UNESP UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

FLÁVIO AUGUSTO MONTEIRO RODRIGUES

CARACTERIZAÇÃO DO DEFEITO TIPO TRINCA DE LAMINAÇÃO, OCORRIDO NO PROCESSO DE LAMINAÇÃO DE BARRAS DE AÇO.

Guaratinguetá
2013

FLÁVIO AUGUSTO MONTEIRO RODRIGUES

CARACTERIZAÇÃO DO DEFEITO TIPO TRINCA DE LAMINAÇÃO, OCORRIDO NO PROCESSO DE LAMINAÇÃO DE BARRAS DE AÇO.

Trabalho de graduação apresentado à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do diploma de graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá
2013

R696c

Rodrigues, Flávio Augusto Monteiro
Caracterização do defeito tipo trinca de laminação, ocorrido no processo de laminação de barras de aço / Flávio Augusto Monteiro Rodrigues – Guaratinguetá : [s.n], 2013.
71 f : il.
Bibliografia: f. 70-71

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.

Orientador: Prof Dr Marcos Valério Ribeiro
Coorientador: Eng. Flávio Honório Pinto

1. Laminação (Metalurgia) 2. Barras de aço I. Título

CDU621.771

UNESP UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

CARACTERIZAÇÃO DO DEFEITO TIPO TRINCA DE LAMINAÇÃO, OCORRIDO NO PROCESSO DE LAMINAÇÃO DE BARRAS DE AÇO.

FLÁVIO AUGUSTO MONTEIRO RODRIGUES

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
Orientador/UNESP-FEG

Engenheiro FLÁVIO HONÓRIO PINTO
Externo

Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
UNESP-FEG

Dezembro de 2013

de modo especial aos meus pais *Edson* e *Regina*, aos quais devo a maior gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro* que me possibilitou realizar este trabalho.

em especial ao engenheiro Flávio Honório, que foi meu coorientador.

aos meus pais Eds*on* e *Regina*, que sempre me apoiaram nos estudos em todos os momentos, me aconselharam e são exemplos de vida.

aos meus irmãos *Carlos Eduardo* e *Luis Gustavo* que sempre me instruíram a buscar um futuro melhor.

aos meus verdadeiros amigos, com quem vivi os melhores anos de minha vida, dentro e fora da faculdade que são fonte de admiração e inspiração.

e a minha namorada Raphaela, que encontrei nesta reta final e é foi fonte de incentivo e apoio.

“Se você tiver coragem, sempre terá força o suficiente
para superar os desafios da vida.”

Autor desconhecido

RODRIGUES, F. A. M. **Caracterização do defeito tipo trinca de laminação, ocorrido no processo de laminação de barras de aço.** 2013. 71 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

Os processos de conformação mecânica são os principais meios de transformação. Dentre todos os processos, o mais utilizado é o de laminação sendo este dividido em produtos planos e produtos não planos. Nos produtos planos estão classificadas as chapas, e nos produtos não planos as barras e perfis. Sendo assim os produtos de laminação, em sua grande maioria, são matérias primas para outros processos de transformação, como estampagem, forjamento, usinagem, dobra entre outros. Este trabalho possui o foco em produtos não planos, assim classificadas as barras e perfis, observando um ponto fundamental nos processos que é a qualidade do produto. Ele demonstra através de análise metalográfica de barras de aço laminadas a quente, as características das trincas superficiais nestas barras.

PALAVRAS-CHAVE: Laminação. Trincas. Laminação de produtos não planos.

RODRIGUES, F. A. M. **Characterization of the defect type of lamination crack occurred on the bar rolling process of steel.** 2013. 71 f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

The mechanical forming processes are the main means of transformation. Among all processes, the most used is rolling and broken down into flat and non-flat products. In the flat products are classified plates, and products no plans bars and profiles. Thus laminating products, mostly, are the raw materials for other processes of transformation, as stamping, forging, machining, bending and more. This work has focused on non-flat products, classified as bars and rods, watching a key point in the proceedings that is the product quality. Here is demonstrated through metallographic analysis of steel bars, hot-rolled, the characteristics of surface cracks in these bars.

KEYWORDS: Rolling Mill. Cracks. Rolling non flat products

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Patente de John Payne de 1728 (ARAUJO, 1997). 15
Figura 2 – Representação do processo de laminação de uma chapa plana (http://www.cimm.com.br). 17
Figura 3 - Laminação de barras e perfis estruturais. (DIETER, 1981). 18
Figura 4 - Construção compacta de uma cadeira de laminador de barras (ARAUJO, 1997)... 19
Figura 5 – Exemplo de um cilindro de laminação de produtos não planos (CHIAVERINI, 1986). 20
Figura 6 – Arranjo de um laminador Duo (ARAUJO, 1997). 23
Figura 7 – Arranjo de um laminador duo reversível (ARAUJO, 1997). 24
Figura 8 – Arranjo de um laminador trio (ARAUJO, 1997). 24
Figura 9 – Arranjo de um laminador quádruo (ARAUJO, 1997). 25
Figura 10 -Arranjo de um trem contínuo composto por gaiolas horizontais e verticais (CODA 2006a). 26
Figura 11 - Arranjo de um trem aberto. (CODA 2006a). 26
Figura 12 - Fluxograma simplificado do processo de laminação a quente (SILVA,2010). 28
Figura 13 - Problemas de qualidade em tarugo de lingotamento contínuo. 29
Figura 14 - Preparação da superfície de um tarugo proveniente de lingotamento contínuo (VILELA, 2007). 30
Figura 15 - Trincas internas em um tarugo (PENNA, 2005). 30
Figura 16 - Diagrama esquemático das propriedades mecânicas próximas à temperatura de fusão durante o lingotamento contínuo do aço (adaptado de WON et al 2000). 31
Figura 17 - Aspecto de uma trinca transversal em um tarugo (MADIAS, GENZANO E REDA). 32
Figura 18 Detalhe de uma trinca transversal no microscópio (MADIAS, GENZANO E REDA). 32
Figura 19 Defeito V (MADIAS, GENZANO E REDA). 33
Figura 20 - Defeito V em corte transversal - (MADIAS, GENZANO e REDA). 33
Figura 21 - Defeito longitudinal, proveniente da trinca transversal (MADIAS, GENZANO e REDA). 34

Figura 22 - Macronanálise com magnaflux mostrando o defeito tipo escama (VIANA, 2009). 36
Figura 23 - Micrografia de amostra com defeito tipo escama atacada com reagente nital 2% (VIANA, 2009). 37
Figura 24 - Dobra (VIANA, 2009) 38
Figura 25- Diagrama de causa e efeito para formação de trincas de laminação (LIM, 2000). 41
Figura 26 - Relação entre aumento da temperatura de reaquecimento e ocorrência de defeitos superficiais (LIM, 2000). 41
Figura 27 Relação entre esforço e propagação. 42
Figura 28 – Amostra. 44
Figura 29 - Equipamento de corte. 45
Figura 30 – Corte sendo efetuado. 46
Figura 31 - Final do corte. 46
Figura 32 - Etapa de lixamento. 47
Figura 33 -Polimento da amostra. 48
Figura 34 - Microscópio metalúrgico Epiphot. 49
Figura 35 - Amostra barra laminada Ø 44,45mm, com indicação da posição do defeito. 50
Figura 36 –Fotomicrografia amostra 01, ampliação 50X. 51
Figura 37 – Fotomicrografia amostra 02, ampliação 50X. 52
Figura 38 – Amostra barra laminada Ø 51,94 mm. 53
Figura 39 - Amostra barra laminada Ø 51,94mm, com indicação da posição do defeito. 53
Figura 40 - Fotomicrografia, ampliação 50X. 54
Figura 41 - Amostra barra laminada Ø 34,93 mm, com indicação da posição do defeito. 55
Figura 42 - Fotomicrografia amostra 01, ampliação 100X. 55
Figura 43 - Fotomicrografia amostra 02, ampliação 100X. 56
Figura 44 - Fotomicrografia amostra 03, ampliação 100X. 57
Figura 45 - Amostra barra laminada Ø 60,32 mm, com indicação da posição do defeito. 58
Figura 46 - Fotomicrografia amostra 01, ampliação 100X. 59
Figura 47 - Fotomicrografia amostra 02, ampliação 50X. 60
Figura 48 - Amostra barra laminada Ø 44,45 mm, com indicação da posição do defeito. 61
Figura 49 - Fotomicrografia amostra 01, ampliação 100X. 61
Figura 50 - Fotomicrografia amostra 3, ampliação 100X. 62
Figura 51 - Fotomicrografia amostra 3A, ampliação 200X. 63

Figura 52 - Fotomicrografia 50X parte 1. 64
Figura 53 - Fotomicrografia 50X parte 2. 64
Figura 54 - Junção das imagens. 65
Figura 55 - Fotomicrografia 200X. 66
Figura 56 - Fotomicrografia 100X. 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Exemplos de processos e respectivos defeitos superficiais (MADIAS, 2004). 35
Tabela 2 - Principais defeitos superficiais em barras laminadas (SILVA, 2010). 35
Tabela 3- Composição dos aços. 44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15
2.1 História da laminação 15
2.2 Classificação dos produtos laminados 16
2.3 Laminação – Propósito 17
2.4 Cadeiras de laminação 18
2.5 Cilindro de laminação 19
2.6 Laminação a quente 21
2.7 Laminação a frio 22
2.8 Laminadores quanto à função 22
2.8.1 Primário ou de desbaste 22
2.8.2 Acabadores 23
2.9 Arranjos dos cilindros nos laminadores 23
2.9.1 Duo 23
2.9.2 Trio 24
2.9.3 Quádruo 25
2.10 Tipos básicos de laminadores 25
2.10.1 Trens contínuos 25
2.10.2 Laminador tipo aberto 26
2.11 Laminação de barras e perfis 27
2.12 Fluxograma do processo de laminação de barras a quente 27
2.13 Matérias-primas do processo de laminação a quente 28
2.13.1 Defeitos nos tarugos - trincas internas 30
2.13.2 Defeitos nos tarugos - trincas tranversais 32
2.14 Defeitos em produtos Laminados 34
2.14.1 Principais defeitos superficiais em barras laminadas 36
2.15 Abordagem mais detalhada – Trincas 39
2.15.1 Trincas de aciaria 39
2.15.2 Trincas de laminação 40
3 MATERIAIS E MÉTODOS 44
4 ANÁLISES E RESULTADOS 50
5 CONCLUSÕES 68
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 70

1 INTRODUÇÃO

O objetivo desse trabalho foi realizar a caracterização do defeito denominado trinca de laminação em barras laminadas. É preciso observar que as trincas são denominadas de laminação, pois é após este processo que são observadas. Porém a origem da trinca muitas vezes não é evidente. Esta origem em muitas vezes é resultado de um defeito do tarugo, que devido aos esforços de laminação são transformados em trincas.

Em um mercado globalizado, onde a competitividade é grande, a qualidade sempre é um diferencial. Ela eleva o lucro, pois está atrelada aos custos de produção, considerando-se assim preço = custos + margem de lucro. A margem de lucro pouco pode ser alterada, pois os mercados estão estabelecidos e há forte concorrência. Faz-se assim necessário as empresas trabalharem para a redução dos seus custos. Visto que qualidade é um ponto impactante nos custos, o sucateamento e o retrabalho em um processo industrial são sempre custos indesejáveis. A utopia é produzir um produto com qualidade e que não gere sucateamento ou retrabalho, porém os processos são dinâmicos e sofrem diversas influências que interferem no produto final.

Este trabalho foi baseado em uma empresa siderúrgica nacional, que atua na produção de aços especiais, na forma de produtos laminados não planos, para o mercado automotivo. Uma área que necessita ter muita qualidade, e que gera produtos que precisam dar garantia de segurança, pois são produzidos com esses aços, diversos componentes de um automóvel, como por exemplo: ponta de eixo de rodas, molas e outros. Elementos que precisam ser seguros e confiáveis. A qualidade desses elementos está muito dependente da matéria prima, no caso, o aço laminado nesta siderúrgica.

Assim, a qualidade do processo em uma laminação terá impacto em seus custos, e também na qualidade dos produtos no resto da cadeia produtiva, nos seus clientes. A origem do defeito em uma laminação pode ser devido à qualidade dos tarugos que são a matéria prima do processo, ou podem ser gerados durante a laminação proveniente de alguma interação mecânica. Um dos defeitos mais críticos no produto laminado são as trincas. Isso, pois ela raramente permite que o material seja retrabalhado, e inspeção às vezes pode falhar, pois nem sempre as trincas são visíveis a olho nu, assim elas podem apenas ser encontradas no cliente, durante a produção ou até mesmo não ser detecta e acabar no produto final.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 História da laminação

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

Ainda segundo Araujo (1997), os cilindros de ferro coquilhado foram usados em 1697, por John Hanbury em Pontypool, Inglaterra e John Payne em 1728, obteve patente para um laminador com cilindros com canais para redondos.

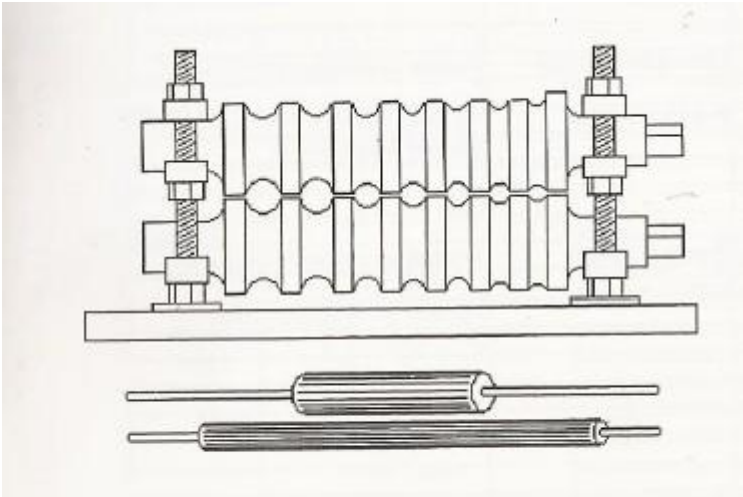


Figura 1 – Patente de John Payne de 1728 (ARAUJO, 1997).

Christopher Polhem, em 1746, no seu Patriotiska Testamente já mencionava a laminação de quadrados, redondos e meias-luas em Stiernsundsbruk, Suécia. As primeiras cadeiras Trio surgiram na Inglaterra em 1817. Zorés na França, em 1848 desenvolveu as primeiras vigas. A utilização do laminador Trio para trilhos e perfis começou com Johnstown, Pensilvânia, com John Fritz em 1855. Os laminadores em linha, o chamado tipo Belga, para produzir redondos finos fizeram a sua primeira apresentação em 1883. (ARAUJO, 1997)

A ideia de um laminador contínuo com cadeiras alternadamente horizontais e verticais, patenteada por John Hazledine em 1789, foi reapresentada por George Bedson de Manchester, Inglaterra, em 1862, juntamente com a utilização de dobradeiras. Alguns anos mais tarde, nos Estados Unidos, Charles H. Morgan construía o seu laminador contínuo com cadeiras horizontais e guias de torção entre ela. A obtenção de barras retas para concreto armado no leito de resfriamento foi atingida por V. E. Edwards em 1906, com o sistema de calhas oscilantes com bordas dentadas. (ARAUJO, 1997)

2.2 Classificação dos produtos laminados

Segundo Araujo (1997) os produtos laminados podem ser classificados como:

Blocos: seção quadrada ou ligeiramente regular, entre 150 e 300 mm de lado.

Placas: seção retangular, com espessura entre 50 e 230 mm e 610 a 1520 mm de largura.

Tarugos: seção quadrada ou circular, entre 50 e 125 mm de lado, ou diâmetro.

Fio-máquina: normalmente de seção circular, com o diâmetro menor que 12,7 mm, produzido em rolos ou bobinas.

Barras: seção quadrada, circular ou poligonal com dimensões menores que 100 mm.

Perfis Normais: com seção mais elaborada, como cantoneiras, T, Z, U, etc., com altura da alma maior que 80 mm.

Chapa Grossa: largura acima de 200 mm, espessura maior que 5 mm.

Tiras Laminadas a Quente: largura entre 610 a 2438 mm, espessuras entre 1,19 a 12,7 mm.

Tiras Laminadas a Frio: larguras entre 400 e 1650 mm, espessuras entre 0,358 e 3 mm.

2.3 Laminação – Propósito

Laminação consiste em um processo de conformação mecânica na qual se modifica a seção transversal de um metal pela passagem entre dois cilindros dispostos paralelamente girando em sentidos opostos. Provocando assim a redução da seção transversal e alongando o material. Na Figura 2, tem-se o esquema genérico do princípio do processo de laminação.

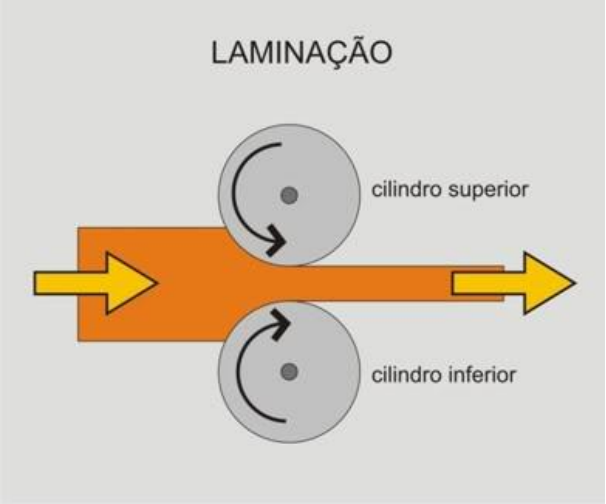


Figura 2 – Representação do processo de laminação de uma chapa plana (http://www.cimm.com.br).

Segundo Dieter (1981) laminação é o processo de transformação mecânica de metais mais usados na prática, porque apresenta alta produtividade e um controle dimensional do produto acabado que pode ser bastante preciso. Na laminação o material é submetido a tensões compressivas altas, resultantes da ação de prensamento dos rolos, e a tensões cisalhantes superficiais, resultantes da fricção entre os rolos e o material. As forças de fricção são também responsáveis pelo ato de puxar o metal.

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

Ainda de acordo com Araujo (1997), um laminador deve transformar seções grandes, retangulares ou redondas, em seções menores, de formatos diversos e, ao mesmo tempo, modificar profundamente a estrutura interna do lingote destruindo, assim, a estrutura

dendrítica do lingotamento e, por outro lado, caldear as bolhas internas. A deformação da seção é obtida mediante a pressão entre cilindros girantes, para se ter a redução de área ou a conformação da peça ao perfil desejado. A entrada do material entre estes cilindros depende do ângulo de contato e do atrito entre o aço e os cilindros do laminador. (ARAUJO, 1997).

Na Figura 3, a seguir, têm-se os diversos exemplos de laminação de diferentes perfis.

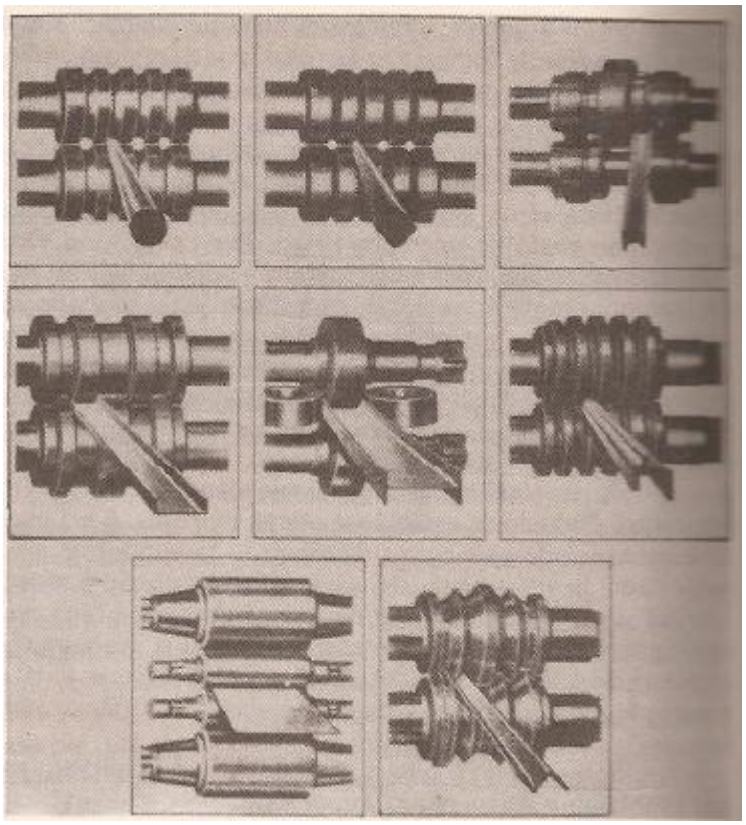


Figura 3 - Laminação de barras e perfis estruturais. (DIETER, 1981).

2.4 Cadeiras de laminação

Para Chiaverini (1986), em princípio, o laminador é constituído de uma estrutura metálica que suporta os cilindros com os mancais, montantes e todos os acessórios necessários. Esse conjunto é chamado de cadeira de laminação.

As chamadas cadeiras de laminação ou gaiolas correspondem ao conjunto de cilindros montados com seus mancais, suportes entre outros equipamentos, formando o conjunto

responsável por realizar o esforço sobre o material. Na Figura 4, tem-se a representação de uma cadeira de laminação.

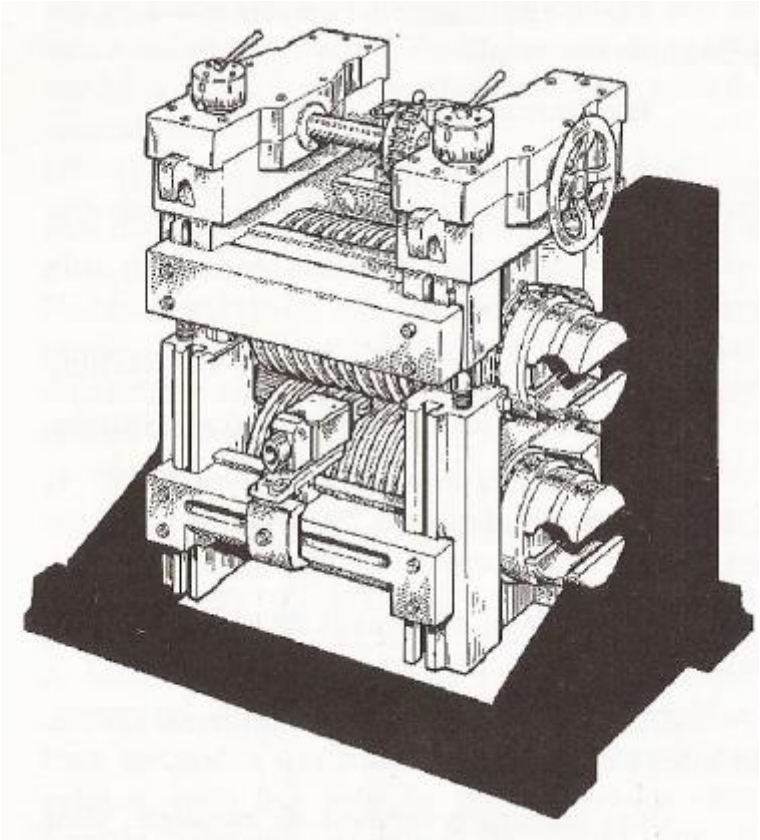


Figura 4 - Construção compacta de uma cadeira de laminador de barras (ARAUJO, 1997).

2.5 Cilindro de laminação

É considerado o principal componente de um laminador. A sua superfície pode ser lisa, para laminação de chapas ou com canais, para produzir os perfis desejados. Na laminação de desbaste, os cilindros precisam de elevada resistência mecânica e possuem maiores diâmetros devido ao forte esforço necessário. Já na laminação de acabamento os cilindros precisam de elevada dureza superficial e são de menores diâmetros.

Os cilindros de laminação são peças inteiriças, fundidas ou forjadas que apresentam uma parte central chamada de corpo, a qual executa o esforço direto de deformação. Essa parte pode ser lisa – para laminação de chapas – ou pode apresentar reentrâncias, de modo a permitir reduções ou conformações diferentes no mesmo cilindro. Essas reentrâncias, também

chamadas caneluras, possibilitam, por exemplo, pelo emprego de passes sucessivos, a redução paulatina da seção de barras redondas, quadradas etc., por intermédio do mesmo par de cilindros ou no mesmo laminador. Em cada extremidade do cilindro, ficam localizados os pescoços, que se apoiam nos mancais das gaiolas. Finalmente, além dos pescoços, situa-se o trevo, que é parte que recebe o acoplamento para rotação. (CHIAVERINI, 1986)

Na Figura 5, temos um exemplo de um cilindro de laminação de produtos não planos.

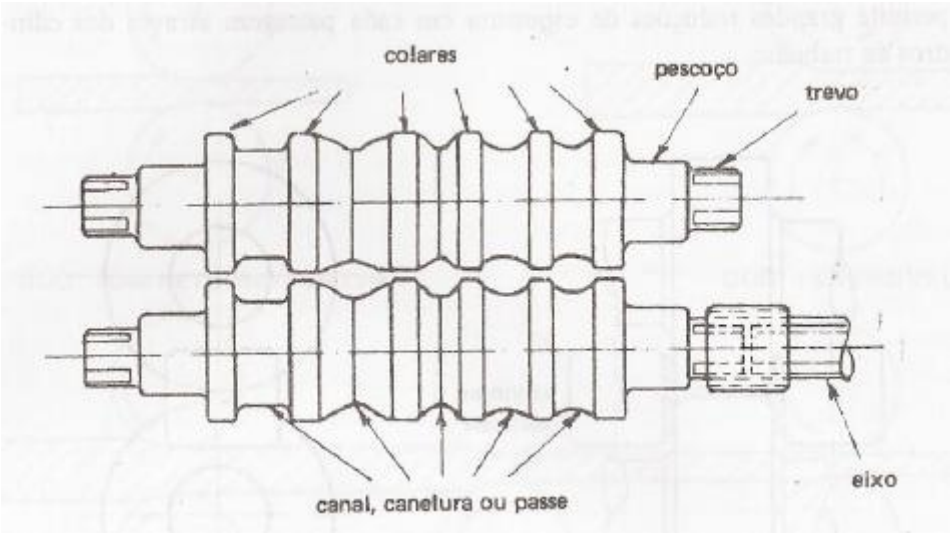


Figura 5 – Exemplo de um cilindro de laminação de produtos não planos (CHIAVERINI, 1986).

Analisando um cilindro, podem-se distinguir nele três partes básicas:

- corpo - onde ocorre o processo de laminação da peça
- pescoço - onde o peso do cilindro e a carga de laminação devem ser suportados
- trevo - onde ocorre o acoplamento com o eixo motor através de uma manga de engate

Os cilindros podem ser feitos dos seguintes materiais, de acordo com o uso.

- Cilindros de desbaste: aços carbono e aços ligados
- Cilindros intermediários: aços ligados e ferro fundido
- Cilindros de acabamento: ferros fundidos

2.6 Laminação a quente

Os processos de deformação a quente são caracterizados pela ocorrência de alterações estruturais que resultam na modificação estrutural, eliminando em grande parte a energia introduzida no material pelos processos de recuperação e recristalização. Um limite aproximado, para separar trabalho a quente de trabalho a frio frequentemente usado como referência é 0,5 Tm, onde Tm é a temperatura de fusão do metal em Kelvin(K). (COLPAERT, 2008).

De modo geral, na laminação a quente de aços, as placas são inicialmente reaquecidas entre 1000°C e 1300°C, pois nesta temperatura o material sofre o fenômeno de recristalização durante a conformação.

A recristalização é o processo de formação de um novo conjunto de grãos livres de deformação e que são equiaxiais, isto é, possuem dimensões aproximadamente iguais em todas as direções, com baixas densidades de discordâncias, e que são característicos das condições que existem antes do processo de trabalho a frio. (CALLISTER, 2002).

O material permanece relativamente macio e dúctil durante a deformação, pois ele não sofre encruamento, portanto, são possíveis grandes deformações. Callister (2002) define encruamento como sendo o fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e mais resistente quando ele é submetido a uma deformação plástica.

Assim, para a laminação a quente tem-se o seguinte resumo de suas características principais:

- Matéria prima: tarugos
- A temperatura de trabalho é superior à temperatura de recristalização do material
- As operações iniciais são de desbaste
- Executa grandes deformações
- Possuem grandes dimensões
- Pode-se produzir diversos tipos de perfis
- Existe certa recuperação da estrutura do material
- Ausência de encruamento
- Baixa precisão dimensional
- Baixa qualidade do acabamento superficial
- Devido à temperatura, forma-se casca de óxidos denominado carepa.
- Produz semi-acabados

2.7 Laminação a frio

A laminação a frio consiste em deformar o material a temperaturas abaixo da temperatura de recristalização. De forma simplificada, a deformação é considerada "a frio" quando se passa a temperaturas em que a energia de deformação é armazenada no material, não ocorrendo processos de recuperação ou recristalização. (CALLISTER, 2002).

A laminação a frio é usada para produzir folhas e tiras com acabamento superficial e com tolerâncias dimensionais superiores comparadas com as tiras produzidas por laminação a quente. Além disso, o encruamento resultante da redução a frio pode ser aproveitado para dar maior resistência ao produto final. (DIETER, 1981).

Tem-se o seguinte resumo sobre as características da laminação a frio:

- Matéria-prima: chapas e barras laminadas a quente
- Executa pequenas deformações
- Operações de acabamento
- Temperatura abaixo da temperatura de recristalização do material
- Melhor acabamento superficial
- Produz superfícies regulares
- Melhor precisão dimensional e geométrica
- Ocorre encruamento

2.8 Laminadores quanto à função

2.8.1 Primário ou de desbaste

Segundo Araujo (1997) os laminadores primários ou de desbaste são aqueles em que os lingotes são transformados em produtos semi-acabados, tais como: placas, tarugos ou blocos.

Consiste na primeira operação que o tarugo, proveniente do lingotamento convencional ou contínuo é sujeitado.

2.8.2 Acabadores

Os laminadores acabadores dão ao material vindo do laminador primário, a forma final, como: perfilados, trilhos, tubos e etc. (ARAUJO, 1997).

2.9 Arranjos dos cilindros nos laminadores

2.9.1 Duo

O laminador tipo Duo consiste em um par de cilindros dispostos um sobre o outro e que giram em sentidos opostos. É um arranjo simples e o primeiro tipo de laminador que surgiu. Este tipo de laminador é o mais antigo e mais simples, sendo usado no passado, para a laminação de chapas e, ainda hoje, nas laminações de barras, para produção de alguns aços ferramenta e aços altamente ligados. (ARAUJO, 1997)

Podem ser dos tipos:

- Duo com retorno por cima

A peça é passada em um sentido entre os rolos de laminação, e depois volta passando por cima do cilindro superior para o próximo passe. Na Figura 6 tem-se uma representação.

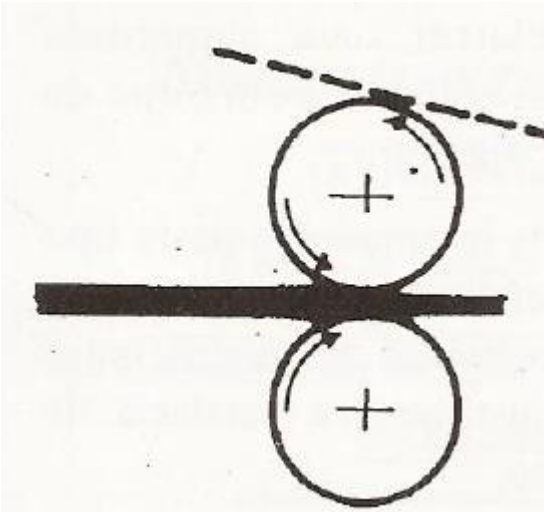


Figura 6 – Arranjo de um laminador Duo (ARAUJO, 1997).

- Duo reversível

A peça passa entre os cilindros, (Figura 7) após este passe os cilindros possuem inversão no sentido de rotação, assim o material passa novamente em outro sentido.

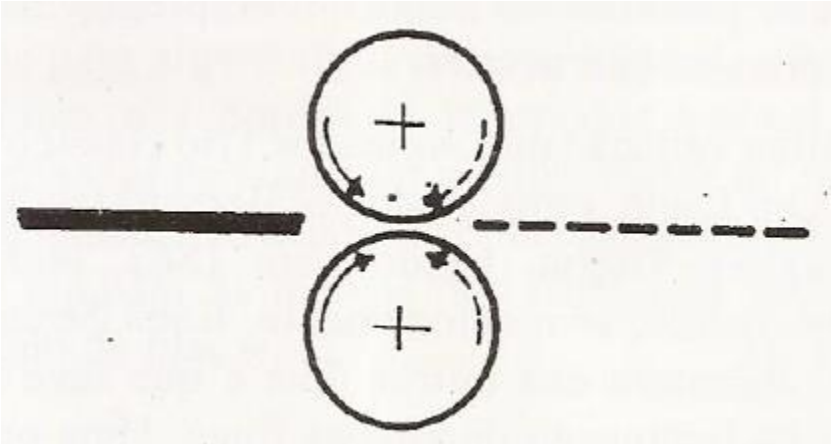


Figura 7 – Arranjo de um laminador duo reversível (ARAUJO, 1997).

2.9.2 Trio

Neste arranjo três cilindros, como visto na Figura 8, são dispostos um sobre o outro e a peça é introduzida no laminador, passando entre o cilindro de baixo e o médio e retorna entre o superior e o central.

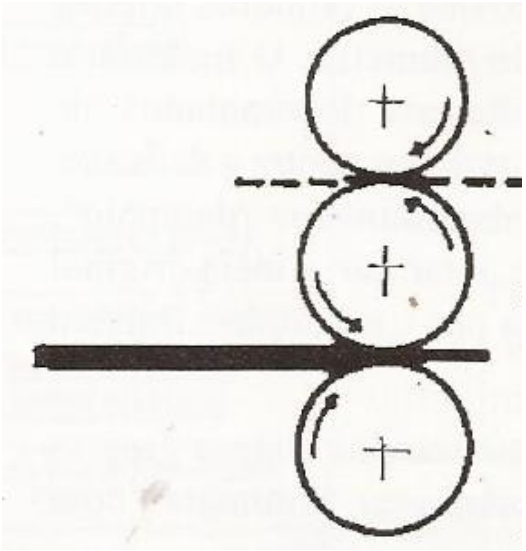


Figura 8 – Arranjo de um laminador trio (ARAUJO, 1997).

2.9.3 Quádruo

O laminador Quádruo, Figura 9 é aquele onde existem quatro cilindros, montados um sobre o outro, sendo os do meio de menor diâmetro, enquanto que os cilindros inferior e superior são de maior diâmetro. O material é laminado entre os dois cilindros, denominados de trabalho, os quais são suportados com a deflexão, pelos cilindros maiores, denominados de apoio (ARAUJO, 1997).

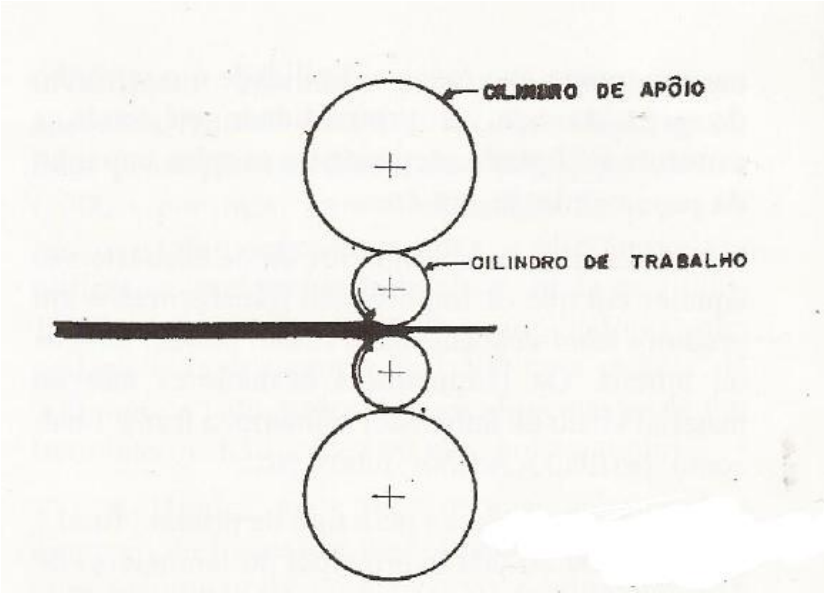


Figura 9 – Arranjo de um laminador quádruo (ARAUJO, 1997).

2.10 Tipos básicos de laminadores

2.10.1 Trens contínuos

Segundo Araujo (1997), os trens contínuos correspondem a uma série de cadeiras Duo, com cilindros girando no mesmo sentido, dispostos ao longo de um mesmo eixo de laminação e com pequeno afastamento entre as cadeiras. O material é trabalhado sucessivamente entre vários pares de cilindros, cuja velocidade periférica aumenta proporcionalmente, para compensar a diminuição da seção. É o tipo de instalação destinada a grandes tonelagens e gama restrita de produtos. Na Figura 10 tem-se uma representação esquemática.

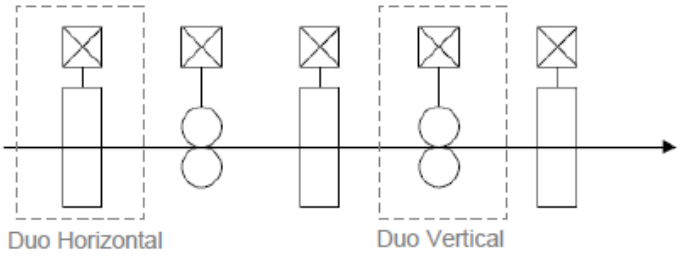


Figura 10 -Arranjo de um trem contínuo composto por gaiolas horizontais e verticais (CODA 2006a).

Na laminação contínua, as gaiolas são postas uma próxima à outra, gerando grandes benefícios de qualidade, custo e produção. A pequena distância entre os cilindros leva a perdas pequenas de temperatura durante o passe, o que reduz o consumo de energia e o consumo de cilindro. Neste tipo de laminação grandes seções de tarugos podem ser usados. (WUSATOSKI 1970).

2.10.2 Laminador tipo aberto

Araujo (1997) define um laminador aberto como sendo composto por várias cadeiras Trio ou Duo, com um acionamento único. A ponta da peça laminada, ao sair de um passe, é "dobrada", entrando no passe seguinte, do mesmo lado do laminador de onde saiu. Esse processo de mudar a direção da peça é repetido de ambos os lados do laminador, tornando possível laminar-se em várias cadeiras ao mesmo tempo. Na Figura 11 tem-se uma representação esquemática.

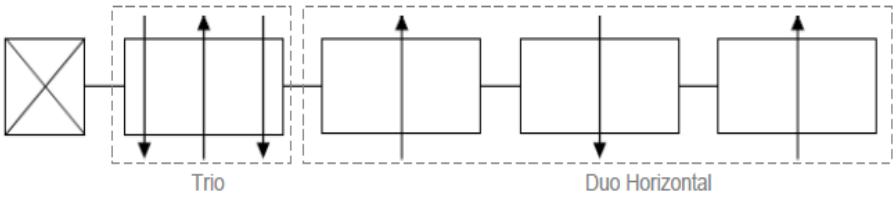


Figura 11 - Arranjo de um trem aberto. (CODA 2006a).

2.11 Laminação de barras e perfis

Barras de seção circular e hexagonal e perfis estruturais como vigas I, calhas e trilhos são produzidos em grande quantidade por laminação a quente com rolos ranhurados. Também a transformação de lingotes em blocos se enquadra nessa categoria, uma vez que se usam rolos ranhurados para controlar as mudanças de forma durante a operação (DIETER, 1981).

Segundo Dieter (1981) a laminação de barras e perfis difere da laminação de folhas e tiras, pois a seção transversal do metal é reduzida em duas direções. Entretanto, em cada passe o metal é normalmente comprimido somente numa direção. No passe subsequente ele é girado 90°. Uma vez que o metal se expande muito mais na laminação a quente de barras do que na laminação a frio de folhas, o cálculo da tolerância necessária para a expansão é um problema importante no planejamento dos passes para barras e perfis.

Um laminador destinado para laminação de barras é conhecido como um laminador de barras ou laminador de perfis comerciais. A maioria dos laminadores de barras são equipados com guias para conduzir o tarugo para as ranhuras e repetidores para inverter a direção da barra e conduzi-la para o próximo passe. Os laminadores desse tipo podem ser normalmente duos ou trios. A instalação comum para a produção de barras consiste em uma cadeira de desbaste, uma cadeira formadora e uma cadeira de acabamento (DIETER, 1981).

2.12 Fluxograma do processo de laminação de barras a quente

Na Figura 13, tem-se a representação em forma de fluxograma do processo de laminação de barras a quente.

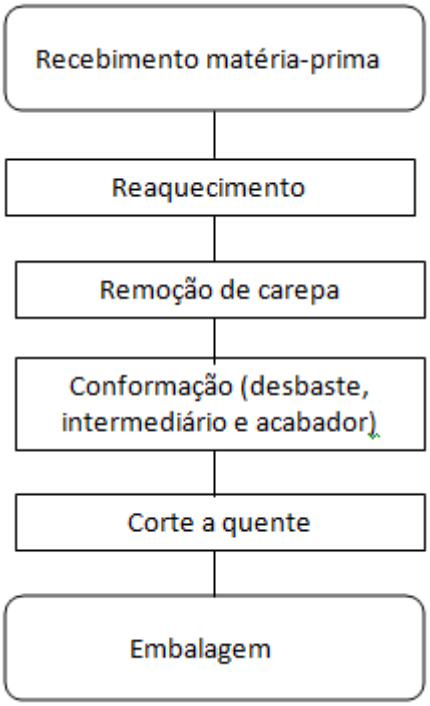


Figura 12 - Fluxograma simplificado do processo de laminação a quente (adaptado de SILVA,2010).

Segundo Silva (2010), o processo de laminação tem início com a preparação e recebimento da matéria-prima e encerra-se com o enfeixamento e despacho do produto para etapas subsequentes do processo na usina. Cabe ressaltar que o processo de laminação compreendido como um processo de conformação se restringe unicamente as etapas de desbaste, intermediário e acabador.

2.13 Matérias-primas do processo de laminação a quente

As matérias-primas utilizadas no processo de laminação a quente podem ser tarugos, placas ou blocos provenientes do processo de lingotamento contínuo ou lingotes provenientes do lingotamento convencional. O fluxo do processo de laminação para um produto com origem em lingotamento contínuo tem início com o recebimento da matéria-prima que pode ter sido preparada anteriormente ou ter vindo diretamente do lingotamento (SILVA, 2010).

Segundo Bombana (2012), os principais tipos de defeitos internos e superficiais no tarugo estão representados na Figura 13. A qualidade do tarugo tem grande impacto na geração de defeitos durante a laminação.

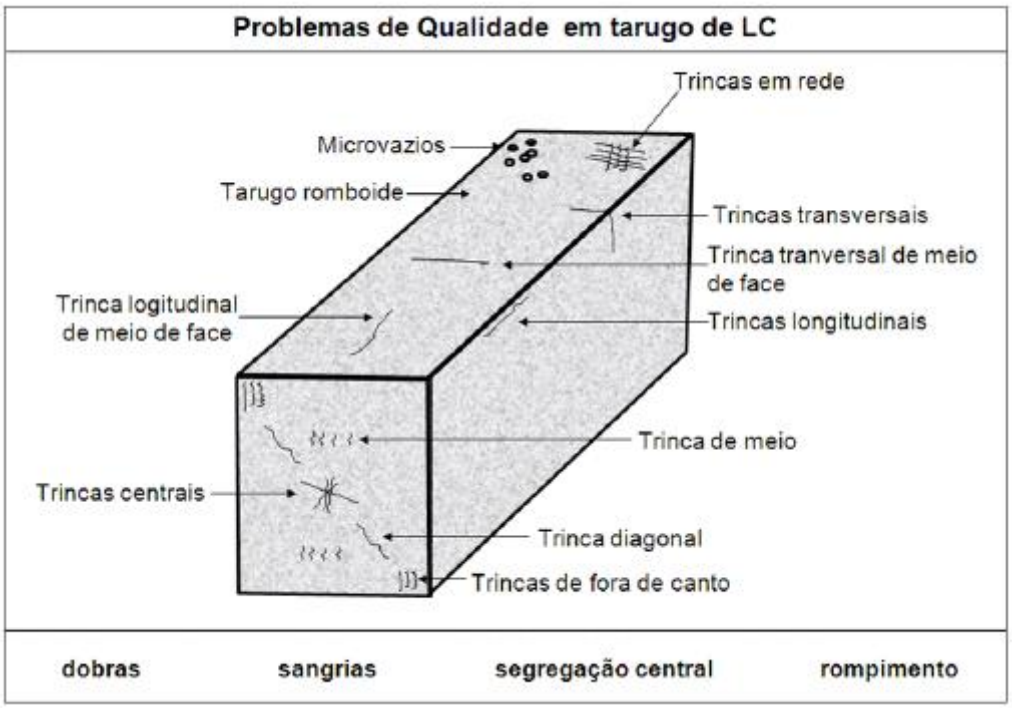


Figura 13 - Problemas de qualidade em tarugo de lingotamento contínuo.

Segundo Silva (2010), a preparação da matéria-prima se dá através do condicionamento do tarugo via processo de remoção total ou parcial da superfície. Esta preparação faz-se necessária quando o tarugo apresenta sua superfície comprometida superficialmente devido à presença de defeitos com origem do processo de solidificação. O tipo de inspeção e condicionamento é definido em função do tipo de aço, sua aplicação, rota de produção e eventos de qualidade durante o lingotamento.

Os tipos de condicionamento podem ser classificados como, por exemplo, esmerilhamento, escarfagem, lixamento, etc. Escarfagem é a retirada de uma pequena parte da superfície do material empregando-se maçaricos. Esmerilhamento é a retirada de uma pequena parte da superfície através do uso de abrasivos (VILELA, 2007). Um exemplo está demonstrado na Figura 14.

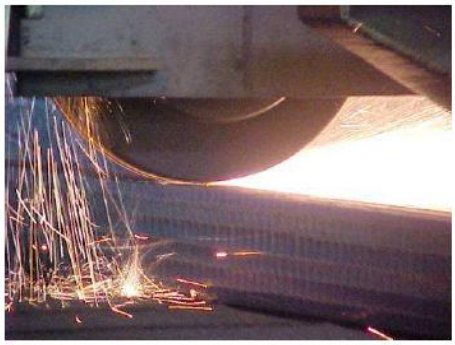
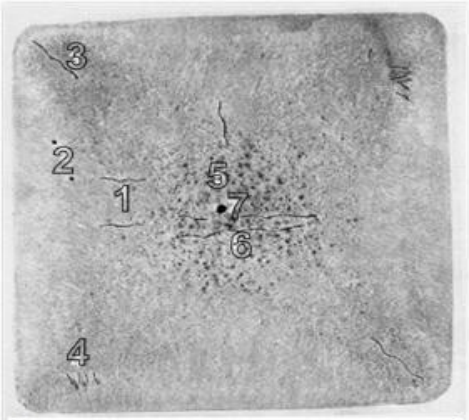


Figura 14 - Preparação da superfície de um tarugo proveniente de lingotamento contínuo (VILELA, 2007).

2.13.1 Defeitos nos tarugos - trincas internas

Segundo Bombana (2012) as trincas no processo de lingotamento contínuo estão diretamente relacionadas à estrutura dendrítica. As trincas internas, ao contrário das trincas superficiais que podem ser identificadas a partir de inspeção visual, são identificadas apenas a partir do corte de uma seção transversal ou longitudinal, seguindo de um ataque com reagente específico para evidenciar a trinca existente.

Na Figura 16 é mostrada uma macrografia de uma seção transversal, exemplificando as trincas internas mais comuns no processo de lingotamento contínuo.



1	Trincas de meio raio
2	Pin holes
3	Trincas Diagonais
4	Trincas off-corner
5	Porosidade Central
6	Trinca Central
7	Segregação Central

Figura 15 - Trincas internas em um tarugo (PENNA, 2005).

Todas as trincas internas observadas no lingotamento contínuo de aços tem origem e propagam-se na direção da zona interdendrítica. Trincas internas tendem a ocorrer em uma faixa de temperatura de fragilização devido a contrações térmicas, deformações mecânicas e transformação de fase. A perda de dutilidade na "mushy zone", região onde as dentritas e a fase líquida coexistem durante a solidificação, está associada a microsegregação de solutos entre as frentes de solidificação das dendritas. (BOMBANA, 2012)

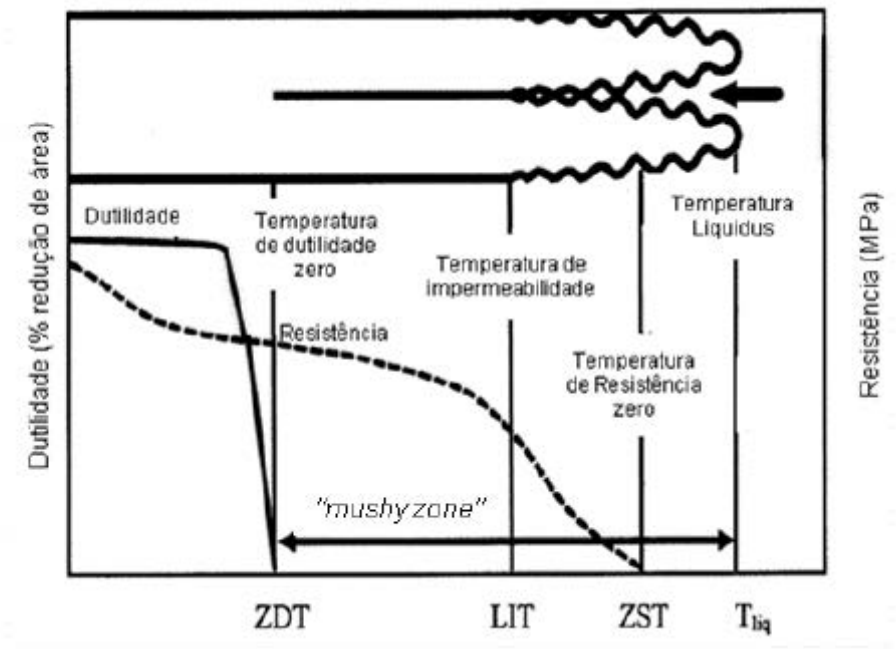


Figura 16 - Diagrama esquemático das propriedades mecânicas próximas à temperatura de fusão durante o lingotamento contínuo do aço (adaptado de WON et al 2000).

Na Figura 16 é mostradra um diagrama esquemático das propriedades mecânicas na chamada "mushy zone" e a estrutura líquido e sólida correspondente. Acima da temperatura de resistência zero ZST o aço comporta-se como líquido, sem dutilidade ou deformação. Trincas a quente formadas entre a região ZST e LIT podem ser preenchidas com líquido e não levar ao surgimento de trincas internas. Na faixa de temperatura entre LIT e ZDT, que é conhecida como temperatura de fragilização, apresenta tensões a quente aplicado um estado de tensões. Este estado de tensões é formado em função da contração térmica, deformação mecânica e transformação de fase. Na região da temperatura de fragilização, o aço passa a comportar-se como sólido, porém ainda muito suscetível a trincas devido à presença de filme interdendrítico líquido gerado pela microsegregação (BOMBANA, 2012).

2.13.2 Defeitos nos tarugos - trincas tranversais

Trincas transversais, nem sempre são detectadas na inspeção dos tarugos, assim dá lugar a sérios defeitos durante a laminação. Na Figura 17 observam-se trincas transversais em um tarugo.

Figura 17 - Aspecto de uma trinca transversal em um tarugo (MADIAS, GENZANO E REDA).

Na Figura 18 tem-se os detalhes desta trinca transversal da amostra polida, em um microscópio.

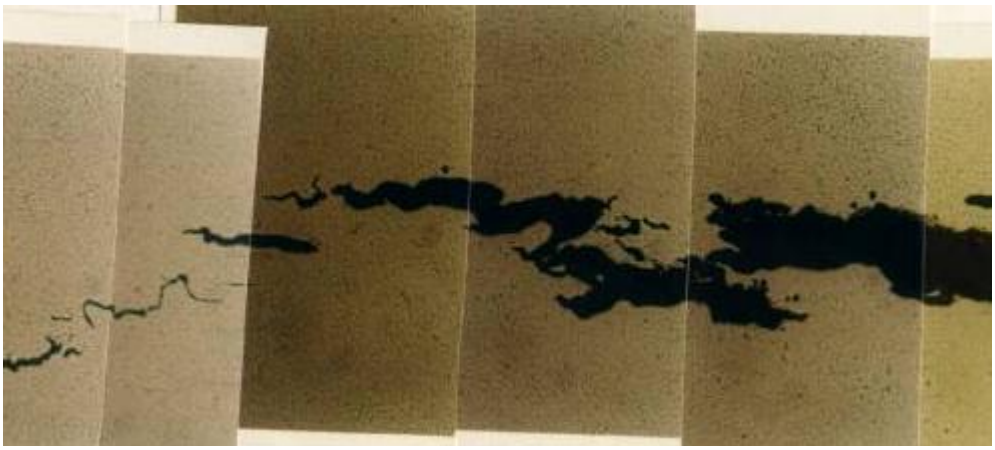


Figura 18 Detalhe de uma trinca transversal no microscópio (MADIAS, GENZANO E REDA).

Durante a laminação, estas trincas transversais dão lugares a defeitos em V.

Figura 19 Defeito V (MADIAS, GENZANO E REDA).

Em um corte transversal, Figura 20.

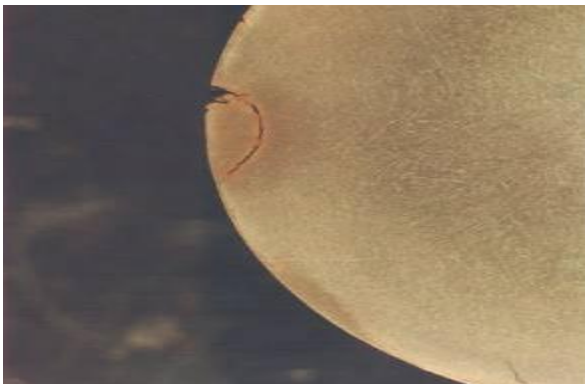


Figura 20 - Defeito V em corte transversal - (MADIAS, GENZANO e REDA).

Para altas taxas de redução, o defeito continua a deformar-se até se parecer a um defeito longitudinal.

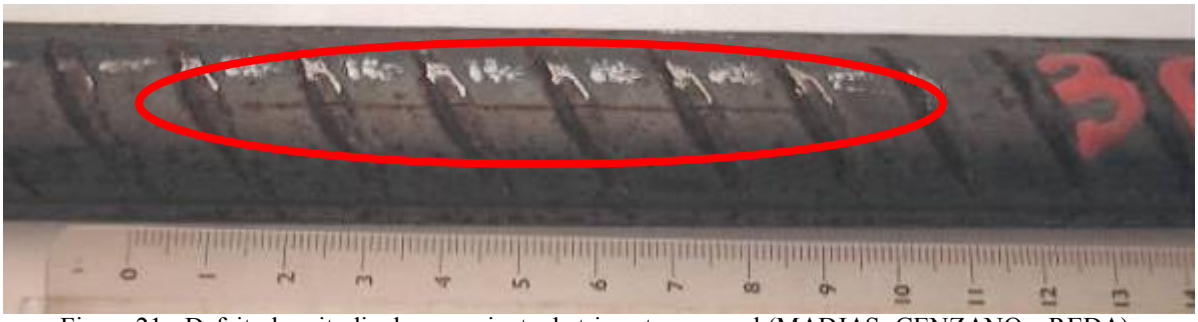


Figura 21 - Defeito longitudinal, proveniente da trinca transversal (MADIAS, GENZANO e REDA).

Através destas Figuras, pode-se ver que um defeito no tarugo se propaga durante a laminação, e assim pode-se gerar defeitos no produto laminado como as trincas.

2.14 Defeitos em produtos Laminados

Os defeitos em produtos laminados podem ser:

- **De forma:** podem ser assim definidos, quando o formato geométrico da seção transversal não está conforme o especificado.
- **Dimensional:** quando não atendem as tolerâncias especificadas.
- **Internos:** são os provenientes da matéria prima, em sua maioria associados a interações metalúrgicas que aparecem durante a produção e solidificação do metal líquido.
- **Superficiais:** as descontinuidades que ocorrem na superfície do produto.

Devido ao foco deste trabalho ser a caracterização das trincas, estas estão classificadas como defeitos superficiais. Os defeitos superficiais podem ter sua origem no processo de solidificação do metal líquido, durante a conformação do lingote, tratamento térmico e também devido ao manuseio.

Defeitos superficiais são defeitos que podem ser localizados, identificados e visualizados na superfície externa dos produtos laminados. Sua identificação é auxiliada pelo uso de equipamentos de inspeção que fazem uso de técnicas de ensaios não destrutivos tais como, partículas magnéticas, campo de fuga, etc. (SILVA, 2010).

Na Tabela 1, Madias (2004) agrupou os processos e os respectivos defeitos superficiais gerados.

Tabela 1- Exemplos de processos e respectivos defeitos superficiais (MADIAS, 2004).

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

Na Tabela 2, Silva (2010), agrupou os principais defeitos em barras laminadas.

Tabela 2 - Principais defeitos superficiais em barras laminadas (SILVA, 2010).

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

2.14.1 Principais defeitos superficiais em barras laminadas

2.14.1.1 Escamas

Este defeito caracteriza-se pela sobreposição de material sobre a superfície da barra, formando uma espécie de escama.

Segundo Silva (2010) as escamas são sobreposições de material de forma e tamanho variável, que se estendem de maneira irregular sobre a superfície do material laminado, aderindo ao metal base somente em alguns pontos. Geralmente o intervalo entre o material e a escama está preenchido com óxidos. Podem ter diversas origens, desde a Aciaria sendo profundas, descarbonetadas, com presença de óxidos e de oxigênio até a Laminação tendo a participação dos fornos de reaquecimento, dos passes intermediários e até mesmo do acondicionamento dos tarugos.

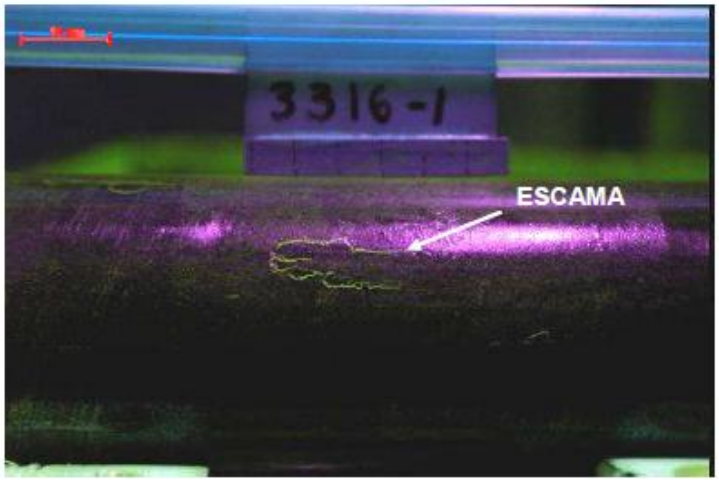


Figura 22 - Macronanálise com magnaflux mostrando o defeito tipo escama (VIANA, 2009).

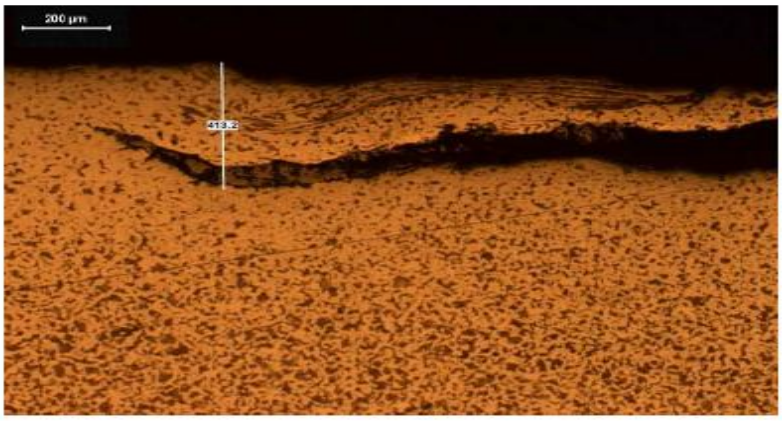


Figura 23 - Micrografia de amostra com defeito tipo escama atacada com reagente nital 2% (VIANA, 2009).

2.14.1.2 Dobras

Segundo Silva (2010) são descontinuidades que em geral penetram obliquamente da superfície para o interior do material, são longas e uniformes. Quase sempre são paralelas ao eixo longitudinal e uniformemente distribuídas na periferia da barra. Algumas vezes aparecem também como linhas duplas paralelas. A causa mais frequente da ocorrência de dobras é o excesso de material no canal que é forçado para fora na luz do cilindro e nos passes seguintes é dobrado e laminado sobre a superfície do material. Podem também se formar quando os canais não são preenchidos suficientemente e o perfil laminado “magro” demais vira no canal. Quando aparecem em apenas um lado do produto, podem ser causadas por guias mal alinhadas.

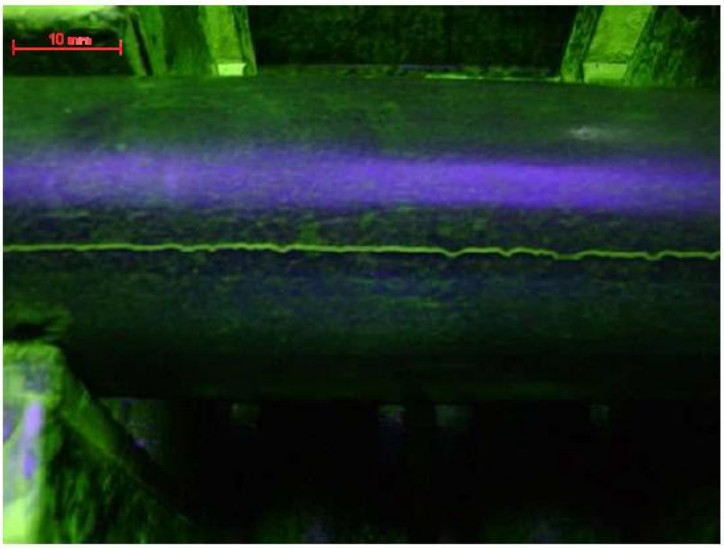


Figura 24 - Dobra (VIANA, 2009)

2.14.1.3 Trincas

São definidas como descontinuidades que penetram no material laminado no sentido longitudinal ou transversal ao sentido de laminação. A origem das trincas podem ser desde a Aciaria, Laminação e até as operações finais de acabamento. Abordando o aspecto das trincas, de origem da laminação, elas podem surgir durante o processo de laminação como, por exemplo, devido à trinca de superfície do canal do cilindro.

De uma forma geral as trincas podem ser detectadas a olho nu ou com pequena ampliação após decapagem mecânica ou química da superfície do material e também no teste de partículas magnéticas.

Segundo Silva (2010), as trincas de origem na Aciaria, ocorrem devido a defeitos superficiais ou sub-superficiais existentes nos tarugos, e são classificados como possível origem de Aciaria quando: há ocorrência de descarbonetação ao longo do defeito, está localizado em uma região mais descarbonetada em relação ao restante da amostra, tem inclusões ou óxidos associados ao defeito, presença de oxigênio junto ao defeito, tem profundidade elevada e geralmente apresentam-se defeitos não alinhados.

Na Laminação as trincas podem surgir devido a rugosidades excessivas na superfície desgastada ou danificada dos cilindros, por marcas de guias, forma imprópria do canal e por temperaturas incorretas de reaquecimento. São classificadas como possível origem de

laminação quando: há pequena ocorrência ou ausência de descarbonetação e de oxigênio ao longo do defeito, possuem pequena profundidade, ocorrem várias trincas numa mesma amostra, e estão localizados em regiões simétricas da barra e o croqui apresenta defeitos alinhados e contínuos (SILVA, 2010).

2.15 Abordagem mais detalhada – Trincas

A caracterização das trincas é à base deste trabalho. Justifica-se então uma abordagem mais detalhada deste tipo de defeito muito comum e presente em um processo de laminação de barras de aço.

As trincas em materiais laminados geralmente estão relacionadas a defeitos da matéria-prima que ao serem laminados causam trincas devido ao excessivo alongamento. Estes defeitos podem ser trincas superficiais presentes no tarugo e também defeitos internos do tipo inclusões, segregação, impurezas, tensões e esforços no resfriamento (SILVA, 2010).

2.15.1 Trincas de aciaria

Segundo Silva (2010) a formação de trincas é reconhecida como um problema cuja principal origem está no processo de lingotamento contínuo de aços. A razão para a profusão de tipos de trincas reside na própria natureza do processo de lingotamento contínuo. Este processo atingiu grande popularidade devido à sua extraordinária taxa de extração de calor através da combinação de modo, sprays e resfriamento radiante.

O rápido resfriamento, porém, resulta em um excessivo gradiente de temperatura na casca sólida que pode mudar rapidamente e gerar tensões térmicas conforme a casca expande ou contrai. Adicionalmente, devido à seção semi-sólida que é necessária para que o corra o movimento através da máquina, a casca também é submetia a tensões mecânicas induzidas devido à fricção no molde, pressão dos rolos extratores, pressão ferrostática, desalinhamento da máquina, curvatura e operações de endireitamento. Dependendo da sua magnitude, qualquer uma destas tensões e deformações pode resultar na formação de trincas (SILVA, 2010).

Além destas causas, outra possibilidade se dá devido às propriedades mecânicas do aço nas diferentes temperaturas que o material atinge durante o processo de lingotamento, gerando diferentes cargas de tensões.

Segundo Bueno (2012) as trincas, nos tarugos podem ser classificadas como:

a) Trinca longitudinal de canto:
São trincas abertas, localizadas nos cantos e paralelas ao eixo do tarugo. Tem origem ligada ao desenho incorreto ou desgaste do molde ou problemas de refrigeração.
b) Trinca transversal de canto:
São trincas perpendiculares ao eixo do tarugo, localizadas nos cantos ou muito próximas a ele, na maioria das vezes aparecem no fundo das marcas de oscilação. Têm origem em diferenças de temperatura, problemas de refrigeração ou oscilação do molde.
c) Trinca longitudinal de face:
São trincas abertas, centralizadas nos lados ou nas zonas próximas aos cantos e em muitos casos aparecem nas regiões afundadas. Tem origem devido a defeitos na refrigeração, na superfície do molde ou no uso de pó inadequado.
d) Trinca transversal de face:
São trincas perpendiculares ao eixo do tarugo localizadas lateralmente e de profundidade variável. Tem origem devido a problemas na extração do tarugo, endireitamento, agarramentos no molde, oscilação do molde e flutuações do nível de aço no molde.

2.15.2 Trincas de laminação

Além dos defeitos provenientes do próprio tarugo, gerado nos processos anteriores à laminação, como lingotamento, movimentação e condicionamento, a própria laminação tem potencial em gerar defeitos superficiais no material, porém muito menor do que a aciaria.

Segundo Dieter (1981) uma variedade de problemas de laminação, acarretando defeitos específicos, pode surgir dependendo da interação do material deformado plasticamente com os rolos deformados elasticamente e com o laminador.

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

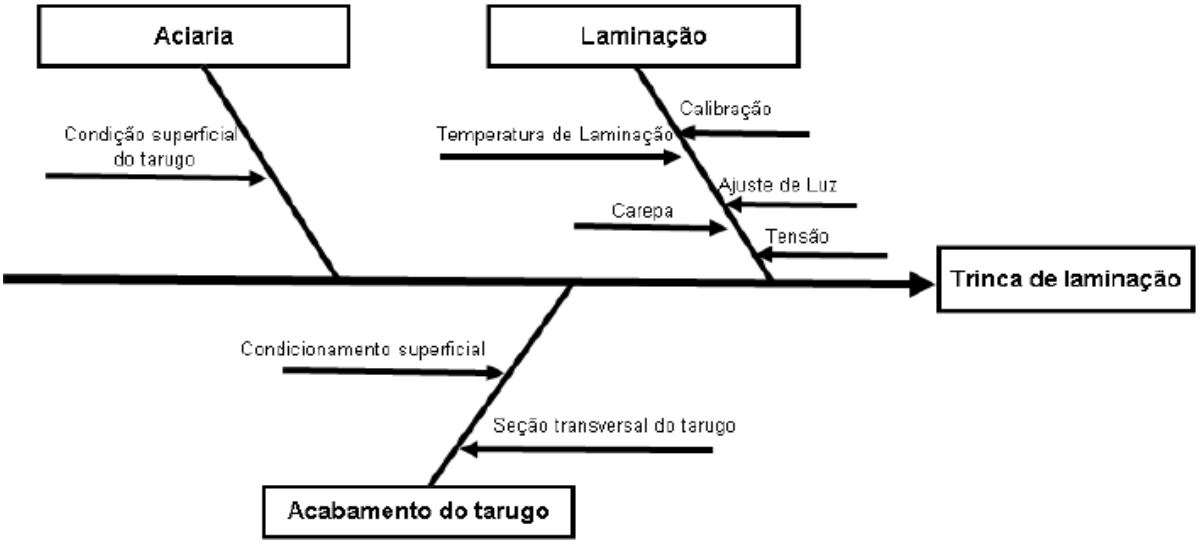


Figura 25- Diagrama de causa e efeito para formação de trincas de laminação (LIM, 2000).

Na Figura 25, pode-se ver as principais influências por processo, para a geração de trincas.

Segundo LIM (2000), pode ser observado que atuando diretamente em alguns destes fatores durante a laminação, é possível reduzir a ocorrência de trincas.

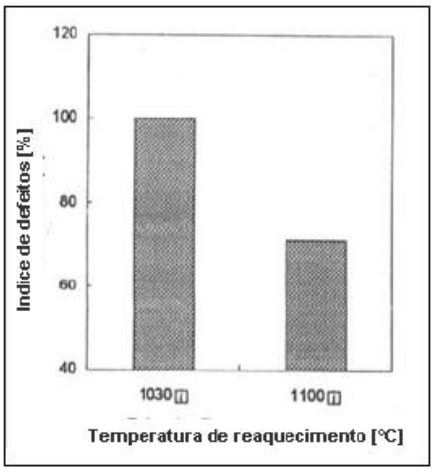


Figura 26 - Relação entre aumento da temperatura de reaquecimento e ocorrência de defeitos superficiais (LIM, 2000).

Na Figura 26, pode-se perceber que uma diferença de 70°C, foi capaz de reduzir consideravelmente o índice de defeitos no processo de laminação.

De acordo com Silva (2010), a temperatura de reaquecimento é o fator mais relevante no controle da temperatura de laminação. Um aumento na temperatura de reaquecimento propicia que o material seja laminado a uma temperatura mais alta, o que corresponde a deformações em regiões nas quais o material apresenta uma melhor ductilidade a quente, reduzindo as chances de surgimento de trincas por esforços em zonas de baixa ductilidade.

2.15.2.1 Relação entre defeitos superficiais e a calibração de laminação

Um experimento realizado em Kokura Works no Japão buscou evidenciar a influencia dos parâmetros de calibração do laminador com o aumento ou a diminuição de defeitos em barras laminadas. Para isso foi utilizado um tarugo de 110 mm de lado por 12000 mm de comprimento. Para investigar o aumento ou diminuição dos defeitos tipo trinca no tarugo, foi providenciado defeitos de forma artificial. Estes defeitos foram buracos de 2 mm ou fendas de 2 mm de comprimento sendo com profundidades de 4 mm e estando longe do centro e cantos do tarugo. Realizando diferentes tipos de passes na laminação chegou-se em uma relação entre os defeitos e as tensões presentes durante a deformação (MATSUI, OGATA, *et al.*, 1974).

A profundidade de defeitos de superfície, como as trincas já presentes no tarugo, diminui durante o estágio de laminação na região de contato com os rolos, onde a tensão de compressão age ao longo da direção das falhas. Por outro lado, na região onde existe a tração, a propagação na direção da falha aumenta.

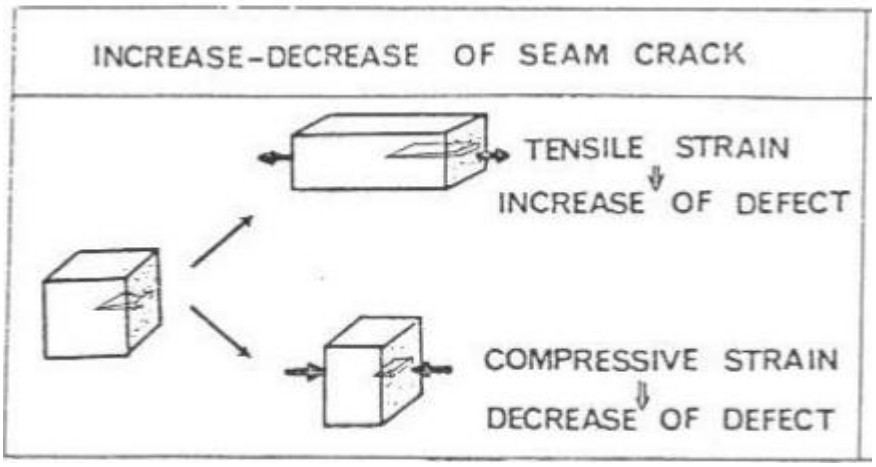


Figura 27 Relação entre esforço e propagação.

Concluiu-se também que o processo de laminação de contato retangular, como na laminação de chapas, o material é laminado de modo quase uniforme, de modo que a profundidade de defeitos, tais como trincas, é proporcional à percentagem de redução na espessura ou a percentagem de propagação de largura de material laminado. No processo de laminação por contato convexo é uma laminação não uniforme. Neste caso, o defeito localizado na parte inferior das ranhuras dos cilindros diminuem e o defeito do lado livre tende a diminuir. Este tipo de contato é o recomendado para evitar este tipo de defeitos. Já no processo de laminação de contato côncavo, o defeito em contato com o rolo diminui, mas existe um grande aumento no defeito nas zonas livres do contato (MATSUI, OGATA, *et al.*, 1974).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As observações das trincas foram realizadas através de análises metalográficas de barras laminadas a quente. Assim, as análises foram baseadas em relatórios metalográficos obtidos durante o período que realizei estágio em uma siderúrgica, e também baseados na preparação e execução em uma amostra no Laboratório de Metalografia na Feg-Unesp.

Os aços analisados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 3- Composição dos aços.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)								
Aço SAE/AISI	C	Mn	Pmax	Smax	Si	Ni	Cr	Mo
4120	0,18 - 0,23	0,90 - 1,20	0,03	0,04	0,15 - 0,35	-	0,40 - 0,80	0,13 - 0,20
4118	0,18 - 0,23	0,70 - 0,90	0,03	0,04	0,15 - 0,35	-	0,40 - 0,60	0,08 - 0,15
5120	0,17 - 0,22	0,70 - 0,90	0,03	0,04	0,15 - 0,35	-	0,70 - 0,90	-

A seguir está descrito qual foi o procedimento para a preparação.

Descrição da amostra, Figura 28:

Aço 4120

Diâmetro 24,95 mm

Comprimento: 30 mm

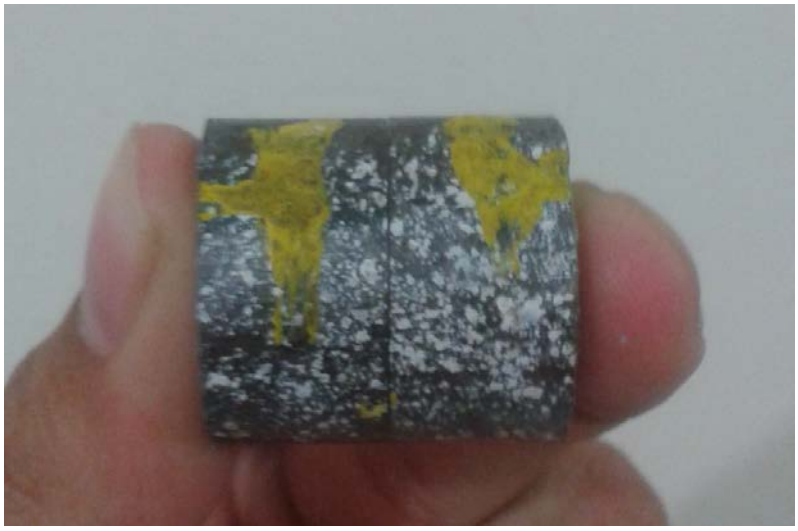


Figura 28 – Amostra.

Corte

Esta amostra já foi obtida com a região da trinca demarcada. Assim, foi realizado o corte transversal, para poder se verificar a trinca. Na Figura 29 é apresentado o equipamento de corte.

Figura 29 - Equipamento de corte.

O corte foi realizado em uma Policorte a 2000 RPM. Na Figura 30 é apresentado o momento da execução do corte.

Figura 30 – Corte sendo efetuado.

Na Figura 31 é demonstrado a amostra já cortada.

Figura 31 - Final do corte.

Através de uma lupa eletrônica, foi verificada qual parte proveniente do corte, possuía a melhor característica para ser preparada para revelar a trinca.

Lixamento

Esta operação tem o objetivo de eliminar os riscos e marcas profundas da superfície da peça, resultando em um acabamento preparatório ao polimento. Foi realizado o lixamento manual úmido. Este lixamento consiste em lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior. Para esta amostra foi lixado em 4 granulometrias diferentes, que foram 200, 400, 600 e 1000.

Na Figura 32 está demonstrado o momento do lixamento e o equipamento.

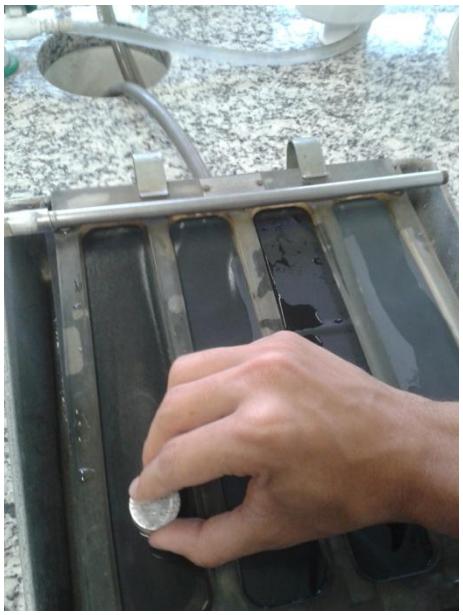


Figura 32 - Etapa de lixamento.

Polimento

Após ter realizado o lixamento, a próxima etapa foi o polimento da amostra. O objetivo do polimento é ter um acabamento superficial polido isento de marcas. Este polimento foi realizado numa politriz utilizando pasta de alumina. Na Figura 33 está demonstrada esta operação.

Figura 33 -Polimento da amostra.

Ataque químico

Após o polimento, a amostra foi submetida a ataque por Nital 2%, e o tempo de ataque foi de 10,35 segundos medido no cronômetro.

Microscopia

Para verificação da imagem metalográfica foi utilizado o microscópio metalúrgico Epiphot 200, Figura34, e feito à verificação com objetiva de 5X, 10X e 20X.

Figura 34 - Microscópio metalúrgico Epiphot.

4 ANÁLISES E RESULTADOS

A seguir são apresentadas as análises baseadas em relatórios observadas durante o meu período de estágio nesta empresa siderúrgica, como mencionado na introdução deste trabalho. Além destes relatórios é apresentado o resultado da amostra que foi preparada, nas dependências da faculdade.

Relatório 1

Na Figura 35 tem-se duas amostras de barra laminada de 44,45 mm de diâmetro, aço 4120. Esta amostra foi retirada após a laminação, na área de acabamento de barras. Foram verificadas estas trincas, em apenas uma região da barra.

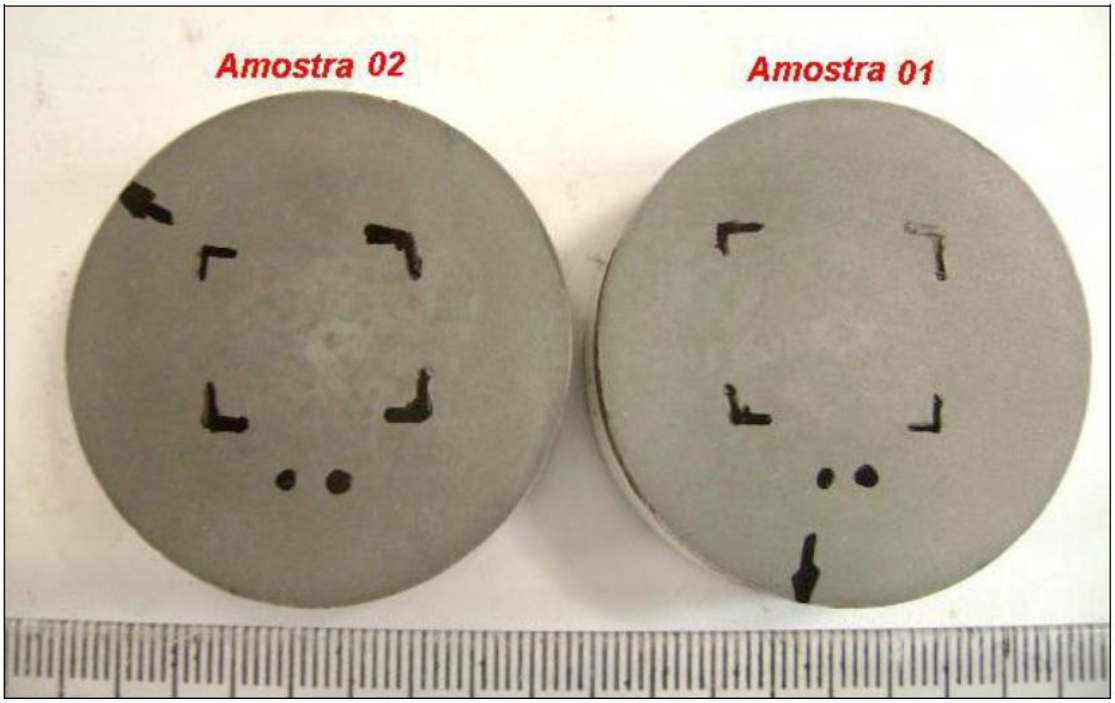


Figura 35 - Amostra barra laminada Ø 44,45mm, com indicação da posição do defeito.

Estas amostras foram preparadas e analisadas por metalografia. Na Figura 36 tem-se a fotomicrografia da amostra 01. Nesta amostra pode-se perceber uma trinca de 0,03 mm de abertura e 0,93 mm de profundidade. Evidencia-se uma forte descarbonetação ao redor e óxidos de forma contínua no interior.

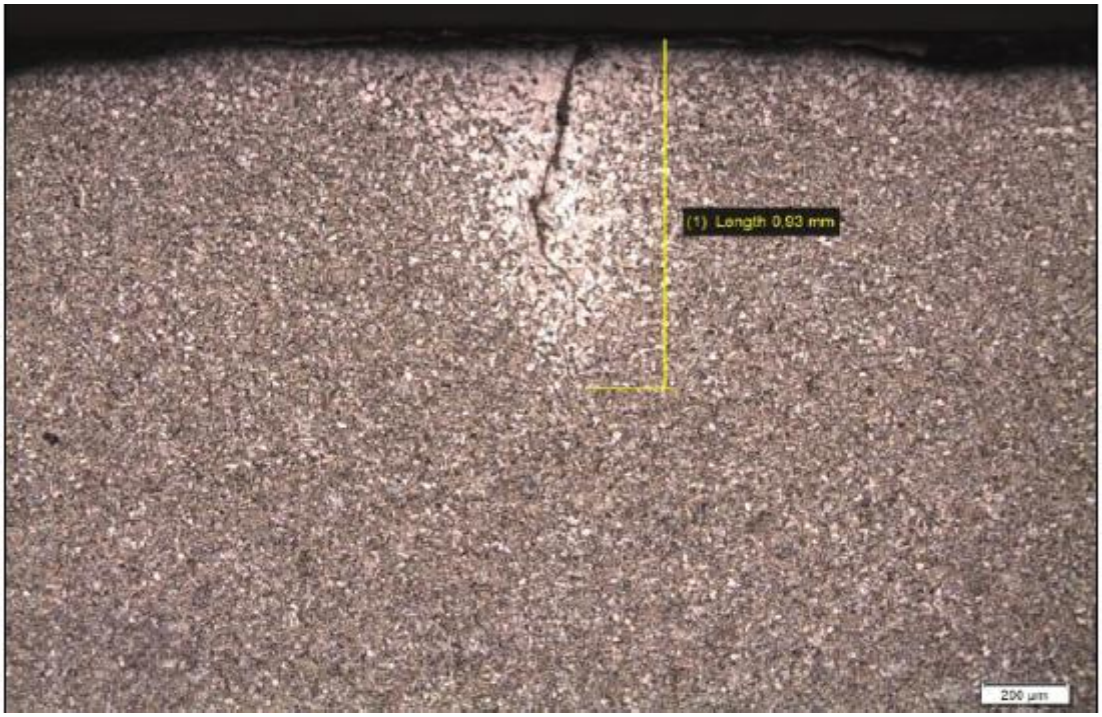


Figura 36 –Fotomicrografia amostra 01, ampliação 50X.

Na Figura 37, tem-se a fotomicrografia da amostra 02 desta barra laminada. Foi verificada uma trinca de 0,06 mm de abertura e profundidade de 0,89 mm. Assim como na amostra 01, esta trinca apresenta descarbonetação no seu entorno e óxidos de forma contínua no interior.

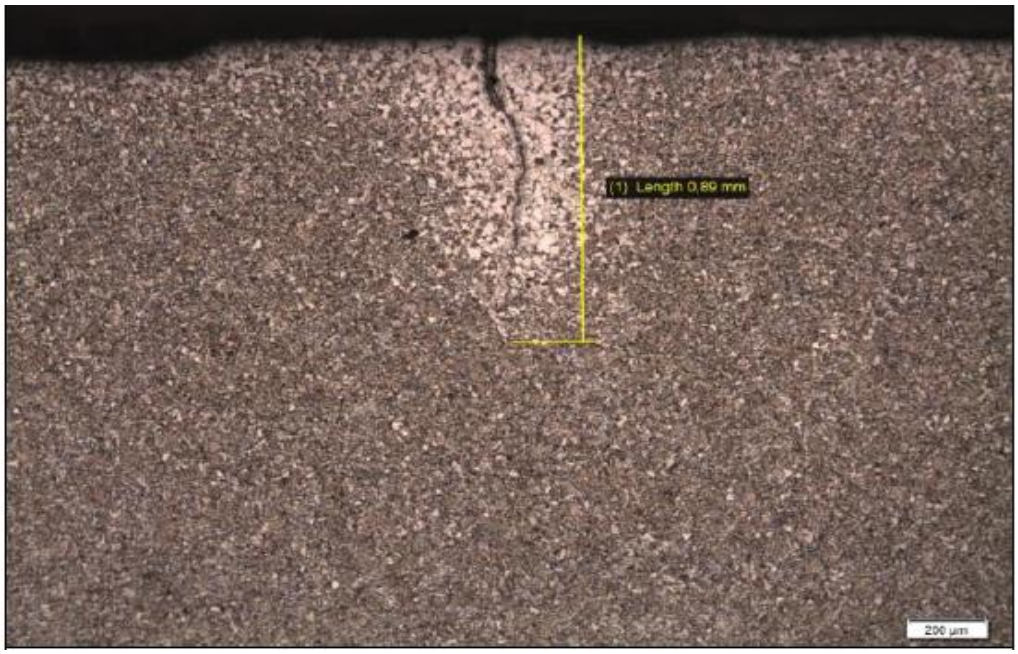


Figura 37 – Fotomicrografia amostra 02, ampliação 50X.

Análise: As duas amostras foram retiradas de uma mesma barra, proveniente de um mesmo tarugo. Pelas características da trinca como tamanho e região ao redor, além do fato de que o defeito não se apresenta de forma periódica na barra, a evidência mais forte é que se trate de um defeito proveniente do tarugo, que teve o seu desenvolvimento na laminação gerando estas trincas.

Relatório 2

Na Figura 38, tem-se a foto da amostra retirada durante o processo de laminação, diâmetro de 51,94 mm e aço 4118. Nesta amostra foi verificada uma região com trinca, como pode ser visto na figura. Esta identificação foi possível pela utilização da técnica de partículas magnéticas. Na Figura 39, tem-se a identificação da posição do defeito na amostra.

Figura 38 – Amostra barra laminada Ø 51,94 mm.

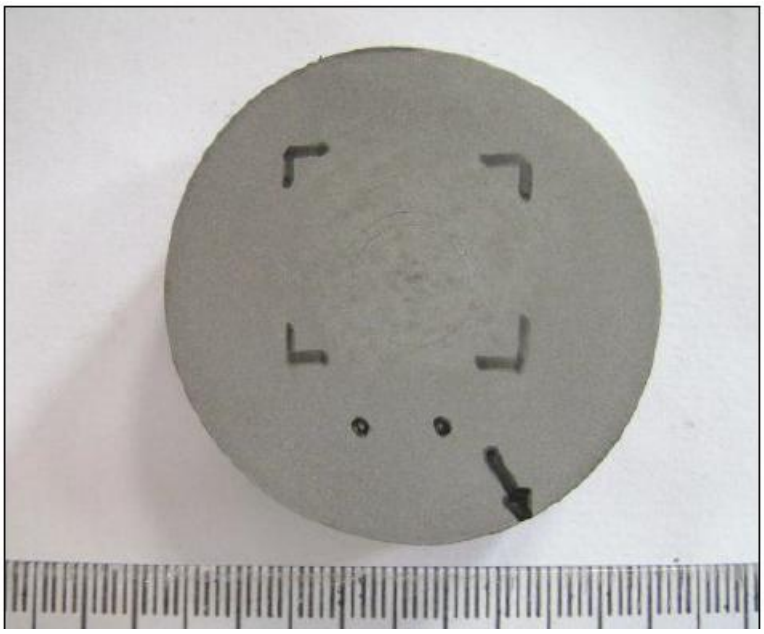


Figura 39 - Amostra barra laminada Ø 51,94mm, com indicação da posição do defeito.

Após a preparação metalográfica e posterior ataque a amostra foi fotografada (Figura 40), foi possível verificar que a trinca possui 0,23 mm de profundidade com leve descarbonetação em seu entorno e óxidos de forma contínua no interior.

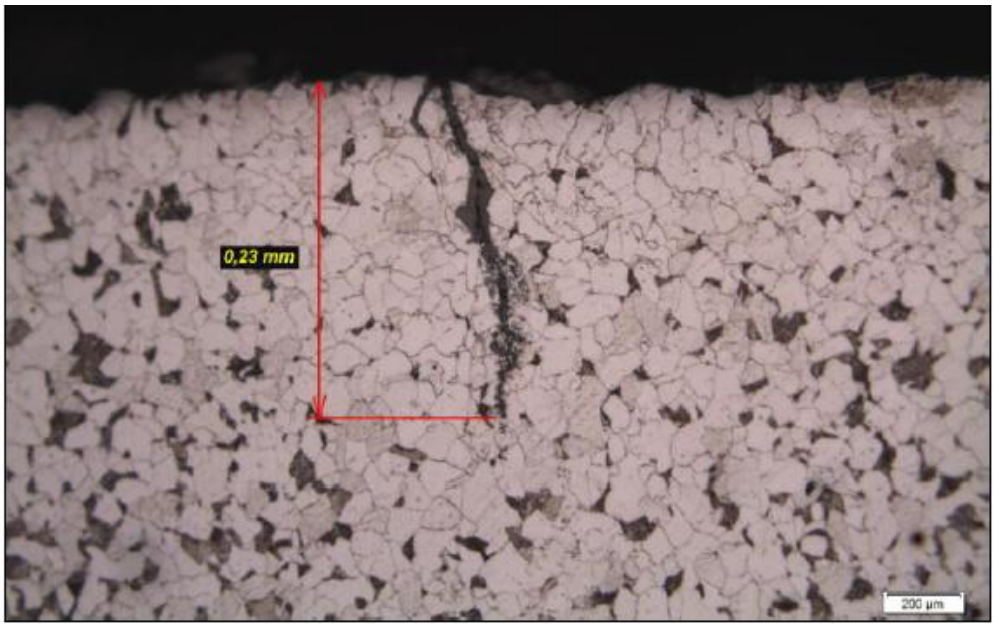


Figura 40 - Fotomicrografia, ampliação 50X.

Análise: Para esta barra laminada, a informação de processo é que este defeito ocorreu apenas neste ponto. Pelas características de processo, seguindo o critério de ser um defeito não periódico na barra, e tendo essa descarbonetação sendo observada, mesmo que mais branda, a suposição mais forte é a de que esta trinca foi gerada devido a um defeito proveniente do tarugo.

Relatório 3

Na Figura 41, observam-se três amostras de 34,93 mm de diâmetro, aço 5120 provenientes de um mesmo tarugo. Estas amostras foram retiradas no acabamento e foi identificado o defeito trinca de forma não contínua e tampouco periódica nas barras.

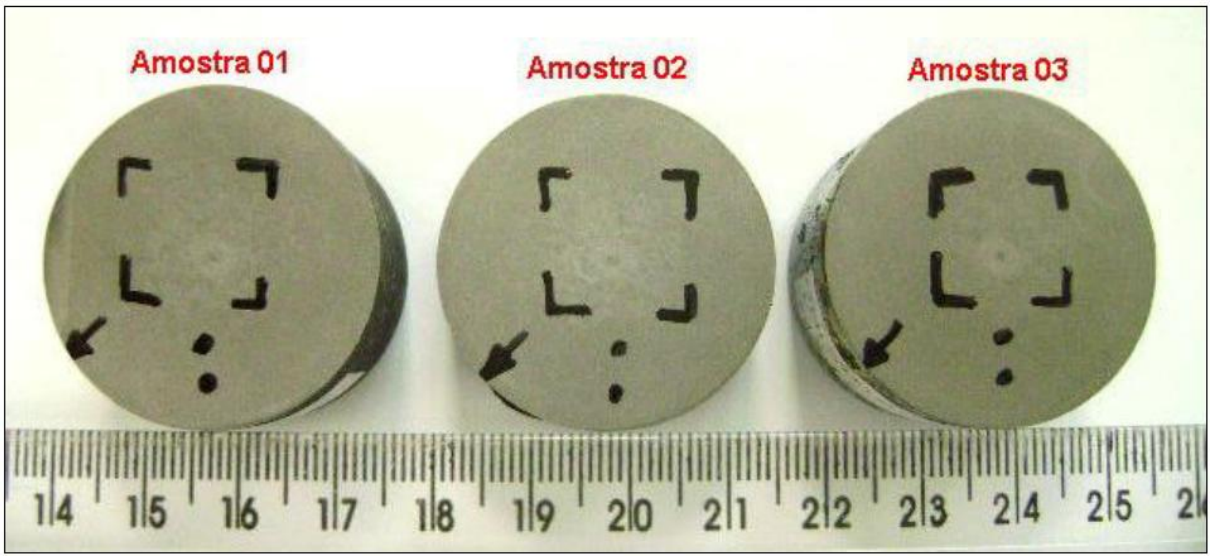


Figura 41 - Amostra barra laminada Ø 34,93 mm, com indicação da posição do defeito.

Na Figura 42, foi identificada uma trinca com 0,61 mm de profundidade, descarbonetação no entorno e preenchida por óxidos de forma contínua. Além disso, observa-se uma faixa de ferrita com 0,52 mm de profundidade com óxidos globulares na sua continuidade.

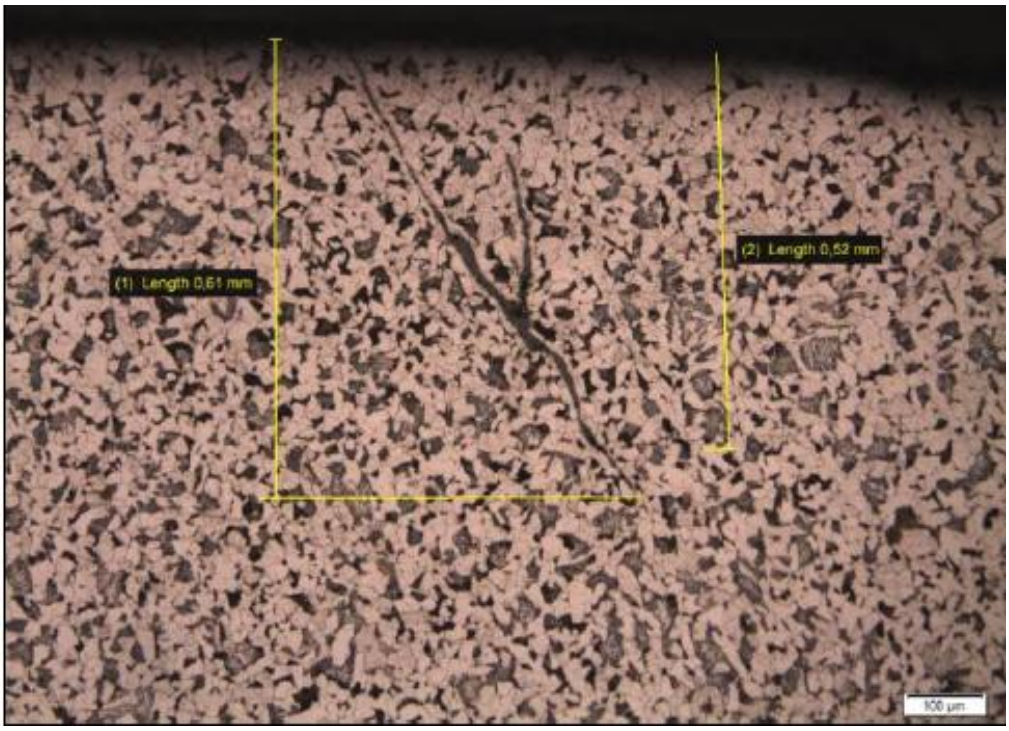


Figura 42 - Fotomicrografia amostra 01, ampliação 100X.

Na Figura 43 foi identificada uma trinca com 0,07 mm de abertura e 0,60 mm de profundidade. Esta trinca apresenta descarbonetação no entorno redor e preenchida por óxidos de forma contínua.

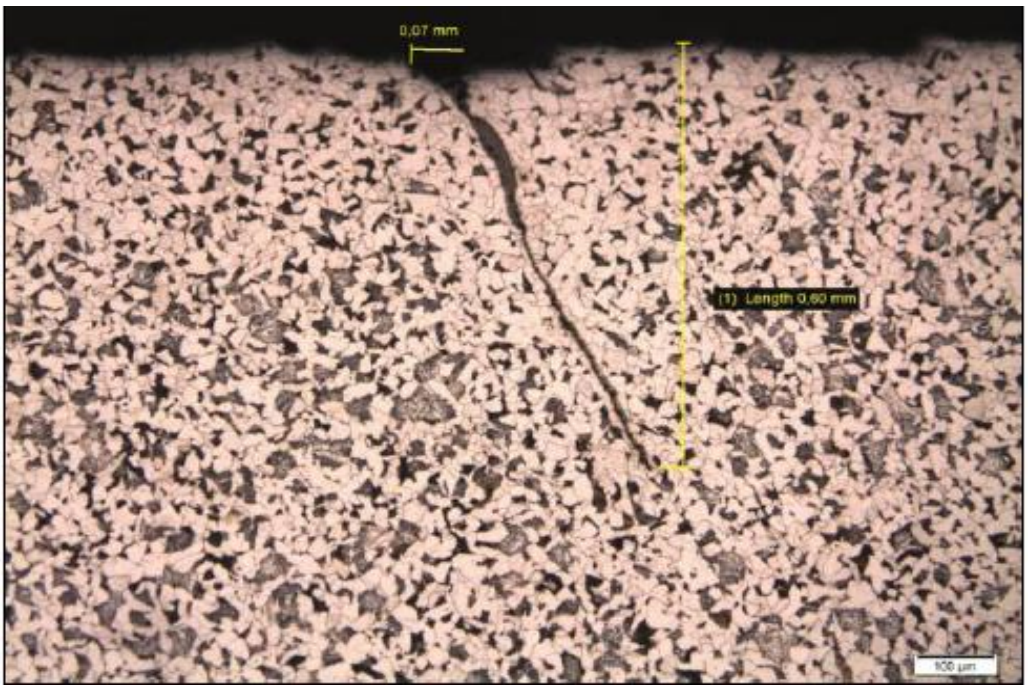


Figura 43 - Fotomicrografia amostra 02, ampliação 100X.

Na Figura 44, foi identificada uma trinca com 0,05 mm de abertura e 0,71 mm de profundidade. Esta trinca apresenta uma descarbonetação no entorno e é preenchida por óxidos de forma contínua.

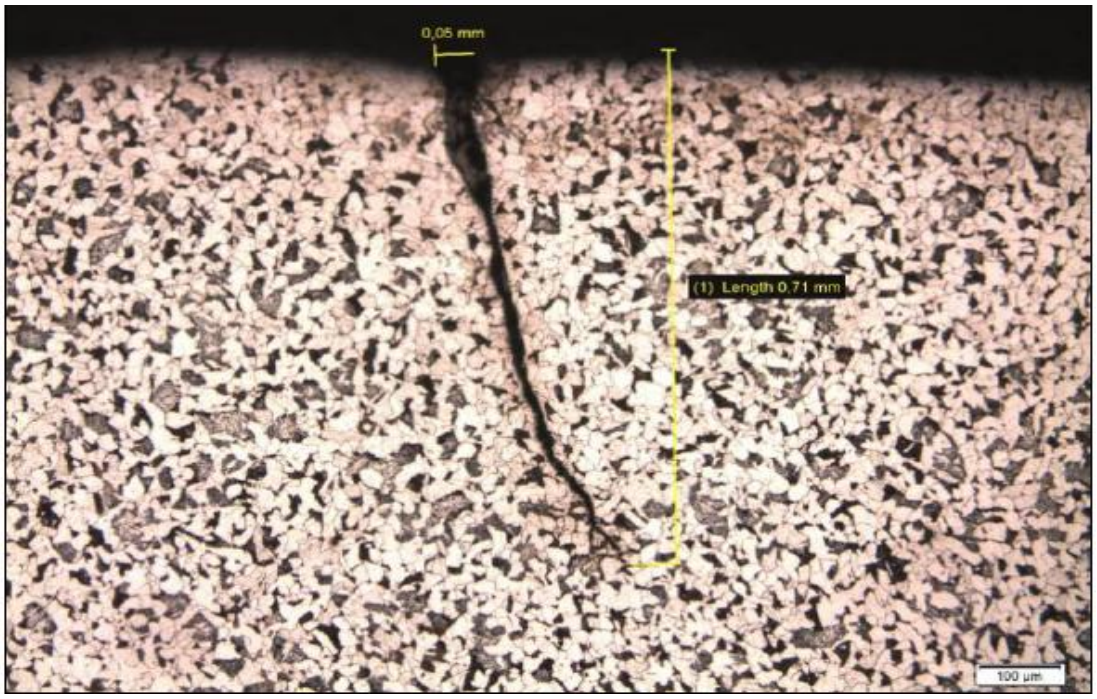


Figura 44 - Fotomicrografia amostra 03, ampliação 100X.

Análise: Através das Figuras 42,43 e 44 ve-se que as trincas neste tarugo apresentam as mesmas características. Por estas características, seguindo o critério de ser um defeito não período na barra, e tendo essa descarbonetação, a suposição mais forte é a de que esta trinca foi gerada devido a um defeito proveniente do tarugo.

Relatório 4

Na Figura 45, tem-se duas amostras de 60,32 mm de diâmetro e aço 4118. Estas amostras foram retiradas no processo de acabamento, e estas trincas não ocorreram de forma periódica nem contínua nas barras.

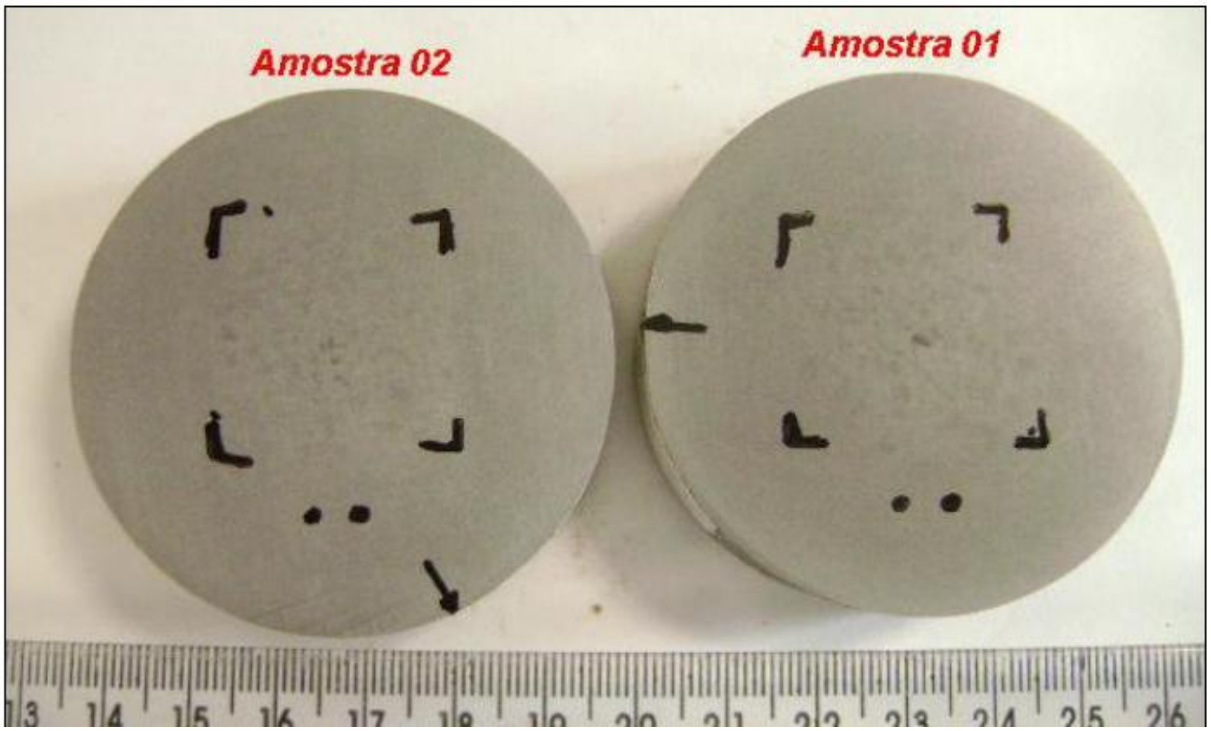


Figura 45 - Amostra barra laminada Ø 60,32 mm, com indicação da posição do defeito.

A fotomicrografia da amostra 01 pode ser vista na Figura 46. A trinca apresenta 0,05 mm de abertura e 0,82 mm de profundidade. É verificado descarbonetação no entorno e preenchida por óxidos fragmentados contendo óxidos globulares ao longo do defeito.

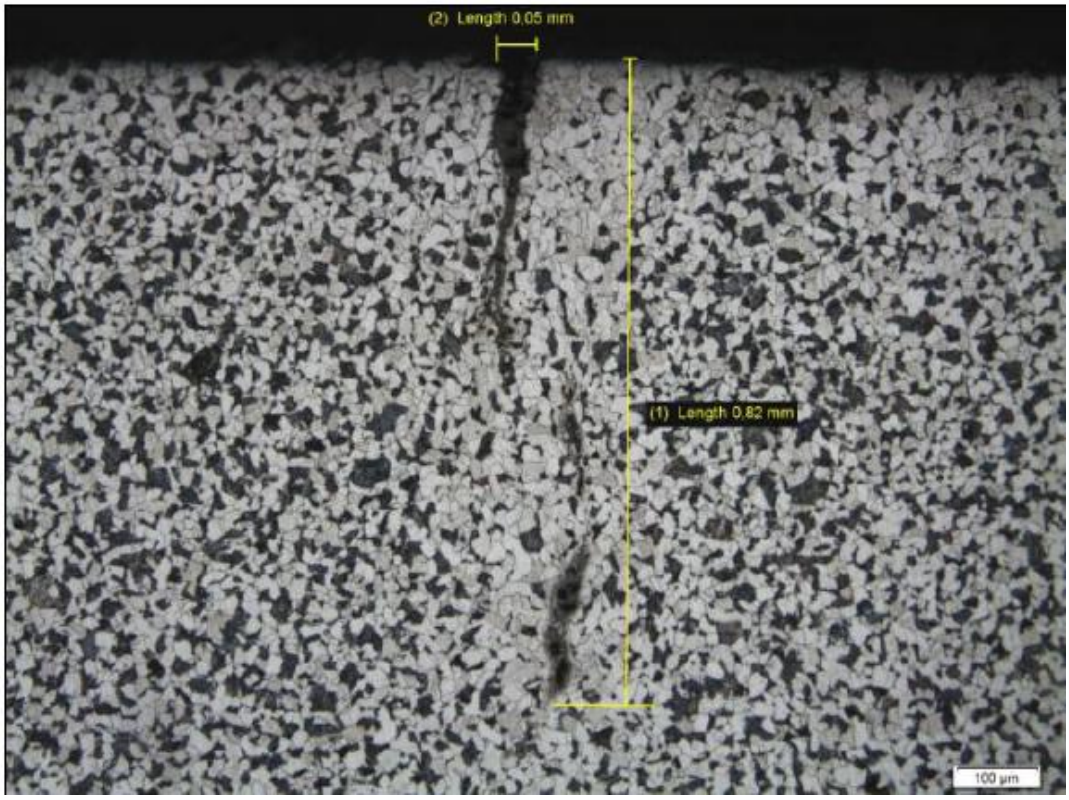


Figura 46 - Fotomicrografia amostra 01, ampliação 100X.

Na Figura 47, é apresentada a fotomicrografia da amostra 02. A trinca apresenta 0,07 mm de abertura e 1,02 mm de profundidade com descarbonetação ao redor preenchido por óxidos alongados contendo óxidos globulares ao longo do defeito.

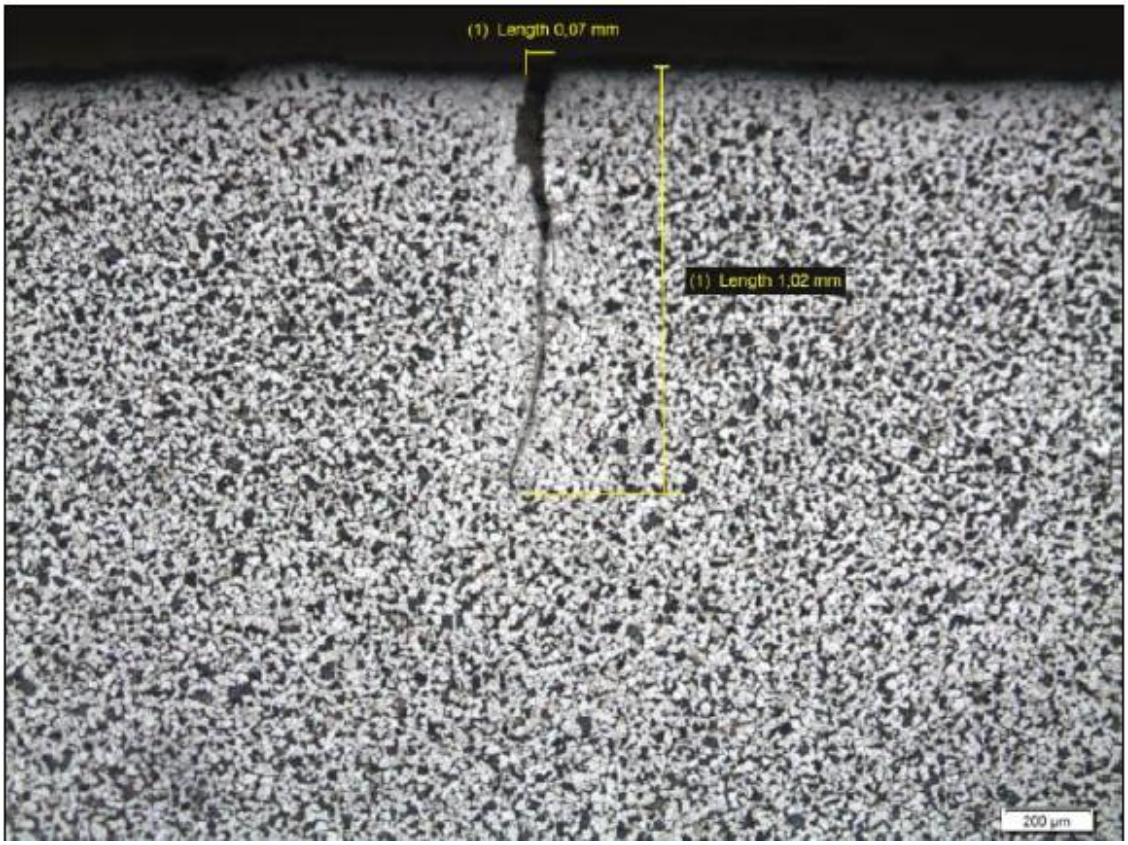


Figura 47 - Fotomicrografia amostra 02, ampliação 50X.

Análise: Para esta amostra, percebe-se que em apenas este ponto ocorreu esta trinca. Por estas características, seguindo o critério de ser um defeito não período na barra, e tendo essa descarbonetação, a suposição mais forte é a de que esta trinca foi gerada devido a um defeito proveniente do tarugo.

Relatório 5

Na Figura 48, tem-se duas amostras de 44,45 mm de diâmetro e aço 4118. Estas amostras foram retiradas no processo de acabamento.

.

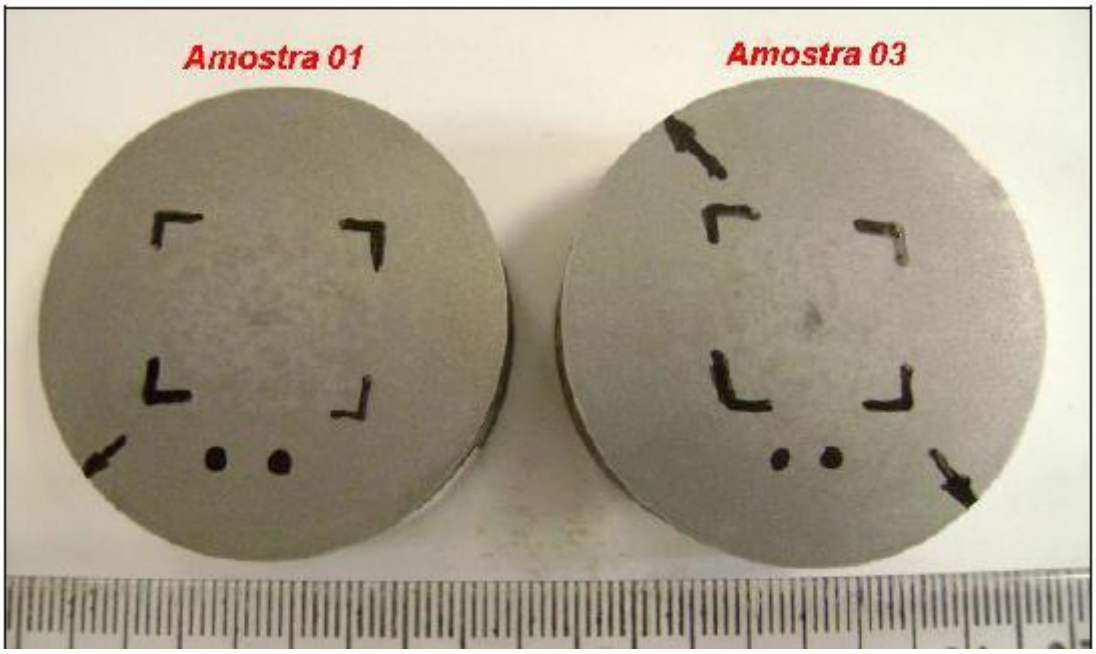


Figura 48 - Amostra barra laminada Ø 44,45 mm, com indicação da posição do defeito.

Na Figura 49, tem-se a fotomicrografia da amostra 01. Apresenta-se uma trinca com 0,07 mm de abertura e 0,67 mm de profundidade contendo descarbonetação no entorno e óxidos de forma contínua no interior.

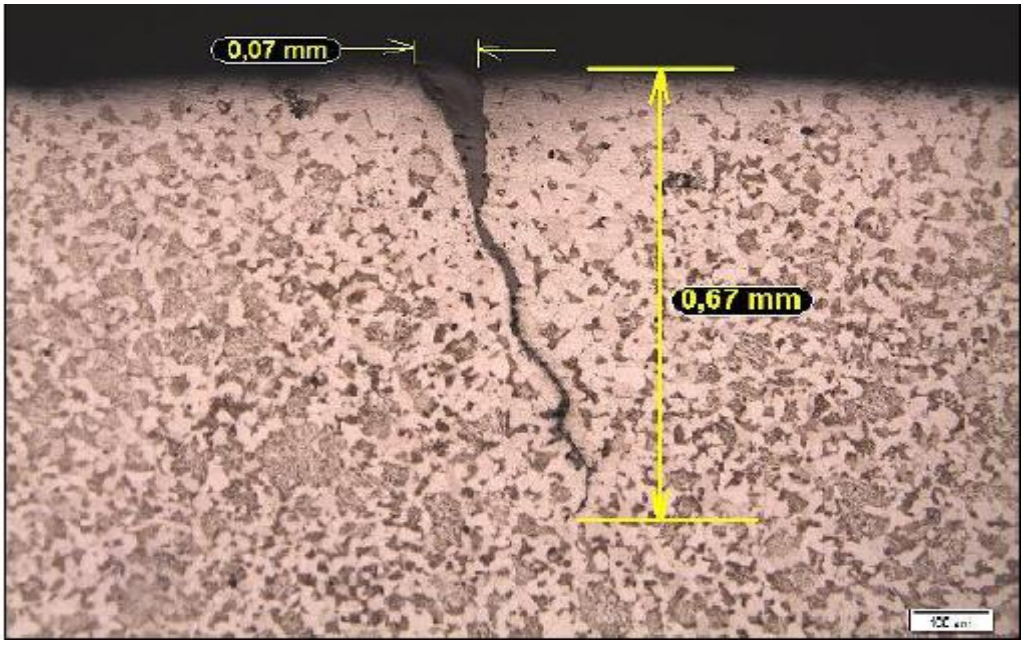


Figura 49 - Fotomicrografia amostra 01, ampliação 100X.

Na Figura 50, tem-se a trinca com 0,04 mm de abertura e 0,83 mm de profundidade com descarbonetação no entorno e óxidos de forma contínua no interior.

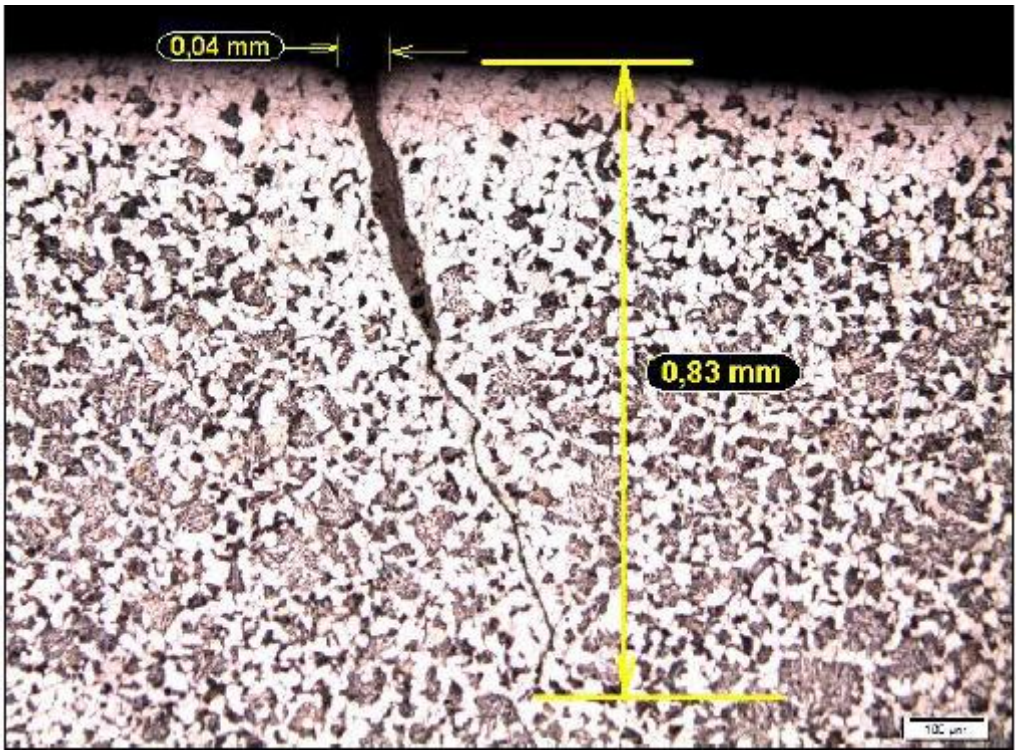


Figura 50 - Fotomicrografia amostra 3, ampliação 100X.

Na Figura 51, tem-se uma trinca com 0,04 mm de abertura e 0,14 mm de profundidade com descarbonetação no entorno e óxidos de forma contínua no interior.

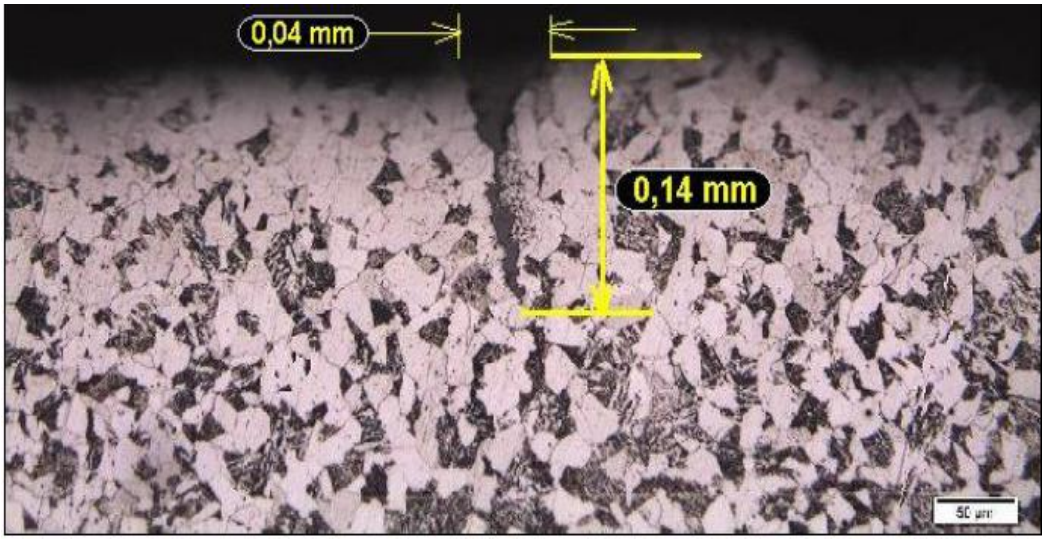


Figura 51 - Fotomicrografia amostra 3A, ampliação 200X.

Análise: Por estas características, seguindo o critério de ser um defeito não período na barra, e tendo essa descarbonetação, a suposição mais forte é a de que esta trinca foi gerada devido a um defeito proveniente do tarugo.

Amostra realizada na Feg-Unesp

A seguir estão representados a fotomicrografia da amostra realizada nos laboratórios da Feg-Unesp. Pelas condições do equipamento e extensão da trinca, foi necessário capturar duas imagens, como por ser visto na Figura 52 e Figura 53.

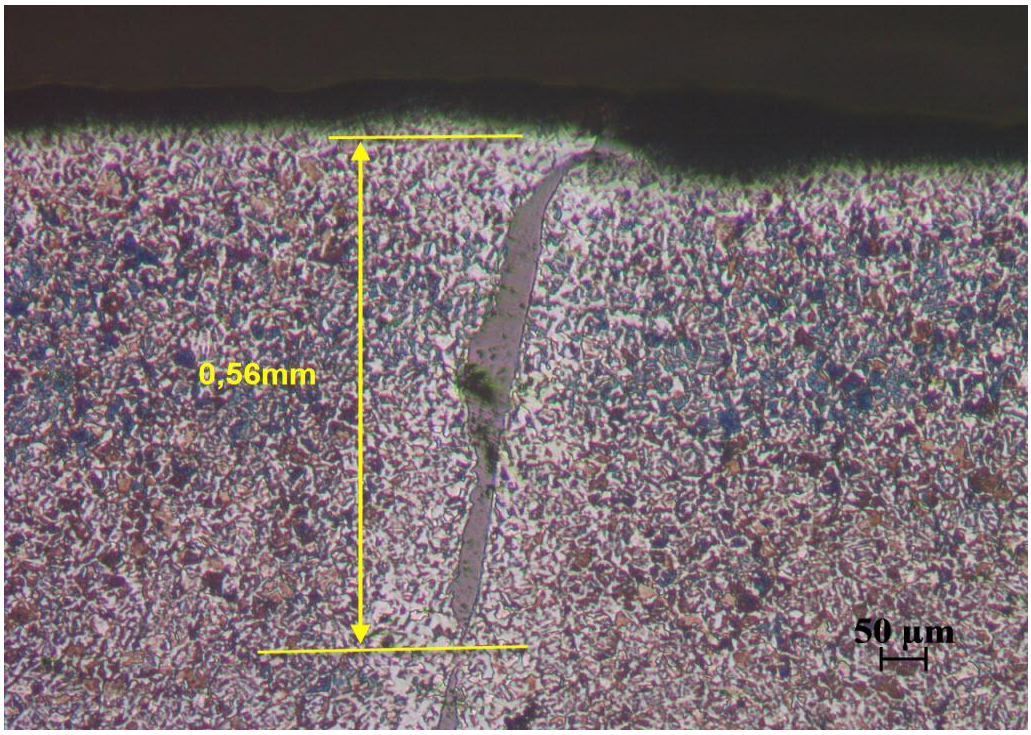


Figura 52 - Fotomicrografia 50X parte 1.

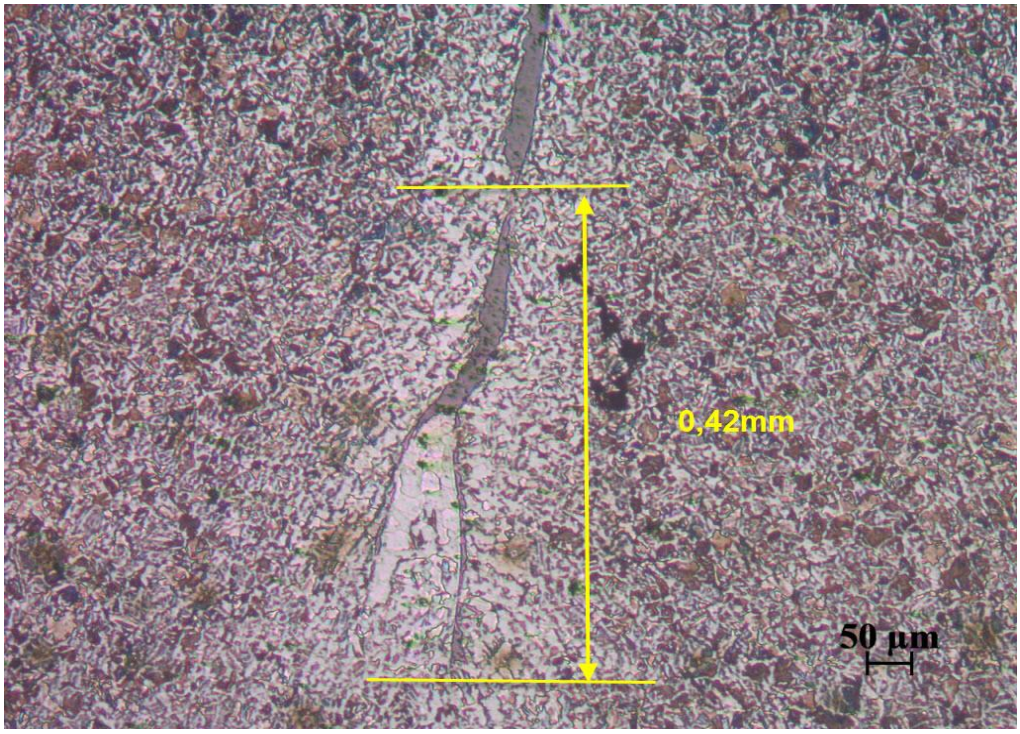


Figura 53 - Fotomicrografia 50X parte 2.

Verificou-se que a trinca possui cerca de 0,98 mm de extensão e o entorno da trinca com visível descarbonetação. Na Figura 54, foi feita a junção das duas imagens.

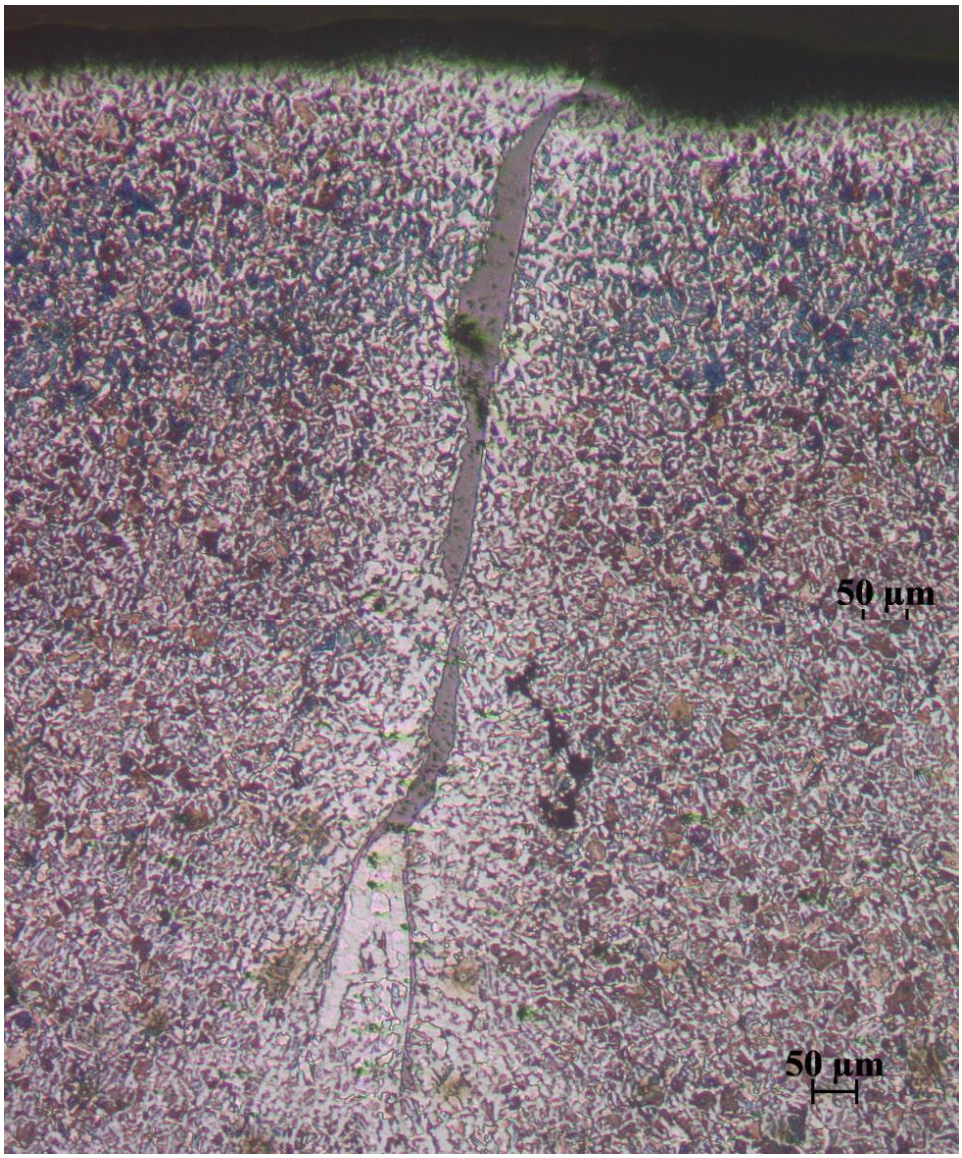


Figura 54 - Junção das imagens.

Na Figura 55, com uma ampliação de 200X percebe-se que existe uma região onde a trinca parece estar interrompida. Já na Figura 56 tem-se a fotomicrografia de uma região onde existe uma ramificação desta trinca.

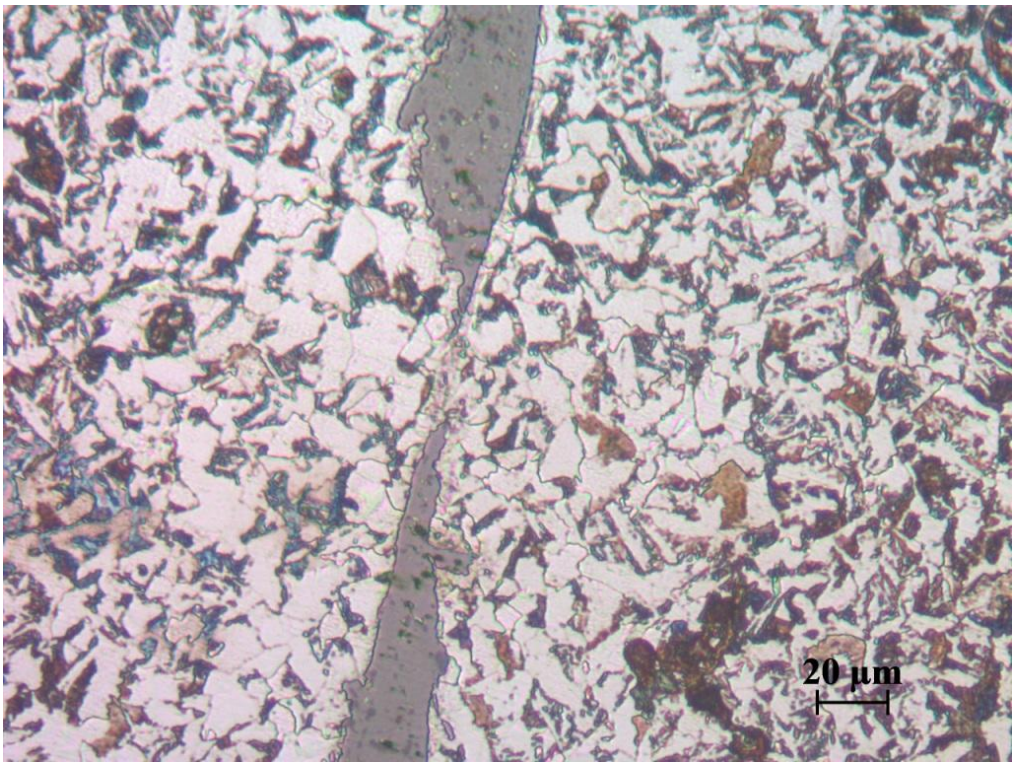


Figura 55 - Fotomicrografia 200X.

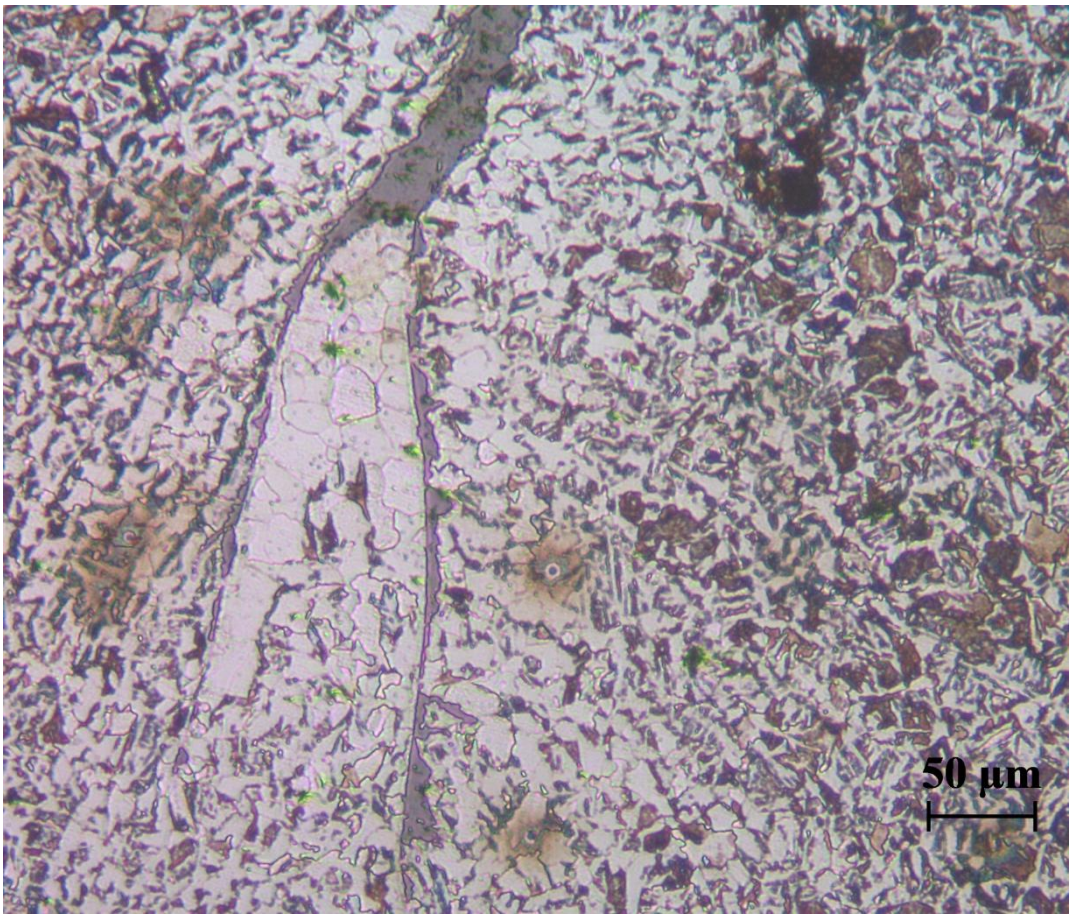


Figura 56 - Fotomicrografia 100X.

Análise: Como visto nas imagens, esta trinca apresentou uma forte descarbonetação ao seu redor o que pode levar a concluir que ela é proveniente de um defeito do tarugo. Isto se torna mais evidente ao observar na Figura 55, uma região sem trinca e com os grãos em formato muito discrepantes da região em questão. Isto pode resultar na ideia de que esta trinca nucleou a partir de um defeito interno, e devido aos esforços sofridos na laminação se propagou em ambas as direções. Além do mais, é uma trinca profunda, mais um indício de que sua origem foi devida a um defeito proveniente do tarugo, como visto na revisão bibliográfica.

5 CONCLUSÕES

Por meio da elaboração deste trabalho, foi possível observar como uma trinca se apresenta em uma barra laminada. Quando se refere ao defeito trinca de laminação, trata-se do defeito que é observado após este processo. Porém a origem desta trinca como verificado, pode ser devido a algum defeito anterior a laminação. A qualidade do tarugo apresenta um grande impacto na geração de defeitos na laminação.

Observa-se em um processo de laminação, diversos defeitos, porém a origem muitas vezes é devido a defeitos no tarugo, entretanto são revelados durante a laminação, sendo assim esta acaba por muitas vezes sendo penalizada.

De uma forma macro, uma forte evidência que as trincas no produto laminado se devem a problemas no tarugo, é o fato que após um tarugo ser laminado e apresentar este defeito, outro tarugo pode ser laminado e os produtos resultantes estarem isentos de defeitos. Isto demonstra que os parâmetros do processo estavam corretos. Quando a trinca surge devido a algum fator na laminação, se deve aos canais do cilindro danificado, guias causando algum impacto na barra entre outros, e dessa forma, produz defeitos periódicos e contínuos e afeta uma sequência de tarugos até os parâmetros serem reajustados.

Por outro lado em um aspecto micro, pode-se observar através da metalografia a região no entorno da trinca. Quando esta surge devido a algum defeito do tarugo, o entorno da trinca apresenta de média e intensa descarbonetação e a trinca é preenchida por óxidos, pois este tarugo teve um longo histórico desde quando foi fundido, depois condicionado e reaquecido antes de ser laminado. Outra característica é que existe uma relativa propagação da trinca. Quando este defeito é devido à laminação, estas características são brandas, pois durante a laminação não existe tempo suficiente para apresentar forte descarbonetação nem grande propagação da trinca.

Conclui-se para as amostras analisadas, que a evidência mais forte é que estas trincas nos produtos laminados são provenientes de processos anteriores aos da laminação, que devido aos esforços deste processo, resultaram no desenvolvimento da trinca. Estas trincas apresentaram de médio a intensa descarbonetação e a presença de óxidos como verificado nas análises metalográficas.

Neste trabalho não foi possível verificar como é esse desenvolvimento da trinca, sua nucleação e crescimento. Para acompanhar o desenvolvimento da trinca, seria necessário

acompanhar o tarugo deste a sua fabricação na aciaria, seu condicionamento e o processo de laminação e em todas as etapas verificar a condição do tarugo, realizando testes.

Para se determinar a trinca com a origem de laminação, seria necessário garantir e isentar o tarugo de qualquer defeito até este entrar no processo de laminação, e verificar os produtos laminados, se estes apresentam defeitos ou não.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, L. A. D. **Manual de Siderurgia:** Transformação. 2ª Edição. ed. São Paulo: Arte & Ciência, v. II, 1997.

BOMBANA, L. T. A. **INFLUÊNCIA DA QUALIDADE E TIPO DE ESMERILHAMENTO DE TARUGOS NA GERAÇÃO DE DEFEITOS SUPERFICIAIS DE BARRAS LAMINADAS**. Porto Alegre: [s.n.], 2012.

BUENO, E. W. **Desempenho Superficial de Barras Laminadas Redondas de Aço SAE 1043 Frente às Variáveis de Condicionamento de Tarugos, Temperatura de Laminação e Uso do Descarepador**. Porto Alegre: UFRGS, 2012. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.

CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais:** Uma Introdução. 5ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. 2ª Edição. ed. São Paulo: Pearson Education, v. II, 1986.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4ª Edição. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª Edição. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A., 1981.

MADIAS, J.; GENZANO, C.; REDA, L. **MINIMIZATION OF SURFACE DEFECTS ON BARS AND WIRE ROD ORGANIZED IN BILLET CASTING**. [S.l.]: [s.n.].

MATSUI, T. et al. **RELATIONSHIPS BETWEEN SURFACE FLAWS AND CALIBER DESING ON BAR AND ROD ROLLING**. KITAKYSHU, JAPAN: [s.n.], 1974.

SILVA, F. L. D. **Melhoria da Qualidade Superficial de Barras Laminadas. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia**, Porto Alegre, 2010. 75.

VIANA, M. C. **Análise de Defeitos Superficiais com Origem no Processo de Laminação de Aços Especiais para a Cadeia Automotiva e Implementação de Soluções**. Porto Alegre: [s.n.], 2009.

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

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

PENNA, L.V. **Trinca de solidificação off-corner no lingotamento contínuo de tarugos**, UFMG, 2005.

WUSATWSKI, Z. **Fundamentals of Rolling. Pergamon Press**, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Braunschweig, 1969.

LIM, K.H ET AL. **More Efficient Operating Practices for Improving the Surface Quality of High Quality Steel Wire**. SEAI SI Quarterly, 2000.

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

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