escamas se assemelha com o defeito superficial tipo Shell. Este defeito é devido a respingos ou fervura nos moldes de lingotamento. Podem ser também devido a inclusões não-metálicas grosseiras, logo abaixo da superfície do lingote, trincas transversais e longitudinais associadas a defeitos de lingotamento por causa da temperatura imprópria de lingotamento. Normalmente são imperfeições no condicionamento dos tarugos ou semiprodutos, escorregamento do estoque, ou ainda danos oriundos de passes de rolos excessivamente usados.

GERDAU - Aços Especiais Piratini

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, conforme a Figura 2.8. Geralmente, o intervalo entre o material e a escama está preenchido com óxidos. Pode ter diversas origens, desde a aciaria (marcas profundas, descarbonetadas, com presença de óxidos e de oxigênio), laminação (participação dos fornos de reaquecimento, dos passes intermediários e até mesmo do acondicionamento dos tarugos). Os defeitos que mais contribuem para a formação de escamas são a peles duplas, as gotas frias e as rebarbas. 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 presença de óxidos.

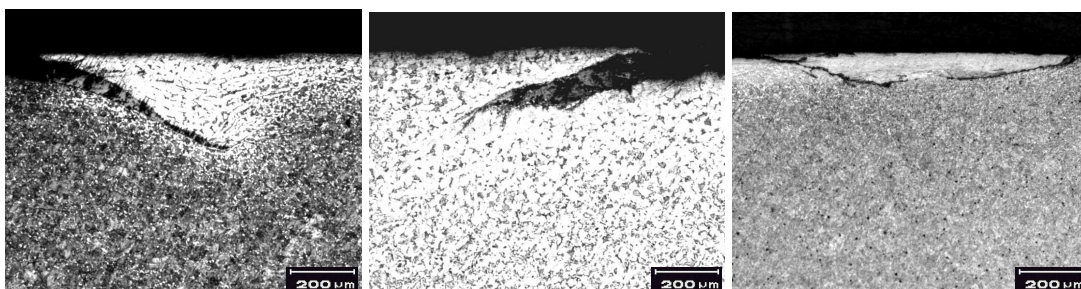


Figura 2.8 Micrografia demonstrando o defeito superficial tipo escama. (a) Origem Aciaria, (b) origem laminação e (c) origem marcas de manuseio. Ataque nital 2%. [Álbum de defeitos Superficiais GERDAU – Aços Especiais Piratini]

Segundo Outros Autores

Segundo Menezes (1980), escamas ou palhas são defeitos superficiais que tem o aspecto de lascas de materiais, tendo forma, distribuição e dimensões variadas. Uma característica geralmente observada é que o interior da escama do fio máquina apresentase, muitas vezes, preenchido com carepa ou substâncias não metálicas.

Yu (2002) refere-se à resistência da carepa e sua influência nos parâmetros da laminação como sendo um dos parâmetros que dão à origem do defeito superficial estudado. A carepa apresenta um potencial de gerar defeitos. Se as forças resultantes da laminação ultrapassam a resistência da carepa ela quebra e pode ser pressionada para dentro do substrato, dando origem a carepa incrustada.

Já Menezes (1980) observou que escamas podem ter diversas origens, desde a aciaria até a laminação final, incluindo a participação dos fornos de reaquecimento, dos passes desbastadores e, até mesmo, do acondicionamento do semiproduto.

As escamas observadas em semiprodutos são normalmente evoluções de defeitos em lingotes, ligados á fabricação e lingotamento do aço. Há, também, casos de escamas provenientes da exposição e oxidação de bolhas subsuperficiais nos tarugos durante o seu reaquecimento para posterior laminação.

Os defeitos de lingotamento que mais contribuem para a formação de escamas são: gotas frias, rebarbas e trincas (transversais).

Origem dos Defeitos Superficiais – Aciaria

Bommaraju (1992), Emling e Waugaman (1994), Chakraborty (1994), Prabhu (1990) entre outros, indicam que o defeito tipo escama na sua maioria é oriundo, principalmente, por parâmetros inadequados de aciaria, tais como incrustamento de: pó fluxante, escória, escória da panela ou do tundish no molde (reoxidação) e da presença de trincas de solidificação. E em pequena parte por defeitos oriundos de laminação (dobras). Sendo assim, tais parâmetros inadequados de aciaria e laminação são definidos da seguinte forma:

Escória

A presença de uma camada de escória durante as operações de fabricação do aço tem como objetivos diminuir as perdas térmicas do banho, protegê-lo da reoxidação e ajudar na remoção de elementos indesejáveis, como inclusões e impurezas (óxidos, enxofre), Mazumdar (1995) citado por Morales Et Al. (2006).

Durante a injeção de argônio pelo fundo da panela, com a finalidade de agitar o banho metálico, desenvolve-se uma coluna de bolhas que ao atingir a superfície do banho produz uma região descoberta na camada de escória denominada “olho” que permite a exposição do aço para o ar atmosférico (ver Figura 2.9a). Na prática industrial, o controle da abertura do olho na panela é extremamente importante, principalmente quando aços críticos são produzidos, pois por meio desta abertura o ar entra em contato com o aço líquido permitindo a ocorrência de reações de oxidação e a conseqüente formação de inclusões além de prejudicar a remoção de enxofre. (Han Whan Jeong Et Al., Yonezawa (2001), Schwerdtfeger (1999), Iguchi, Et Al. (2004) citados por Morales Et al. (2006))

Simultaneamente, quando se emprega altas vazões de gás, desenvolve-se na interface banho-escória uma região formada pela emulsificação da camada de escória no aço líquido (ver Figura 2.9b).

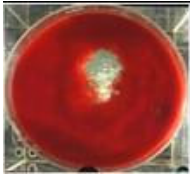

Vazão de Gás 17 NI/min	Vazão de Gás 39 NI/min
A 	B 
Espessura de camada 30mm	Espessura de camada 16mm

Figura 2.9 Modelo físico de uma panela siderúrgica agitada com gás. Visualização dos fenômenos: a) da abertura do “olho” da coluna de bolhas; b) emulsificação de escória. Posição de injeção de gás central. Simulador de escória: querosene pigmentado. [Morales Et al. (2006)].

A Figura 2.10 apresenta, de forma esquemática, a injeção de gás em uma panela de aço. Argônio (ou nitrogênio) é injetado no banho através de um plugue poroso (ou direcional), localizado na base da panela. O gás é injetado e, devido a sua menor densidade, emerge para a superfície livre, induzido com isso um escoamento turbulento e

recirculatório do líquido, sendo descarregado através da camada de escória. (Mietz et al, (1988) citado por Sicorski, (2006))

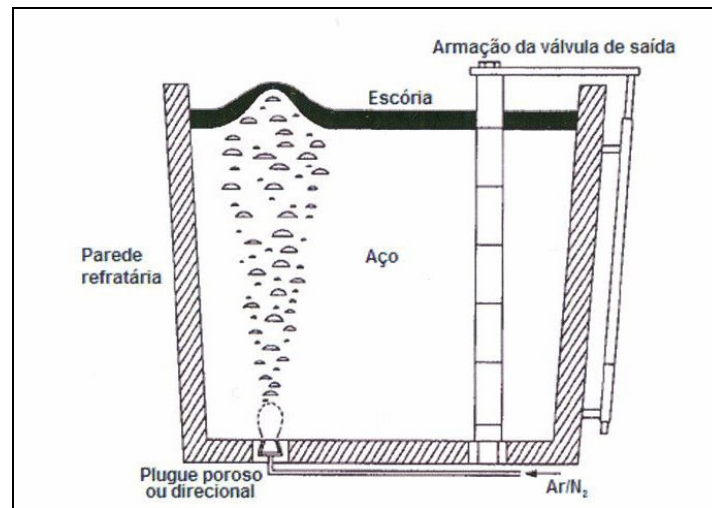


Figura 2.10 Esquema de uma injeção de gás de uma panela. [Mazumdar (1995) citado por Sicorski (2006)].

Nota-se, pela Figura 2.10, que os processos fluidodinâmicos envolvidos em sistemas de panelas agitadas por gás são numerosos. Eles são complexos devido à natureza tridimensional, turbulenta e multifásica (gás-metal e escória) do sistema.

Além disso, diversos fenômenos distintos podem ser identificados nesse sistema, como por exemplo: interações gás-líquido, o desenvolvimento de um movimento turbulento recirculatório induzido pela coluna de bolhas no aço líquido, a transferência de massa entre metal e escória nas vizinhanças da superfície livre e assim por diante.

A condição para que a escória torne-se emulsionada está representada esquematicamente na Figura 2.11 e pode ser explicada da seguinte forma segundo Mietz Et Al. (1991) citado por Morales Et al. (2006): “na região da coluna de bolhas, acima da posição do injetor, o gás ascende como bolhas produzindo na sua chegada à superfície do banho a abertura do “olho”. Nesta zona o escoamento do líquido é direcionado radialmente, sendo que no contorno do olho a escória é acelerada para baixo, produzindo um vetor velocidade oblíquo direcionado para o fundo. A força de inércia atuante sobre a escória gera a deformação do contorno da mesma, enquanto a força de flutuabilidade e a força superficial atuam em sentido oposto estabilizando-a. Assim a emulsificação é produzida quando a força de inércia do líquido excede a soma das forças de flutuabilidade e superficial”.

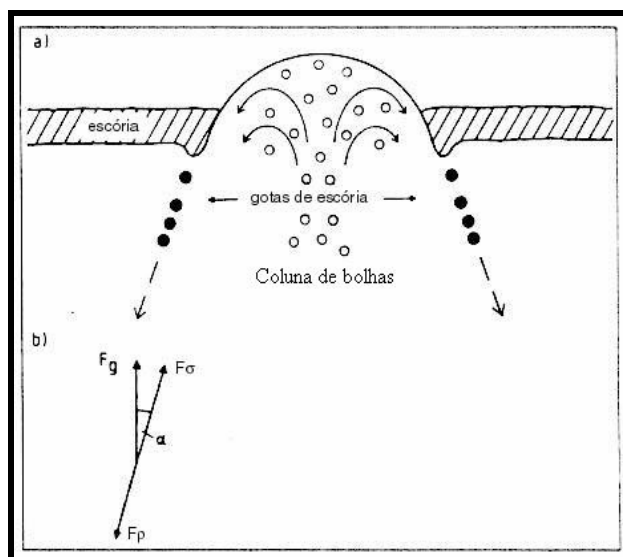


Figura 2.11 - Desenho esquemático: a) princípio de emulsificação de escória na panela de aço b) equilíbrio entre as forças de inércia F_p , força de empuxo $F_g \cos \alpha$, e força superficial F_σ no ponto de desprendimento da gota. [Wei, Oeters (1992) citado por Morales Et al.(2006)].

Segundo Thomas e Cai (2002), o argônio é utilizado para realizar a agitação da panela fazendo com que as inclusões formadas na etapa da desoxidação do aço flutem para escória sobrenadante. O gás argônio também é utilizado para prevenir a reoxidação do aço líquido nas suas etapas de fabricação, conforme a Figura 2.12.

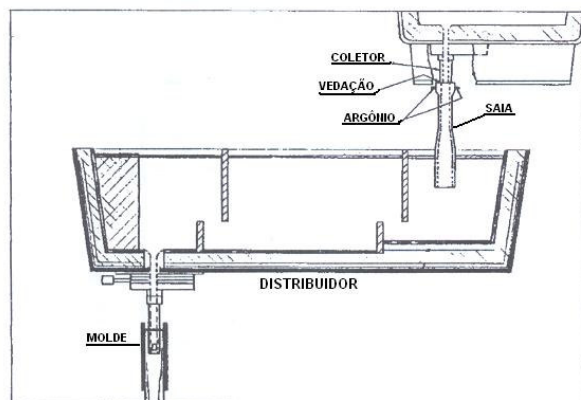


Figura 2.12 Ilustração esquemática da panela e do distribuidor (Thomas e Cai 2002).

Esta reoxidação é evitada utilizando-se saias de proteção com canais onde passam este gás de proteção. Normalmente a reoxidação acontece nas etapas de transferência do aço líquido da panela para o distribuidor e do distribuidor para o molde (lingoteira).

Estudo realizado por Bonilla (1995) demonstrou um alto nível de oxigênio durante longos períodos de agitação (de mais de 20 minutos) e durante uma agitação excessiva. Os níveis de oxigênio provaram ser maiores em panelas que foram várias vezes utilizadas porque seus tijolos refratários estavam desgastados produzindo mais borbulhamento que o necessário. O aço que foi exposto a longos períodos de agitação mostrou altos níveis de oxigênio devido ao arraste da escória sobrenadante.

Ainda Bonilla (1995), comenta que após esta etapa a panela é abaixada sobre o tundish com uma saia de proteção direcionando o jato de aço para a parte inferior do tundish. Neste caso, a empresa não utilizava a válvula tampão, Figura 2.13, portanto, a velocidade de lingotamento é controlada pelo nível do aço do tundish. O nível de aço, por sua vez, é controlado pela abertura da válvula no interior do tundish. O lingotamento iniciava assim que o molde estava cheio de aço.

Tempos muito longos para encher o molde significam propriedades fluidas do aço muito pobres para iniciar o lingotamento, com o que uma grande parte do aço é exposta ao ar ambiente. Estes fatores promovem uma reoxidação e inclusões, desde que as inclusões não têm a oportunidade de flotar. Arraste de ar pelo jato de aço que está sendo vazado é a maior causa de reoxidação.

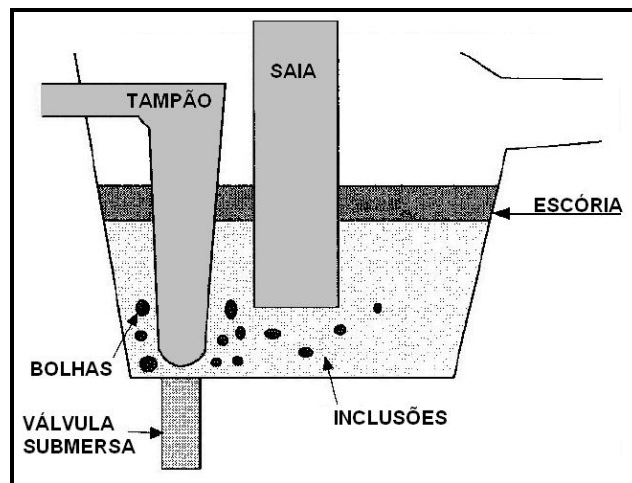


Figura 2.13 Ilustração do arraste de inclusões com o borbulhamento de gás inerte (Bonilla 1995).

Escória da Panela e do Distribuidor

Herrera e Santos (2005) comentam que inclusões de alumina foram por muitos anos um dos principais problemas na produção de aços de alta qualidade acalmados com

alumínio. Isto devido à presença de aglomerados de alumínio presentes nas zonas próximas à superfície de tarugo, originando escamas ou até mesmo buracos na etapa posterior de laminação.

Zhang (2006) relata o tipo morfológico e as origens das inclusões nos aços, incluindo inclusões endógenas e exógenas. Inclusões endógenas são produtos de desoxidação ou inclusões precipitadas durante o resfriamento e solidificação do aço. Inclusões exógenas são produtos da reoxidação e interação mecânica do aço líquido com a sua vizinhança (arraste de escória e erosão do refratário).

Herrera e Santos (2005) também observam que no processo de produção do aço a formação de alumina tem duas principais fontes: a primeira como um produto da desoxidação do aço quando usado alumínio como agente desoxidante, que dão o formato das inclusões no aço conhecidas como endógenas; e segundo como um produto de reoxidação do aço durante etapas do processo, quais são conhecidas como exógenas.

Alumina como um Produto do Processo de Desoxidação

Alumínio é um dos elementos mais usados para controlar o oxigênio presente no aço. Este processo de desoxidação com alumínio segue as seguintes reações: $\text{Al (s)} \rightarrow \text{Al (l)} \rightarrow \underline{\text{Al}}$ (alumínio dissolvido no aço) e $2\text{Al} + 3\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ (s)}$ (reação do alumínio com o oxigênio dissolvido), ou seja, $3\text{FeO} + 2\text{Al} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$.

Inclusões remanescentes no aço líquido devem ser modificadas de formato para inclusões globulares líquidas para facilitarem sua remoção para escória. Esta transformação é realizada através da adição do elemento cálcio transformando a alumina em um cálcio aluminato. Este cálcio aluminato formado é forçado a flotar para escória sobrenadante através da injeção do gás argônio na panela. A injeção de argônio é realizada na panela para homogeneizar o banho, capturar e arrastar as inclusões para escória sobrenadante.

Alumina como um Produto do Processo de Reoxidação

O aço após sua desoxidação é exposto a muitas fontes de oxigênio durante o processo de fabricação. Esta exposição forma inclusões de alumínio com, por exemplo,

galaxita ou espinélio que geralmente são maiores e que apresentam maiores riscos na qualidade superficial final do produto. Estas são dificilmente eliminadas, pois são formadas muitas vezes no final do processo de fabricação do aço. Como por exemplo: na etapa de vazamento do aço líquido da panela para o distribuidor.

Segundo Chakraborty e Hill (1994), o alumínio é adicionado no aço líquido para reduzir FeO na escória e gerar alumina. Através de correntes de convecção térmica induzidas na panela por perdas de calor esta redução do FeO pela alumina é facilitada. Esta corrente de convecção térmica faz com que o alumínio seja sempre utilizado para reoxidar na interface escória/metal e esta alumina gerada é carregada por correntes convectivas com ilustrado na Figura 2.14.

Este processo inicia após a completa desoxidação do aço quando o alumínio solúvel se torna livre para reoxidação, persistindo apesar do período de vazamento da corrida para o distribuidor. A alumina é transferida para o distribuidor, uma parte da alumina flutua em cima na escória, enquanto outra fração esta depositada no bocal do distribuidor e tubos. Isto contribui para formação de defeitos internos.

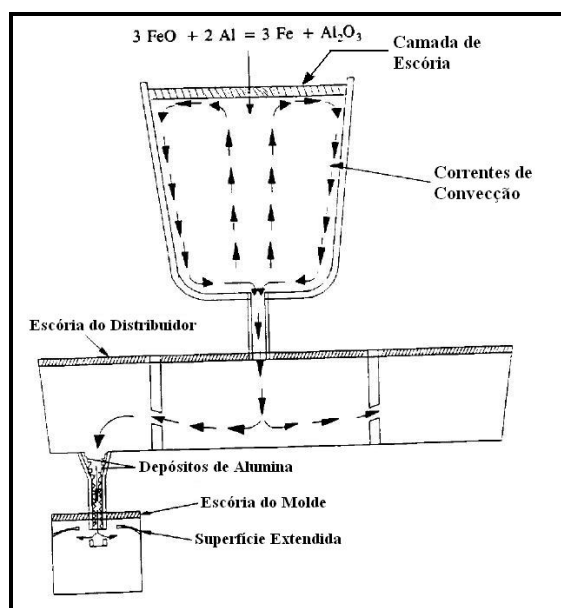


Figura 2.14 Representação esquemática do mecanismo proposto, por Chakraborty e Hill (1994), para geração de alumina.

O depósito de alumina nas válvulas e tubos conduz a uma obstrução progressiva conforme se aumenta o número de corridas. O aglomerado de alumina deve ser tirado da válvula submersa durante o lingotamento. Devido a apreciáveis forças de flotação os

tamanhos macros de aglomerados de alumina tendem a flotar em direção da superfície do tarugo que se incrustam na frente de solidificação. Estes aglomerados de alumina subsuperficiais fraturam durante subsequente trabalho a frio ou a quente e se transformam em uma linha longa de defeitos superficiais chamados de escamas. Estes ficam localizados na linha central devido à distribuição preferencial do distribuidor.

Se for realizado o desentupimento da válvula submersa com injeção de gás inerte (rooding) tem-se a formação de blowholes. Blowholes são bolhas de gás retidas durante etapa de solidificação. Logo, a presença de blowholes indica alta oscilação do nível de aço líquido no molde, devido à presença de aglomerados de alumina. Indicando que há um entupimento dos tubos e válvulas por esta alumina.

Segundo Thomas e Cai (2002), o processo de lingotamento contínuo envolve muitos fenômenos, mostrados na Figura 2.15, os quais têm conseqüência de longo alcance na qualidade do produto. Inclusões levadas para o molde através da válvula submersa incluem produtos de desoxidação, produtos do entupimento da válvula e arraste da escória do distribuidor/panela (reoxidação por SiO_2 , FeO , MnO na escória), e produtos de reoxidação a partir de absorção de ar por vazamentos na válvula. Escória do molde pode ser arrastada por velocidade excessiva de vazamento na parte superior ou por flutuações no nível do molde. Novas inclusões podem precipitar como gotas superaquecidas, tais como inclusões de TiO_2 em aços ao Titânio. Por outro lado, inclusões podem ser removidas para a interface escória/aço por flutuação, transporte de fluxo líquido e aderência na superfície de bolhas. O molde é o último passo no refino onde as inclusões ou são seguramente removidas para a camada superior de escória ou elas são capturadas na casca em solidificação para formar defeitos permanentes no produto.

Segundo os experimentos realizados Nakamura (1992), utilizando-se um modelamento físico simulando condições de lingotamento com e sem injeção de gás, foram observados os seguintes mecanismos: sem injeção de gás ocorre o arraste junto à saída da válvula, se esta está pouco submersa e junto à parede do molde, devido à recirculação do metal líquido; com a injeção de gás o padrão de recirculação modifica-se e forma-se uma espuma com o gás que sobe junto à válvula.

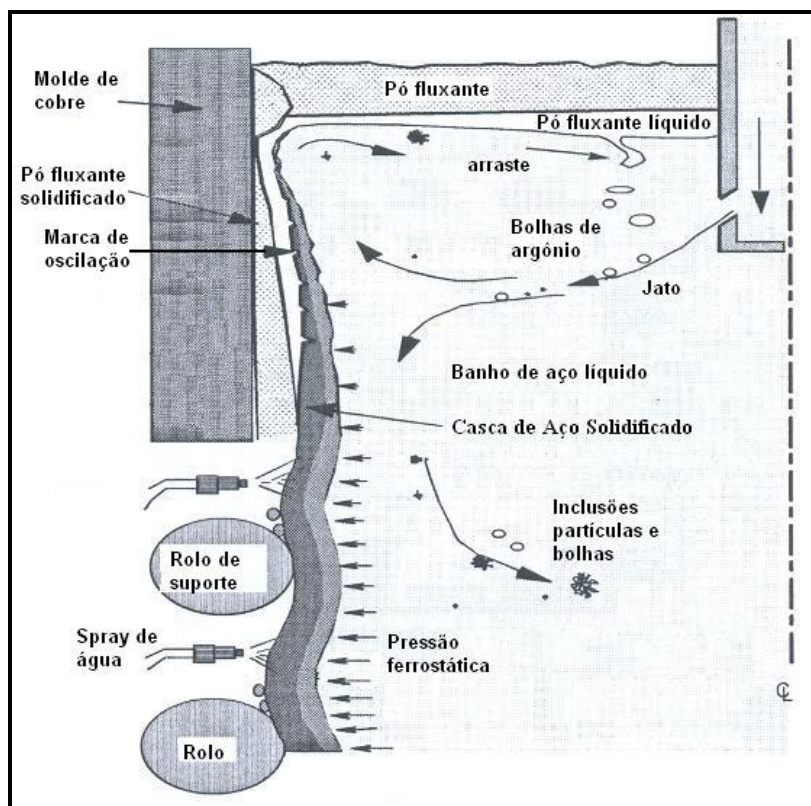


Figura 2.15 Fenômenos que acontecem no lingotamento contínuo segundo Thomas e Cai (2002).

Eventualmente esta espuma aproxima-se do bocal de saída da válvula, sendo arrastada pelo fluxo de metal líquido.

Emling e Waugaman (1994) determinaram como os defeitos superficiais ocorrem em equipamentos de lingotamento contínuo curvo para produtos planos (placas). Durante o processo de lingotamento contínuo inclusões ou bolhas de gás podem ser capturadas na frente de solidificação no raio interno, quando elas são carregadas abaixo do ponto de captura, conforme a Figura 2.16. Logo, o ponto de captura seria o local preferencial de captura de inclusões durante o lingotamento de produtos planos (placas). Antes de serem capturadas inclusões podem se aglomerar em torno das bolhas de gás que estão subindo. E durante subsequente recozimento o gás capturado pode expandir causando um empolamento superficial conforme a Figura 2.17.

Para melhorar a distribuição das inclusões e o arraste das bolhas pode-se providenciar um maior comprimento vertical. Emling e Waugaman (1994) sugerem que um comprimento vertical antes da curvatura para melhor flotação das inclusões seria em torno de 2,5 à 3m para placas.

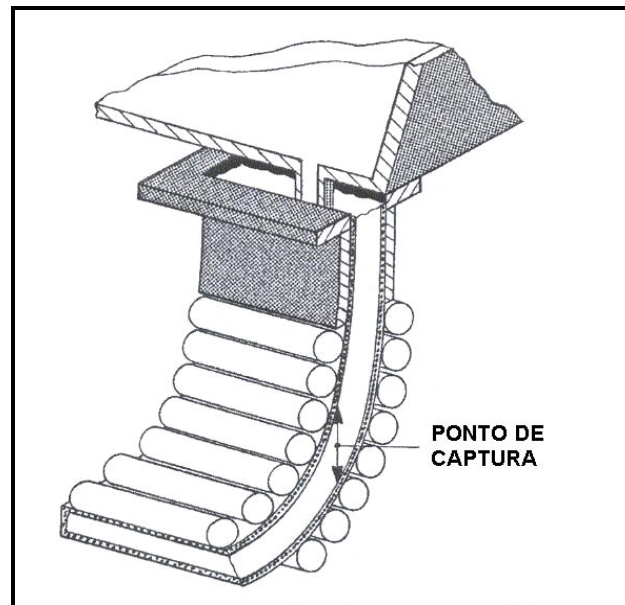


Figura 2.16 Esquema demonstrando o ponto de captura de inclusões/gás por bolhas no na região curva do lingotamento contínuo de placas, segundo Emling e Waugaman (1994).

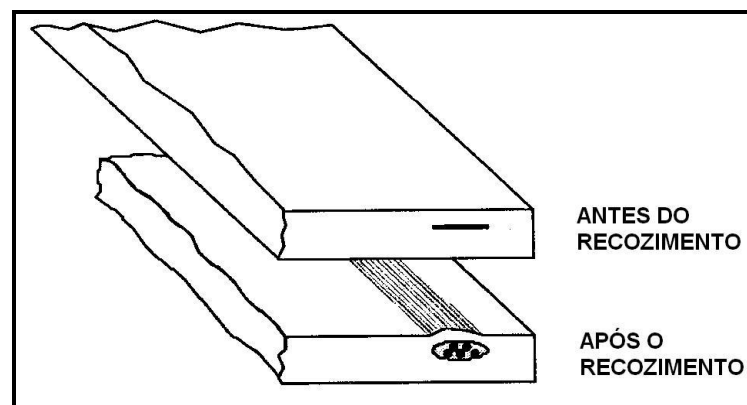


Figura 2.17 Ilustração de como o defeito subsuperficial pode empolar após recozimento devido à presença de gás capturado, segundo Emling e Waugaman (1994).

Emling e Waugaman (1994) ainda citam que os principais formadores de blowholes seriam: a velocidade de vazão do aço líquido na região do menisco na etapa de lingotamento contínuo e a profundidade de penetração da válvula submersa. Se a penetração na válvula submersa for muito próxima da interface escória/aço os padrões de circulação na saída da válvula irão arrastar a escória para dentro do aço líquido e misturá-las, conforme a Figura 2.18.

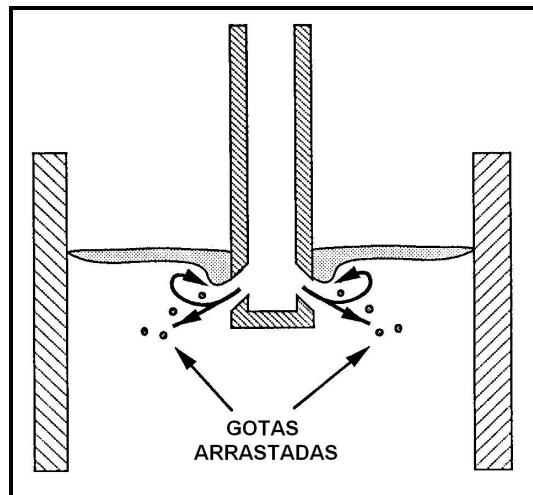


Figura 2.18 Ilustração do mecanismo de arraste de partículas do pó fluxante para o aço líquido, segundo Emling e Waugaman (1994).

Segundo mecanismo de incrustamento de arraste da escória nas proximidades da parede do molde ocorre quando a formação de vórtices devido a uma alta velocidade de lingotamento, conforme a Figura 2.19.

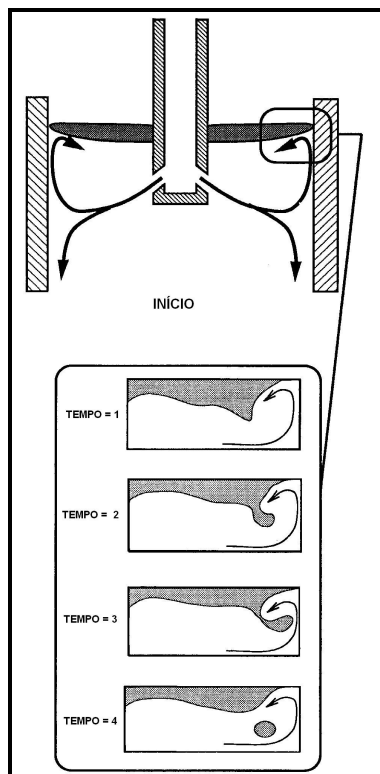


Figura 2.19 Ilustração do mecanismo de arraste de partículas da escória do molde devido a alta velocidade de lingotamento, segundo Emling e Waugaman (1994).

Ainda Chakraborty e Hill (1994) afirmam também que a porcentagem de FeO na escória tem uma relação direta com porcentagem de alumina no banho. Quanto mais FeO na escória mais alumina terá no banho.

Pó Fluxante do Molde

Segundo Bommaraju (1992), as escamas são predominantemente inclusões não metálicas complexas incrustadas no aço durante o processo de lingotamento e solidificação. Inclusões não metálicas complexas incrustadas são devidas à interação do pó fluxante no aço líquido, especialmente nas vizinhanças da válvula submersa. Esta interação pode ser teorizada em termos de: arraste do pó fluxante líquido para dentro do aço líquido e adesão do mesmo sobre a camada solidificada. Isto acontece devido a duas causas: interação mecânica e a reação química ocorrendo na interface escória/metál. A alta velocidade de vazão do aço no molde por um lado pode arrastar e incrustar o pó fluxante líquido no tarugo. Por outro lado, onde há baixa velocidade do aço, vórtices que puxam a escória para dentro do aço podem ser criados.

A intensa transferência de massa na interface escória/aço dá lugar a uma turbulência interfacial devido à diminuição da tensão interfacial para um mínimo gerada pelo um gradiente de temperatura. Esta turbulência pode misturar a interface escória /metal. Sendo assim, a dispersão de escória no aço líquido se torna extremamente fácil durante tal estado, conforme a Figura 2.20.

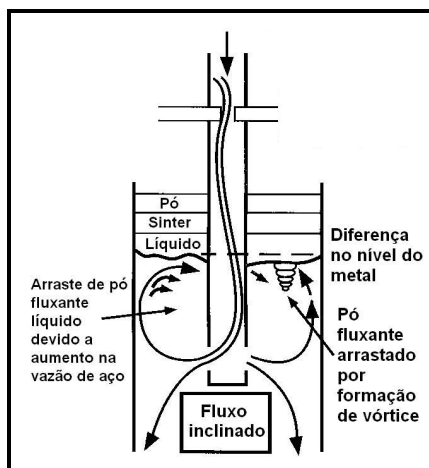


Figura 2.20 Esquema demonstrando o fluxo inclinado na lingoteira causando vórtices e arraste do pó fluxante, segundo Bommaraju (1992).

De maneira a vencer o arraste e penetração da escória do molde para o aço líquido, é importante aumentar a tensão interfacial entre a escória e o aço. A tensão interfacial entre as duas fases é não somente dependente das tensões superficiais individuais com a interface gasosa, mas também com as espécies presentes na interface em virtude das trocas químicas. Gaye et ali. citado por Bommaraju (1992), colocam que tensões interfaciais são reduzidas drasticamente com introdução de espécies ativas superficialmente tais como enxofre e oxigênio.

A dispersão de escória do molde líquido para a fase de aço líquido devido à turbulência interfacial resultante de reações químicas na interface, pode ser minimizada pelo aumento da viscosidade do pó fluxante. Juntamente com isto, entretanto, deve ser colocado que mudanças na viscosidade devido à interação entre o aço e o pó fluxante devem ser levadas em consideração antes de projetar-se a composição do pó fluxante do molde.

A presença de inclusões não-metálicas complexas em camadas subsuperficiais no lingote pode ser relacionada com a adesão de pó fluxante líquido no “gancho” formado na região do menisco. A Figura 2.21a referem-se á possibilidade de ocorrência de solidificação sobre o menisco líquido, proposta inicialmente formulada por Thorton citado por Quaresma J. e Garcia M (1982).

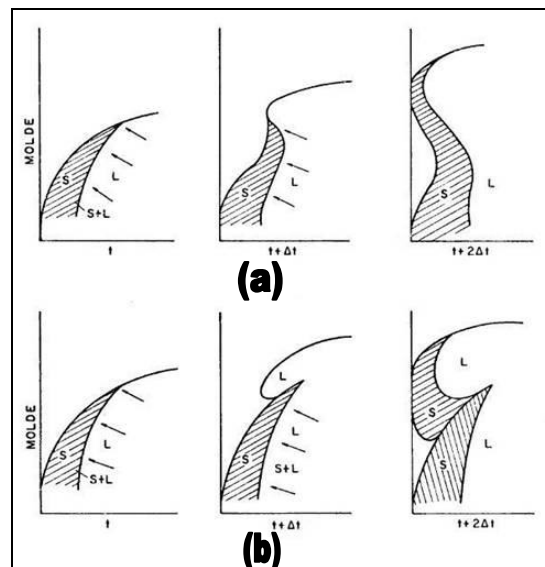


Figura 2.21 Ilustração da (a e b) formação de marcas de oscilação por dobramento de camada e fluxo de metal sobre o menisco, segundo Quaresma J. e Garcia M (1982).

Com o molde estático, a solidificação tem início a alguns milímetros do molde, e durante o movimento descendente do lingote deve deformar-se para se adaptar à forma de equilíbrio do menisco. Se a pressão metalostática for insuficiente para vencer a resistência desta camada sólida no sentido de deslocá-la completamente em direção à parede do molde, a mesma será deformada somente de forma parcial, provocando a formação da marca superficial. Se a velocidade de vazamento for relativamente baixa, a solidificação sobre o menisco se realizará de forma extensiva, impossibilitando a deformação pela pressão do metal líquido. Nestas condições, este flui sobre a casca sólida preenchendo parcialmente o espaço entre o molde e o menisco, solidificando em seguida (Figura 2.21b).

O menisco de aço pode periodicamente solidificar em virtude de um superesfriamento do aço devido à alta transferência de calor existente no menisco. Quando o superaquecimento é baixo, esta condição é exacerbada. Pode ser postulado que se o pó fluxante líquido adere ao menisco solidificado ele pode ser incrustado abaixo do vale da marca de oscilação (Figura 2.22). Através de subseqüentes operações de laminação a quente e a frio, isto pode resultar em uma escama.

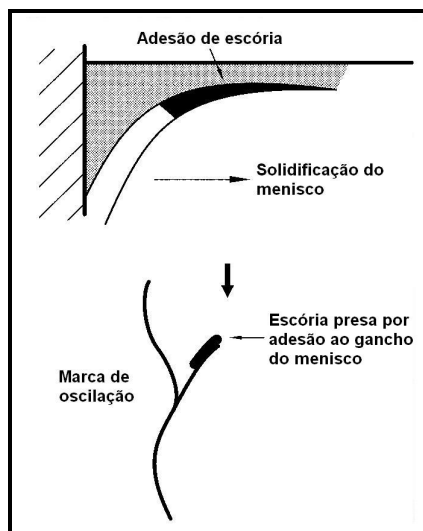


Figura 2.22 Esquema demonstrando a formação do gancho no menisco e adesão do pó fluxante no aço líquido, segundo Bommaraju (1992).

De modo a suprimir o incrustamento subsuperficial de escória ao menisco solidificado, é importante diminuir a adesão do pó fluxante no aço líquido. A adesão parece ser dependente do pó fluxante do molde para uma dada qualidade de aço. Trabalhos

recentes mostraram que aumentando a tensão superficial do pó fluxante ocorre uma redução na adesão.

É também benéfico suprimir a formação do gancho no menisco pela diminuição da profundidade das marcas de oscilação.

Segundo Quaresma J. e Garcia M (1982) o mecanismo responsável pela formação de marcas superficiais ou de oscilação em lingotes baseia-se fundamentalmente na ocorrência de solidificação antes do contato entre metal e molde, ou mais precisamente sobre o menisco formado pelo metal líquido. Logo, uma maneira de se evitar isso seria:

1. Utilizar ligas com maiores intervalos de solidificação, pois estas apresentam melhor qualidade superficial, enquanto ligas que apresentam ponto de transformação líquido – sólido o metal base apresenta piores qualidades de superfície;
2. Diminuir a taxa de transferência de calor entre metal e molde diminui o espaçamento e a profundidade das marcas superficiais;
3. Aumentar a temperatura de vazamento do aço;
4. Aumentar a velocidade de lingotamento.

Segundo Bommaraju (1992), uma maneira para suprimir a formação do gancho seria aumentando a viscosidade do pó fluxante no menisco. A tensão superficial de óxidos puros e fluoretos tem sido investigada. A base para formação de novos fluxos foi incorporar óxidos que tenham alta tensão superficial MgO, MnO, etc.

Recente trabalho tem mostrado que a adesão de pó fluxante líquido no aço sólido diminui com o acréscimo de Na₂O no pó fluxante.

Tsai (1990) e Funaoka, Tsuji e Yamana (2004) comentam que a incidência de escamas causadas por tarugos trincados devido a pó fluxante no resfriamento secundário (resfriamento que acontece na região com chuveiros na etapa do lingotamento do aço). Tsai (1990) comenta que para minimizar este problema ele trocou o pó fluxante granulado utilizado por um pó esférico oco semi-côncavo. O pó esférico tem uma densidade de corpo menor proporcionando um excelente isolamento do menisco formado durante o lingotamento do aço. Ele funde uniformemente e produz uma suave e mais uniforme taxa de transferência de calor do molde, o qual é essencial para a redução de trincamento

superficial. Prabhu e Pinkowski (1990) sugerem que escamas oriundas de tarugos trincados também indicam problemas na distribuição do pó no molde gerando tensões térmicas. Presença de K e Na é indicativo, mas não conclusivo da origem por pó fluxante.

Trincas

Segundo Menezes (1980) trincas são descontinuidades que partem da superfície do fio máquina, penetrando perpendicular ou obliquamente ao mesmo. Elas têm diferentes comprimentos e, em geral, são retilíneas podendo, entretanto ser oblíquas ou perpendiculares com relação ao eixo longitudinal do fio máquina.

Nas trincas de tarugos são observadas zonas descarbonetadas e a presença de carepa, indicando que ela existe antes do último reaquecimento ou, mostrando que se trata de uma trinca proveniente do lingote.

As trincas aparecem em lingotes como conseqüência de tensões a que ficam submetidas às camadas externas dos lingotes ao curso da solidificação. Estas tensões têm a seguinte origem:

- Tensão residual conseqüente da contração de resfriamento;
- Pressão ferrostática;
- Tensão de transformação;
- Tensões locais devido à irregularidade no resfriamento.

Existem diversos mecanismos propostos para explicar a formação de trincas. Muitos pesquisadores associaram esta ocorrência à existência de estruturas frágeis e de baixa resistência num domínio de temperatura logo abaixo da linha “solidus”. Estas estruturas, não resistindo às tensões normalmente existentes, romperiam formando trincas. O aparecimento de trincas ocorreria na vizinhança da linha “solidus”, no momento em que os filmes líquidos não pudessem mais alimentar as zonas interdendríticas com fortes concentrações de tensões.

Os tipos principais de trincas em lingotes são:

- Trincas transversais que aparecem, sobretudo, na metade inferior do lingote geralmente são perpendiculares ao seu eixo;
- Trincas transversais provocadas por um impedimento à retração normal do lingote quando da solidificação, a existência de rebarbas formadas pela infiltração do metal líquido em fissuras no molde de lingotamento, etc.
- Trincas longitudinais de ângulo;
- Trincas longitudinais de face de comprimento limitado;
- Trincas longitudinais, podendo se estender por toda a superfície de lingote.

As trincas transversais se formam ao curso da solidificação e por isso são denominadas trincas a quente. Elas ocorrem quando as tensões externas (solidificação perturbada) ou internas (principalmente a pressão ferrostática) ultrapassam a resistência da camada externa solidificada.

As trincas longitudinais, por sua vez, se formam a temperaturas relativamente baixas e são de natureza intergranular, o que conduz a pensar que uma fina rede de ferrita incapaz de resistir às tensões que ocorrem no resfriamento do lingote pode conduzir à formação destas trincas. Ao que tudo indica, entre os diversos fatores que contribuem para a formação de trincas longitudinais, a presença de Al é fundamental; além da diminuição da resistência a quente da ferrita, há o problema da formação de nitretos de (Al) que favorecem a formação de trincas.

São diversos os fatores que influenciam na sensibilidade à formação de trincas de um aço. Destacam-se principalmente o carbono e o alumínio. No caso do carbono alguns autores associam a maior tendência à formação de trincas em aços baixo carbono à transformação peritética que é acompanhada de uma contração de volume numa estreita faixa de temperatura.

Dos fatores ligados à elaboração e lingotamento do aço há que se ressaltar a influência do grau de desoxidação, da temperatura e velocidade de lingotamento. Para uma melhor superfície do lingote a desoxidação deve ser completa para evitar a presença de bolhas de gases subsuperficiais que aflorariam nos futuros reaquecimentos ou na laminação. No caso de aços efervescentes a menor ocorrência de defeitos superficiais é

explicada pelo desprendimento de CO e CO₂ à medida que o aço resfria no interior das lingoteiras.

A maioria das trincas existentes em semi-produtos e fio máquina são provenientes de trincas em lingotes. Porém, existem casos em que trincas podem decorrer de outros defeitos, podendo ser conseqüente de más condições de transformação.

Em qualquer caso, pode-se dizer que uma trinca aparece quando a resistência da camada superficial do material é inferior às tensões existentes. Por este motivo pode-se observar, quando da laminação, trincas resultantes de queimas localizadas ao curso de reaquecimento, de tensões excessivas devidas a cilindros rugosos, de resfriamento mais acentuado em ângulos muito fortes. Trincas podem aparecer quando o reaquecimento de lingotes ou semi-produtos não é uniforme e conduz a uma heterogeneidade na capacidade de deformação da seção reta.

Finalmente, muitos defeitos que aparecem quando da laminação têm sua origem na aciaria. É o caso, por exemplo, da existência de numerosas inclusões próximas à pele do lingote ou da existência de bolhas subcutâneas.

Também de acordo com Tsai (1990), os defeitos oriundos de tarugo trincado podem apresentar uma variedade de formas. Um defeito multi-linha, variando em espessura, é típico de origem de tarugos trincados. O defeito é usualmente negro, entretanto, na inspeção pode aparecer branco ou brilhante. Caracterizado por grãos finos e equiaxiais e óxidos internos dispersos, a primeira metade mostra uma microestrutura normal enquanto abaixo é mostrada a região afetada, sendo notada a troca de grão grosseiro para fino. A troca de microestrutura é causada devido a trabalho a quente localizado. O grão não cresce devido ao seu ancoramento pelos óxidos. A carepa não removida reduz-se após o recozimento.

Origem dos Defeitos Superficiais – Laminação

Dobras

Segundo Meyette (1948), dobras são defeitos longos que usualmente tem um prolongamento interno, originadas por práticas de laminação com defeito.

As dobras de laminação apresentam na sua seção transversal características como estruturas fibrosas, com os ataques Oberhoffer ou Stead. As fibras são curvadas acentuadamente ao redor das dobras, voltadas para o interior e a distância em volta da dobra é na forma de um arco. Isto indica que as dobras são resultados da rugosidade na laminação. Dobras se apresentam como fissuras preenchidas com carepa e na sua margem as superfícies são descarbonetadas.

Este tipo de defeito é o resultado da rugosidade superficial durante o processamento do tarugo.

As dobras são quase sempre resultado de um rebatimento que contribua para a formação de rebarba quando da laminação. Esta fatalmente conduz a formação de dobras.

As rebarbas podem se originar de:

- Aço com tendência a forte alargamento;
- Calibragem mal adaptada ou má regulagem dos cilindros;
- Guias descentradas;
- Variação na velocidade de laminação;
- Não uniformidade de temperatura em uma barra;
- Defeitos internos no perfil laminado, tais como vazios ou segregação forte, os quais prejudicam o comportamento normal da deformação;
- Perfis “magros” os quais não preenchem devidamente os canais e podem provocar rebarbas;

Além de rebarba – motivo principal das dobras – devem ser ressaltados os seguintes fatores:

- Arestas vivas no perfil a serem laminados provenientes, por exemplo: de um acondicionamento imperfeito do semiprodutos;
- Riscos profundos no produto provocador por guias, tubos, etc.

Para se evitar a formação das dobras os seguintes fatores devem ser observados:

- Qualidade do produto a ser laminado, evitando defeitos internos e de acondicionamento;
- Calibragem e regulagem do trem (perfis, guias, cilindros, tubos, etc.);
- Regularidade na velocidade de laminação e na distribuição de temperaturas.

Ao contrário das trincas, as dobras, principalmente quando muito próximas à superfície do fio máquina, podem se destacar na trefilação causando conseqüências como entupimento de fieira e fragmentos, podendo causar arrebentamento.

2.3 Contramedidas

Tsai (1990) organizou um diagrama causa efeito, visto na Figura 2.23, e demonstra que inclusões complexas ficam incrustadas no aço líquido devido ao contato entre o aço e refratários, escória da panela e distribuidor, pó fluxante do molde e areia do bocal do distribuidor. Para prevenção, deve-se reduzir a oportunidade de haver incrustamento de não-metálicos e promover bastante tempo de flotação para retirada das inclusões complexas. Aluminatos (produtos da desoxidação e reoxidação) é a principal causa de escamas em bobinas laminadas a frio. Se práticas de limpeza do aço forem implementadas, minimizando a formação e aumentando a flotação de produtos da desoxidação e da reoxidação do aço. Trincas longitudinais dão origem as escamas, sendo a maioria originadas no molde durante solidificação. Contramedidas para se evitar trincamento superficial focaram-se no condicionamento do molde, alinhamento superior do maquinário, resfriamento secundário e, mais importante, seleção do pó fluxante.

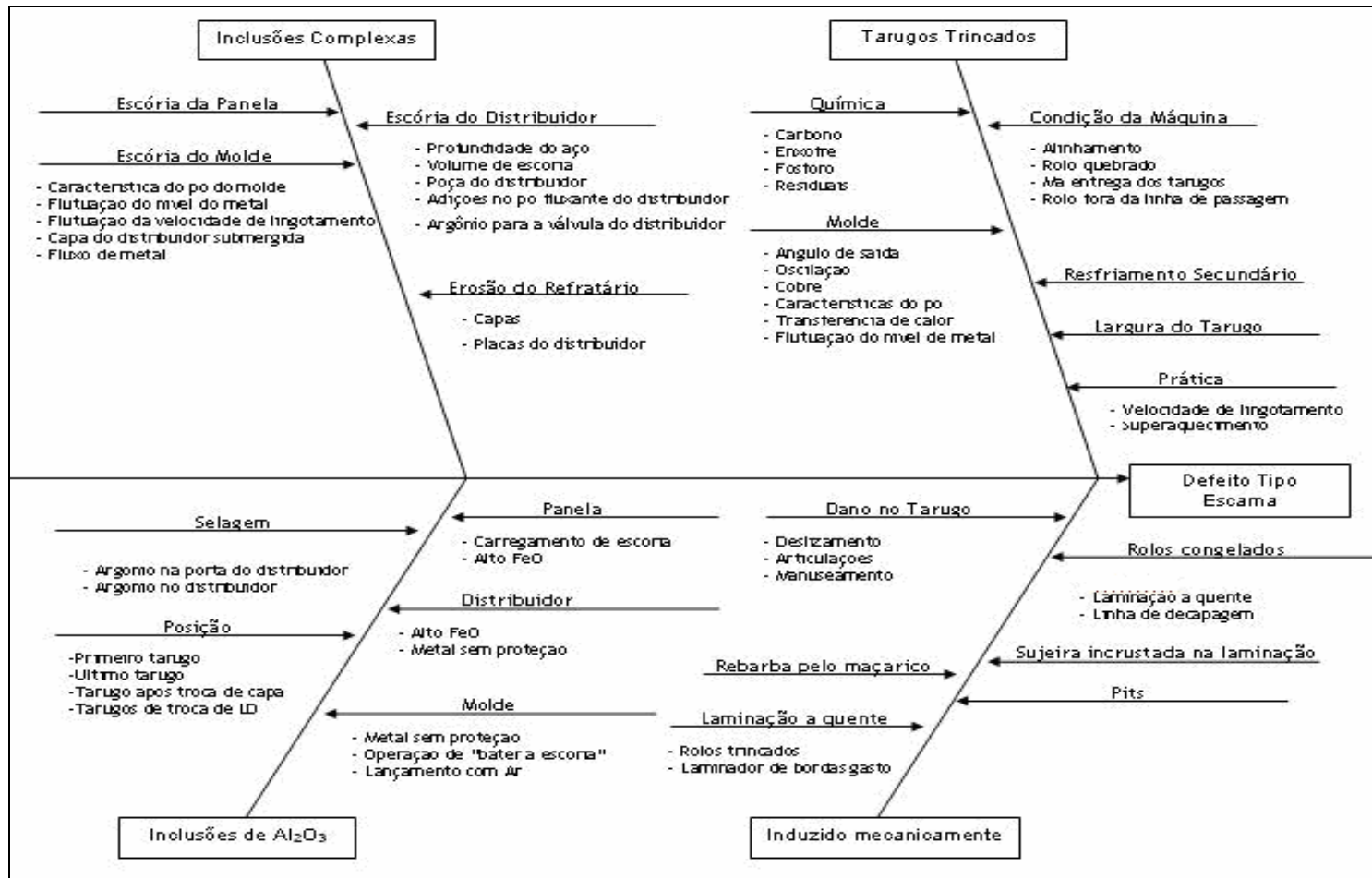


Figura 2.23 Contramedidas para minimizar o defeito tipo escama, segundo Tsai (1990).

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentadas as qualidades das barras de aço trefiladas analisadas e a metodologia utilizada para determinar a origem dos defeitos superficiais tipo escama.

3.1 Material

Este trabalho foi realizado utilizando como material de análise barras trefiladas redondas das seguintes qualidades de aço: ABNT 9254 e ABNT 1045 com bitolas na faixa de 12 a 22,33 mm, conforme a Tabela 3.1, provenientes da sucata da empresa GERDAU - Aços Especiais Piratini. Estas barras foram submetidas ao tratamento térmico de recozimento, trefiladas e inspecionadas para posteriormente serem analisadas. Amostras foram retiradas de 9 corridas diferentes da produção após serem rejeitadas na inspeção realizada em linha no processo de trefilação, pelo ensaio não destrutivo por correntes parasitas. Destas, oito corridas foram para análises da qualidade de aço ABNT 9254 e uma corrida para análise do aço ABNT 1045. Sendo que foram analisadas 11 barras trefiladas por corridas do aço ABNT 9254 (total 88) e 16 barras trefiladas do aço ABNT 1045 (total 16).

Tabela 3.1 Identificação das amostras analisadas.

Código	Qualidade	Bitola	Sucata (Quantidade de barras)	Motivo da Reprovação
A	ABNT 9254	13,88	Amostra de 11 barras com defeito	Escamas
B	ABNT 9254	13,88	Amostra de 11 barras com defeito	Escamas
C	ABNT 9254	12,50	Amostra de 11 barras com defeito	Escamas
D	ABNT 9254	11,45	Amostra de 11 barras com defeito	Escamas
E	ABNT 9254	12,50	Amostra de 11 barras com defeito	Escamas
F	ABNT 9254	13,88	Amostra de 11 barras com defeito	Escamas
G	ABNT 9254	13,88	Amostra de 11 barras com defeito	Dobras
H	ABNT 9254	12,00	Amostra de 11 barras com defeito	Escamas
I	ABNT 1045	22,23	Amostra de 16 barras com defeito	Escamas

Devido ao grande número de amostras analisadas, para o aço ABNT 9254, será apresentado somente um exemplo representativo para cada provável origem do defeito, por exemplo: amostra “A7” é referente à sétima amostra da primeira corrida de aço ABNT 9254 analisado. Já para o aço ABNT 1045 por se tratar apenas de uma corrida analisada foi identificada de seguinte maneira: amostra “4” é referente a amostra 4 da qualidade aço ABNT 1045.

As Tabela 3.2 e Tabela 3.3 apresentam as faixas de composição química dos aços ABNT 9254 e ABNT 1045. Todas as amostras obtidas para este trabalho estão dentro da faixa de composição química especificadas nas tabelas.

Tabela 3.2 Faixa de composição química exigida para a qualidade de aço ABNT 9254.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em peso)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
Mínimo	0,52	1,2	0,6	-	-	0,6	-	-	0,005
Máximo	0,58	1,4	0,8	0,03	0,015	0,8	0,06	0,25	0,015

Tabela 3.3 Faixa de composição química exigida para a qualidade de aço ABNT 1045.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em peso)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
Mínimo	0,43	0,17	0,6	-	-	-	-	-	0,01
Máximo	0,5	0,3	0,8	0,03	0,035	0,2	0,06	0,25	0,035

3.2 Metodologia de Análise

A determinação da origem de defeitos superficiais, visando sua minimização, inclui a observação dos aspectos gerais, tais como a frequência, localização, posicionamento na barra (uma geratriz ou várias).

Também é importante o estudo detalhado dos aspectos visuais do defeito, a olho nu e com ajuda de lupa estereoscópica, assim como a observação de amostras polidas, obtidas geralmente por cortes transversais, do produto trefilado e atacado com diversos reagentes. Logo a metodologia empregada para análise consistiu em caracterização visual dos defeitos em lupa estereoscópica de baixo aumento e análises metalográficas em

microscópio ótico e em microscópio eletrônico de varredura, juntamente com análise via microsonda acoplada ao microscópio eletrônico (EDS).

Algumas barras trefiladas, dos feixes rejeitados na inspeção por correntes parasitas, foram escolhidas aleatoriamente e levadas ao equipamento de partículas magnéticas para localização e caracterização visual dos defeitos, assim como foi realizada a descrição da composição e frequência dos defeitos existentes nas barras, conforme a Figura 3.1.

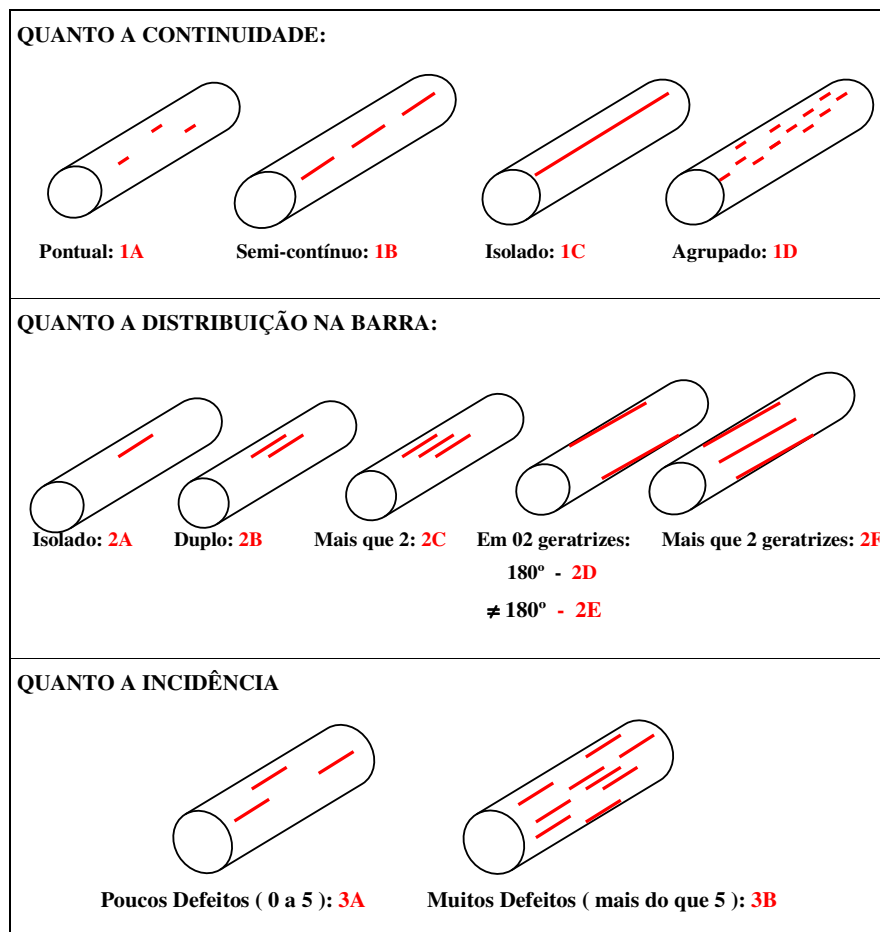


Figura 3.1 Descrição da composição e frequência dos defeitos existentes nas barras analisadas.

As seções que apresentavam defeitos foram levadas ao laboratório metalúrgico, onde os defeitos foram caracterizados em lupa de baixo aumento Zeiss Stemi SV11, com sistema de aquisição digital de imagens. Logo após, foram cortadas em máquinas de disco abrasivo Buehler Abrasimatic 2 e Struers Secotom-10, em duas amostras de cada barra com a região com o defeito, conforme a Figura 3.2. Após, uma das amostras foi embutida em baquelite na máquina Struers LaboPress-3, sendo preparada conforme procedimento

metalográfico padrão e a outra amostra conservada sem nenhum tipo de preparo metalográfico para análise de topo.

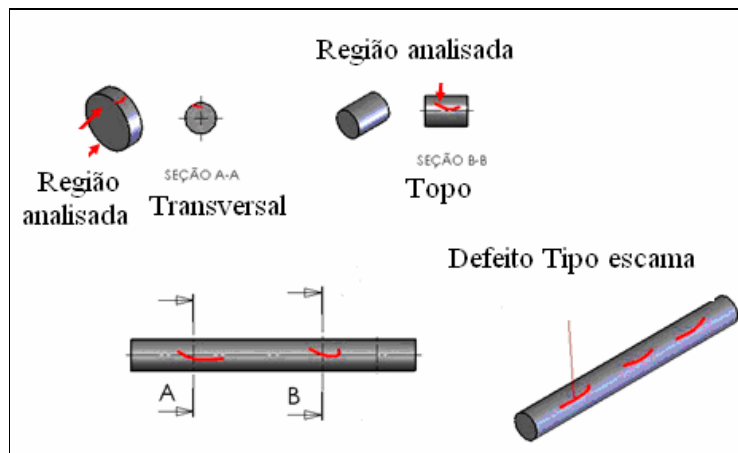


Figura 3.2 Metodologia utilizada para o corte das barras.

Para análise ao microscópio ótico Olympus BX-60M foram empregadas amostras sem ataque, com o ataque nital 2%, com o ataque ácido picríco e álcool, reagente Stead ou Oberhoffer e reagente cromato alcalino a quente, conforme a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Identificação das análises realizadas para determinação da origem do defeito tipo escama através da caracterização microestrutural.

Reagente/Método	Revela	Como identificar
Magnaflux	- Distribuição do defeito	-Defeito contínuo identifica defeito tipo dobra de laminação.
Lupa Esteroscópica	- Morfologia do defeito	-Permite a diferenciação entre marcas de manuseio e escamas.
S/ Ataque (Microscopia ótica)	- Oxidação - Presença de inclusões	-Inclusões vítreas identificam defeito oriundo da aciaria.
Nital (Microscopia ótica)	- Microestrutura - Descarbonetação - Linhas de deformação	-Fusão parcial ou total no contorno de grão indica superaquecimento ou queimados que é um defeito oriundo da laminação. -Descarbonetação pode ser oriunda da laminação ou aciaria. Marcas de deformação identificam defeito oriundo da laminação.
Stead ou Oberhoffer (Microscopia ótica)	- Segregação de Fósforo e enxofre - Linhas de deformação	-Região não atacada pelo reagente é a que apresenta segregação de P e S, problema oriundo da aciaria. -Marcas de deformação identificam defeito oriundo da laminação ou aciaria.
Cromato Alcalino (Microscopia ótica)	- Ressalta região com presença de oxigênio	-Regiões esbranquiçadas identificam defeito que pode ser oriundo da aciaria ou laminação.
Picral (Microscopia ótica)	- Distribuição e Tamanho de grão	-Mudança de tamanho de grão: grão menor próximo ao defeito identifica defeito de aciaria (trinca de solidificação).
Microscopia Eletrônica - EDS	- Análise da superfície do defeito e análise química qualitativa	-Determinação da composição química e do tamanho das inclusões presentes no defeito e em sua proximidade.

Na seqüência iremos apresentar exemplos de classificação de defeitos tipo escamas a partir das técnicas utilizadas neste trabalho.

3.2.1 Macroanálise

O estudo da freqüência, localização, espaçamento de um defeito é a primeira tarefa necessária para estudar sua origem. Discutem-se separadamente as características gerais dos defeitos e a observação a simples vista, com lupa esteroscópica e partículas magnéticas (magnaflux) é um bom recurso para se diferenciar escamas de outros tipos defeitos.

Magnaflux

As macrografias apresentadas na Figura 3.3 tem como objetivo determinar a posição dos defeitos em relação à barra. Pode-se ainda observar a distribuição dos defeitos ao longo da mesma diferenciando escama de dobra de laminação que é um defeito contínuo.

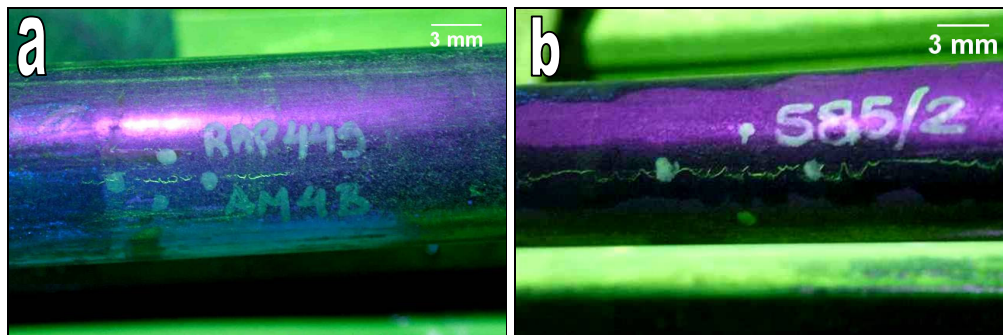


Figura 3.3 Macroanálise com magnaflux mostrando barras com o defeito tipo (a) escama e (b) com o defeito tipo dobra.

Lupa Esteroscópica

Para observação de defeitos superficiais em barras não há uma possibilidade de se limpar previamente a superfície das mesmas. Logo, um ataque com nital 2% pode ser interessante para retirar o brilho da superfície polida, mas mesmo assim só permite ver defeitos muito grosseiros e muitas vezes não permite ver muitos detalhes que ajudam a identificar suas causas como, por exemplo, de defeitos subsuperficiais.

Na Figura 3.4 pode-se observar os defeitos tipo escama, apresentando uma lasca fina de metal presa à barra em um ponto. Observa-se que a parte interna do defeito apresenta-se diferente da superfície da barra e com aparência rugosa, com ou sem preenchimento com carepa/óxidos.

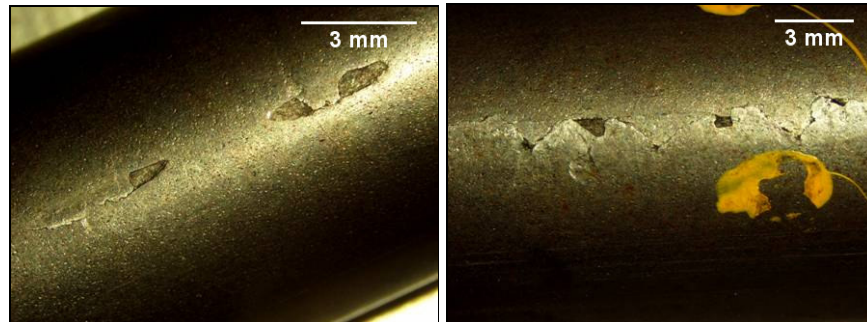


Figura 3.4 Macro análise mostrando barras com o defeito tipo escama analisada com lupa estereoscópica.

3.2.2 Microanálise

Amostra Sem Ataque

Na observação sem ataque, pode ficar clara a origem do defeito se aparecer macroinclusões associadas. A observação metalográfica deve ser completada com análise via EDS para poder estabelecer a origem da macroinclusão.

A Figura 3.5 apresenta micrografia da secção transversal de uma barra na região do defeito. Esta micrografia foi efetuada sem ataque químico.

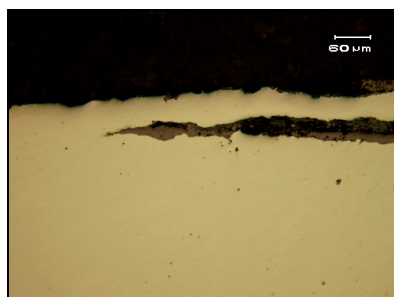


Figura 3.5 Micrografia da secção transversal de uma barra apresentando defeito tipo escama. Sem ataque químico. MO.

Com esta técnica podem-se caracterizar as dimensões do defeito em profundidade, largura e extensão. Além disto, pode-se verificar a presença de outras características como a presença de inclusões não metálicas, também sendo possível a sua quantificação em termos de tamanho e quantidade.

Ataque com Nital 2%

O Nital é um reagente de uso geral na metalografia dos aços ao carbono, de fácil preparação e uso. A preparação deste reagente é observada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Composição e preparação do reagente Nital 2%.

Reagente	Quantidade
Ácido Nítrico HNO ₃	2 ml
Álcool Etílico	98 ml
Acrescentam-se 2 ml de HNO ₃ aos 98 ml de álcool para obter Nital 2%.	
Ataque: 10 a 30 segundos a temperatura ambiente por imersão.	

O ataque com Nital permite definir grãos de ferrita e torna a perlita escura em MO. Permite observar a descarbonetação, o crescimento anormal de grão, a estrutura bandeada, a segregação central e as linhas de deformação em defeitos submetidos a conformação. A descarbonetação ao redor de defeitos expostos a alta temperatura e atmosfera oxidante ou em contato com óxido de ferro é bem visível em aços de médio e alto teor de carbono.

A Figura 3.6 apresenta exemplos de micrografias de secções transversais de barras com defeito tipo escama, atacadas com Nital 2%.

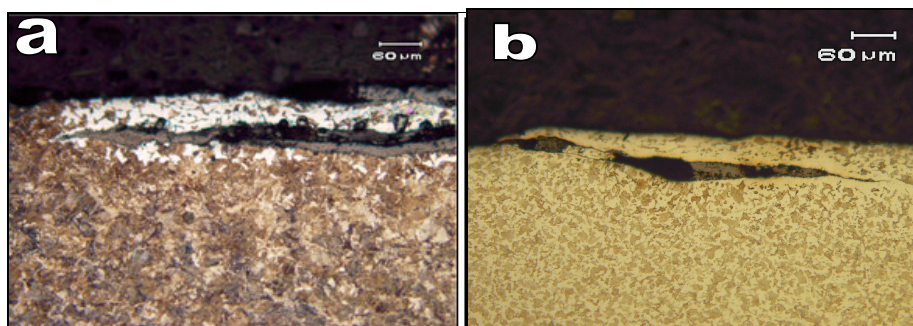


Figura 3.6 Micrografia secções transversais de barras com defeito tipo escama atacadas com o reagente nital 2%. MO.

Este ataque permite a verificação da microestrutura da região, bem como a presença de marcas de deformação sugerindo defeito ocasionado no processo de laminação. Também se pode observar a presença de óxidos e descarbonetação na superfície ou nas proximidades do defeito, embora estas características não indiquem a provável origem do defeito.

Ataque com Oberhoffer e Stead

O reagente Oberhoffer, também chamado de cloreto férrico modificado e o reagente Stead são utilizados para estudar fenômenos relacionados com a segregação. A preparação destes reagentes são apresentadas nas Tabela 3.6 e Tabela 3.7.

Tabela 3.6 Composição e preparação do reagente Oberhoffer.

Reagente	Quantidade
Cloreto Férrico FeCl_3	30 gramas
Cloreto Cúprico CuCl_2	1 grama
Cloreto Estanhoso SnCl_2	0,5 gramas
Álcool Etílico	500 ml
Água Destilada	500 ml
Dissolve-se em um recipiente CuCl_2 e SnCl_2 com HCl . Em um outro copo de precipitado se coloca FeCl_3 com água destilada; logo se une todo o conjunto ao álcool etílico.	
Ataque: 5 a 10 segundos para observação no microscópio ótico; 10 a 20 para observação com lupa; a temperatura ambiente, usado por imersão.	

Tabela 3.7 Composição e preparação do reagente Stead.

Reagente	Quantidade
Cloreto de Cobre CuCl_2	2,5 gramas
Cloreto de Magnésio MgCl_2	10 grama
Ácido Clorídrico HCl (concentrado)	0,5 ml
Álcool Etílico	250 ml
O sais são dissolvidos no HCl com adição mínima possível de água quente.	
Ataque: 1 minuto para observação no microscópio ótico. Usado por imersão.	

É caracterizada, com este reagente, a segregação de elementos tais como enxofre, manganês ou fósforo. Normalmente na região interdendrítica ocorrem microsegregações de gases previamente dissolvidos no aço líquido, que dão lugar à formação de poros. Nestes poros também se tem microsegregação de enxofre e manganês. Também são observáveis as linhas de deformação (fluência) do material trabalhado a quente.

Na Figura 3.7 apresenta exemplos de micrografias obtidas a partir de secções transversais de barras, atacadas com os reagentes Stead ou Oberhoffer, utilizados para visualizar segregações de fósforo e enxofre na direção do interior da barra, associada a poro subsuperficial, conforme Madias e Reda (2004). Isto passa despercebido na observação com nital 2%. Pode-se observar ainda na Figura 3.7b as regiões mais claras onde temos regiões ricas em fósforo ou enxofre. Com este reagente também pode-se observar na Figura 3.7a as linhas de deformação decorrentes do processo de conformação do material indicando uma provável origem no processo de laminação.

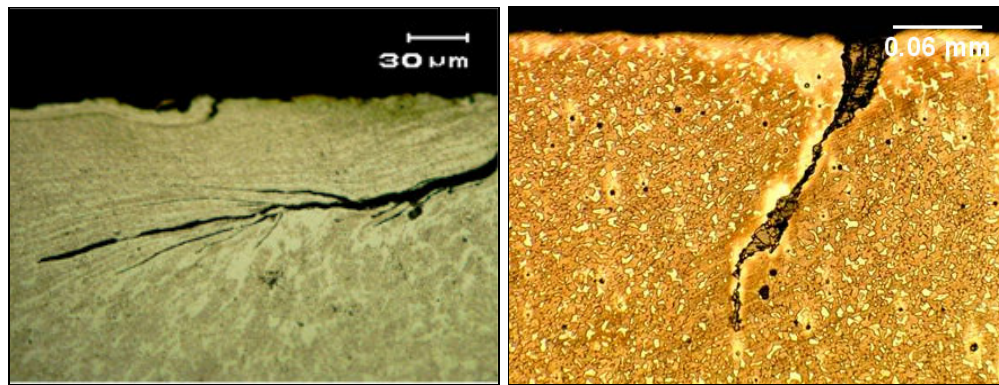


Figura 3.7 Micrografias do defeito tipo escama atacadas (a) com reagente Stead e (b) com reagente Oberhoffer. MO.

Ataque com Cromato Alcalino

O ataque com cromato alcalino revela a penetração de oxigênio. Tem utilidade para definir se um defeito já estava presente no forno de pré-aquecimento ou não. A preparação destes reagentes é apresentada na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 Composição e preparação do reagente Cromato alcalino.

Reagente	Quantidade
Óxido Crômico CrO_3	16 gramas
Água Destilada	145 ml
Hidróxido de Sódio NaOH	80 gramas
Dissolver o sal em água e acrescentar o NaOH vagarosamente, para evitar aquecimento e fervura.	
Ataque: Utiliza-se a 110 -120 °C, durante 10 – 20 minutos.	

O cromato alcalino obscurece a martensita rápido, a ferrita mais lentamente e as regiões com alto teor de oxigênio muito mais lentamente. As regiões com penetração de

oxigênio ficam sem atacar, de cor clara. Normalmente esta faixa não atacada fica ao redor do defeito. A magnitude da penetração de oxigênio fica revelada pela largura desta faixa, como ilustrado na Figura 3.8.

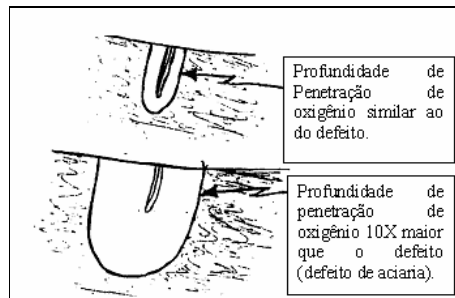


Figura 3.8 Interpretação de Morgan citado por IAS, sobre o resultado do ataque com cromato sódico alcalino.

A Figura 3.9 apresentam imagens exemplificando o resultado do ataque com o reagente cromato alcalino. Observam-se regiões esbranquiçadas nas proximidades do defeito, indicando a penetração de oxigênio. Se a penetração de oxigênio for muito profunda nas vizinhanças do defeito pode supor que o defeito seja oriundo do tarugo. Porém pouca penetração ou ausência de oxigênio não significa que o defeito seja oriundo de laminação, pois o defeito pode estar presente no tarugo e aflorar no processo de laminação.

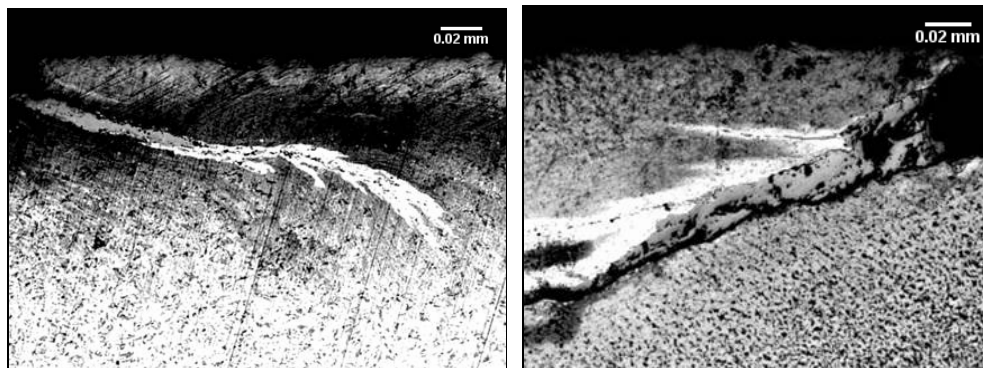


Figura 3.9 Micrografias exemplificando o resultado do ataque com o reagente cromato alcalino. As regiões mais claras, em forma de pluma, identificam a região de penetração de oxigênio. MO.

Ataque com Picral

O ácido pícrico em álcool foi empregado para determinação do tamanho de grão perto e longe do defeito analisado. A preparação destes reagentes é observada na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 Composição e preparação do reagente Picral.

Reagente	Quantidade
Ácido Pícrico	4 gramas
Álcool Etílico	100 ml
Dissolver o ácido pícrico em álcool.	
Ataque: alguns segundos a 1 minuto ou mais.	

Este reagente pode caracterizar os grãos finos e equiaxiais, óxidos internos dispersos nas vizinhanças do defeito e uma microestrutura normal afastado da região com falha. Se for observada a troca de grão de grosso para fino isto pode ser devido ao trabalho a quente localizado. O grão não cresce devido ao seu ancoramento pelos óxidos.

Análise via Microscópio Eletrônico de Varredura e Análise EDS

As amostras com defeitos foram observadas no microscópio eletrônico de varredura ou sobre amostras polidas. A observação tal qual, que é certamente importante no estudo de defeitos superficiais em barras trefiladas. A observação de amostras polidas, sem ataque ou com ataque, também não proporciona muita informação, além do observado no microscópio ótico. Segundo Ray, Dhua e Jha (1999), o mais importante é a possibilidade de fazer EDS, para assegurar a identificação de carepa, sulfetos e óxidos, e ter um conjunto interessante de estudo onde à análise localizada dá informação útil para definir a origem de diversos defeitos.

Logo, as amostras foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura para caracterização via microssonda de regiões de interesse, como de óxidos e inclusões. Para a análise química com ajuda do MEV/EDS, ainda foram cortadas amostras das barras de cada ordem de produção no sentido longitudinal, deixando a região do defeito intacta, apenas levantando ou retirando a aba superior do defeito tipo escama para ali realizar a análise química, conforme a Figura 3.2. Análises transversais também foram realizadas nas vizinhanças do defeito (com aproximadamente $0,032 \text{ mm}^2$ de área) e no lado oposto do

defeito, conforme a Figura 3.10, de modo a determinar se regiões próximas ao defeito têm aspectos diferenciados das regiões mais afastadas. Já para a determinação das dimensões dos defeitos analisados, foi utilizado o método observado na Figura 3.11.

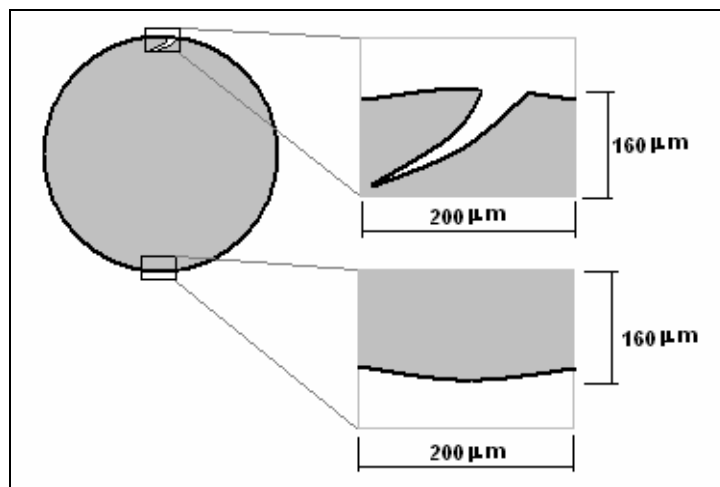


Figura 3.10 Ilustração das áreas utilizadas para realização das análises nas regiões próximas e afastadas ao defeito.

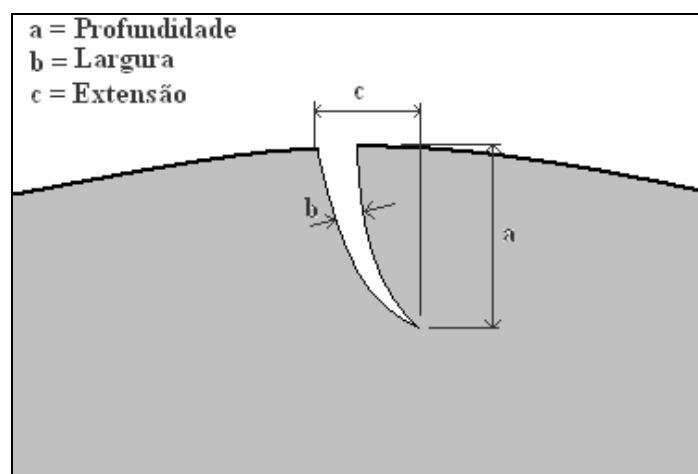


Figura 3.11 Método utilizado para determinação do dimensional dos defeitos analisados.

Na Figura 3.12 mostra imagens obtidas através de microscopia eletrônica de varredura, sendo na Figura 3.12a uma imagem da secção transversal da barra na região do

defeito e na Figura 3.12b a imagem na superfície da barra (análise de topo), apresentando o defeito.

O microscópio eletrônico de varredura permite uma excelente visualização da topografia dos defeitos, apresentando alta resolução e grande profundidade de foco. Além disto, analisando-se as amostras sem recobrimento com ouro ou carbono, evidencia-se a presença de inclusões vítreas devido às suas características de condutividade elétrica. Estas inclusões são visualizadas como pontos brancos e brilhantes, como observados na Figura 3.12, também devido à grande capacidade de ampliação deste equipamento, consegue-se uma boa precisão na medida do tamanho e forma das inclusões e da sua distribuição na amostra.

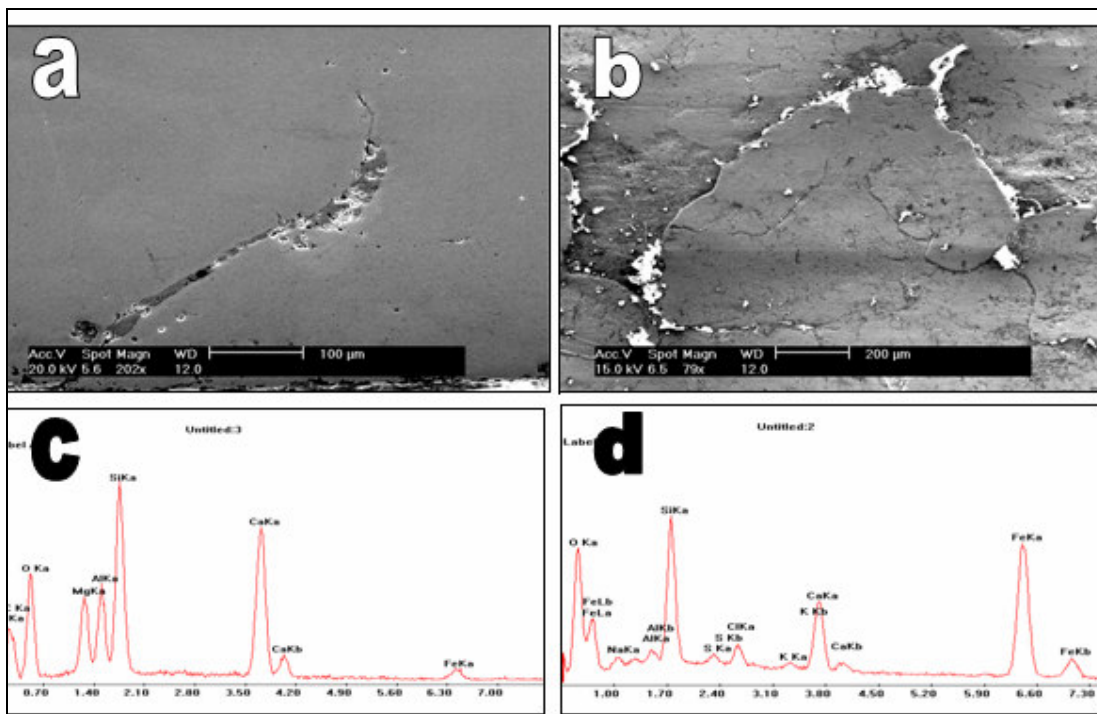


Figura 3.12 Exemplos de Análise por microscopia de varredura em região apresentando defeito, juntamente com seu EDS.

A Figura 3.12 apresenta espectros de raios X, obtidos através do EDS, de inclusões presentes no material, nas proximidades de um defeito. Observam-se a presença dos picos de emissão de vários elementos, notadamente de cálcio e oxigênio e outros elementos, sugerindo que estes defeitos são oriundos do tarugo. Através da análise química, via EDS, das inclusões presentes próximos ou no interior do defeito pode-se sugerir qual etapa do processo produtivo de obtenção do tarugo foi determinante para a ocorrência do defeito.

A caracterização da origem das inclusões encontradas nas barras analisadas foi efetuada tomando-se como base o trabalho de Leal (2000). Em sua dissertação, este autor analisa vários tipos de inclusões quanto a sua forma e composição química, relacionando a origem das inclusões através de seu formato e da sua análise química.

|

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados do trabalho de caracterização da origem dos defeitos superficiais tipo escama dividido nas duas qualidades de aços analisadas ABNT 9254 e ABNT 1045. Sendo também discutidos os resultados deste trabalho em relação a diversos pesquisadores.

4.1 Aço ABNT 9254

As análises realizadas nas barras trefiladas do aço ABNT 9254 demonstraram que as origens dos defeitos tipo escamas estão distribuídas segundo a Figura 4.1. Mais de 96% de defeitos tipo escamas estão relacionados à aciaria. Uma larga porcentagem das categorias era muito rasa para ser identificada. Um estudo preliminar indicou que havia os seguintes mecanismos iniciais para a formação desse tipo de defeito: (a) mecanismo de incrustamento de escória (Figura 4.2 a Figura 4.5), (b) remoção incompleta de trincas superficiais do tarugo (Figura 4.6), (c) além de marcas de guia ou de rolos de laminação (Figura 4.7). Para este trabalho foi apresentado somente um exemplo de cada tipo de origem do defeito analisado.

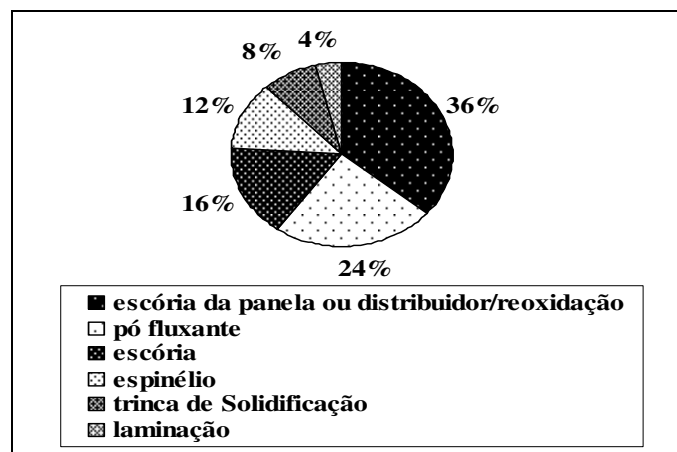


Figura 4.1 Origem dos defeitos tipo escama para o aço ABNT 9254.

Os defeitos relacionados à aciaria são resultados de aluminatos e inclusões complexas (CNI's) ou tarugos trincados conforme comentado por Prabhu (1990), Bommaraju (1992), Emiling e Waugaman (1994) e Bonilla (1995). Segundo Tsai (1990), partículas não-metálicas causam escamas durante o processo de laminação porque sua

conformabilidade é muito menor que a do metal. Trincas podem causar escamas, pois a superfícies das trincas são oxidadas no forno de reauecimento e não irão caldear na laminação. Fluxos diferentes nos dois lados das trincas forçam a formação de escamas na superfície.

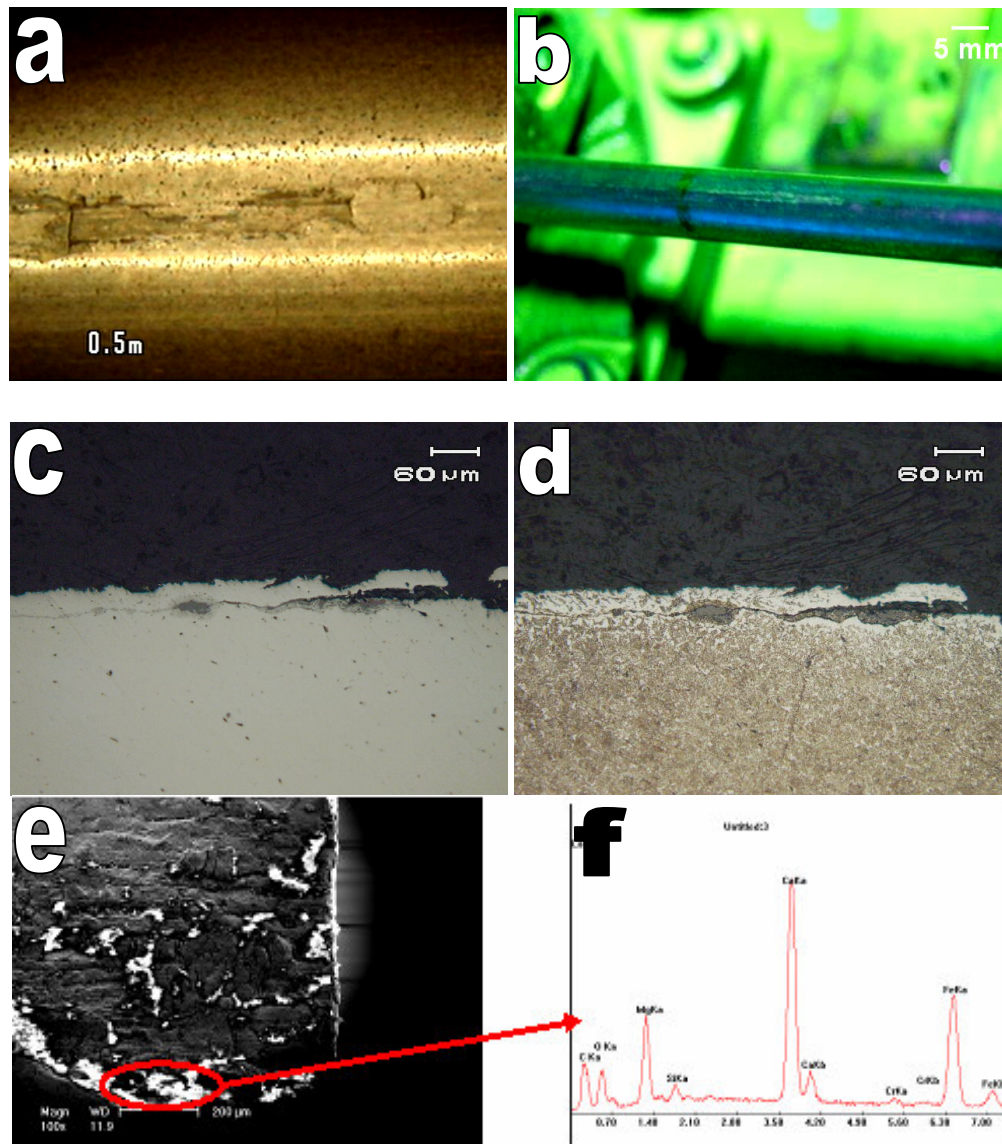
Tsai (1990) e através de estudos observou que tarugos com as melhores classificações de qualidade (sem anomalias), mas tendo tanto trincas como aluminatos identificados antes do preparo de tarugos, foram enviadas para processamento sem condicionamento. Os índices de escamas nesses tarugos foram muito maiores daqueles livres de defeitos.

Tsai (1990), buscando determinar a origem do defeito tipo escama, conclui que 50% dos defeitos tipo escamas tem origem na aciaria sendo que: 29% de inclusões complexas incrustadas no aço, 14,3 % de aluminatos, 12,9 % de trincas do tarugo e 9,3 % de laminação a quente.

Comparando os resultados apresentados neste trabalho com os do pesquisador Tsai (1990), Prabhu (1990), Meyette (1948), Milyuts e Kulakov (1983), Nakamura (1992) e outros pesquisadores, pode-se concluir que o defeito superficial tipo escama originado no processo de aciaria, ocorre através de incrustamento de inclusões complexas está oriundas do pó fluxante, aluminatos, da escória da panela, trincas de solidificação e dobras de laminação. Sendo que a maior parte devido à incrustamento de escória e de pó fluxante.

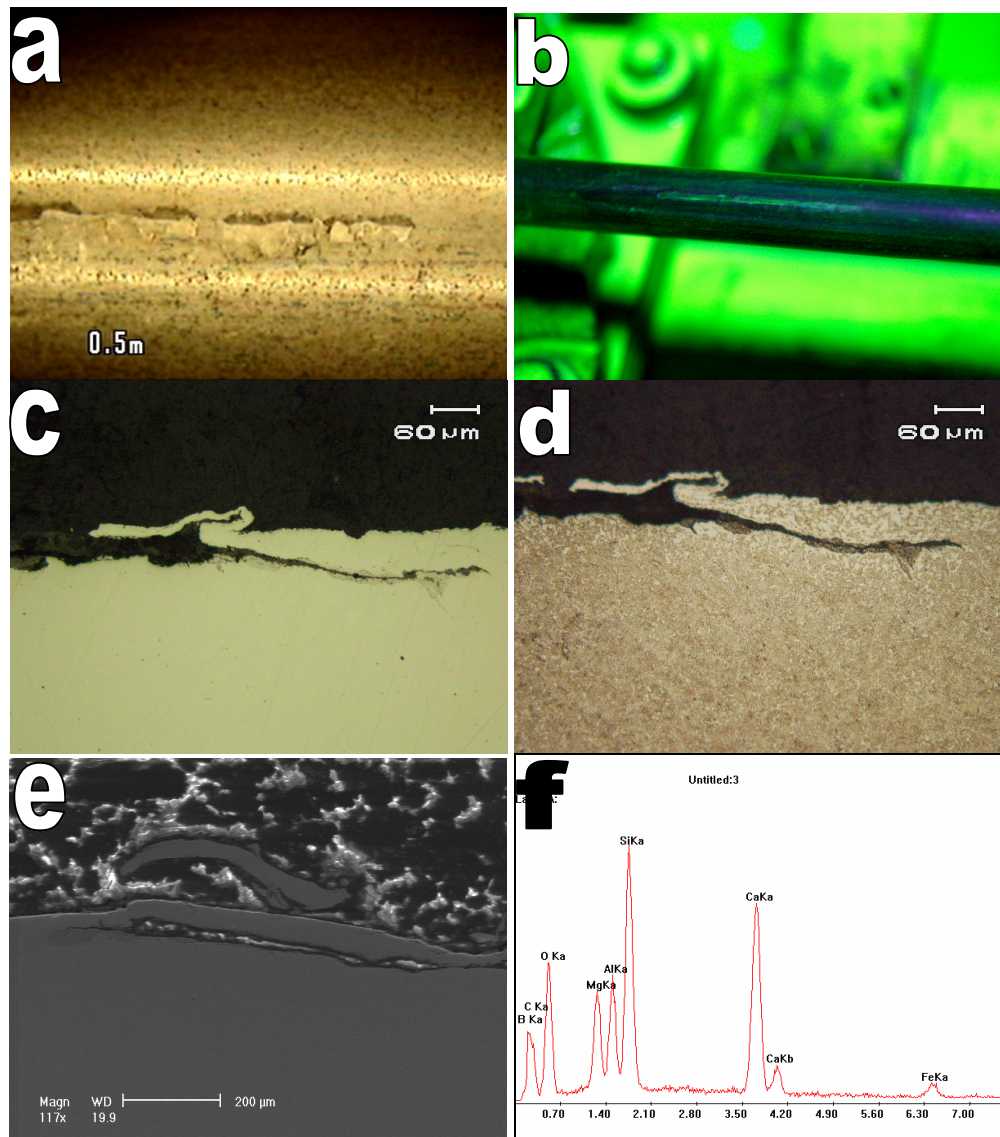
Na Figura 4.2 pode-se observar as características do defeito tipo escama gerado pela presença de escória na barra, através da macrografia em lupa de baixo aumento, magnaflux, micrografia em microscópio ótico com a amostra sem ataque e atacada com o reagente nital 2% e MEV juntamente com o espectro de frequência na seção longitudinal da barra trefilada.

Na Figura 4.3 pode-se observar as características do defeito tipo escama gerado pela presença de espinélio na barra, através da macrografia em lupa de baixo aumento, magnaflux, micrografia em microscópio ótico com a amostra sem ataque e atacada com o reagente nital 2% e MEV juntamente com o espectro de frequência na seção transversal da barra trefilada.



Elem	Wt%	At%	K-Ratio	Z	A	F
C	36,11	55,67	0,0542	1,0380	0,1709	1,0003
O	20,88	21,51	0,0651	1,0222	0,2130	1,0006
Mg	9,13	6,92	0,0014	0,9834	0,4169	1,0058
Si	1,11	0,13	0,1669	0,9835	0,6943	1,0005
Ca	11,95	6,88	0,0031	0,9550	0,9339	1,0108
Fe	20,82	8,89	0,1235	0,8760	1,0121	1,0000
Total	100,00	100,00				

Figura 4.2 Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de escória na amostra G1 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b) macrografia utilizando magna flux, (c e d) micrografia em microscópio ótico e (e) de varredura juntamente com o (f) espectro de frequência na seção longitudinal da barra trefilada.



Elem	Wt%	At%	K-Ratio	Z	A	F
C	57,69	77,91	0,2065	1,0368	0,3452	1,0002
O	9,71	9,85	0,0138	1,0210	0,1395	1,0006
Mg	2,16	1,44	0,0086	0,9823	0,4064	1,0013
Al	2,75	1,65	0,0139	0,9540	0,5301	1,0014
Mo	0,54	0,09	0,0048	0,8140	1,0847	1,0064
Cl	0,59	0,27	0,0050	0,9264	0,9111	1,0137
Ca	9,40	3,80	0,0912	0,9538	1,0010	1,0160
Fe	17,17	4,99	0,1515	0,8750	1,0089	1,0000
Total	100,00	100,00				

Figura 4.3 Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de espinélio na amostra F2 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b) macrografia utilizando magnáflux, (c) micrografia em microscópio ótico sem ataque, (d) micrografia com o reagente nital 2%, (e) microscopia de varredura juntamente com o (f) espectro de frequência nas seções: longitudinal e transversal da barra trefilada.

Na Figura 4.4 pode-se observar as características do defeito tipo escama gerado pela presença de escória do distribuidor/reoxidação na barra, através da macrografia em lupa de baixo aumento, micrografia em microscópio óptico com a amostra atacada com o reagente nital 2% e MEV juntamente com o espectro de frequência na seção transversal e longitudinal da barra trefilada.

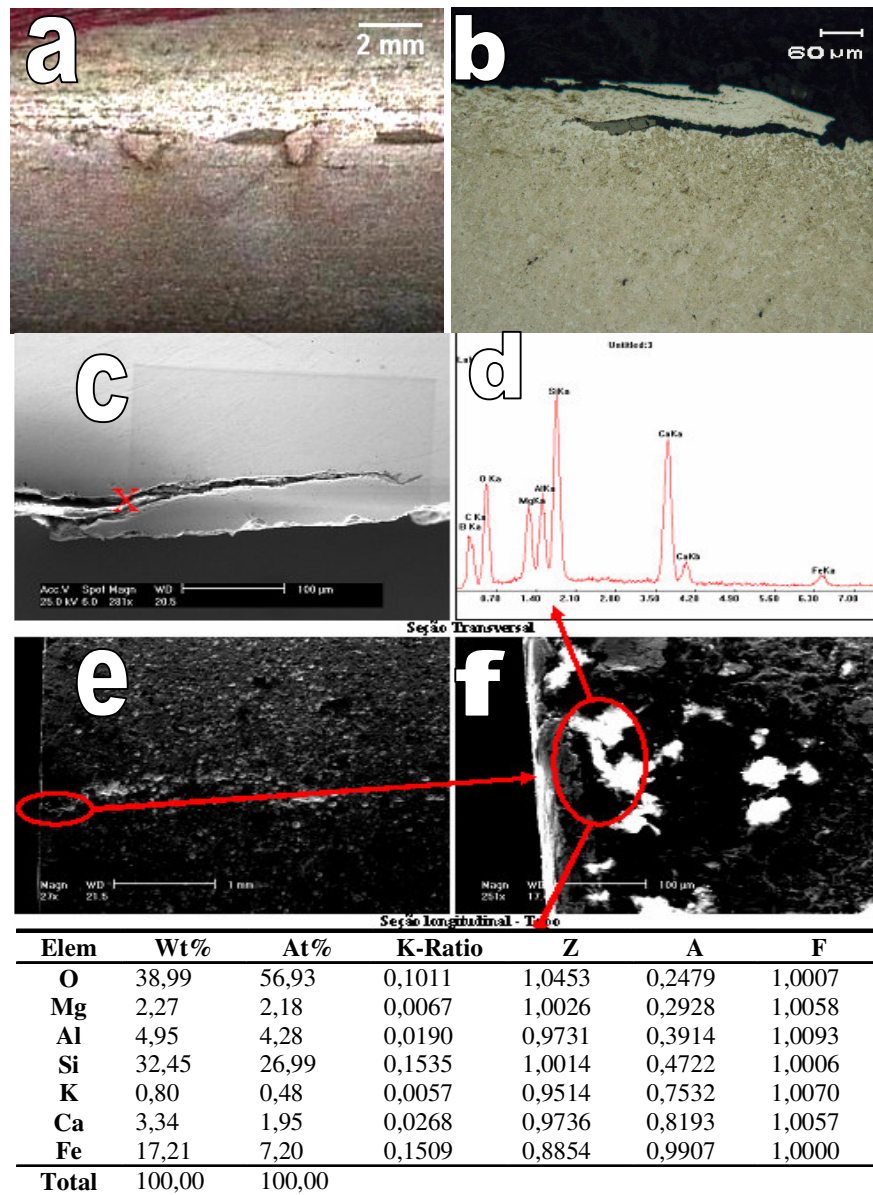


Figura 4.4 Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de escória da panela ou do distribuidor na amostra A3 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b) micrografia em microscópio óptico (reagente nital 2%) e de (c) varredura (transversal), (e e f) varredura (longitudinal) juntamente com o (d) espectro de frequência nas seções: longitudinal e transversal da barra trefilada.

Na Figura 4.5 pode-se observar as características do defeito tipo escama gerado pela presença de pó fluxante na barra, através da macrografia em lupa de baixo aumento, magnaflux, micrografia em microscópio óptico com a amostra sem ataque e atacada com o reagente nital 2% e MEV juntamente com o espectro de frequência na seção transversal da barra trefilada.

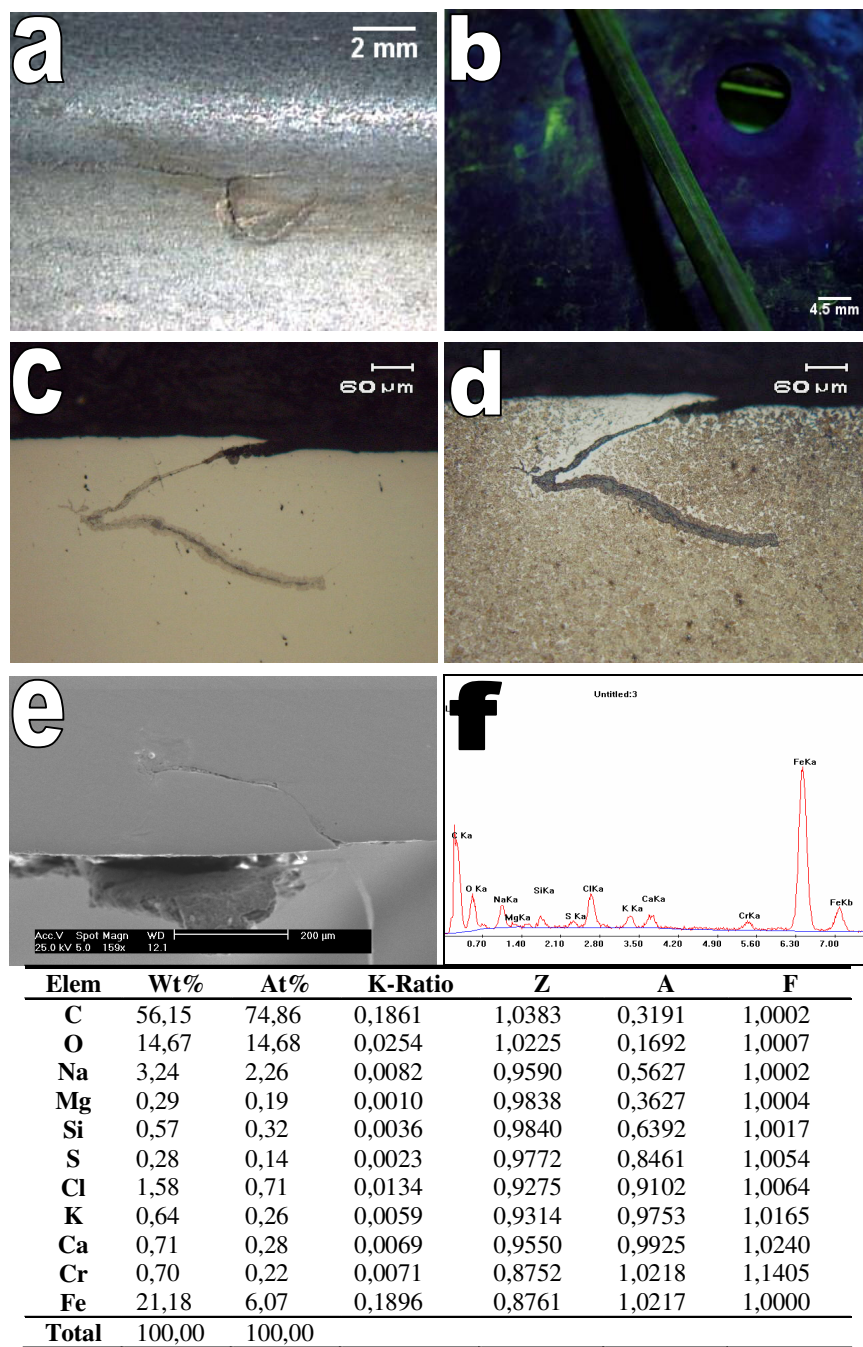


Figura 4.5 Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de pó fluxante na amostra B14 através da (a) macrografia em lupa de baixo

aumento, (b) macrografia utilizando magnaflux, (c e d) micrografia em microscópio ótico e de (e) varredura juntamente com o (f) espectro de frequência nas seção transversal da barra trefilada.

A Figura 4.6 demonstra a análise realizada em amostra (E2) contendo defeito tipo escama oriundo de trinca solidificação através da macrografia em lupa de baixo aumento, micrografia em microscópio ótico e de varredura na seção transversal da barra trefilada. As trincas normalmente apresentam grão mais refinado próximo ao defeito devido a seu ancoramento pelos óxidos. Já em regiões afastadas pode-se observar um tamanho de grão normal. E segundo Tsai (1990), a troca de grão grosseiro para fino pode ser devido ao trabalho a quente localizado. O grão não cresce devido ao seu ancoramento pelos óxidos.

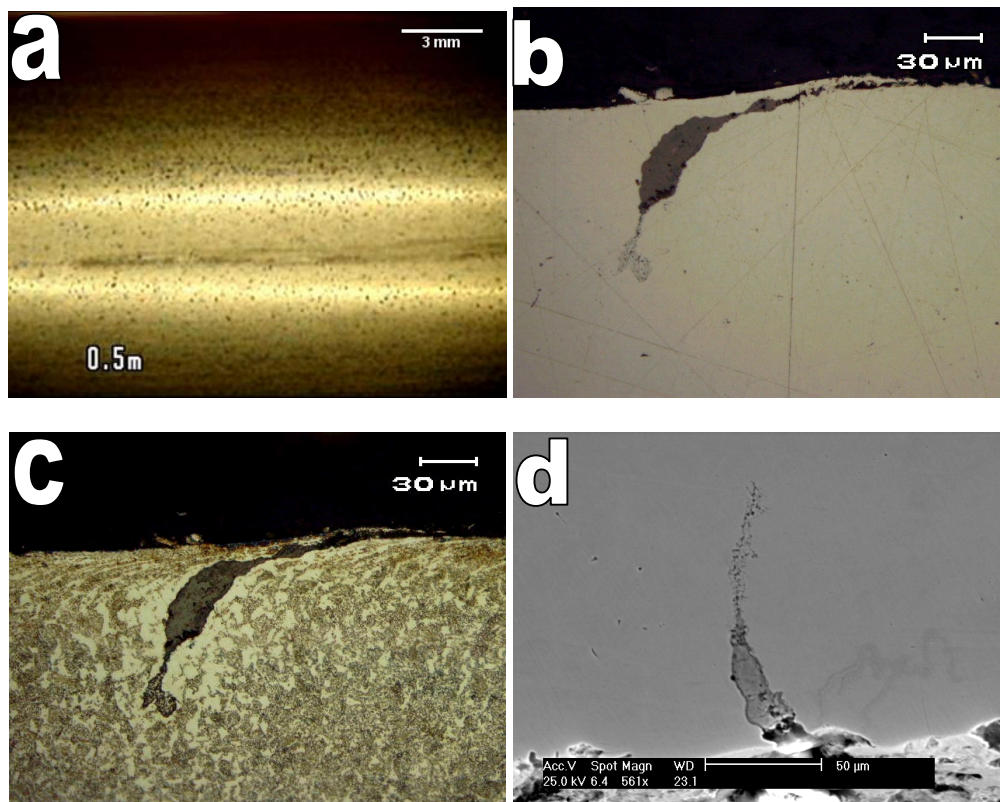


Figura 4.6 Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de trinca de solidificação na amostra E2 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b e c) micrografia em microscópio ótico, sendo em (a) sem ataque e em (b) atacada com nital, e de (d) varredura na seção transversal da barra trefilada.

Na Figura 4.7 pode-se observar a análise realizada na amostra A7 através da macrografia em lupa de baixo aumento e micrografia em microscópio ótico na seção

transversal da barra trefilada. Estas análises demonstram um defeito contínuo na análise macro e, além disso, marcas de deformação indicando uma provável causa do defeito nas operações de conformação mecânica. Nestas amostras não foram encontradas inclusões complexas ou aluminatos oriundas de incrustações.

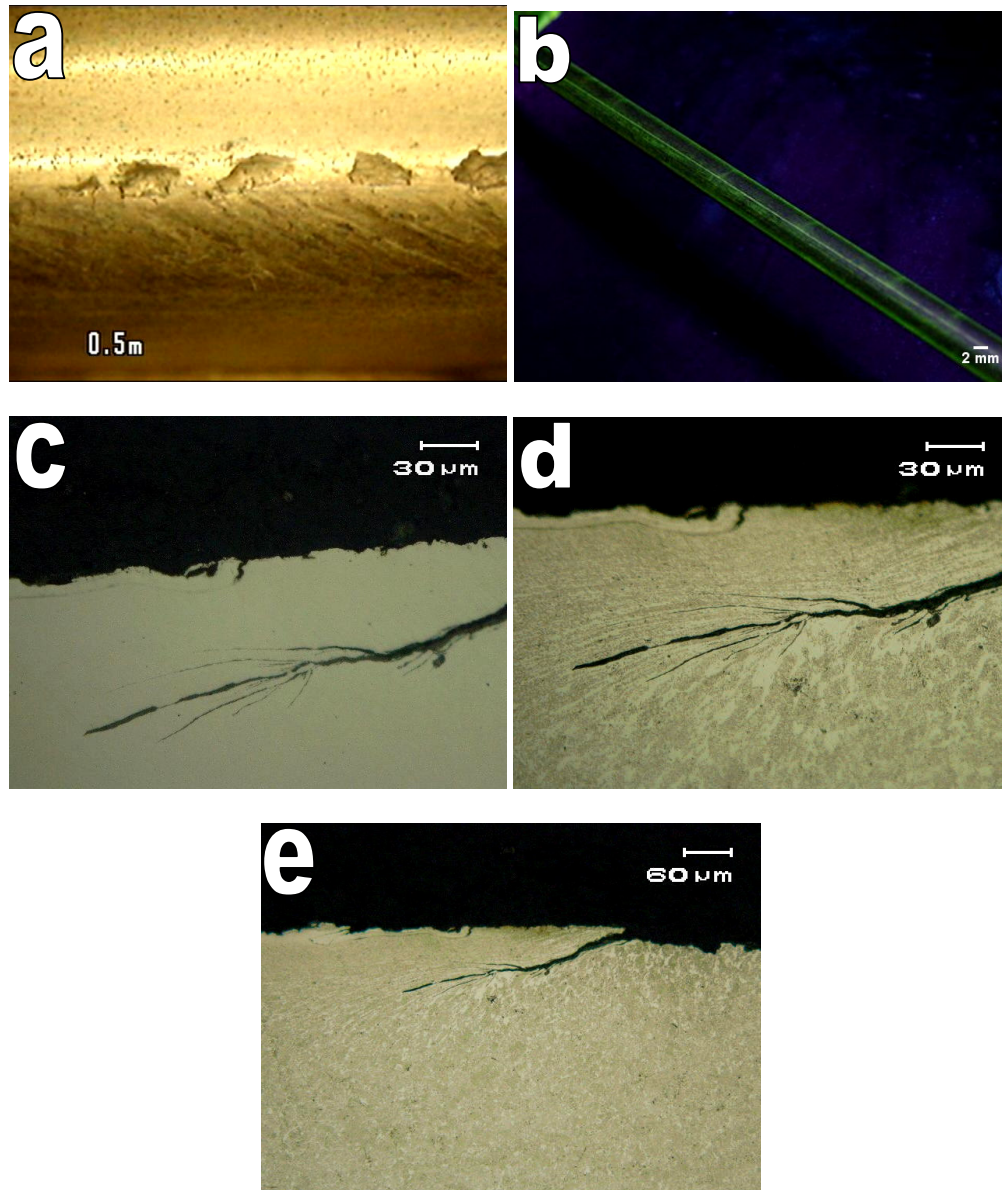


Figura 4.7 Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de dobra de laminação na amostra A7 através da macrografia em (a) lupa de baixo aumento, (b) macrografia utilizando magnaflux, (c) micrografia em microscópio ótico sem ataque, (d) micrografia com o reagente Stead e (e) como o reagente Nital 2% na seção transversal da barra trefilada.

Conforme Tsai (1990), inclusões incrustadas subsuperficialmente representam a principal causa de escamas. Para verificar esta possibilidade, foi efetuada a contagem de

inclusões nas proximidades do defeito e em região oposta a ele. Também foi efetuada a medida do diâmetro das inclusões encontradas.

Também, de acordo com os álbuns de defeitos IAS e AISI, os defeitos tipo escama se caracterizam por apresentar pouca profundidade em relação à sua área superficial. Para tanto, foi efetuada a medida das dimensões dos defeitos encontrados, podendo-se verificar que eles apresentaram uma extensão consideravelmente maior em relação à profundidade e largura.

Na Figura 4.8 observa-se a distribuição das inclusões complexas encontradas na região transversal das amostras do aço ABNT 9254. Como se pode observar foi encontrado maior quantidade de inclusões próximas ao defeito, em média em torno de 24 inclusões próximas e 13 inclusões no lado oposto ao defeito. Nestas amostras foram realizadas as medições para determinar o diâmetro médio de inclusões encontradas perto do defeito tipo escama, observadas nas Figura 4.9 e Figura 4.10. Foram efetuadas medidas em uma média de 20 inclusões por amostra, resultando que estas inclusões apresentaram um diâmetro médio de 24 μm .

Estudo realizado por Dalmaso (1996), revela que as inclusões de cálcio aluminatos com alguns conteúdos de Mg e S, se encontram numa faixa de 30 a 150 μm diâmetro sendo que são oriundas do arraste de escória na etapa de lingotamento do aço.

Nas Figura 4.11 e Figura 4.12 demonstra-se as dimensões dos defeitos analisados. Na figura 4.11 estão comparadas as dimensões de extensão, largura e profundidade dos defeitos encontrados. Pode-se notar que a extensão do defeito é a dimensão predominante, apresentando uma média de 900 μm , enquanto que as dimensões de profundidade e largura apresentaram uma média inferior a 100 μm . Na figura 4.12 estão comparadas as dimensões de largura e profundidade dos defeitos encontrados. Aqui pode-se verificar que os defeitos apresentaram uma profundidade maior em relação à sua largura, apresentando uma profundidade média de 75 μm e uma largura média de 40 μm

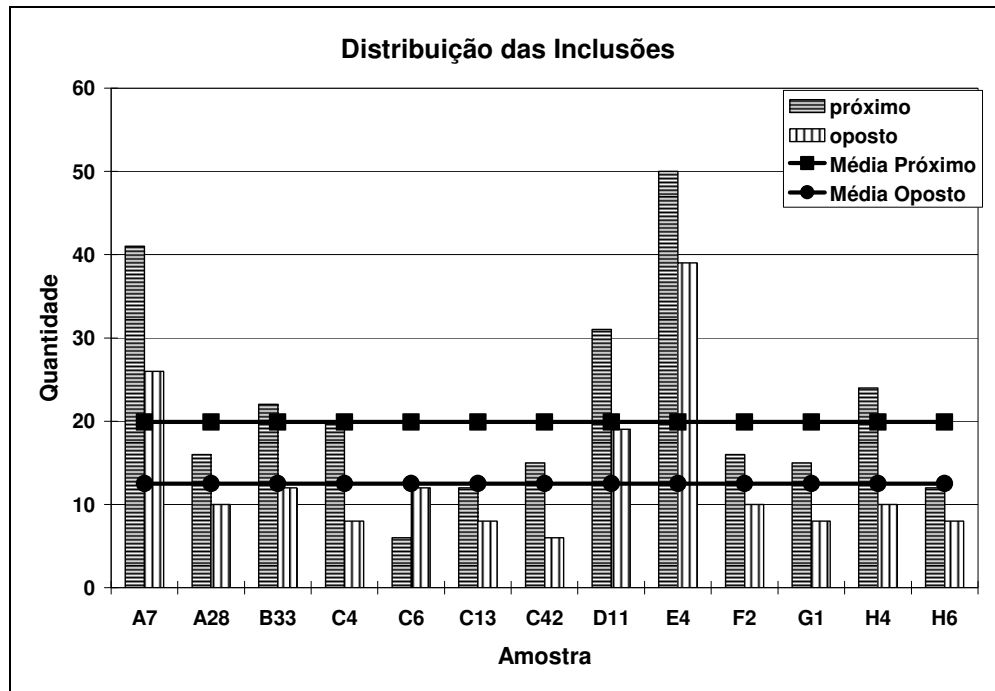


Figura 4.8 Distribuição das inclusões encontradas próximas e do lado oposto ao defeito tipo escama para cada corrida analisada do aço ABNT 9254.

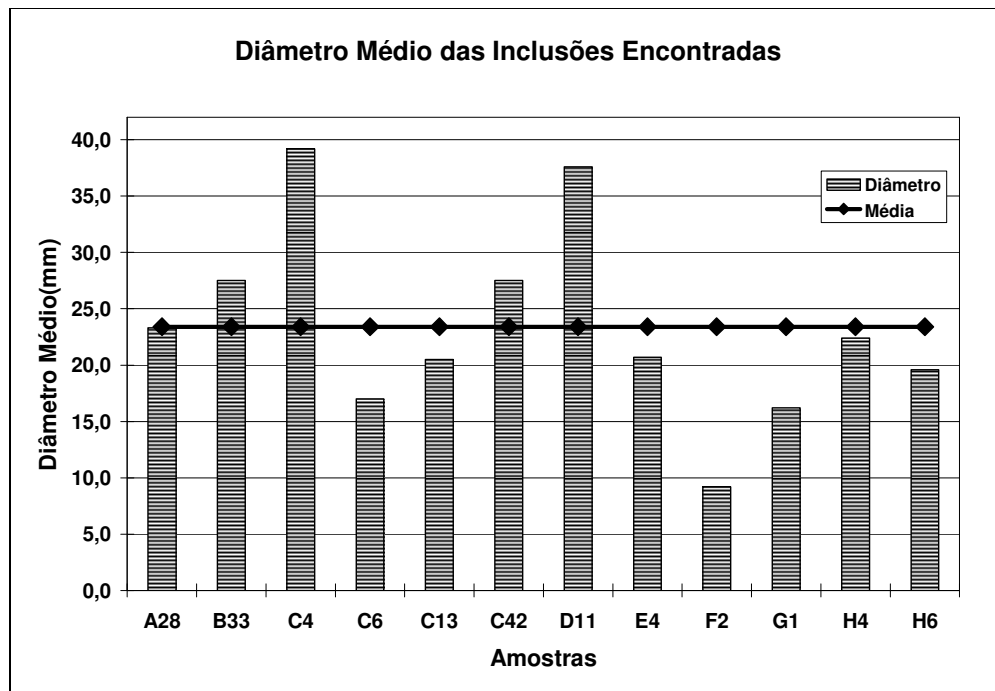


Figura 4.9 Diâmetro médio de inclusões encontradas nas proximidades do defeito, para cada corrida analisada para o aço ABNT 9254.

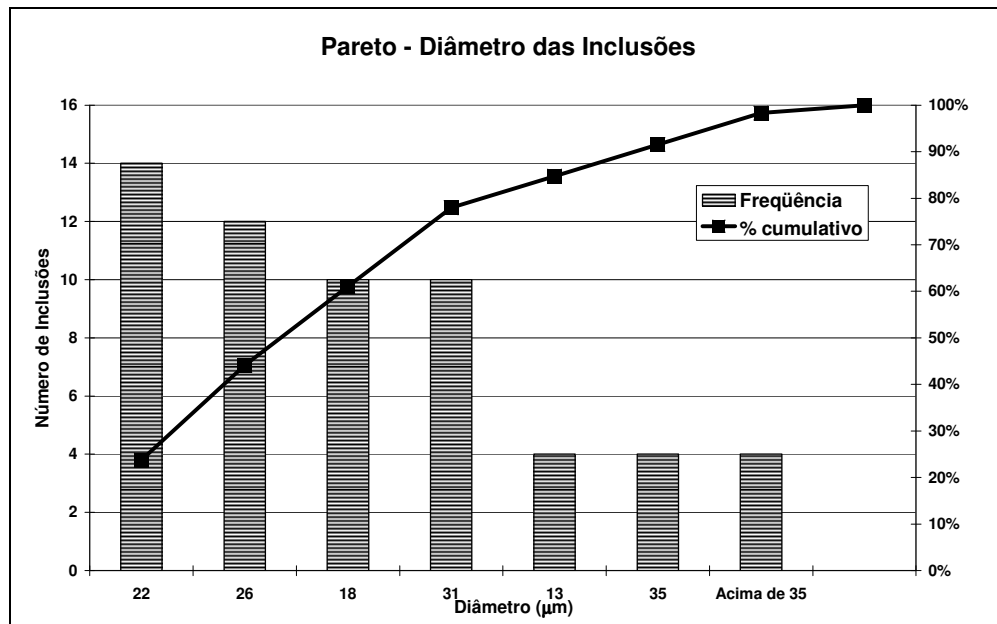


Figura 4.10 Pareto demonstrando o número de inclusões x diâmetro das inclusões nas proximidades do defeito, para o aço ABNT 9254.

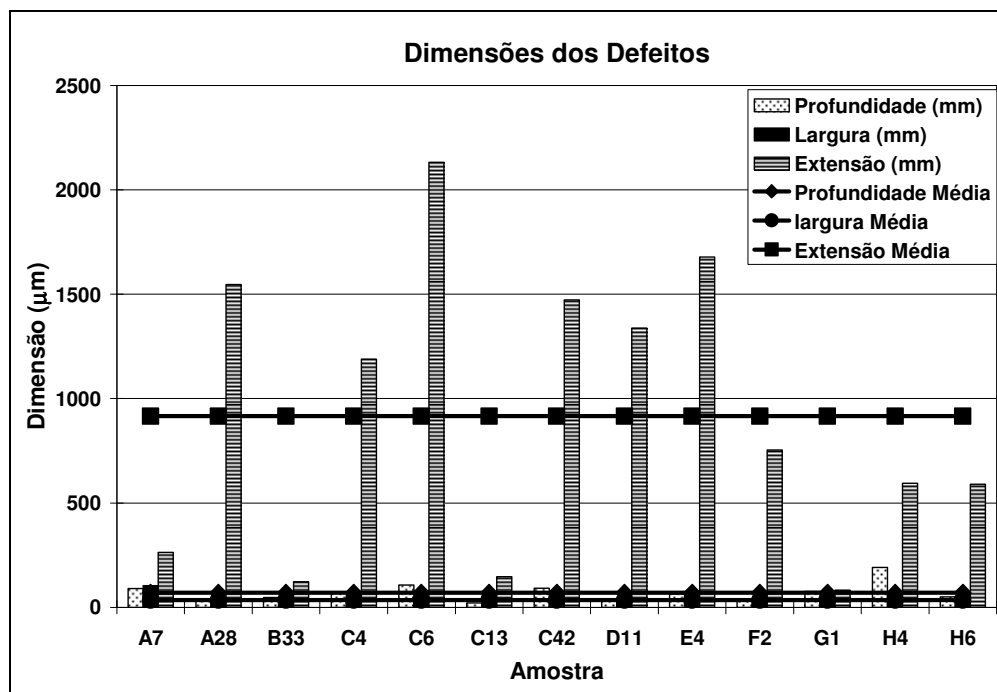


Figura 4.11 Dimensões dos defeitos tipo escama analisado pra o aço ABNT 9254.

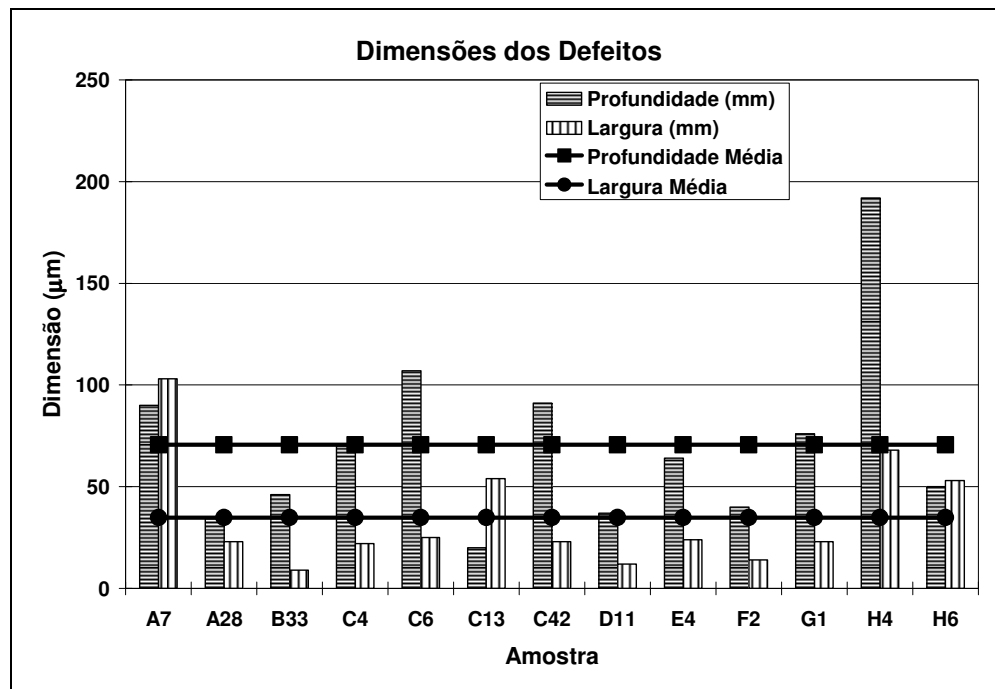


Figura 4.12 Dimensões dos defeitos tipo escama analisado para o aço ABNT 9254.

4.2 Aço ABNT 1045

As análises realizadas nas barras trefiladas do aço ABNT 1045 demonstraram que as origens dos defeitos tipo escamas estão distribuídos segundo a Figura 4.13. Mais de 95% de defeitos tipo escamas estão relacionados à aciaria. Um estudo preliminar indicou que havia os seguintes mecanismos iniciais para a formação desse tipo de defeito: (a) mecanismo de incrustamento de escória (Figura 4.14 a Figura 4.17), (b) remoção incompleta de trincas superficiais do tarugo (Figura 4.18), (c) além de marcas de guia ou de rolos de laminação (Figura 4.19). Sendo que nas amostras que apresentavam defeito de laminação não foram encontradas inclusões complexas ou aluminatos oriundos de incrustações na etapa de solidificação do aço.

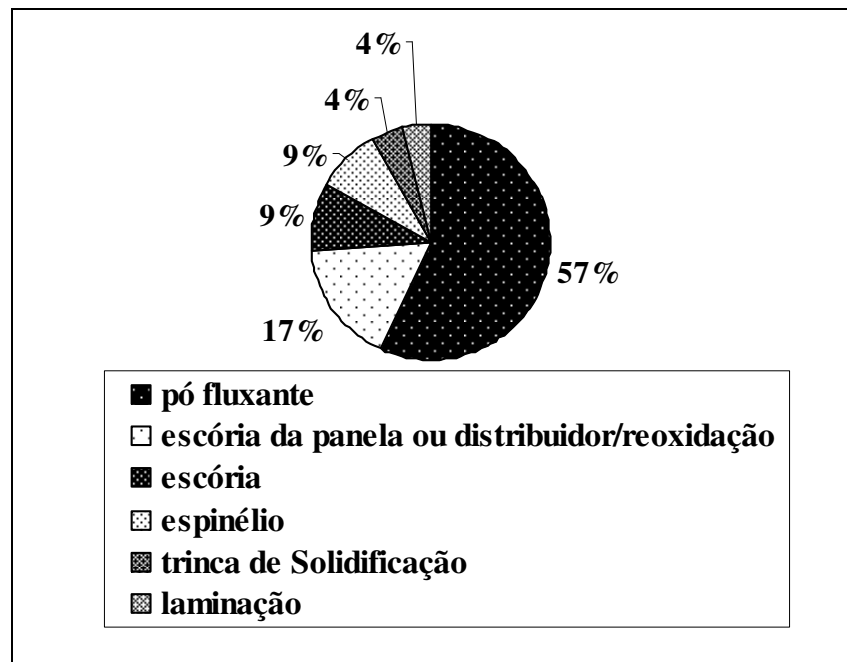


Figura 4.13 Origem dos defeitos tipo escama para no aço ABNT 1045.

Está apresentado somente um exemplo representativo de cada tipo de defeito analisado devido a grande quantidade de imagens geradas.

Devido à metodologia de caracterização ser idêntica e independe da qualidade de aço analisada as discussões dos resultados se assemelham ao aço ABNT 9254.

Na Figura 4.14 pode-se observar as características do defeito tipo escama gerado pela presença de escória na barra, através da macrografia em lupa de baixo aumento, micrografia em microscópio ótico com a amostra atacada com o reagente nital 2% e com cromato alcalino e MEV juntamente com o espectro de frequência na seção longitudinal e transversal da barra trefilada.

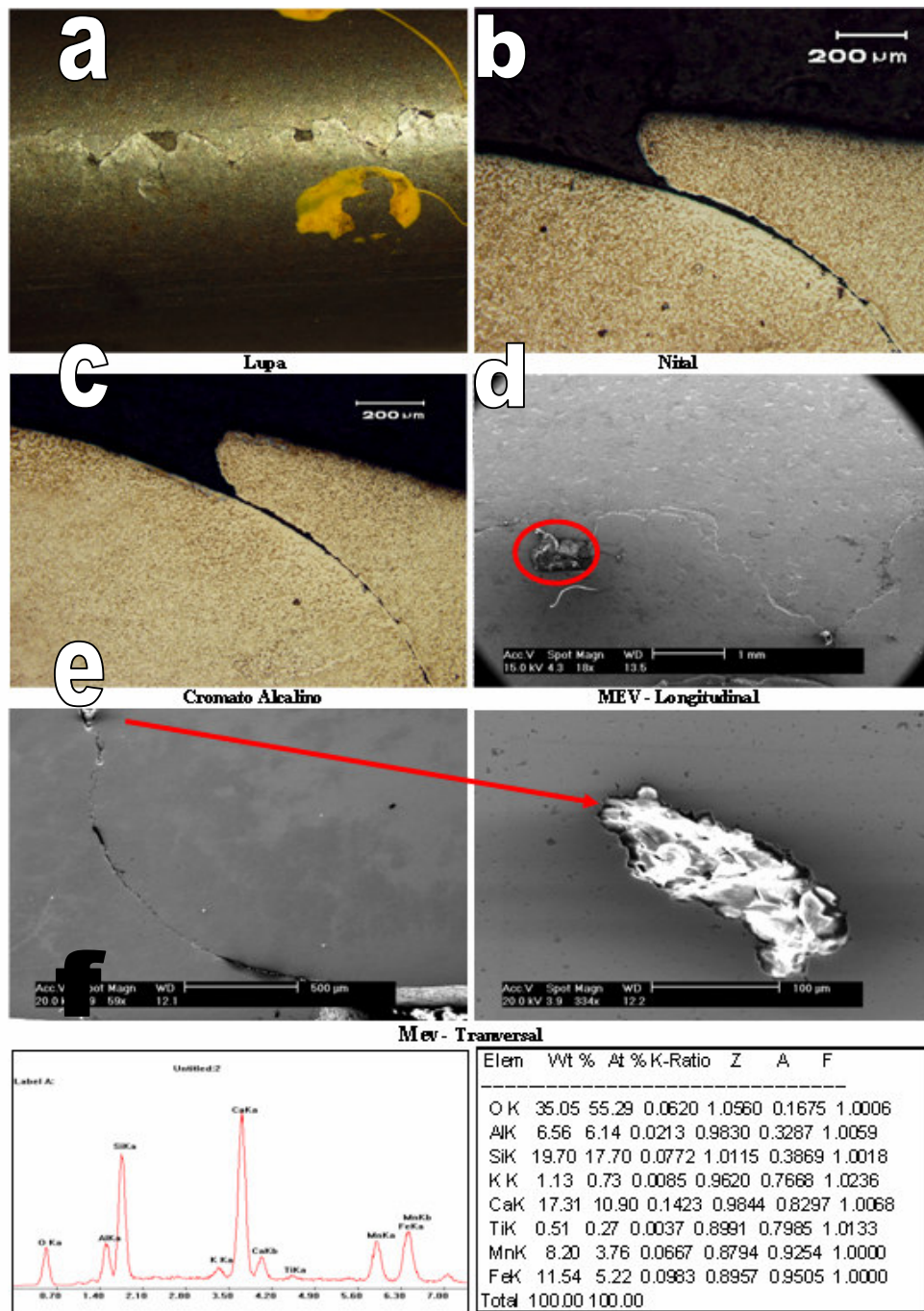


Figura 4.14 Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de escória na amostra 7 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b) micrografia em microscópio ótico (ataque nital 2%) e de (c) micrografia ataque Stead, (d) MEV (seção longitudinal) (e) MEV (seção transversal) e (f) o espectro de frequência nas seções: longitudinal e transversal da barra trefilada.

Na Figura 4.15 pode-se observar as características do defeito tipo escama gerado pela presença de espinelho na barra, através da macrografia em lupa de baixo aumento,

micrografia em microscópio ótico com a amostra atacada com o reagente nital 2%, e MEV juntamente com o espectro de frequência na seção longitudinal e transversal da barra trefilada.

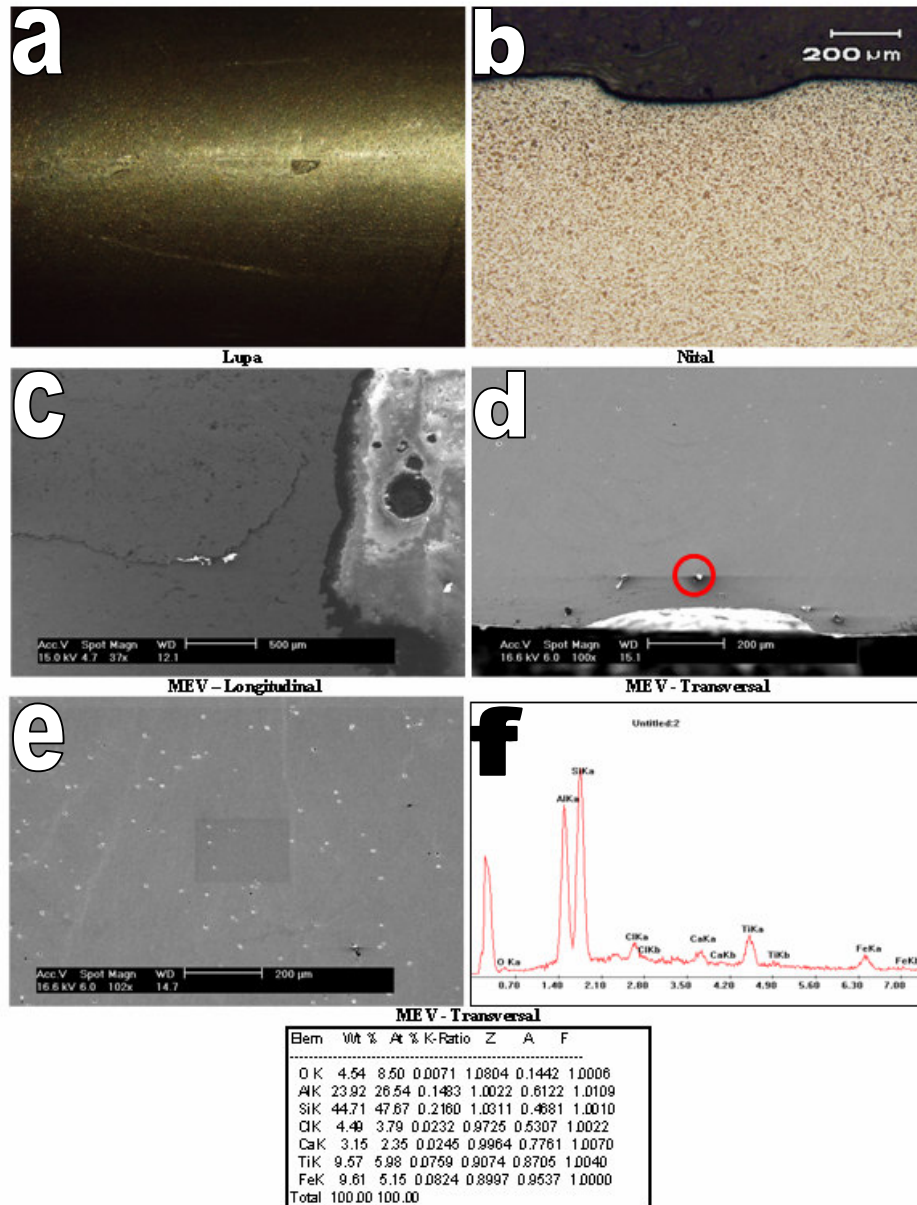


Figura 4.15 Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de espínélio na amostra 8 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b) micrografia em microscópio ótico (ataque nital 2%), (c) MEV (seção longitudinal), (d) MEV (seção transversal) juntamente com o (f) espectro de frequência na seção transversal da barra trefilada.

Na Figura 4.16 pode-se observar as características do defeito tipo escama gerado pela presença de escória da panela ou do distribuidor na barra, através da macrografia em

lupa de baixo aumento, micrografia em microscópio ótico com a amostra atacada com o reagente nital 2%, Stead e MEV juntamente com o espectro de frequência na seção longitudinal da barra trefilada.

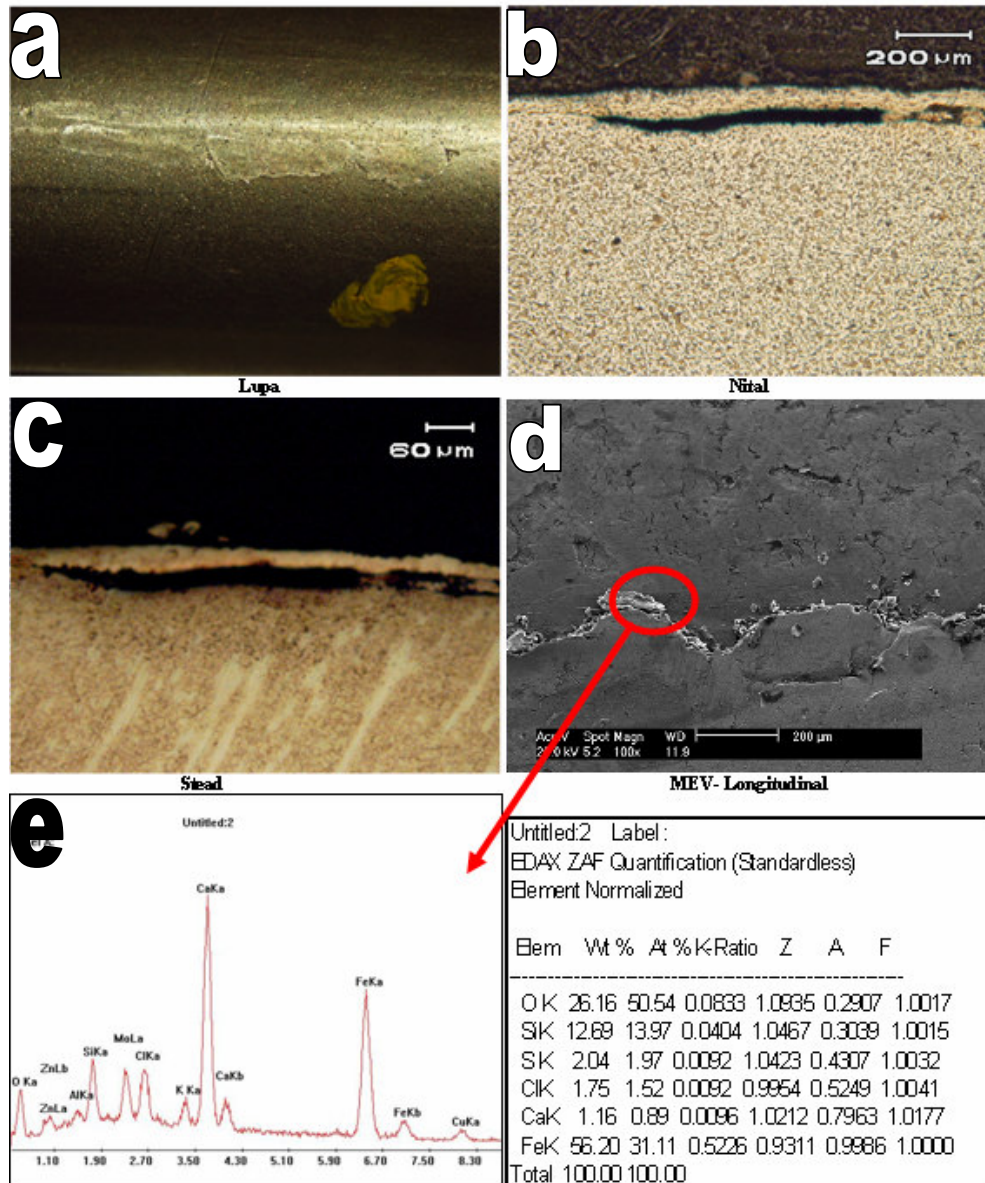


Figura 4.16 Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de escoria da panela e do distribuidor na amostra 4 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b) micrografia com os reagentes nital, (c) reagente Stead, (d) MEV juntamente com o (e) espectro de frequência na seção longitudinal da barra trefilada.

Na Figura 4.17 pode-se observar as características do defeito tipo escama gerado pela presença de pó fluxante na barra, através da macrografia em lupa de baixo aumento, micrografia em microscópio ótico com a amostra atacada com o reagente nital 2%, cromato alcalino e MEV juntamente com o espectro de frequência na seção longitudinal da barra trefilada.

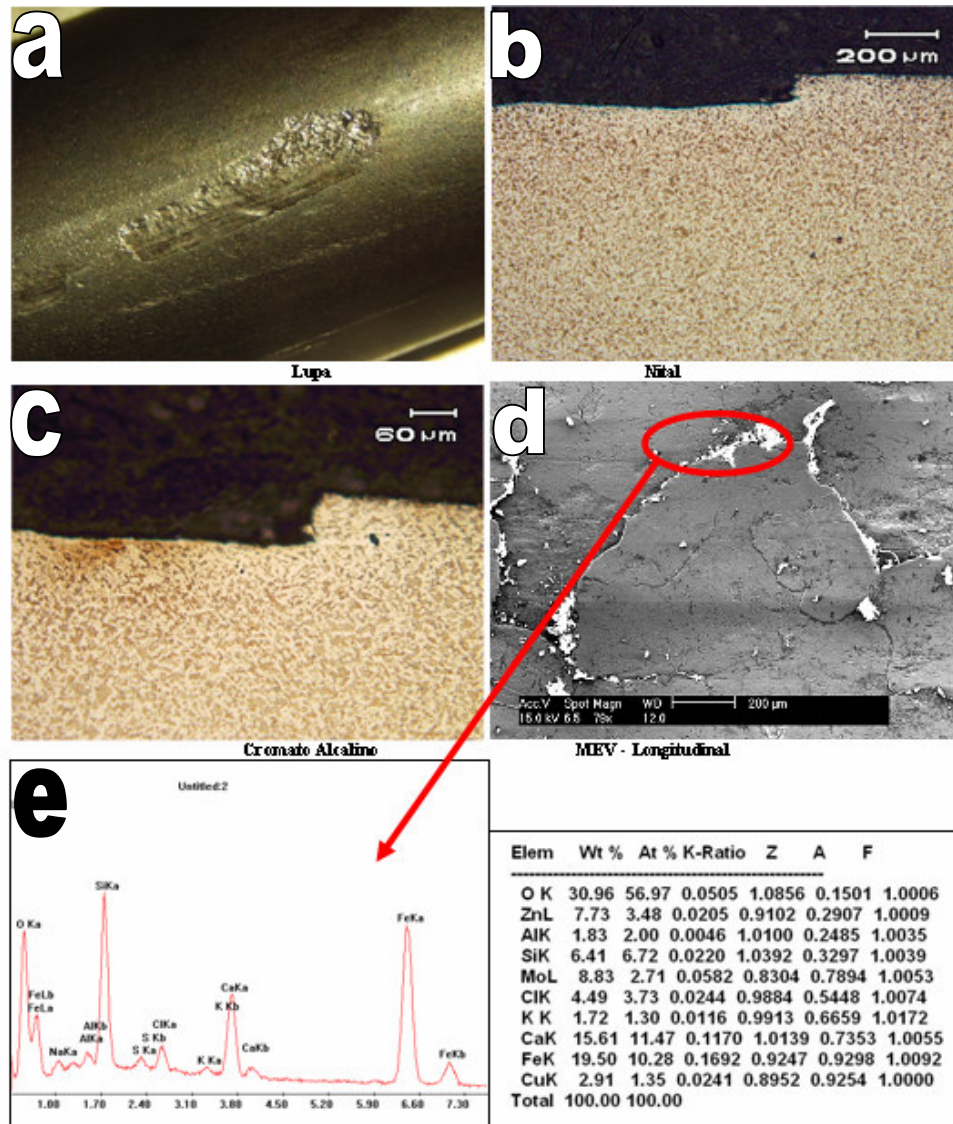


Figura 4.17 Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de pó fluxante na amostra 9 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b e c) micrografia com os reagentes nital e Cromato alcalino, (d e e) MEV juntamente com o espectro de frequência na seção: longitudinal da barra trefilada.

A Figura 4.18 demonstra a análise realizada na amostra 13 através da macrografia em lupa de baixo aumento, micrografia em microscópio ótico e de varredura na seção transversal da barra trefilada. As trincas normalmente apresentam grão mais refinado próximo ao defeito devido a seu ancoramento pelos óxidos. Já em regiões afastadas pode-se observar um tamanho de grão normal. E segundo Tsai (1990), a troca de grão de grosso para fino pode ser devido ao trabalho a quente localizado. O grão não cresce devido ao seu ancoramento pelos óxidos.

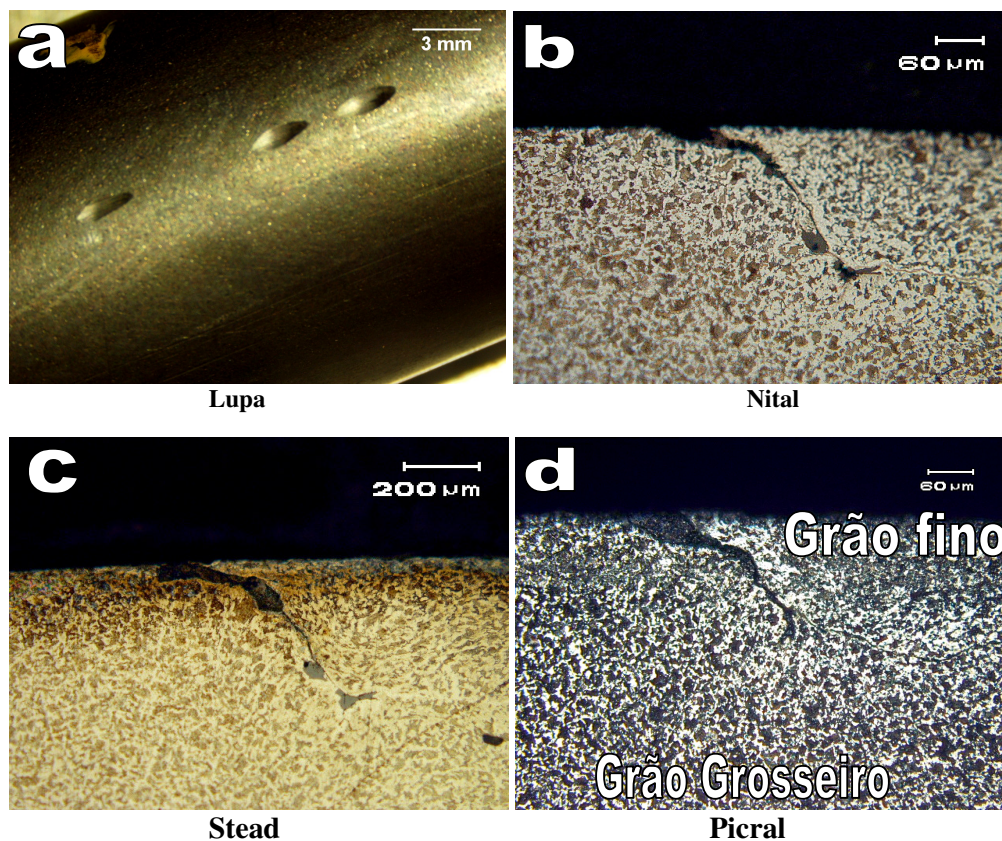


Figura 4.18 Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de trinca de solidificação na amostra 13 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b) micrografia em microscópio ótico com o reagente nital, (c) com o reagente cromato Alcalino e (d) com o reagente picral na seção transversal da barra trefilada.

Na Figura 4.19 pode-se observar a análise realizada na amostra 14 através da macrografia em lupa de baixo aumento, micrografia em microscópio ótico e de varredura na seção transversal da barra trefilada. E esta demonstra defeito contínuo na análise macro e, além disso, marcas de deformação devido a práticas inadequadas de laminação. Nestas amostras não foram encontradas inclusões complexas ou aluminatos oriundas de incrustações.

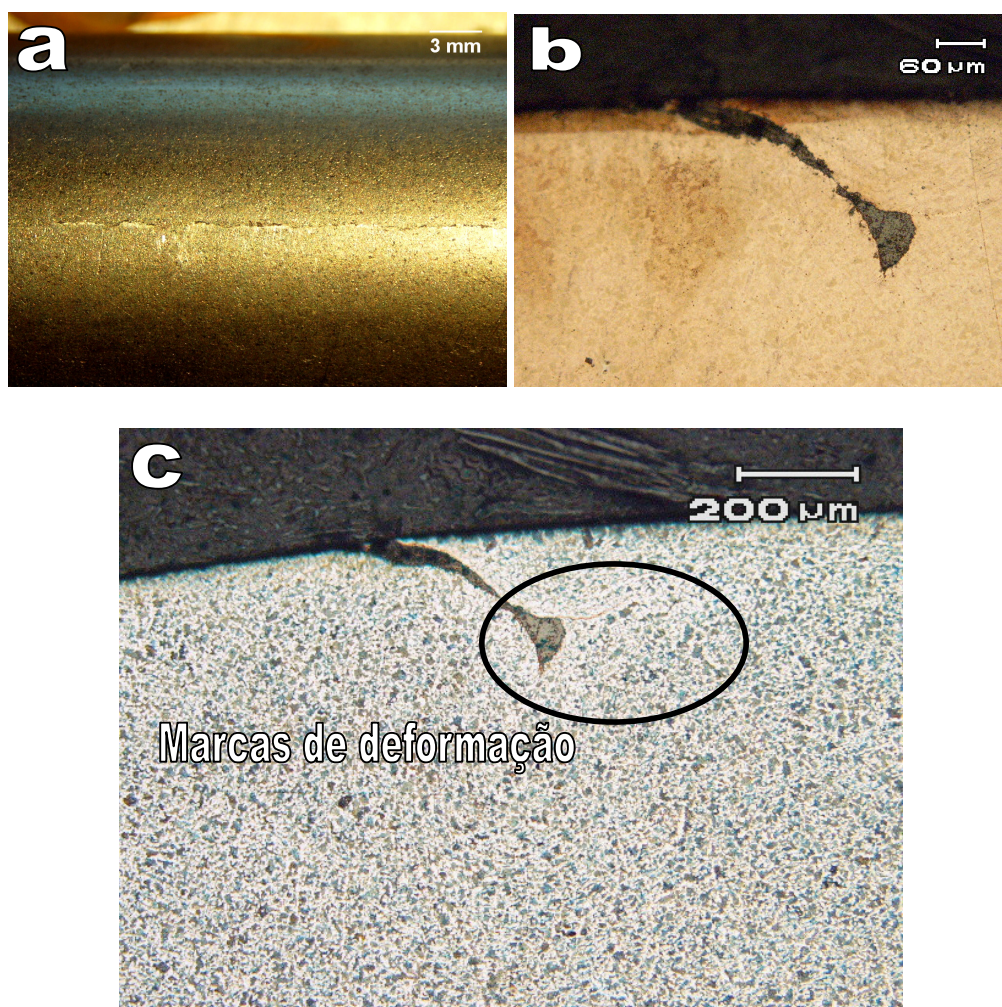


Figura 4.19 Características do defeito tipo escama facilitado pela presença de dobras de laminação na amostra 14 através da (a) macrografia em lupa de baixo aumento, (b) micrografia em microscópio ótico com os reagentes Stead e (c) com o reagente nital 2% na seção transversal da barra trefilada.

Conforme Tsai (1990), inclusões incrustadas subsuperficialmente representam a principal causa de escamas. Para verificar esta possibilidade, foi efetuada a contagem de

inclusões nas proximidades do defeito e em região oposta a ele. Também foi efetuada a medida do diâmetro das inclusões encontradas.

Também, de acordo com os álbuns de defeitos IAS e AISI, os defeitos tipo escama se caracterizam por apresentar pouca profundidade em relação à sua área superficial. Para tanto, foi efetuada a medida das dimensões dos defeitos encontrados, podendo-se verificar que eles apresentaram uma extensão consideravelmente maior em relação à profundidade e largura.

Na Figura 4.20 observa-se a distribuição das inclusões complexas encontradas na região transversal das amostras analisadas, em uma área de aproximadamente 0,2mm². Como pode-se observar foi encontrado maior quantidade de inclusões próximas ao defeito, em média em torno de 13 inclusões próximas e 10 inclusões no lado oposto ao defeito. Nestas amostras foram realizadas as medições para determinar o diâmetro médio de inclusões encontradas perto e longe do defeito tipo escama, observadas nas Figura 4.21 e Figura 4.22. E a maior parte das inclusões encontradas tem um diâmetro médio de 12,5 µm. Nas Figura 4.23 e Figura 4.24 são apresentadas às dimensões dos defeitos analisados para cada amostra. E estes se apresentam rasos e extensos.

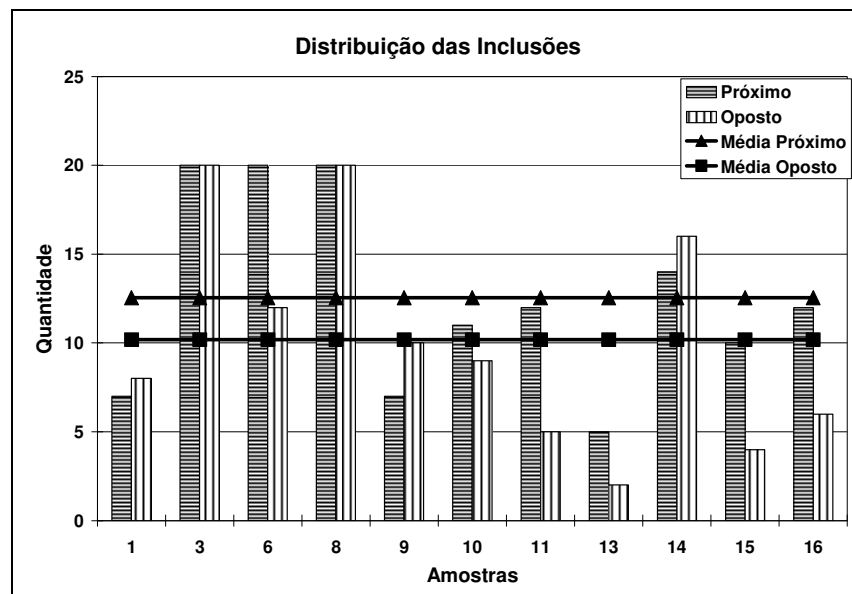


Figura 4.20 Diagrama representando a distribuição das inclusões encontradas próximas e do lado oposto do defeito tipo escama para a qualidade de aço ABNT 1045.

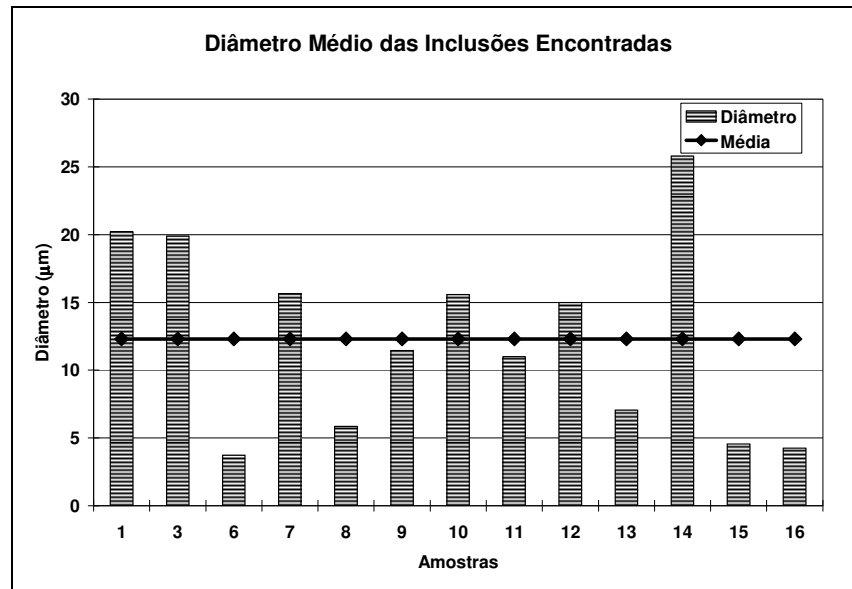


Figura 4.21 Representação do tamanho médio de inclusões encontradas para cada amostra com defeito pra a qualidade de aço ABNT 1045.

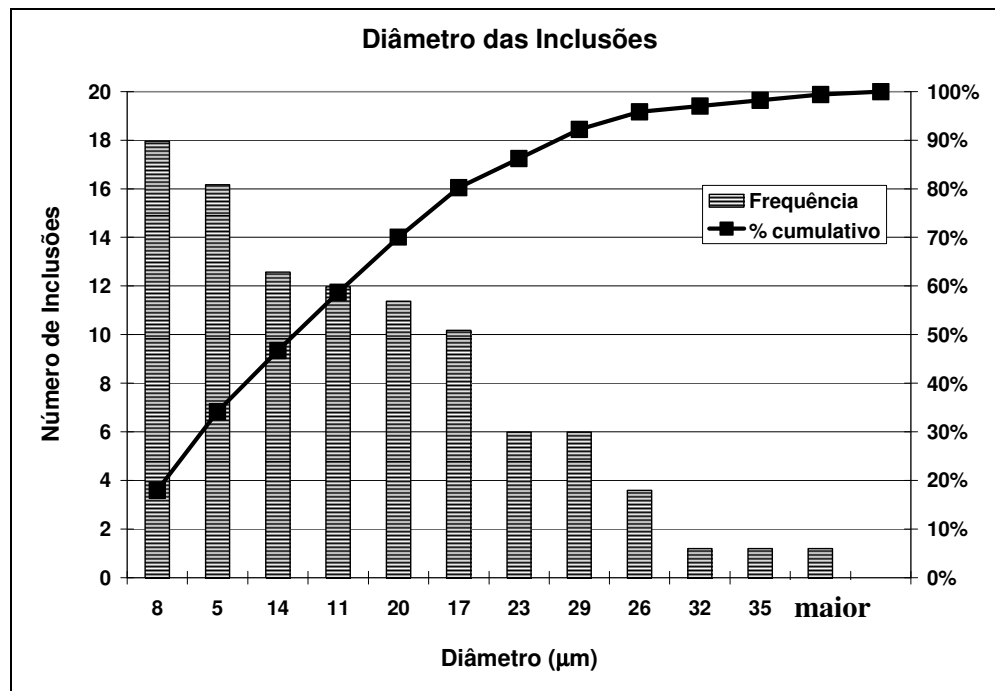


Figura 4.22 Pareto demonstrando o número de inclusões x diâmetro das inclusões para a qualidade de aço ABNT 1045.

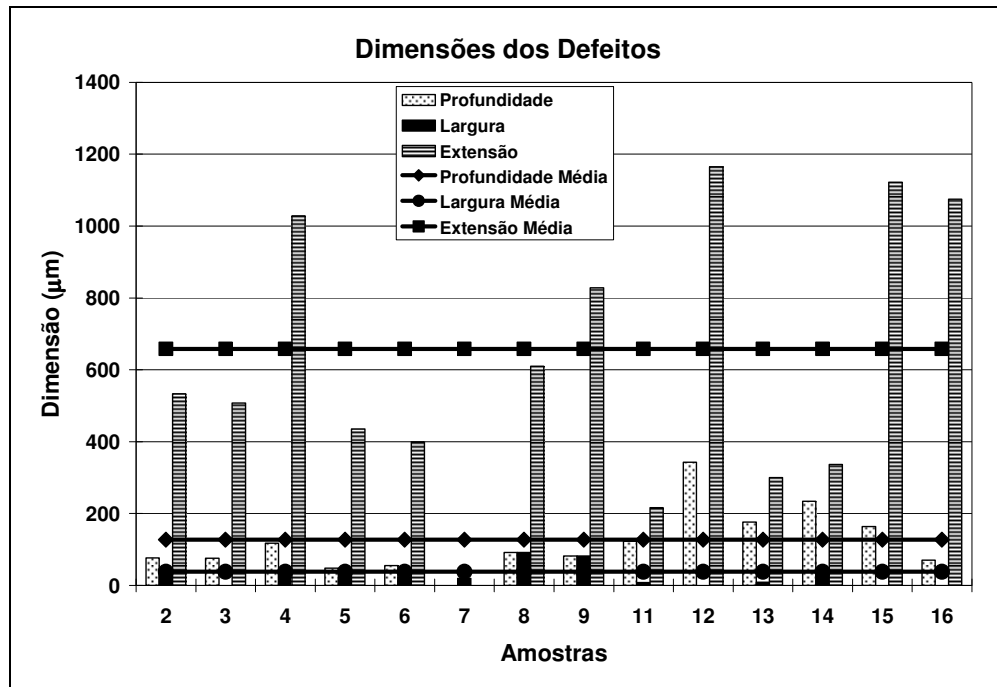


Figura 4.23 Dimensões dos defeitos tipo escama analisados para amostras do aço ABNT 1045.

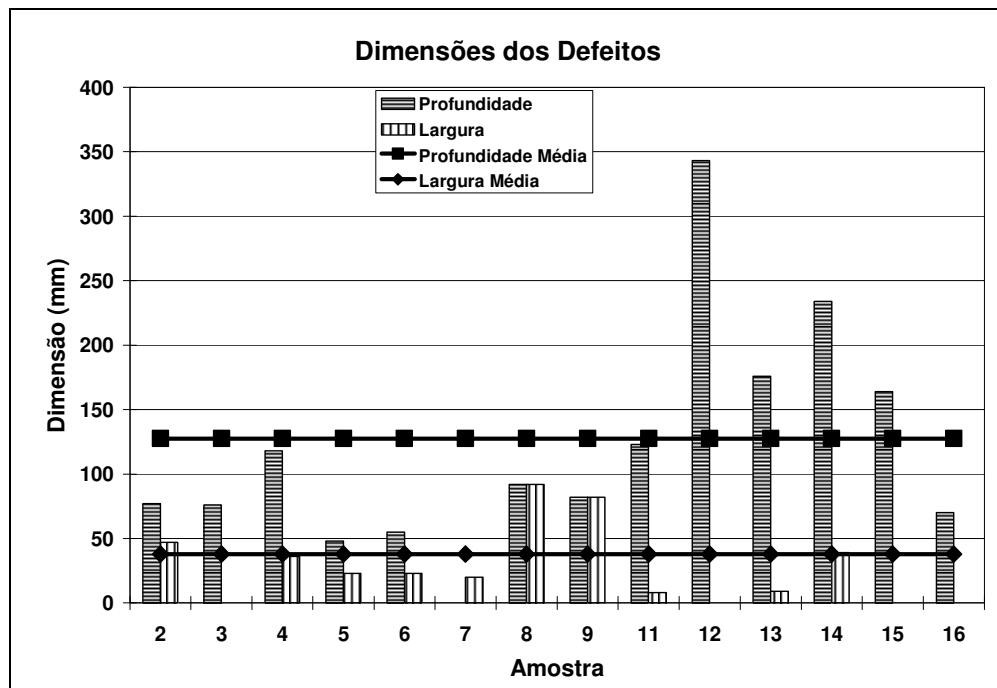


Figura 4.24 Dimensões dos defeitos tipo escama analisados para amostras do aço ABNT 1045.

5.0 CONCLUSÕES

Através das análises realizadas nas barras trefiladas com defeitos tipo escama da qualidade de aço ABNT 9254 ABNT 1045, conclui-se que as principais origens dos defeitos tipo escama são oriundos de defeitos pré-existentes no tarugo. Dentre os mecanismos que ocasionaram este tipo de defeito, destacam-se incrustamento da escória da panela ou reoxidação com 36%, pó fluxante incrustado com 24% e escória com 16% para a qualidade de aço ABNT 9254. E para a qualidade de aço ABNT 1045, destacam-se: pó fluxante incrustado com 57%, incrustamento da escória da panela ou reoxidação com 17%, espinélio com 9% e trincas de solidificação com 9%.

Os dados adquiridos comprovam que em média existem mais inclusões próximas ao defeito (em torno de 24) comparado ao lado oposto da barra com defeito (em torno de 13) para a qualidade de aço ABNT 9254. E para a qualidade de aço ABNT 1045 existem em torno de 13 inclusões próximas ao defeito comparado ao lado oposto da barra com defeito (em torno de 10), devido às partículas não metálicas incrustadas apresentarem menor grau de deformabilidade do que a matriz. Sendo assim, estas mesmas partículas não metálicas fragmentam-se em pequenas partículas nas vizinhanças do defeito na etapa de deformação plástica ao qual o tarugo/barra é submetida. A maior porcentagem das inclusões apresenta diâmetro entre 17 e 30 μm , apresentando um diâmetro médio de 24 μm para o aço ABNT 9254. E para a qualidade de aço ABNT 1045 a maior porcentagem das inclusões apresenta diâmetro entre 5 e 20 μm com um diâmetro médio de 12,5 μm .

Com relação às dimensões dos defeitos pode-se observar que a extensão é maior que a profundidade, e a profundidade é maior que a largura. Em média a extensão apresentou 916 μm , com uma profundidade de 70 μm e uma largura de 34 μm para o aço ABNT 9254. E para o aço ABNT 1045 em média a extensão apresentou 658 μm , com uma profundidade de 127 μm e uma largura de 38 μm . Logo, os defeitos analisados são na sua maioria rasos e extensos, o que poderia indicar alterações na superfície ou na microestrutura subsuperficial.

Através da coleta de amostras das qualidades de aço que apresentaram defeitos tipo escama e a sua análise utilizando-se diversos reagentes de ataque e técnicas de microscopia, aliado à utilização do microscópio eletrônico de varredura e EDS, foi possível efetuar uma caracterização e a determinação da provável origem deste defeito.

Inspeção visual e macrografias via magnaflux permitem a caracterização da distribuição dos defeitos na barra.

A análise por técnicas de microscopia ótica com diferentes reagentes de ataque químico permite uma diferenciação entre as prováveis causas dos defeitos sendo, no entanto, pouco eficaz na determinação da causa raiz do defeito.

A análise via microscopia eletrônica de varredura juntamente com o EDS demonstrou grande eficiência na determinação das origens dos defeitos observados.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

1. Este trabalho demonstrou ser possível criar uma metodologia capaz de identificar a origem do defeito superficial tipo escama. Com base na ampla aquisição de dados adquiridos durante a realização deste trabalho, seria interessante realizar um trabalho visando à minimização destes defeitos utilizando as contramedidas indicadas pelos vários pesquisadores.
2. Sugere-se utilizar a mesma metodologia do trabalho para determinação da origem de outros defeitos superficiais como, por exemplo: trincas.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDE - Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção.<
<http://www.abende.org.br/>> Acesso em 20 de julho de 2006.

AISI Technical Comitee on Rod and Bar Mills. **Detection, Classification and Elimination of Rod and Bar Surface Defects.** AISI Publication. N°:MT 003 – 3, 1996.

Belzunce, F.J.; Ziadi, A.; Rodriguez, C. **Structural integrity of hot strip mill rolling rolls”, Engineering Failure Analysis**, v.11, pp. 789–797, 2004.

Bommaraju, R.; Jackson, T; Lucas, J.; Skoczylas, G. **Design, Development and Applications of Mold Powder to Reduce Sliver.** Iron and Steelmaker, pp. 21-27, Abril 1992.

Bonilla, C. **Slivers in Continuous Casting.** Iron and Steelmaker. pp. 41-45, November 1995.

Chakraborty, S; Hill, W. **Reduction of Alumina Sliver at Great Lakes no. 2 CC.** Steelmaking Conference Proceedings, pp. 389-395, 1994.

Chandler, H; Flint, V; Davidson, G. M.; Boring, R. L.; Powers C. L. **Heat Treater’s Guide – Practices and Procedures for Irons and Steels - American Society of Metals Publishing**, 2nd Edition, 1995.

Dalmaso et al.. **Steel Clanliness in Continuous Casting Slabs – ISS 55th Steelmaking Conference**, november de 1995.

Emling, W.H.; Lakshminarayana, B.V. **An AISI-Sponsored Collaborative Project on FeO-Type Sliver Defects.** Steelmaking Conference Proceedings, pp. 453-459, 2000.

Emling, Z. H.; Waugaman, T. A. **Subsurface Mold Slag Entrainment in Ultra Low Carbon Steel.** Steelmaking Conference Proceedings, pp. 371-379, 1994.

Funuaka, Y.; Tsuji, K.; Yamana, H.; **Quality Improvement of Steel in the Bloom Caster at Kobe Works.** SEAIISI Quartely, Vol 33, number 1, 2004.

Hanao, M.; Kawamoto, M.; Mizukami, H.; Hanazaki K. **Influence of Molten Steel Flow Velocity near the Meniscus in Continuous Casting Mold on Surface Quality of Slabs.** Iron and Steelmaker, pp. 55-59, Novembro 2000.

Hernandez, D.; Morales D.; Cabañas-Moreno, J. **The Spheroidization of Cementite in a Médium Carbon Steel by Means of Subcritical and Intercritical Annealing.** ISTJ international, vol. 32, 1992.

Herrera, G. and Santos, R.; **Improvement in Surface Quality and Internal Cleanliness of Thin-Slab Casting at HYLSA.** September 2005.

IAS – Instituto Argentino de Siderurgia – **Defeitos em Produtos Longos de Aços ao Carbono e Baixa Liga,** IAS Publicações. Outubro de 2004.

Kubota, J.; Kubo, N.; Ishii, T.; Suzuki, M.; Aramaki, N.; Nishimachi, R. **Steel Flow Control in Continuous Slab Caster Mold by Traveling Magnetic Field.** NKK Technical Review, no. 85, 2001.

Leal, Paulo Ribeiro; **Caracterização e Controle de Macro-inclusões em Tarugos de Lingotamento Contínuo.** Dissertação de mestrado, PPGEM – UFRGS, 2000.

Leoneris, A.; Fagundes G.; Teichmann L.; Reguly A.; **Caracterização de Defeitos Superficiais Tipo Escama em Barras Trefiladas.** 43º Seminário de Laminação da ABM, 2006.

Leoneris, A.; Stadtländer R.; Reguly A.; **Metodologia para Caracterização do Defeito Superficial Tipo Escama em Barras Trefiladas.** 61º Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Matérias - ABM, 2006.

Luyckx, L. **Incomplete Mixing of Manganese as Origin of Surface Pencil Lines in Aluminum-Killed Steel for Autobody.** Journal of Metals, pp. 61-68, Junho 1968.

Madias, J.; Reda, L. **Defeitos em Produtos Longos de Aços ao Carbono e Baixa Liga.** IAS publicações– Instituto Argentino de Siderurgia, 2004.

Marston, H. F.; Bolt, P. H.; Leprince, G.; Röder, M.; Klima, R.; Niska, J.; Jart, M. **Challenges in the modeling of scale formation and decarburization of high carbon, special and general steel.** Ironmaking and Steelmaking, v. 31, no 1, pp. 57-65, 2004.

Menezes, G. A.; Torres, I. V. **Defeitos Superficiais em Fio-Máquina de Aço Carbono e suas Conseqüências.** XXXV Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, pp. 543-558, 1980.

Meyette, C. L.; Elliott, V.E. **A Method for Determining the Origin of Surface Defects in Rolled Steel Products.** Transactions of the AIME, v. 176, pp. 201-218, 1948.

Milyuts, V. G.; Pavlov, V. V.; Kulakov, V. V.; Mullko, G. N.; Tarvid, L. S. **Effect of Steelmaking Factors on Scab Damage to Steel 17G1S-U Slabs and Plates.** Orsk-Khalilovo Metallurgical Combine, no. 10, pp. 26-28, 1983.

Morales J. A., Francois M. G., Trindade L. B., Vilela A. C. F., **Physical and Numerical Modeling on Steel Process Optimization**, PPGEM – UFRGS, (a ser publicado, 2006).

Munther, P. A.; Lenard, J. G. **The effect of scaling on interfacial friction in hot rolling of steels.** Journal of Materials Processing Technology, v. 88, pp. 105–113, 1999.

Nakamura, H.; Kohira, S.; Kubota, J.; Kondo, T.; Suzuki, M.; Shiratani, Y. **Technology for Production of High Quality Slab at High Speed Casting.** Steelmaking Conference Proceedings, pp. 409-415, 1992.

Prabhu, N.; Pinkowski, J. **Measuring Cold Rolled Surface Quality Based on Data Collected at the Caster.** Steelmaking Conference Proceedings, pp. 491-495, 1990.

Quaresma, J. M. V.; Garcia, A. **Análise de Fatores de Influência na Formação de Defeitos Superficiais em Lingotes.** ABM publicações – Associação Brasileira de Metais, páginas 303 – 324, 1982.

Ray A.; Dhua S.; Dhua S.; Jha S. **Electrin- Probe Microanalysis: Some Applications in the Assessment of Steel Product Quality.** X-Ray Spectrometry 28, pp 41-50, 1999.

Sasai, K.; Mizukami, Y. **Effect of Composition of Immersion Nozzle on Occurrence of Blister Defects in Steel Sheet.** ISIJ International, v. 36, no. 1, pp. 45-51, 1996.

Sicorski, Rafael. **Modelagem Numérica Aplicada aos Fenômenos de Escoamento e Mistura em Modelos Físicos de Pannels de Aciaria**. Dissertação. PPGEM: UFRGS, 2006.

Sidorenko, D.; Bonilla, C. **Quality Evaluation of Billet Surface at Ivaco Rolling Mills. Iron and Steelmaker**, pp. 35-39, Abril 1998.

Thomas, B. G.; Zhu, H. **Thermal Distortion of Solidifying Shell near Meniscus in Continuous Casting of Steel**". JIM / TMS Solidification Science and Processing Conference, Honolulu, pp. 197-208, 1995.

Thomas, B. G.; Lui, D.; Ho, B. **Effect of Tranverse Depressions and Oscillation Marks on Heat Transfer in the Continuous Casting Mold**. In: Sensors and Modeling in Materials Processing: Techniques and Applications, S. Viswanathan, R.G. Reddy, and J.C. Malas, eds., The Minerals, Metals, & Materials Society, Warrendale, PA., pp. 117-142, 1997.

Thomas, B. G.; Zhang, L.; Wang X.; Cai K. **Evolution and Control of Steel Cleanliness - Review**. 85th Steelmaking Conference Proceedings, ISS - AIME, Warrendale, PA, pp. 431-452, 2002.

Tsai, H. T.; Sammon, W. J.; Hazelton, D. E. **Characterization and Countermeasures for Sliver Defects in Cold Rolled Products**. Steelmaking Conference Proceedings, pp. 49-59, 1990.

Ward, R. **Oxide-metal Layers Formed on Commercial Iron-silicon Alloys Exposed to High Temperatures**. Metals Technology, pp. 141-155, 1945.

Yu, Y.; Lenard, J. G. **Estimating the resistance to deformation of the layer of scale during hot rolling of carbon steel strip**. Journal of Materials Processing Technology, v. 121, pp. 60-68, 2002.

Zhang, Li-Feng. **Inclusions and Bubble in Steel – A Review**. Journal of Iron and Steel, Research, International, 2006.