

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS QUÍMICOS RESIDUAIS DO AÇO NA QUALIDADE  
DO FIO MÁQUINA ENFORNADO A ALTA TEMPERATURA E LAMINADO A  
QUENTE

Autor: José Márcio Soares Penna

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Cetlin

Belo Horizonte

Junho/2022

José Márcio Soares Penna

Influência de elementos químicos residuais do aço na qualidade do fio máquina  
enfornado a alta temperatura e laminado a quente

Dissertação de Mestrado a ser apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Metalurgia de Transformação

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Cetlin

Belo Horizonte/MG  
Escola de Engenharia da UFMG  
Junho de 2022

P412i

Penna, José Márcio Soares.

Influência de elementos químicos residuais do aço na qualidade do fio máquina enfiado a alta temperatura e laminado a quente [recurso eletrônico] / José Márcio Soares Penna. - 2022.

1 recurso online (36 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Paulo Roberto Cetlin.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 36.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Metalurgia de transformação - Teses. 3. Aço - Teses. 4. Resíduos de metal - Teses. 5. Altas temperaturas - Teses. 6. Laminação (Metalurgia) - Teses. 7. Aço - Indústria - Teses. 8. Calor - Teses. I. Cetlin, Paulo Roberto, 1946-. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 669(043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,  
Materiais e de Minas da UFMG - Mestrado Profissional

**UFMG**

***INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS QUÍMICOS RESIDUAIS DO AÇO NA  
QUALIDADE DO FIO  
MÁQUINA ENFORNADO A ALTA TEMPERATURA E LAMINADO A  
QUENTE***

**JOSÉ MÁRCIO SOARES PENNA**

Dissertação de mestrado submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 20 de junho de 2022.

Por:

*Paulo Cetlin*

\_\_\_\_\_  
**Prof. PAULO ROBERTO CETLIN (UFMG)**  
Orientador

*Maria Teresa Paulino Aguilari*

\_\_\_\_\_  
**Prof(a). MARIA TERESA PAULINO AGUILAR (UFMG)**

Nayara Aparecida  
Neres da Silva

Assinado de forma digital por  
Nayara Aparecida Neres da Silva  
Dados: 2022.06.24 12:44:28 -03'00'

\_\_\_\_\_  
**Prof(a). NAYARA APARECIDA NERES DA SILVA (UFMG)**

## RESUMO

Em usinas siderúrgicas integradas e semi-integradas, o tarugo produzido no lingotamento contínuo pode ser direcionado diretamente para o forno de reaquecimento de tarugos da laminação, atingindo temperaturas em torno de 850°C, o que garantiria economia de combustível significativa em relação aos tarugos armazenados em pátios que seriam enforados em temperatura ambiente. Porém, ocasionalmente, tarugos de aço de baixo carbono, enforados diretamente do lingotamento contínuo e direcionados à produção do fio-máquina por laminação a quente, apresentam defeitos superficiais, impossibilitando a garantia da qualidade do produto. Tais defeitos, influenciados pela conformação mecânica, podem estar relacionados às concentrações e tipos de elementos químicos residuais contidos nos materiais utilizados na produção de tarugos na aciaria de forno elétrico a arco que utiliza sucata metálica como matéria-prima. Neste trabalho, foi avaliada a influência dos elementos residuais na qualidade superficial do fio-máquina laminado, utilizando tarugos enforados pela rota a quente. Foram realizados testes em bancada e em processo, de modo a avaliar quatro variáveis: tempo do material no forno, temperatura do material no forno, composição química do aço e posterior processo de conformação mecânica. Os resultados mostraram que elevados teores de elementos residuais podem gerar defeitos superficiais e que a conformação mecânica tem impacto significativo para a formação desses defeitos.

Palavras-chave: Fragilidade a quente. Elementos residuais. Defeitos em fio máquina.

## ABSTRACT

In integrated and semi-integrated steel mills, the billet produced in continuous casting can be directed directly to the billet reheating furnace of the rolling mill, reaching temperatures around 850°C, which would guarantee significant fuel savings compared to stored billets. In practice, billets are often stored in patios that would be baked at room temperature. However, occasionally, low carbon steel billets, baked directly from the continuous casting and directed to the production of wire rod by hot rolling, show superficial defects, making it impossible to guarantee the quality of the product. Such defects, influenced by the mechanical conformation, may be related to the concentrations and types of residual chemical elements contained in the materials used in the production of billets in the electric arc furnace melt shop that uses metallic scrap as raw material. In this work, the influence of residual elements on the surface quality of the rolled wire rod was evaluated, using hot rolled billets. Tests were carried out on bench and in process, in order to evaluate four variables: time of the material in oven, temperature of the material in oven, chemical composition of the steel and subsequent mechanical forming process. The results showed that high levels of residual elements can generate surface defects and that mechanical shaping has a significant impact on the formation of these defects.

Keywords: Hot shortness. Residual elements. Rod wire defects.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Bobina de Fio máquina. ....	11
Figura 2: Altos-fornos ArcelorMittal Aços Longos Juiz de Fora.....	12
Figura 3: Lingotamento contínuo da aciaria ArcelorMittal Aços Longos Juiz de Fora. .....	13
Figura 4: Tarugos direcionados para o forno de aquecimento da laminação a alta temperatura.....	14
Figura 5: Laminador desbastador ArcelorMittal Aços Longos.. ....	15
Figura 6: Layout do forno de reaquecimento de tarugos do processo de laminação com identificação das suas 5 zonas.....	16
Figura 7: Máquina do processo de trefilação.....	18
Figura 8: Corte de seção transversal de fio máquina com defeito de dobra. ....	19
Figura 9: Corte de seção transversal de fio máquina com dimensões fora de tolerância.....	19
Figura 10: Superfície do fio máquina contendo defeito de palha.....	20
Figura 11: Peças após retirada da mufla.....	23
Figura 12: Peças após resfriamento contendo carepa. ....	24
Figura 13: Peças após remoção da carepa grosseira. ....	24
Figura 14: Condição 01, Amostra 01 – Tempo de permanência no forno de 4h a 1200°C. Formação de camada de óxidos de 110 $\mu\text{m}$ .. ....	26
Figura 15: Condição 02, amostra 01 – Tempo de permanência no forno de 2h a 1200°C. Formação de camada de óxidos de 74 $\mu\text{m}$ .. ....	27
Figura 16: Condição 03, amostra 01 – Tempo de permanência no forno de 4h a 1100°C. Formação de camada de óxidos de 46 $\mu\text{m}$ .. ....	27
Figura 17: Condição 04, amostra 01 – Tempo de permanência no forno de 2h a 1100°C. Formação de camada de óxidos de 39 $\mu\text{m}$ .. ....	28
Figura 18: Aço 02 – Menor concentração de Cu e Sn.....	29
Figura 19: Aço 01 – Maior concentração de Cu e Sn.....	30
Figura 20: Amostra do fio máquina com baixo teor de Cu (0,07%) e Sn (0,0046%) enfornado a alta temperatura e laminado a quente. Superfície lisa, sem defeitos .....	31

Figura 21: Amostra do fio máquina com maiores teores de Cu (0,23%) e Sn (0,0046%) enfiado a alta temperatura e laminado a quente. Superfície rugosa, com defeito de palha .....	31
Figura 22: Imagem metalográfica da seção transversal da amostra de fio máquina com baixo teor de Cu e Sn. Aumento 200X .....	32
Figura 23: Imagem metalográfica da seção transversal da amostra de fio máquina com maior teor de Cu e Sn, na região de um defeito aumento 200X. ....	32
Figura 24: Ampliação de 500x do corte da seção da amostra de fio máquina com baixo teor de Cu e Sn atacada com ácido Nital. Não apresenta defeitos. ....	33
Figura 25: Ampliação de 500x do corte da seção da amostra de fio máquina com maior teor de Cu e Sn atacada com ácido Nital. Presença de defeitos e óxidos .....	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composições químicas das amostras do teste em bancada (%). .....	22
Tabela 2: Condições de teste em bancada. ....	23
Tabela 3: Composição química dos tarugos utilizados no teste em processo industrial. .....	25
Tabela 4: Análise da amostra do aço 01 no teste em bancada.....	28

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>11</b>
3.1	Fabricação de Fio Máquina na ArcelorMittal Juiz de Fora .....	11
<b>3.1.1</b>	<b>Fio máquina</b> .....	<b>11</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Linha de fabricação</b> .....	<b>12</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Alto-forno</b> .....	<b>12</b>
3.1.3.1	Aciaria .....	13
3.1.3.2	Tipos de sucata usados no forno elétrico à arco.....	14
3.1.3.3	Laminação.....	15
<b>3.1.4</b>	<b>Forno de reaquecimento de tarugos da laminação</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Processo de trefilação</b> .....	<b>17</b>
3.2	Defeitos comuns na fabricação do fio máquina.....	18
<b>3.2.1</b>	<b>Tipos de defeitos de fio máquina</b> .....	<b>18</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Palhas na superfície do fio máquina</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Variáveis de influência na geração do defeito</b> .....	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>22</b>
4.1	Materiais e Métodos.....	22
<b>4.1.1</b>	<b>Teste em bancada</b> .....	<b>22</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Teste em Processo Industrial</b> .....	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>26</b>
5.1	Resultado e discussão do teste de bancada.....	26
5.2	Resultado e discussão do teste em processo industrial.....	30
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>35</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em um mercado siderúrgico cada vez mais competitivo, a busca por desempenho, qualidade e custo se torna mais intensa. Nesse contexto, as usinas siderúrgicas integradas e semi-integradas apresentam grande vantagem, visto que com os processos sequenciados é possível reduzir custos com transporte, mão de obra e energia.

Nas siderúrgicas, o tarugo é lingotado na aciaria e é reaquescido em fornos na etapa de laminação, nos quais permanecem por determinado tempo até atingirem temperaturas adequadas para a conformação mecânica. O forno de reaquescimento de tarugos pode ter como fontes de combustíveis: gás natural, gás de alto-forno, óleo diesel, entre outras, e é um dos principais equipamentos no quesito consumo de energia no processo siderúrgico, correspondendo a aproximadamente 15% do consumo total de energia nas indústrias de ferro e aço (CHEN et al.,2018).

O tarugo lingotado pode sair do lingotamento contínuo diretamente para o forno de reaquescimento de tarugos da laminação, chegando com uma temperatura em torno de 850°C, o que garantiria uma economia de combustível expressiva comparado a tarugos armazenados em pátios que seriam enforados a temperatura ambiente inicialmente. Entretanto, tarugos de aço baixo carbono, enforados diretamente do lingotamento contínuo e direcionados para a produção de fio máquina podem apresentar defeitos superficiais, impossibilitando a garantia de qualidade do produto. Tais defeitos podem estar relacionados com as concentrações e os tipos de elementos químicos residuais contidos nos materiais utilizados na produção dos tarugos na aciaria com fornos elétricos à arco, que utiliza sucata metálica como matéria prima (SU XU et al., 2006).

A utilização de sucata metálica na produção do aço em fornos elétricos a arco vem crescendo, sendo que a reciclagem metálica tem se tornado uma solução importante no que tange aos aspectos econômicos, energéticos e ambientais (SU XU et al., 2006). No entanto, essa sucata pode apresentar diversas impurezas como elementos residuais (OHTSUKA et al., 1997). Tais elementos podem causar defeitos durante a laminação a quente, que soltam lascas e formam palhas na superfície do

aço (RANA et al., 2013) e que podem ser influenciados por longo tempo de exposição do aço a altas temperaturas (SAHOO et al., 2018).

Por meio da análise da influência dos elementos residuais, da aplicação de conformação mecânica, do tempo e temperatura de permanência do aço em forno, neste trabalho foi avaliada a geração de defeitos superficiais no fio máquina laminado com tarugos enfiados a alta temperatura, a fim de reduzir o consumo de combustível do forno e redução de emissão de CO<sub>2</sub>.

## 2 OBJETIVOS

Avaliar a formação de defeitos superficiais no fio máquina laminado através da influência da conformação mecânica, da presença de elementos químicos residuais e do tempo de permanência do aço baixo carbono em altas temperaturas.

Para isso, devem ser atingidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar a microestrutura das amostras de aço não conformado em função da composição química, temperatura e tempo de permanência em mufla, avaliando formação de trincas;
- Caracterizar a microestrutura das amostras de aço conformado a quente em função da composição química, temperatura e tempo de permanência em forno, em processo industrial, avaliando a formação de defeitos superficiais.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Fabricação de Fio Máquina na ArcelorMittal Juiz de Fora

A fabricação de fio máquina na ArcelorMittal Juiz de Fora inicia-se no alto-forno, seguindo pelos processos de aciaria e laminação a quente. O material é produzido em bobinas e direcionado para o processo de trefilação.

##### 3.1.1 Fio máquina

Fio máquina é um fio de seção aproximadamente circular de aço produzido através de conformação mecânica por laminação a quente de tarugos. Pode ser produzido em diferentes bitolas e é matéria-prima para outros produtos de aço, tais como: arames para lã de aço, pregos, fixadores, eletrodos e solda MIG e, ainda, possui aplicações em agropecuária, construção civil, eletrificação, cabos, linha branca, barras para construção mecânica, molas helicoidais, hastes de amortecedores e muitas outras.

Algumas características importantes do fio máquina para boa processabilidade no processo de trefilação são: circularidade da seção, ductilidade do material, nível de embaraçamento de espiras e condição da carepa. Na Figura 1 é apresentada a imagem de uma bobina de Fio Máquina.



Figura 1: Bobina de Fio máquina Fonte: Próprio autor.

### 3.1.2 Linha de fabricação

A linha de fabricação do fio máquina ASTM 1015 na usina ArcelorMittal aços longos Juiz de Fora tem início no alto-forno, onde é produzido o ferro gusa, passando pela aciaria elétrica, onde é produzido o aço e finalmente na laminação na qual o aço é conformado e o fio máquina é produzido.

### 3.1.3 Alto-forno

No alto-forno o ferro gusa é produzido por meio do processo de redução do minério de ferro pelo carbono oriundo de carvão vegetal. O gusa obtido do processo é direcionado para a aciaria FEA – Forno Elétrico a Arco. Na Figura 2 é apresentada foto dos altos-fornos da ArcelorMittal Aços Longos Juiz de Fora.



Figura 2: Altos-fornos ArcelorMittal Aços Longos Juiz de Fora. Fonte: Próprio autor.

### 3.1.3.1 Aciaria

O gusa é adicionado ao forno elétrico a arco juntamente com carga de sucata sólida que é fundida através do arco elétrico gerado por eletrodo. O material líquido é direcionado ao forno panela, no qual são realizados ajustes de composição química por meio de adição de elementos.

Do forno panela o material é vazado na máquina de lingotamento contínuo. A máquina é composta por um distribuidor que escoo o aço líquido por cinco veios. O material é refrigerado em moldes por jatos de água e solidificado, formando os tarugos de aço, com seção quadrada de 130 mm x 130 mm e cortados por oxicorte em comprimentos de 15,60 m. Os tarugos são direcionados a um leito rotativo para resfriamento ao ar no qual a temperatura é reduzida de 900°C a 500°C e então são os mesmos são estocados no pátio até serem direcionados ao forno de reaquecimento de tarugos da laminação. Na figura 3 é ilustrada etapa de lingotamento contínuo da aciaria ArcelorMittal Aços Longos Juiz de Fora.



Figura 3: Lingotamento contínuo da aciaria ArcelorMittal Aços Longos Juiz de Fora. Fonte: Próprio autor.

A outra rota de processo, tema desse estudo, é a rota de enformamento a quente. Nela, os tarugos lingotados na aciaria não passam pelo leito de resfriamento ao ar e sim pela rota a quente onde são direcionados diretamente para o forno de reaquecimento de tarugos da laminação, chegando com temperaturas em torno de 850°C. Segue figura 4, com seta indicando tarugo vindo diretamente da aciaria, em alta temperatura.



Figura 4: Tarugos direcionados para o forno de aquecimento da laminação a alta temperatura. Fonte: Próprio autor.

### 3.1.3.2 Tipos de sucata usados no forno elétrico à arco

As sucatas podem ser classificadas quanto à origem, quanto às características físicas e quanto aos elementos de liga (ABNT NBR 16229). Em relação à origem, podem ser industriais, oriundas de qualquer processamento industrial, ou obsolescência, resultante de todos os materiais considerados obsoletos ou irrecuperáveis para seu uso original. Quanto às características físicas refere-se a massa específica aparente, podendo ser leve (igual o inferior a 0,6t/m<sup>3</sup>) ou pesada (superior a 0,6t/m<sup>3</sup>). E por último, no que concerne aos elementos de liga refere-se a um material com baixo (igual ou menor que 5%) ou alto teor de elementos de liga (maior que 5%). Na aciaria da ArcelorMittal Aços longos Juiz de Fora, utiliza-se sucatas tanto de processamento industrial quanto de obsolescência.

### 3.1.3.3 Laminação

Na laminação, os tarugos (advindos do pátio ou direto da aciaria) são pesados e encaminhados ao forno de reaquecimento de tarugos, no qual permanecem sendo aquecidos por tempos em torno de 2h até alcançarem temperaturas ideais de conformação mecânica por laminação a quente, em torno 1180°C. Após atingirem essa temperatura, os tarugos são conformados no desbaste por sete passes em gaiolas compostas de dois cilindros horizontais, acionados por motores. Nessa etapa os tarugos são conformados e sofrem redução da seção quadrada de 130 mm x 130 mm até uma seção circular de 51mm de diâmetro. O material então é direcionado ao laminador intermediário, composto por 8 gaiolas de pares de discos alternados horizontal e verticalmente. No final dos 8 passes o material tem seção circular reduzida a 15mm de diâmetro. Na figura 5 está ilustrado laminador desbastador.



Figura 5: Laminador desbastador ArcelorMittal Aços Longos. Fonte: Próprio autor.

Na sequência de laminação, o material termina a conformação no bloco acabador, composto de 10 gaiolas com pares de discos que reduzem o material até seção circular de 6mm de diâmetro. Nessa etapa do processo, o material apresenta temperatura na faixa de 1000°C e é refrigerado a água até temperatura de 860°C. Em seguida, o material passa por um tubo espiral, formando espiras que são transportadas através de rolos e correntes; e refrigeradas por ventiladores até atingirem temperaturas de 350°C. Por fim, o fio máquina em espiras forma uma bobina que é compactada, amarrada e direcionada para o processo de trefilação.

### 3.1.4 Forno de reaquecimento de tarugos da laminação

O forno de reaquecimento de tarugos tem 16,50 m de largura por 28 m de comprimento, tendo capacidade de armazenamento de 135 tarugos. Ele é dividido em cinco zonas e cada uma tem seu papel na preparação do material a ser laminado. O forno em questão recebe os tarugos na zona 1 e transfere os tarugos por meio de movimentação por soleira caminhante passando pela zona 2 até a região das zonas 3, 4 e 5, de onde os tarugos são encaminhados para o laminador.

A zona 1 é composta por 8 queimadores e é a região do forno de menor temperatura, podendo receber tarugos em faixas de temperatura que variam de 25° C (temperaturas ambientes) até 850 °C, que seriam temperaturas de material vindo direto do lingotamento contínuo. Esta zona armazena 42 tarugos por 30 minutos. A zona 2 é a zona de aquecimento dos tarugos. Ela é composta por 8 queimadores que aquecem o material de 800 °C para 1100 °C. Essa região comporta em torno de 62 tarugos por 60 minutos e é a zona de maior consumo de combustível.

As zonas 3, 4 e 5 são as regiões de enxarque dos tarugos e são importantes para manter o material em temperatura estável para enfim serem desenformados e laminados. Essa região comporta em torno de 31 tarugos por 30 minutos e cada uma das zonas é designada a uma parte do material, sendo zona 3 cauda da peça, zona 4 meio da peça e zona 5 cabeça da peça. Na Figura 6 é apresentado layout do forno.

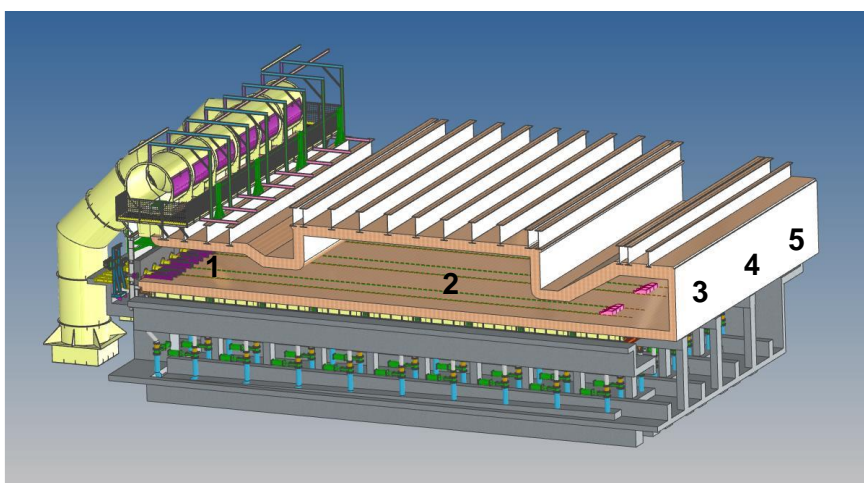


Figura 6: Layout do forno de reaquecimento de tarugos do processo de laminação com identificação das suas 5 zonas. Fonte: Próprio autor.

### 3.1.5 Processo de trefilação

O processo de trefilação é um processo de conformação mecânica que faz a redução da seção de um fio de aço por meio da passagem por fieiras com aberturas de diversos diâmetros. O fio máquina produzido na laminação tem sua carepa superficial quebrada e é trefilado através de um conjunto de fieiras, que são estruturas circulares contendo um orifício de metal duro ou diamante para passagem do fio máquina a ser trefilado.

Algumas características importantes do fio máquina para boa processabilidade no processo de trefilação são: circularidade da seção, ductilidade do material, nível de embaraçamento de espiras e condição da carepa. A circularidade da seção é importante para garantir uma trefilação com conformação homogênea, sem comprometer a lubrificação das fieiras e dessa forma prevenindo o desgaste irregular das mesmas e consequente rompimento no produto.

A ductilidade adequada é essencial para um processo de trefilação regular e de alta produtividade. Níveis de ductilidade baixo podem não garantir resistência adequada do produto, além de gerar desgaste irregular de fieiras e arrebentamentos. O nível de embaraçamento das espiras na bobina de fio máquina deve ser baixo, pois numa máquina de alta produtividade podem ocorrer embolamentos e consequente rompimento do fio.

E por último, a carepa no fio máquina tem papel relevante no processo de trefilação pois protege o material de desgastes irregulares na superfície do fio. Porém, ela precisa ser removida antes da trefilação por fieiras através de processo de decapagem mecânica. Caso a carepa seja muito fina, ela fica aderida à superfície, evitando que o sabão lubrificante aí se agregue. Com isso, o fio máquina entraria em contato direto com a fieira, aumentando a possibilidade de arrebentamentos. Contudo, ela sendo excessivamente grosseira, pode quebrar antes do processo de decapagem, podendo ocasionar pontos de corrosão na superfície do fio. Na Figura 7 é apresentada máquina do processo de trefilação.

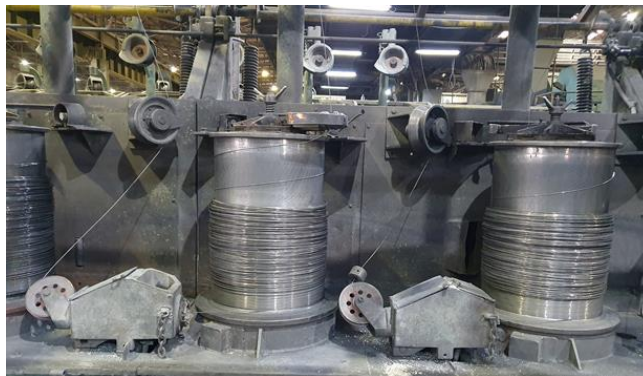


Figura 7: Máquina do processo de trefilação. Fonte: Próprio autor.

## 3.2 Defeitos comuns na fabricação do fio máquina

### 3.2.1 Tipos de defeitos de fio máquina

Os fios máquina podem apresentar defeitos físicos oriundos de falhas de conformação mecânica na laminação ou oriundos de defeitos relacionados ao tarugo, por falhas de refrigeração, dimensionamento ou composição química. Os defeitos mais comuns gerados no processo de laminação são dobra e material fora de tolerância. Por outro lado, os defeitos mais usuais oriundos do tarugo são palhas, escamas e incrustações de partículas macias, podendo ser causados por infiltração de compostos não metálicos, geração de pele dupla ou marcas de oscilação devido a falhas na solidificação ou segregação de elementos residuais. Na Figura 8 está ilustrado defeito de dobra indicado pela seta amarela e na Figura 9, material com dimensão fora de tolerância.

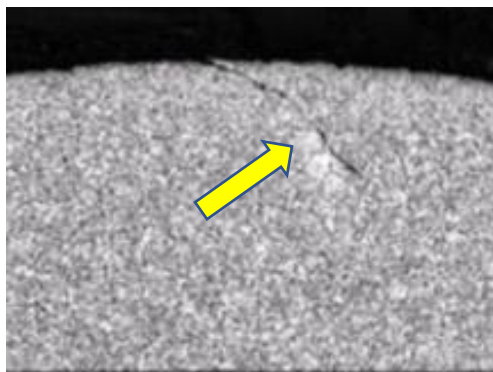


Figura 8: Corte de seção transversal de fio máquina com defeito de dobra. Fonte: LIMA, 2012.

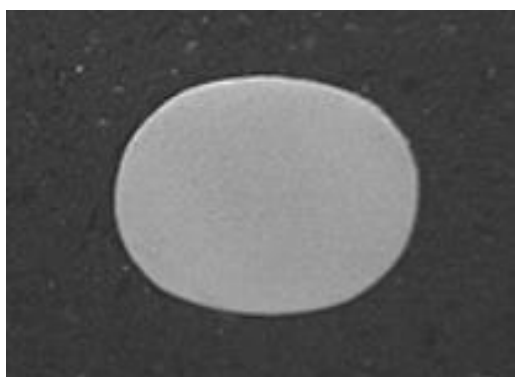


Figura 9: Corte de seção transversal de fio máquina com dimensões fora de tolerância. Fonte: LIMA, 2012.

### 3.2.2 *Palhas na superfície do fio máquina*

Um dos defeitos mais frequentes no material laminado consiste na presença de palhas na superfície do fio máquina. Esse defeito é prejudicial ao processo de trefilação pois nele não há aderência homogênea do sabão lubrificante para evitar contato do aço com as fieiras, gerando assim arrebetamento de material.

Uma das possíveis causas da geração desse tipo de defeito são os elementos residuais como o cobre e o estanho que coalescem em solução sólida, migram para os contornos de grão e formam um composto de baixo ponto de fusão que se funde durante o processo de conformação, formando palhas na superfície do fio laminado (RANA et al., 2013). Na Figura 10 é apresentado defeito de palha em fio máquina, indicado pela seta amarela.

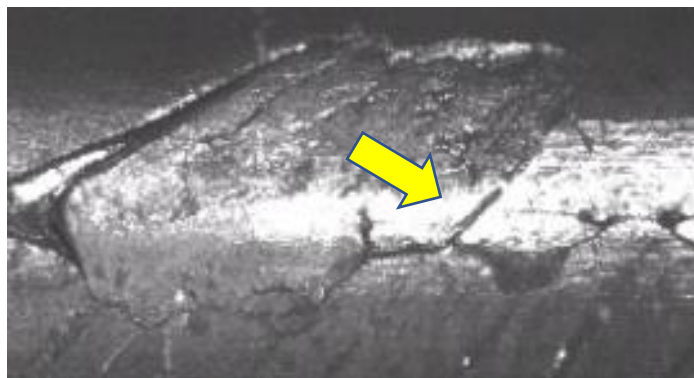


Figura 10: Superfície do fio máquina contendo defeito de palha. Fonte: LIMA, 2012.

### 3.2.3 Variáveis de influência na geração do defeito

As variáveis que mais influenciam na geração do defeito de palha superficial são: temperatura, tempo do material em alta temperatura, deformação mecânica e composição química. Com relação à composição química, sabe-se que o cobre e o estanho geram defeitos superficiais no produto laminado a quente (STEPHENSON, 1983), tais como palhas e escamas formadas na superfície do material, que deveria ser lisa. Sabe-se também que tais defeitos podem ocorrer em decorrência da condição termomecânica que gera a desintegração dos contornos de grão (MIRANDA, 2019).

Durante processos de conformação mecânica a alta temperatura, aços ligados ao cobre apresentam defeitos superficiais longitudinais de forma intermitente, tendendo a se destacar e se soltar da superfície. Esse fenômeno é denominado fragilidade superficial a quente (RANA et al., 2013).

A fragilidade superficial a quente pode ser causada pelo enriquecimento de elemento residual na região abaixo da superfície do aço durante a oxidação no forno de reaquecimento, gerando segregação nos contornos de grãos da austenita (MELFORD, 1980) e pode ser acelerado pela aplicação de tensões (SAHOO et al., 2016). Aços contendo cobre como elemento residual formam um composto de baixo ponto de fusão rico em cobre na superfície durante o processo de reaquecimento de tarugos, (SAHOO et al., 2018) (BERGMAN e WEST, 1988). Esse composto migra para os contornos de grão da austenita gerando trincas no material (RANA et al., 2013).

A região de interface aço/carepa (região oxidada) tende a ficar enriquecida por cobre devido à oxidação seletiva dos átomos de ferro durante o aquecimento do aço para trabalhos a quente. A fase de cobre enriquecida normalmente funde e penetra nos contornos de grão da austenita sob tração durante a laminação, causando trincas na superfície do material. O Estanho acelera este efeito de deterioração do cobre. (SHIBATTA et al, 2002).

Em condições de temperatura e de atmosfera usuais do reaquecimento dos tarugos, a oxidação do aço é controlada pela difusão de átomos do ferro através do óxido e o fenômeno é então regido pela lei disposta na equação 3.1.

$$y = y_0 e^{\frac{-E}{T}} \sqrt{t} \quad (3.1)$$

Sendo  $y$  é a espessura do metal oxidado,  $T$  é a temperatura e  $t$  é o tempo.

As constantes  $y_0$  e  $E$  resultam de ensaios de oxidação dos aços em laboratório (CARLOS, 2004). Quanto maior o tempo de exposição do material a alta temperatura numa atmosfera oxidante, maior a oxidação do aço e assim, maiores as regiões de interface aço/carepa, favorecendo a condição de geração da fase líquida do cobre.

## 4 METODOLOGIA

Foram realizados dois tipos de testes. Um em bancada utilizando amostras de aço sem aplicação de conformação mecânica e outro durante o processo industrial de laminação, avaliando o fio máquina conformado, a fim de verificar a influência da conformação mecânica.

### 4.1 Materiais e Métodos

#### 4.1.1 Teste em bancada

No teste em bancada, foram utilizadas amostras de dois tipos de aço baixo carbono ASTM 1015, com dois níveis de quantidade de Cu e Sn. Foram coletadas duas amostras, uma de cada composição química indicada na Tabela 1, após 15 passes de conformação, com dimensões de 1 m de comprimento e seção semicircular de 20 mm de diâmetro. Elas foram resfriadas ao ar e cortadas em 4 partes, uma para cada configuração do teste.

Tabela 1: Composições químicas das amostras do teste em bancada (%).

Composição	C	Mn	Cu	Sn	Ni
Aço 1	0,11	0,59	<b>0,179</b>	<b>0,0076</b>	0,037
Aço 2	0,10	0,61	<b>0,079</b>	<b>0,0043</b>	0,025

Em seguida, as amostras foram cortadas transversalmente e ensaiadas por espectroscopia para avaliação da composição química. As amostras foram enfiadas em mufla e condicionadas em dois níveis diferentes de temperatura e por dois níveis de tempo para simular possíveis condições do forno de reaquecimento de tarugos, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Condições de teste em bancada.

Condição	Material com Cu e Sn	Temperatura (°C)	Tempo de forno (h)
1	Alto - Aço 1	1200	4
2	Alto - Aço 1	1200	2
3	Alto - Aço 1	1100	4
4	Alto - Aço 1	1100	2
5	Baixo – Aço 2	1200	4
6	Baixo – Aço 2	1200	2
7	Baixo – Aço 2	1100	4
8	Baixo – Aço 2	1100	2

Após condicionamento no forno, as amostras foram resfriadas ao ar e preparadas para ensaios metalográficos de microscopia ótica através de remoção de carepa com escova de aço e banho em ácido clorídrico (diluído 50% em água), embutimento a quente, lixamento, polimento e ataque com Nital (2% ácido nítrico, 98% álcool etílico). Na Figura 11 são apresentas imagens das peças após retirada da mufla, com material ainda em alta temperatura, na figura 12 são apresentas imagens das peças após resfriamento contendo carepa aderida e na Figura 13 são indicadas imagens das peças após retirada da carepa grosseira.



Figura 11: Peças após retirada da mufla. Fonte: Próprio autor.



Figura 12: Peças após resfriamento contendo carepa. Fonte: Próprio autor.



Figura 13: Peças após remoção da carepa grosseira. Fonte: Próprio autor.

O espectrômetro utilizado para avaliação da composição química foi o modelo ARL 3460 AM Metal Analyzer da marca Thermo Fisher. Na preparação da amostra foi utilizado ácido clorídrico em solução aquosa para remoção da carepa. Foram utilizadas lixas com granulometria de 80, 120, 400 e 600 mesh e polimentos grosso e fino utilizando pasta de diamante de 4 a 6 micra e 0 a 2 micra respectivamente. Para ataque químico foi utilizado Nital 2% imersão por 3 segundos.

A mufla utilizada é da marca 7Lab, modelo m e o microscópio óptico utilizado foi o modelo Leica DMLM da marca Leica. Os ensaios foram realizados no laboratório metalográfico da usina da ArcelorMittal Aços Longos Juiz de Fora.

#### 4.1.2 Teste em Processo Industrial

No teste em processo industrial, foram coletadas amostras de dois tipos de fio máquina produzido com tarugos de aço baixo carbono ASTM 1015. Os fios máquina foram processados nas mesmas condições de temperatura de enformamento, tempo de forno, temperatura de forno, velocidades e taxas de deformação durante a laminação, porém com composições químicas diferentes, variando os níveis de Cu e Sn, como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Composição química dos tarugos utilizados no teste em processo industrial.

<b>Aços/ Composição química</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Sn</b>	<b>B</b>	<b>N</b>
Aço 1	0,150	0,76	0,19	0,026	0,008	<b>0,23</b>	0,052	<b>0,0141</b>	0,0031	0,0081
Aço 2	0,124	0,60	0,15	0,022	0,010	<b>0,07</b>	0,033	<b>0,0046</b>	0,0036	0,0088

Os tarugos foram enformados no forno de reaquecimento diretamente do ligotamento contínuo a temperatura de 850°C, e mantidos por 2h a uma temperatura de 1080°C, até então serem laminados. Os tarugos foram conformados por 25 passes de laminação, com velocidade final de 80m/s e taxa de redução média de 22,5%, até chegarem a uma seção semicircular com diâmetro de 6mm, a 1000°C.

Os fios máquina foram resfriados a água até atingirem temperatura de 860°C a uma taxa de 200°C/s, em seguida foram resfriados ao ar por ventiladores do stelmor, até atingirem a temperatura de 300°C a uma taxa de 15°C/s e finalmente resfriados ao ar naturalmente até atingirem a temperatura ambiente. As amostras de fio máquina nas duas condições foram cortadas transversalmente para análise das superfícies. O material foi lixado, polido, atacado quimicamente com Nital (2% ácido nítrico, 98% álcool etílico) e avaliado em microscópio óptico. Foram utilizadas as mesmas técnicas e equipamentos usados no teste em bancada.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Teste de bancada

Após submeter as amostras de duas composições químicas diferentes em diferentes temperaturas e tempo de permanência no forno, foram realizadas as micrografias das amostras contendo alto teor de Cu e Sn nas quatro condições e da amostra contendo baixo teor de Cu e Sn na condição de maior exposição à temperatura. As Figuras 14, 15, 16 e 17 referem-se respectivamente às micrografias das amostras nas quatro condições, sem ataque químico.

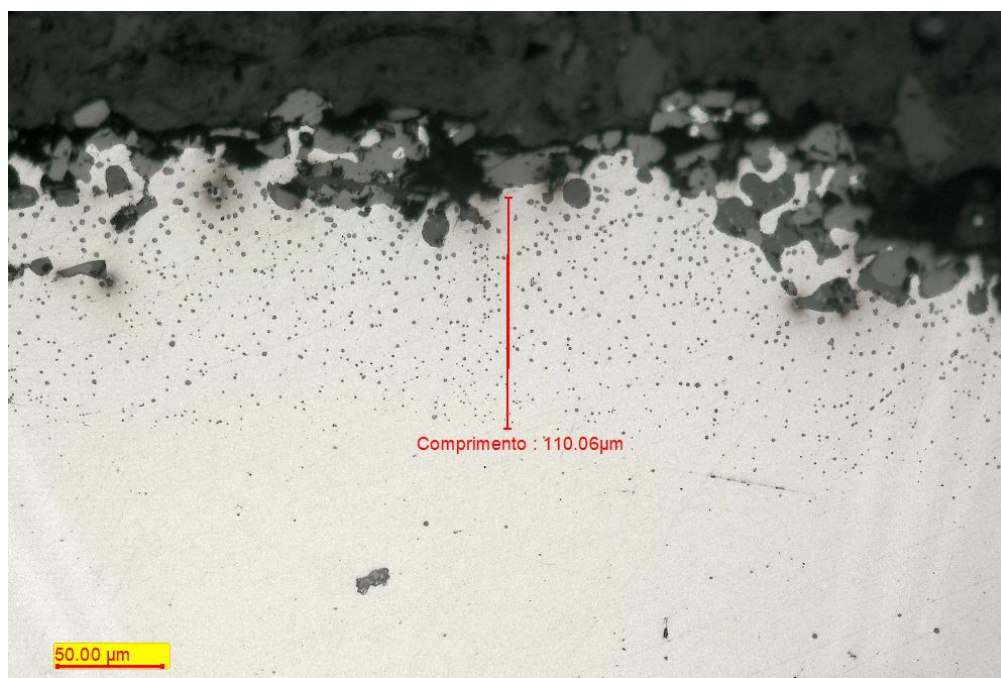


Figura 14: Condição 01, Amostra 01 – Tempo de permanência no forno de 4h a 1200°C. Formação de camada de óxidos de 110 µm. Fonte: Próprio autor.

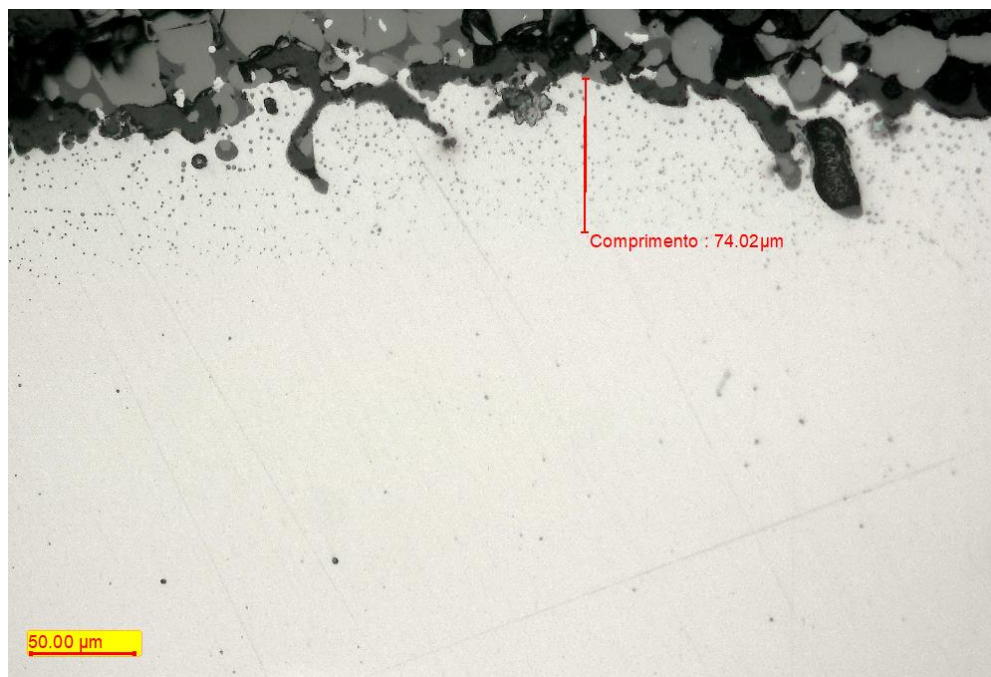


Figura 15: Condição 02, amostra 01 – Tempo de permanência no forno de 2h a 1200°C. Formação de camada de óxidos de 74 µm. Fonte: Próprio autor.



Figura 16: Condição 03, amostra 01 – Tempo de permanência no forno de 4h a 1100°C. Formação de camada de óxidos de 46 µm. Fonte: Próprio autor.

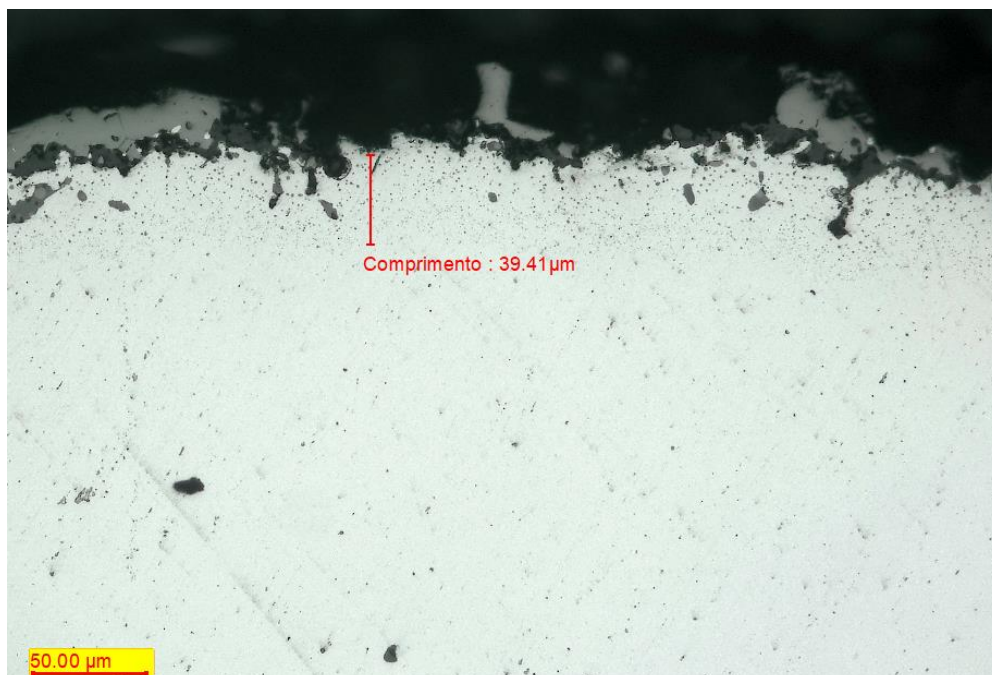


Figura 17: Condição 04, amostra 01 – Tempo de permanência no forno de 2h a 1100°C. Formação de camada de óxidos de 39 µm. Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 4 é apresentada análise da variação da espessura da camada de óxidos nas quatro diferentes condições de temperatura e tempo em mufla.

Tabela 4: Análise da amostra do aço 01 no teste em bancada.

Temperatura (°C)	Tempo de permanência (h)	Espessura da camada de óxidos (µm)
1200	4	110
1200	2	74
1100	4	46
1100	2	39

Foi observada ausência de trincas, oxidação da superfície e formação de óxidos na região abaixo da superfície em todas as condições e nos dois aços. A espessura das camadas variou em decorrência da temperatura e do tempo de permanência no forno. Quanto maior temperatura e maior o tempo de permanência no forno, maiores foram as espessuras das camadas de óxidos. Maiores temperatura

e tempo conduzem a maiores espessuras de camadas de óxidos (CARLOS 2004). Não foi evidenciada a presença de trincas superficiais. Isso pode ser explicado pelo fato de que as amostras não sofreram conformação mecânica em alta temperatura durante o teste (SAHOO et al., 2016).

Em seguida, nas Figuras 18 e 19 estão ilustradas micrografias ópticas referente as amostras dos aços de maior e menor concentração de cobre e estanho, respectivamente, (Aço 1 com 0,179% de Cu e 0,0076% de Sn; Aço 2 com 0,079% de Cu e 0,0043% de Sn, expostos às condições de maior temperatura (1200°C) e maior tempo de mufla (4h).

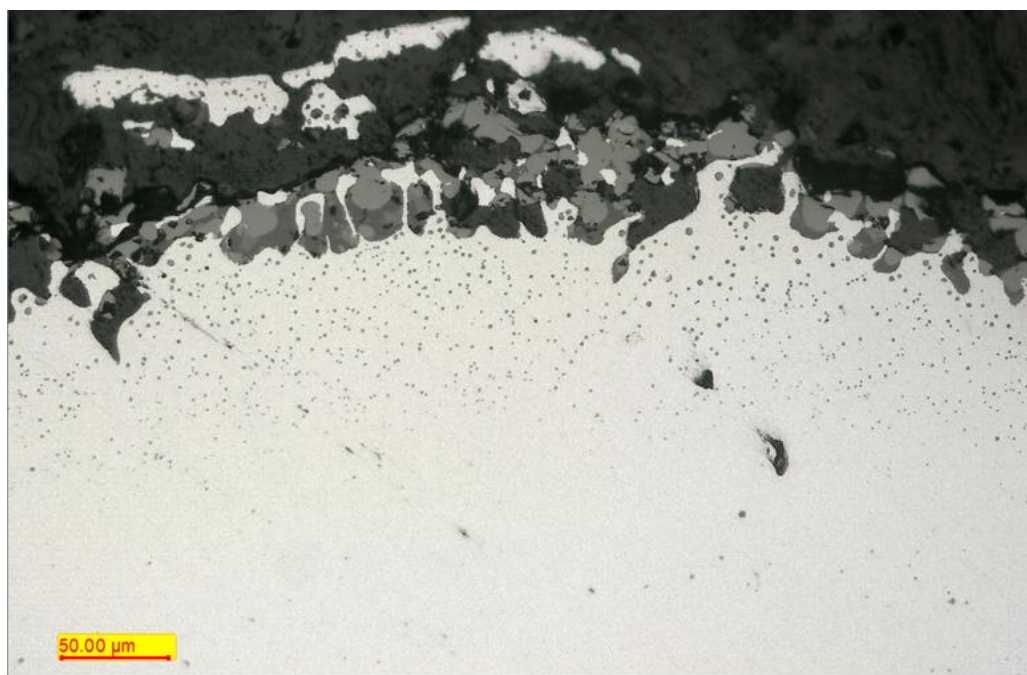


Figura 18: Aço 02 – Menor concentração de Cu e Sn. Fonte: Próprio autor.

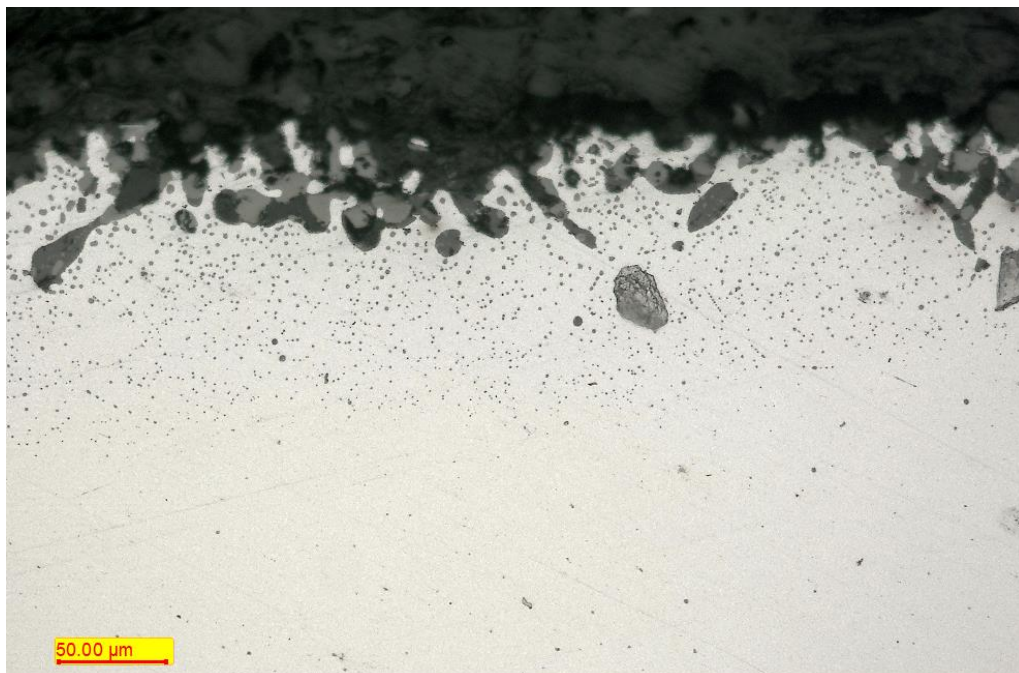


Figura 19: Aço 01 – Maior concentração de Cu e Sn. Fonte: Próprio autor.

Na comparação dos aços com altos e baixos teores de Cu e Sn na condição 1, maior tempo de forno e maior temperatura, não se observou diferença significativa na formação dos óxidos abaixo da superfície nem nenhuma outra diferença na morfologia das amostras.

## 5.2 Teste em processo industrial

Após submeter os dois aços contendo diferentes concentrações de Cu e Sn nas mesmas condições de processo, observaram-se resultados diferentes com relação a presença de defeitos superficiais.

Nas Figuras 20 e 21 são apresentadas amostras dos fios máquina contendo diferentes teores de cobre e estanho e expostos às mesmas condições de enformamento, temperatura e tempo de forno. Na Figura 20 é possível observar a superfície do fio máquina sem defeitos e na Figura 21 a seta indica o defeito de palha.



Figura 20: Amostra do fio máquina com baixo teor de Cu (0,07%) e Sn (0,0046%) enornado a alta temperatura e laminado a quente. Superfície lisa, sem defeitos.

Fonte: Próprio autor.



Figura 21: Amostra do fio máquina com maiores teores de Cu (0,23%) e Sn (0,0046%) enornado a alta temperatura e laminado a quente. Superfície rugosa, com defeito de palha. Fonte: Próprio autor.

O material contendo baixos teores de Cu e Sn apresentou superfície lisa, sem defeitos. Já o material com maior teor de Cu e Sn apresentou superfície rugosa, com defeitos de palha por toda sua extensão. Os defeitos de palha se evidenciam por pequenos pontos que afloram no material, tornando a superfície do fio irregular e rugosa, como mostrado na Figura 21.

As amostras cortadas e polidas foram avaliadas no microscópio ótico primeiramente sem ataque. Seguem Figuras 22 e 23 contendo imagens das micrografias sem ataque das amostras dos fios máquina contendo diferentes teores de cobre e estanho e expostos às mesmas condições de enformamento, temperatura e tempo de forno. Na amostra contendo baixo teor de Cu e Sn a superfície se apresenta lisa, sem a presença de defeitos. Já na amostra com maior teor de Cu e Sn é possível observar trincas na região abaixo da superfície.

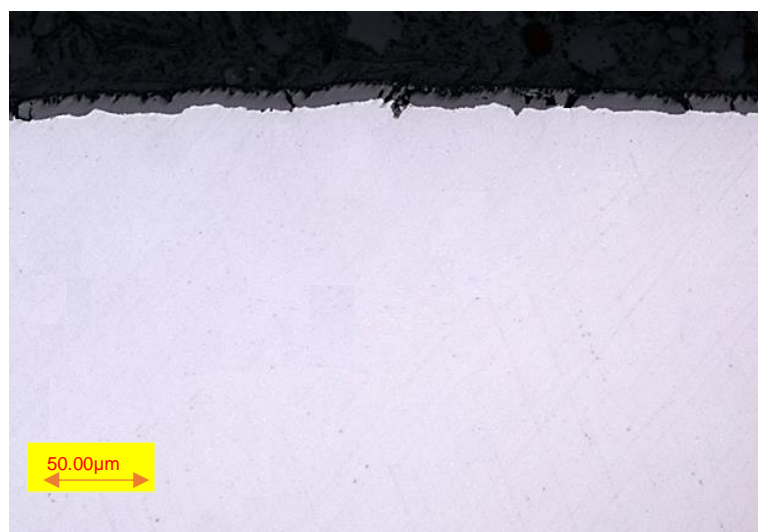


Figura 22: Imagem metalográfica da seção transversal da amostra de fio máquina com baixo teor de Cu e Sn. Aumento 200X. Fonte: Próprio autor.



Figura 23: Imagem metalográfica da seção transversal da amostra de fio máquina com maior teor de Cu e Sn, na região de um defeito aumento 200X. Fonte: Próprio autor.

Nas Figuras 24 e 25, referentes a micrografia com ataque Nital 2% das amostras dos fios máquina contendo diferentes teores de cobre e estanho e expostos às mesmas condições de enformamento, temperatura e tempo de forno, é possível observar amostra sem defeito e amostra com defeito, respectivamente.

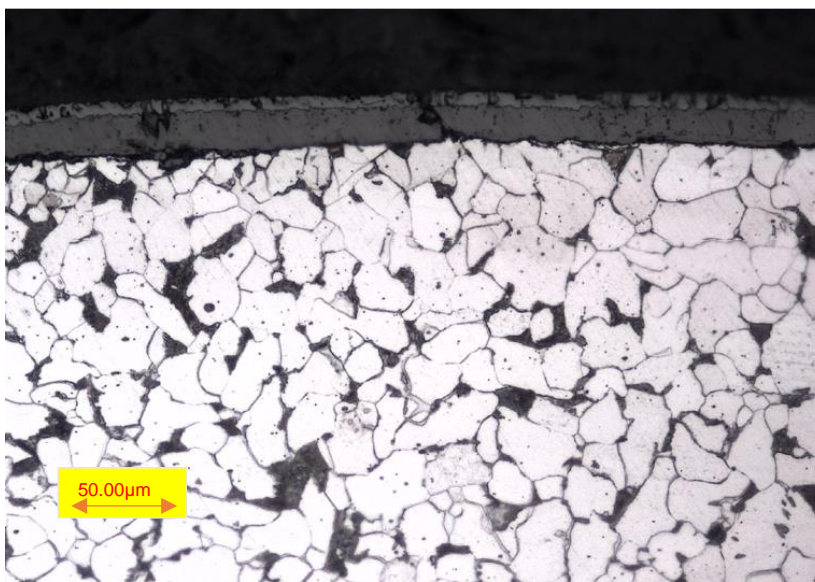


Figura 24: Ampliação de 500x do corte da seção da amostra de fio máquina com baixo teor de Cu e Sn atacada com ácido Nital. Não apresenta defeitos.



Figura 25: Ampliação de 500x do corte da seção da amostra de fio máquina com maior teor de Cu e Sn atacada com ácido Nital. Presença de defeitos e óxidos.

Fonte: próprio autor.

No teste em processo foi observada a formação de trincas superficiais no material com elevada porcentagem de Cu e Sn, mantido alto tempo em elevada temperatura, enornado pela rota a quente e laminado em 25 passes de conformação. Já o material com baixos teores de Cu e Sn, enornado e laminado nas mesmas condições apresentou superfície livre de defeitos.

## 6 CONCLUSÃO

Levando em consideração que o tarugo enornado pela rota a quente solidifica no lingotamento contínuo e segue direto para o forno de reaquecimento, ele permanece mais tempo em alta temperatura comparado ao tarugo que é enornado a frio, tendo condições mais favoráveis, tempo e temperatura, para formar óxidos e consequentemente superfícies aço/óxido. Dessa forma, caso os aços tenham alto teor de Cu e Sn, os compostos de cobre com baixo ponto de fusão são formados facilmente, gerando defeitos na superfície do fio máquina laminado a quente.

Com a caracterização das microestruturas dos testes em bancada e em processo, os resultados mostraram que elevados teores de elementos residuais podem gerar defeitos superficiais e a conformação mecânica tem impacto essencial para a formação desses defeitos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16229**: sucata de ferro fundido e aço. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- BERGMAN, A.; WEST, R. Copper enrichment during reheating. **Scr. Metall. Mater.** v. 22, p. 659–663, 1988.
- CARVALHO, C. E. R. **Cinética de oxidação e caracterização da carepa de aços inox SAE 304 e SAE 430**. Ouro Preto: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). 64p.
- CHEN, D.; LU, B.; DAI, F. Q.; CHEN, G.; YU, W. Variations on billet gas consumption intensity of reheating furnace in different production states. **Applied Thermal Engineering**, v. 129, p. 1058–1067, 2018.
- LIMA, M. M. **Defeitos em Produtos Longos**. [S.l.]: ArcelorMittal Monlevade, 2012.
- MELFORD, D. A. The Influence of Residual and Trace Elements on Hot Shortness and High Temperature Embrittlement, **Phil. Trans. R. Soc. Lond.** v. 295, n. 1413, 1980, pp. 89-103.
- MIRANDA, A. M. **Monitoramento dos elementos residuais menos comuns no fornecimento de sucata para aciaria FEA**. Ouro Preto: REDEMAT, Escola de Minas da UFOP-UEMG, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT. 61 p.
- OHTSUKA, H.; GHOSH, G.; NAGAI, K. Effects of Cu on diffusional transformation behavior and microstructure in Fe-Mn-Si-C Steels. **ISIJ International**, v. 37, n. 3, p. 296-301, 1997.
- RANA, R.; BLECK, W.; SINGH, S. B.; MOHANTY, O. N. Hot shortness behavior of a copper-alloyed high strength interstitial free steel. **Materials Science & Engineering A**, Kharagpur, v. 588, n.1, p. 288-298, 2013.
- SAHOO, G.; DEEPA, M.; SINGH, B.; SAXENA, A. Hot ductility and hot-shortness of steel and measurement techniques: a review. **Journal of Metals, Materials and Minerals**, v.26, n.2, pp.1-11, 2016.
- SAHOO, G.; SINGH, B.; SAXENA, A. Effect of strain rate, soaking time and alloying elements on hot ductility and hot shortness of low alloy steels. **Materials Science & Engineering A**, v. 718, n. 1, p. 292-300, 2018.
- SHIBATA, K. et al. Suppression of surface hot shortness due to Cu in recycled steels. **Materials Transactions**, v. 43, n 3, p 292-300, 2002.
- STEPHENSON, E. T. Effect of recycling on residuals, processing, and properties of carbon and low-alloy steels. **Metall Mater Trans A**, v. 14, n. 2, p. 343-353, 1983. ISSN 0360-2133.
- XU, S.; BROWN, J. R.; TYSON, W. R. Influence of Residual Elements on Mechanical Properties of Two Carbons Steel Grades. **Steel Research International**, v. 77, n.11, p. 825-835, 2016.