



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JADIEL OLIVEIRA COSTA

FABRICAÇÃO DE TIRAS METÁLICAS DA LIGA DE Al
6061 NO FUNDIDOR DE TIRAS

Ilha Solteira

2024



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JADIEL OLIVEIRA COSTA

FABRICAÇÃO DE TIRAS METÁLICAS DA LIGA DE Al 6061 NO FUNDIDOR DE TIRAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia, da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Campus de Ilha Solteira, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Antônio de Pádua Lima Filho

Ilha Solteira

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C838f Costa, Jadel Oliveira.
Fabricação de tiras metálicas da liga de Al 6061 no fundidor de tiras /
Jadel Oliveira Costa. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
38 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2024

Orientador: Antônio de Pádua Lima Filho

Inclui bibliografia

1. Fundidor de tiras. 2. Agentes nucleantes. 3. Funil direcionador.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: FABRICAÇÃO DE TIRAS METÁLICAS DA LIGA DE Al 6061 NO FUNDIDOR DE TIRAS

ALUNO: : JADIEL OLIVEIRA COSTA RA: 162053681

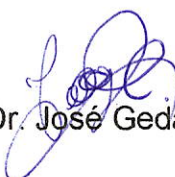
Orientador: Antonio de Pádua Lima Filho

Aprovado (X) – Reprovado () pela Comissão Examinadora

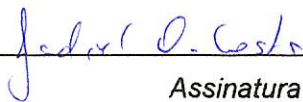
Nota obtida: 9,0

Comissão Examinadora:


Prof. Dr. Antonio de Pádua Lima Filho
Presidente (Orientador)


Prof. Dr. José Gedael Fagundes Júnior


Eng. Mecânico Bruno Alves de Andrade


Assinatura do Aluno

Ilha Solteira (SP) 04 de março de 2024.

AGRADECIMENTOS

A princípio gostaria de agradecer aos meus pais Adna Santos Oliveira Costa e Paulo de Jesus Costa por todo esforço e dedicação empregados para que eu pudesse conquistar meus objetivos até o momento. Muito obrigado por todo empenho e amor direcionados a mim, sem o qual não estaria aqui hoje.

Também gostaria de agradecer ao meu amigo e padrinho Juan Harold Sosa Arnao, pelos conselhos e orientações ao longo de toda minha trajetória acadêmica, tornado muito mais visível o caminho pelo qual eu deveria trilhar.

Quero agradecer também ao meu orientador Prof. Dr. Antônio de Pádua Lima Filho por toda a paciência, disponibilidade e atenção que teve comigo durante a execução deste trabalho. Agradeço ao senhor pela forma rica em que me passou conhecimento, sempre mantendo sua dedicação, humildade e respeito, característicos de sua pessoa.

Agradeço aos técnicos Diego de Alcântara e Bruno Alves de Andrade, por toda sua experiência, disponibilidade, agilidade e paciência, elementos que tornaram possível a execução deste trabalho da forma como foi. Suas ideias, sempre muito práticas, me ajudaram a ter a clareza necessária para aplicar os conhecimentos obtidos durante a graduação.

Também gostaria de agradecer a Moradia Estudantil da UNESP de Ilha Solteira pelo qual nutro eterna gratidão e carinho, em especial a Ala 7, pois além de contribuir na minha formação como cidadão também possibilitou minha permanência no curso de Engenharia Mecânica.

Por fim, agradeço ao corpo docente da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP por todo o conhecimento e sabedoria que foram passados ao longo desses anos. Sem eles, eu não poderia estar apto a ser o profissional capacitado como estou hoje. Sou muito grato também a entidade “UNESP”, a qual pertenço com muito orgulho e me comprometo em, sempre que possível, trazer oportunidades e compartilhar os frutos que serão colhidos ao longo de minha carreira profissional.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo a fabricação de tiras metálicas a partir da liga de Alumínio 6061 em um fundidor de tiras metálicas, no qual foi instalado um motor elétrico de 1 CV para acionar uma esteira dupla com 14 roletes e um sistema de resfriamento para controlar a temperatura no processo de laminação. O alumínio foi aquecido até a temperatura de 900°C e vazado a uma temperatura de 750°C logo após a retirada da escória e da adição do refinador de grãos ou agentes nucleantes. A partir do vazamento do metal líquido observou-se a formação de tiras metálicas que ficaram congestionadas entre os cilindros do equipamento e o funil direcionador localizado entre os roletes e os cilindros da máquina, não permitindo a formação contínua das tiras que estavam sendo conformadas. Sendo necessário a implementação de novos equipamentos que possam direcionar com mais eficiência as tiras metálicas para os roletes que auxiliam no recolhimento das tiras geradas pelo fundidor de tiras metálicas.

Palavras-chave: Fundidor de tiras; Agentes nucleantes; Funil direcionador.

ABSTRACT

The aim of this work is to manufacture metal strips from Aluminum 6061 alloy in a strip caster, in which a 1 HP electric motor was installed to drive a double belt with 14 rollers and a cooling system to control the temperature in the rolling process. The aluminum wire was heated to a temperature of 900°C and poured at a temperature of 750°C immediately after the slag was removed and the grain refiner or nucleating agents were added. As soon as the liquid metal was poured, the formation of metal strips was observed, which became congested between the cylinders of the equipment and the directing funnel located between the rollers and the cylinders of the machine, not allowing the continuous formation of the strips that were being formed. It was necessary to implement new equipment that could more efficiently direct the metal strips to the rollers that help collect the strips generated by the metal strip caster.

Keywords: Strip caster; Nucleating agents; Directing hopper.

LISTA DE FIGURAS

	P.
Figura 1 - Aplicação de roletes nos fundidores de tira Bessemer.	14
Figura 2 - Processo de fabricação de tiras metálicas pelo equipamento de Hazelett.	15
Figura 3 - Comparação do lingotamento contínuo de placas grossas, finas e tiras.	16
Figura 4 - Arraste da tira solidificada com o auxílio de dois cilindros cintados.	17
Figura 5 - Representação esquemática da solidificação ocorrendo entre os rolos: (a) solidificação da liga M-Alloy; (b) Solidificação da liga S-Alloy.	18
Figura 6 - Representação esquemática do MDBRC e do (MDBRC + CS) respectivamente: (a) MDBRC; (b) (MDBRC + CS).	18
Figura 7 - Fabricação de tiras metálicas em nosso laboratório.	19
Figura 8 - Distribuição do refinador de grãos na liga de alumínio.	20
Figura 9 - Eficiência do Titânio e do Bório nas ligas de alumínio.	20
Figura 10 - Influência dos elementos de liga nas ligas de Alumínio.	21
Figura 11 - Sistema de aquisição de temperaturas.	22
Figura 12 - Funil direcionador antigo(a); funil direcionador atual com furo. oblongo fixado nos roletes (b).	23
Figura 13 - Reservatório para o fluido de refrigeração dos cilindros (a); configuração dos reservatórios dos fluidos (b).	24
Figura 14 - Tacômetro (a); inversor de frequência(b).	25
Figura 15 - Medições das rotações dos roletes para sincronização das velocidades.	25
Figura 16 - Calha de resfriamento.	26
Figura 17 - Bocal que recebe o metal semissólido.	26
Figura 18 - Forno utilizado para aquecer o bocal.	27
Figura 19 - Forno utilizado para aquecer a liga metálica de alumínio.	28
Figura 20 - Curva de calibração do inversor de frequência do fundidor de tiras.	30
Figura 21 - Curva de calibração do inversor de frequência dos roletes.	34
Figura 22 - Acúmulo do metal no funil direcionador: vista lateral (a); vista frontal (b).	36
Figura 23 - Vista superior da região de entrada no fundidor de tiras metálicas.	33
Figura 24 - Tiras empilhadas no funil de direcionamento.	37
Figura 25 - Região de ingresso do metal nos cilindros após o vazamento.	37

LISTA DE TABELAS

	P.
Tabela 1 - Valores de frequência e rotação coletados para os cilindros do fundidor de tiras.	29
Tabela 2 - Valores de frequência e rotação coletados para os cilindros dos roletes.	30
Tabela 3 - Frequências obtidas a partir das rotações dos cilindros do fundidor de tiras.	31
Tabela 4 - Frequências obtidas a partir das rotações dos cilindros dos roletes.	31
Tabela 5 - Diâmetro do cilindro do fundidor e do rolete.	32
Tabela 6 - Velocidades superficiais dos cilindros do fundidor de tiras.	32
Tabela 7 - Velocidade superficial dos cilindros do rolete.	33

SUMÁRIO

	P.
1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 SAÍDA DA TIRA METÁLICA DO FUNDIDOR DE TIRA	13
3.2 REFINADORES DE GRÃOS OU AGENTES NUCLEANTES	18
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	20
4.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SINAL E DADOS DOS TERMOPARES	20
4.2 AJUSTE DO COLETOR DAS TIRAS POSICIONADO NA ENTRADA DA ESTEIRA DE ROLETES	21
4.3 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DOS CILINDROS E DA ESTEIRA DE ROLETES	22
4.4 SINCRONIZAÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DOS ROLETES E DOS CILINDROS DO FUNDIDOR DE TIRAS	22
4.5 ARRANJO DO FUNDIDOR DE TIRAS PARA INICIAR A FABRICAÇÃO DE TIRAS METÁLICAS	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1 SINCRONIZAÇÃO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAIS	26
5.2 VAZAMENTO DO METAL METÁLICA NO FUNDIDOR DE TIRAS	31
6 CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS	35

1. INTRODUÇÃO

O principal processo para obter tiras metálicas diretamente do estado líquido consiste na tecnologia de rolos duplos, conhecido na literatura por *Twin-Roll* ou por rolos únicos *Single-Roll*. A tecnologia é caracterizada pela produção de tiras metálicas de espessura em torno de 2 mm que podem ser bobinadas. Esse processo tem sido bastante aplicado em indústrias de alumínio e atualmente vem ganhando atenção especial por parte da indústria de aço. Dois fatores são fundamentais para o grande interesse industrial desse processo (AMAURO, 2007).

- 1.) Economia considerável nos custos de produção, pela redução das etapas de processo de fabricação; e
- 2.) Melhoria da qualidade metalúrgica do produto, devido a imposição de taxas de resfriamento relativamente elevadas na solidificação (10^3 a 10^4 K/s). (FERREIRA, 2020)

O processo por *Twin-Roll* combina a solidificação rápida e a laminação a quente praticamente no estado semissólido em um único estágio de operação. No Brasil, a CBA (Companhia Brasileira de Alumínio/Votorantim Metais) produz tiras de espessura de 4,0 a 7,0 mm das ligas de Al 1xxx, 3xxx, 5xxx, 7xxx, and 8xxx (YAMASSAKI, 2008). Desse modo, o investimento de capital para implementação do processo é significativamente menor que o custo associado aos processos de produção convencional. Experimentos têm demonstrado que a qualidade do produto é bastante influenciada pelos seguintes aspectos: 1.) Turbulência da poça líquida formada entre os rolos; 2.) Variações térmicas no líquido da poça; 3.) Áreas de estagnação dentro da poça; 4.) Altura do ponto de encontro entre as duas frentes de solidificação oriundas das superfícies dos rolos; e 5.) Oscilações no nível da poça líquida (AMAURO, 2007) .

A esteira transportadora de roletes foi desenvolvida no trabalho de graduação do aluno Gustavo Henrique Sanches, posicionada na saída do Fundidor de Tiras, é acionada por um motor elétrico trifásico de 1 CV por correia. Por outro lado, o aluno Bruno Veneziano (VENEZIANO , 2021), instalou acessórios para movimentar a esteira desenvolvido no seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). O aluno Guilherme Machado Santana atualmente está finalizando o seu TCC pela instalação do sistema de refrigeração da tira semissólida na saída do fundidor de tiras.

A finalidade deste Trabalho de Conclusão de Curso é de dar continuidade ao estudo sobre processamento de tiras metálicas fundidas empregando a liga de Al 6061 (Al-1Mg-0,6Si) com adição de 0,25% Cu e 0,2 Cr (refinador de grãos) para melhorar a resistência mecânica e corrosão respectivamente. Esta liga doada pela Companhia Brasileira de Al (CBA) ainda não foi testada em nosso Fundidor de Tiras. É uma liga tratada termicamente, solubilização e envelhecimento, para aumentar a resistência mecânica. As ligas Al-1Mg-0,6Si são amplamente usadas como ligas estruturais de média resistência com vantagens adicionais de boa soldabilidade, resistência à corrosão e imunidade à corrosão sob tensão. As ligas 6xxx são mais empregadas na forma estrutural (YAMASSAKI, 2008).

As propriedades térmicas dessas são: 1. Temperatura *Liquidus* (650 °C) e temperatura *Solidus* (585 °C). Estas informações são importantes para estimar a temperatura de vazamento da liga 6061 no fundidor de tiras em nosso laboratório para obter o material semissólido na calha de resfriamento.

A saída contínua da tira solidificada na saída do fundidor de tiras é importante para obter um fluxo contínuo de fabricação. A esteira transportadora de roletes posicionada na saída do nosso fundidor de tiras foi desenvolvida por dois Trabalhos de Conclusão de Curso (TCCs) (VENEZIANO , 2021), (SANCHES, 2020).

O processamento de tiras metálicas a partir do estado líquido pode ser feito empregando laminadores de dois cilindros e por esteira dupla metálica para materiais não ferrosos de médio e baixo ponto de fusão, por exemplo, ligas de alumínio e zinco, respectivamente. No início dessa tecnologia, o metal ou a liga metálica no estado líquido é vazado diretamente para um bocal acoplado junto aos cilindros dispostos na posição vertical (YAMASSAKI, 2008). Em nosso Laboratório é utilizado um “Tundish”, panela intermediária que funciona como um distribuidor, o qual funciona como um controle estático do processo. Uma calha de resfriamento posicionada na saída do “Tundish” possibilita a sobrevivência do embrião da liga metálica vazada no estado líquido, através do superresfriamento térmico. Esta lama metálica alimenta o bocal acoplado aos cilindros para produzir a tira metálica pelo fundidor de tiras (FERREIRA, 2020).

Como resultado, a menor temperatura da lama metálica em relação ao estado líquido agride menos os cilindros do fundidor de tiras quando se emprega ligas de alumínio, por exemplo. Em nosso Laboratório, os cilindros são feitos em aço ao carbono comum

refrigerado internamente por um líquido composto de 1 parte de óleo para 9 partes de água numa vazão aproximada de 1200 L/h. Dessa forma, o material é conformado no estado semissólido gastando menor quantidade de energia para produzir a tira metálica e a refrigeração interna dos cilindros reduz a oxidação/desgaste deles.

Em geral, os processos de produção de tiras metálicas no estado semissólido são classificados: 1. Cilindro Único (*Single Roll*); 2. Cilindro Duplo (*Twin Roll*); e 3. Cilindros cintados que será descrito abaixo. Os cilindros duplos podem ser posicionados de forma vertical e horizontal dependendo da saída da tira no fundidor de tiras: 1. Vertical (cilindro na posição vertical); e 2. Horizontal (cilindro na posição horizontal).

Este trabalho tem por objetivos fazer o teste prático, ou seja, produzir a partir do metal líquido tiras metálicas de alumínio, verificando se as modificações realizadas anteriormente como: instalação do motor de 1 VC para o acionamento dos roletes e o sistema de resfriamento, trouxeram melhorias para o processo. Além de sincronizar as velocidades dos roletes e dos cilindros do laminador

Naturalmente, é fundamental que a velocidade superficial dos roletes da esteira transportadora tenha a mesma velocidade superficial dos cilindros do fundidor de tiras. Este trabalho mostra a forma de execução da instrumentação da esteira transportadora de roletes por um motor elétrico trifásico 1 cv, com um sistema de roldanas acionadas por polia e a velocidade controlada por um inversor de frequência WEG CFW 08.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo:

1. Estudar o sistema de controle do fundidor de tiras;
2. Fabricar a tira metálica da liga Al 6061 no Fundidor de Tiras;
3. Acompanhar a amostra para a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) parceira nesta pesquisa para análise da composição química, metalográfica, ensaio de tração de tiras como recebida e processada por laminação a frio e posterior tratamento térmico de recristalização.
4. Sincronia das velocidades do sistema de roletes e dos cilindros do laminador de tiras.

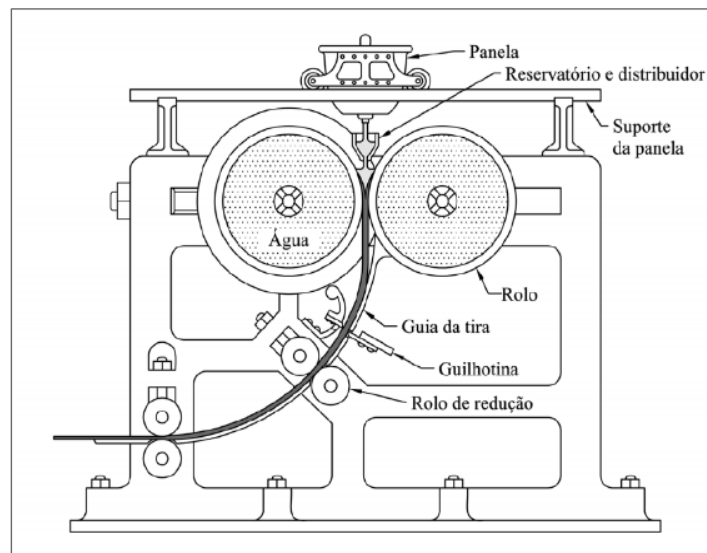
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um estudo do recolhimento da tira metálica do fundidor de tiras é feito no item a seguir.

3.1. SAÍDA DA TIRA METÁLICA DO FUNDIDOR DE TIRA

A Figura 1 ilustra o fundidor de tira desenvolvido em 1857 e patenteado por Bessemer (BESSEMER, 1865). Os cilindros eram internamente refrigerados a água e com apoio para a tira solidificada quando da sua saída do equipamento. Este apoio funciona como uma guia para direcionar a tira para uma posterior conformação. A tira deixa o equipamento na posição vertical. Por isso, é atribuído que os cilindros estão na posição vertical. Devido aos desafios do Sir Henry Bessemer em melhorar o seu conversor para a produção de aço, esta pesquisa foi abandonada. Na época, a tecnologia existente não proporcionava o avanço necessário nessa pesquisa: auxílio computacional, metalurgia avançada e limitação de processos na fabricação.

Figura 1 - Aplicação de roletes nos fundidores de tira Bessemer

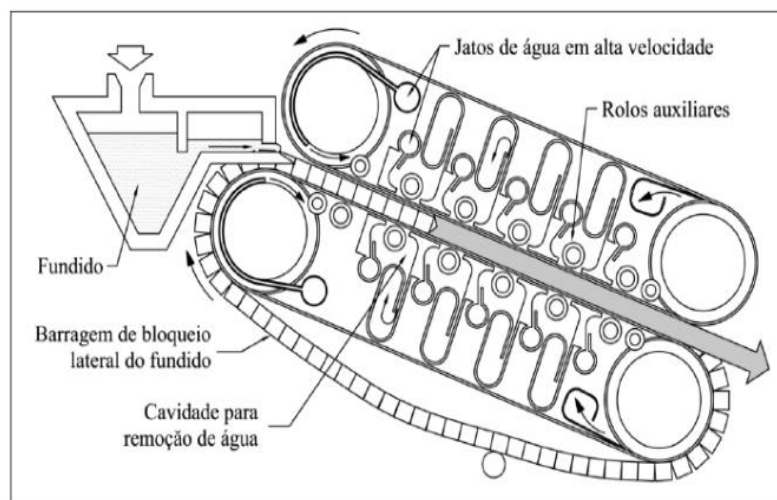


Fonte: (BESSEMER, 1865)

A Figura 2 ilustra o processo Hazelett, desenvolvido praticamente 100 anos após o equipamento de Bessemer como descrito anteriormente. Neste processo uma cinta metálica atua como uma barreira lateral para manter a largura da tira metálica durante a fabricação. Tanto pelo processo Bessemer como Hazelett a liga metálica é vazada diretamente do estado

líquido, ou seja, não têm a presença de um superresfriamento térmico para a sobrevivência do embrião. Atualmente, mais de 100 máquinas Hazelett estão em operação em vários países para a fabricação de ligas metálicas de baixo ponto de fusão, como as ligas de alumínio (HAZELETT, 1966). Assim, mesmo com severa refrigeração, o processo Hazelett não é aplicado na fabricação de ligas ferrosas ou de maior ponto de fusão, pois a cinta metálica poderá ser danificada.

Figura 2 - Processo de fabricação de tiras metálicas pelo equipamento de Hazelett



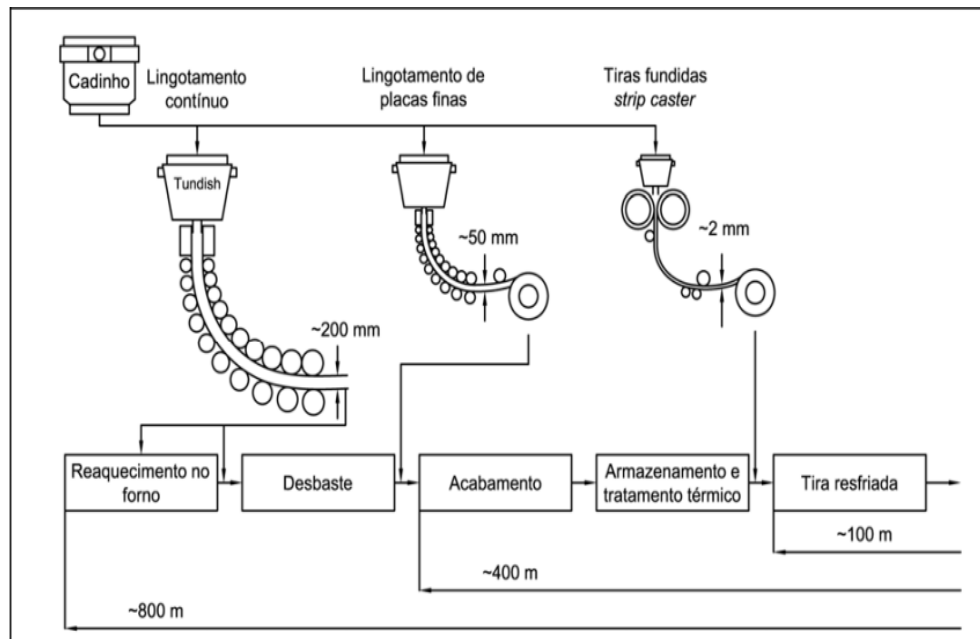
Fonte: (HAZELETT, 1966) .

A fundição contínua é empregada na fabricação de produtos semiacabados tanto de aço ferrosos como de não ferrosos para posterior conformação mecânica, laminação a quente. A Figura 3 ilustra a produção de placas grossas e finas. Observa-se a ação dos cilindros de apoio na fundição contínua de placas grossas e finas. Neste trabalho, é feita o controle do movimento da esteira transportador na saída do fundidor de tiras em nosso Laboratório. Realmente, o fundidor de tiras é altamente competitivo em relação ao lingotamento contínuo, pois já obtém a tira metálica na forma final.

No Brasil, a Companhia Brasileira de Alumínio/Votorantim Metais (CBA) opera com duas instalações JUMBO 3CM em escala industrial (Lingotamento Contínuo entre Cilindros) que foram entregues em julho de 2001. A instalação na CBA pode produzir bobinas de fundição de ligas de alumínio (1XXX, 3XXX, 5XXX, 7XXX e 8XXX) para relaminação (YAMASSAKI, 2008).

citam que o processo CASTRIP® é o primeiro método comprovado comercialmente para fundição direta de chapas de aço finas com baixo teor de carbono. A Nucor instalou a primeira unidade de produção CASTRIP em 2002 na fábrica de Crawfordsville, IN.

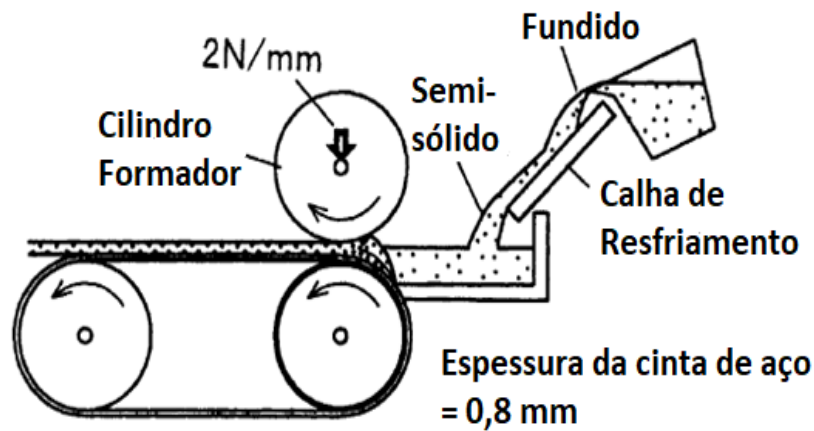
Figura 3 - Comparação do lingotamento contínuo de placas grossas, finas e tiras



Fonte: (YAMASSAKI, 2008)

A Figura 4 ilustra o apoio da tira metálica pelo cilindro inferior na saída do fundidor de tira desenvolvido por (HAGA, 2002). Esta cinta metálica feita em aço, garante o apoio da tira na saída do fundidor de tiras. Uma eventual aderência da tira no cilindro inferior pode ser evitada pelo arrasto do material semissólido conformado entre os dois cilindros.

Figura 4 - Arraste da tira solidificada com o auxílio de dois cilindros cintados



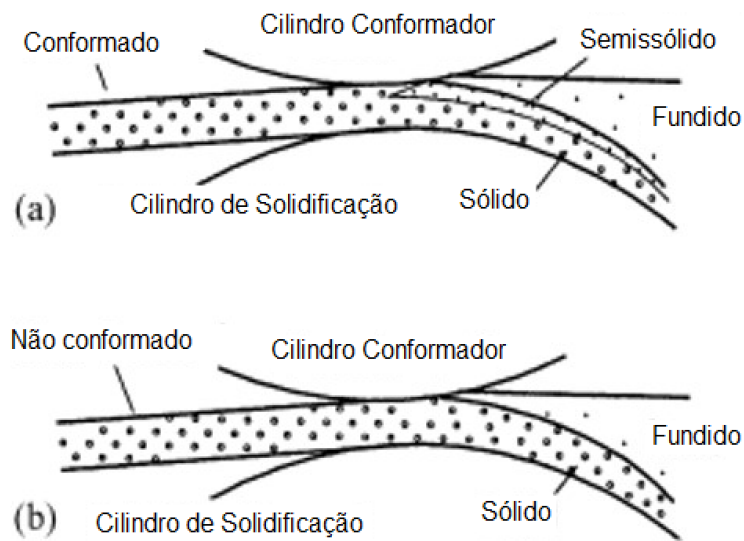
Fonte: (HAGA, 2002).

Haga, cita que o processo *twin roll* apresenta diversas vantagens na fundição de tiras de ligas de alumínio, como: 1 – Rápida solidificação; 2 – Fabricação direta das tiras logo após a fundição; e 3 - Baixo custo do equipamento.

No processo de *Melt drag twin-roll caster* (MDTRC), ocorre um arrasto do material semissólido, Figura 4. Isto é necessário para a fabricação de tiras fundidas de material semissólido (“M-Alloy”) de ligas de alumínio em altas velocidades como será analisado posteriormente para serem conformadas pelo cilindro superior, como indica a Figura 5 (a).

No caso da fabricação de tiras fundidas de alumínio do tipo *Skin* (“S-Alloy”), a superfície da tira no estado semissólido sofre conformação entre cilindros, Figura 5 (b). Para as tiras fundidas do tipo *M-Alloy*, a parcela semissólida se localiza no topo da camada solidificada da tira, como a Figura 5 (a) ressalta. Em contrapartida, na fundição de tiras do tipo *S-Alloy*, a camada semissólida pode ser conformada com a aplicação de uma pequena força de separação, deixando-a muito fina ou inexistente, como mostra a Figura 5 (b) (HAGA, 2002).

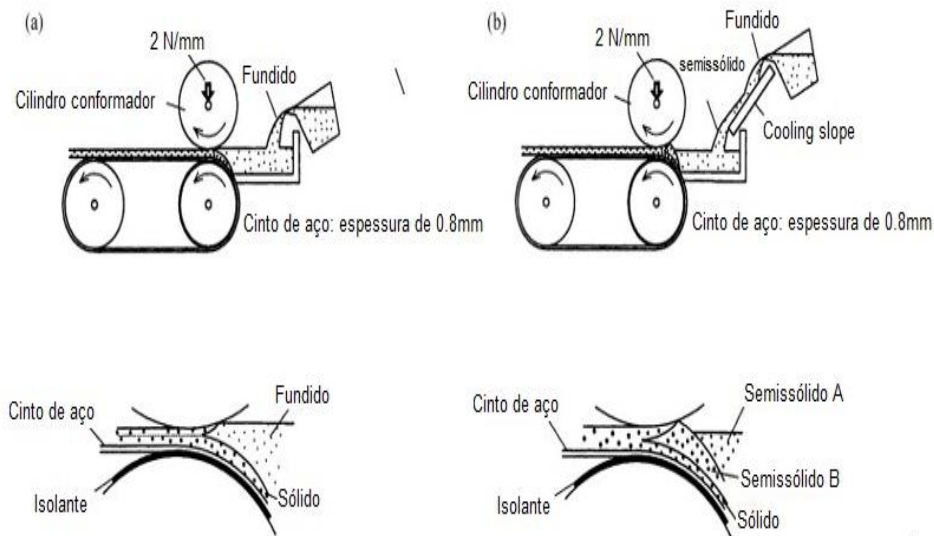
Figura 5 - Representação esquemática da solidificação ocorrendo entre os rolos: (a) solidificação da liga M-Alloy; (b) Solidificação da liga S-Alloy



Fonte: Traduzido de (HAGA, 2002).

O processo de *Melt drag belt-roll caster* (MDBRC) foi desenvolvido a fim de fundir tiras de alumínio de ligas *S-alloy* com a utilização de um cinto de aço, Figura 4. O cilindro inferior, onde o cinto é posicionado, fica revestido com isolante térmico para o funcionamento contínuo do fundidor de tiras, como indica a Figura 6.

Figura 6 - Representação esquemática do MDBRC e do (MDBRC + CS), respectivamente: (a) MDBRC; (b) (MDBRC + CS)



Fonte: Traduzido de (HAGA, 2002).

Concluindo seu trabalho, Haga indica que a utilização do “MDTRC + CS” é útil para fundição de tiras de alumínio de ligas *M-alloy* por causa da velocidade de fabricação da tira, chegando a 90 m/min. No caso do processo (MDBRC + CS), sua utilidade é dada para fundir tiras de alumínio de ligas *S-alloy*, com velocidades de processamento inferiores, chegando a 20 m/min.

O equipamento instrumentado neste trabalho é apresentado com esteira transportadora dupla de roletes, utilizada para extrair a tira solidificada do laminador e evitar a interrupção do fluxo da tira durante o processamento, Figura 7.

Figura 7 - Fabricação de tiras metálicas em nosso Laboratório

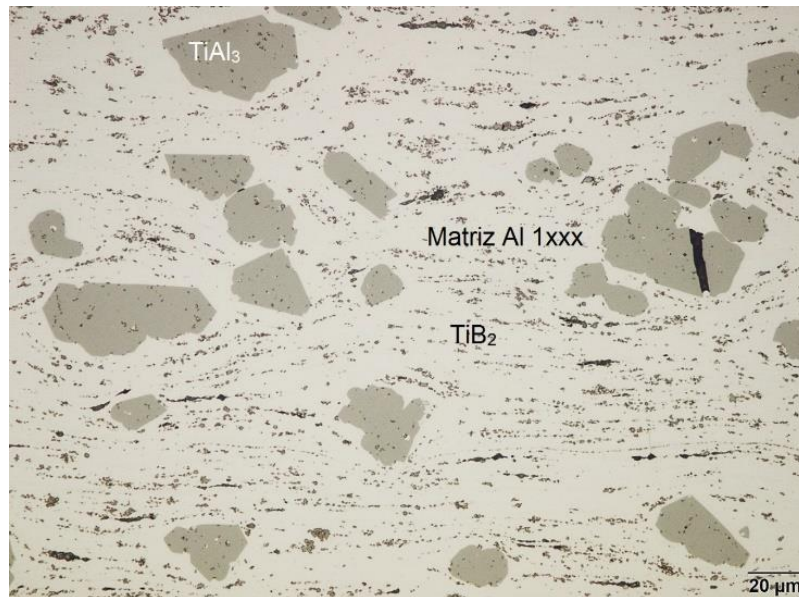


Fonte: (VENEZIANO , 2021).

3.2 REFINADORES DE GRÃOS OU AGENTES NUCLEANTES

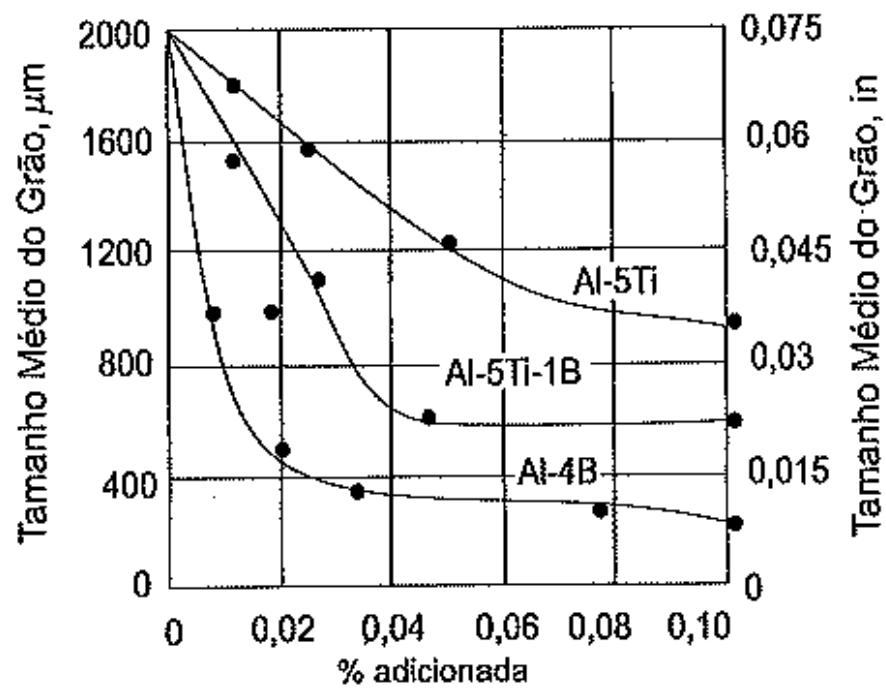
Os refinadores de grãos são substâncias utilizadas em pequenas quantidades que não interferem na composição química da liga, mas funcionam como um catalisador da nucleação. A eficiência de um refinador de grãos é medida a partir da sua capacidade de produzir menores ângulos de contatos entre as partículas nucleantes e o núcleo sólido que está se formando. Neste experimento o agente nucleante utilizado foi o TIBAL (Al-5%Ti-1%B) com massa de 0,1% da massa fundida. As Figuras 8, 9 e 10 mostram respectivamente como o refinador de grãos age na liga, a eficiência dos elementos titânio e o bório quando são utilizados como refinadores e grãos e a eficiências de elementos de liga no tamanho dos grãos nas ligas de alumínio.

Figura 8 - Microestrutura do TIBAL



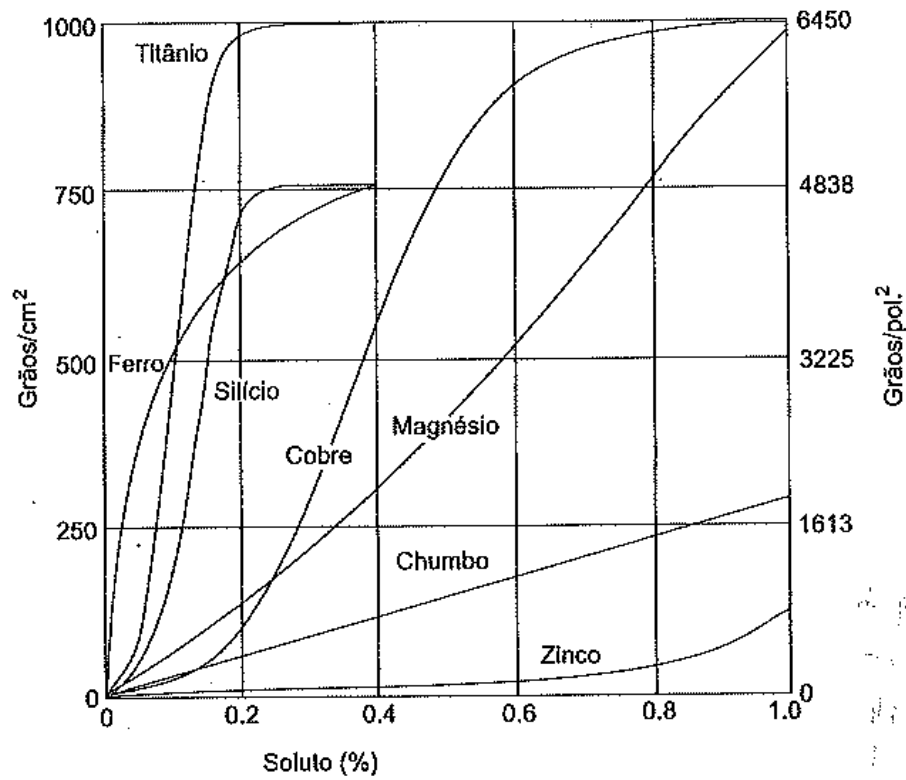
Fonte: Próprio Grupo de Pesquisa.

Figura 9 - Eficiência do Titânio e do Bório nas ligas de alumínio



Fonte: (AMAUURI, 2007).

Figura 10 - Influência dos elementos de liga nas ligas de Alumínio



Fonte: (AMAURI, 2007).

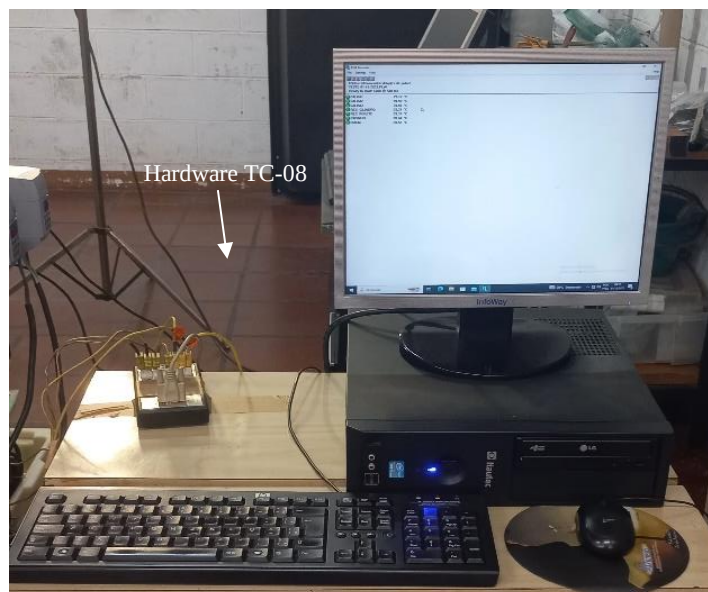
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SINAL E DADOS DOS TERMOPARES

O processo para a realização do experimento começou com a limpeza e organização do laboratório onde foi realizado o experimento. Sendo assim todos os armários e bancadas foram limpos e organizados, separando os materiais úteis e descartando os que não apresentavam mais utilidades, sempre com muito cuidado e atenção para não descartar matérias úteis. Feita a limpeza do local, partimos para a limpeza do fundidor de tiras metálicas limpando e lixando os cilindros que estavam oxidados e lubrificando as engrenagens do equipamento.

Finalizada a limpeza e organização, nos atentamos a calibragem dos termopares utilizados para aferir as temperaturas em lugares selecionados durante o experimento. Com a ajuda da equipe de TI (Tecnologia da Informação) da UNESP o sistema de aquisição de temperatura (composto por um hardware TC -08 da Picolog Technology Limited com oito canais de entrada e um Software Picolog) foi reinstalado, pois apresentava divergências nas temperaturas coletadas. A Figura 11 mostra o sistema de aquisição mencionado anteriormente.

Figura 11 - Sistema de aquisição de temperatura



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.2 AJUSTE DO COLETOR DAS TIRAS POSICIONADO NA ENTRADA DA ESTEIRA DE ROLETES

Notou-se durante o experimento que o funil direcionador que fora acoplado entre os cilindros e os roletes apresentava um grande intervalo de distância em relação aos cilindros o que poderia dificultar a passagem das tiras metálicas. Para desfazer esse problema, foi feito um furo oblongo no suporte do funil para ser ajustado mais próximo aos cilindros do fundidor de tiras, como indicado na Figura 12 (a) e (b).

Figura 12 - Funil direcionador sem ajuste (a); funil direcionador atual com furo oblongo fixado nos roletes para aproximar dos cilindros (b)

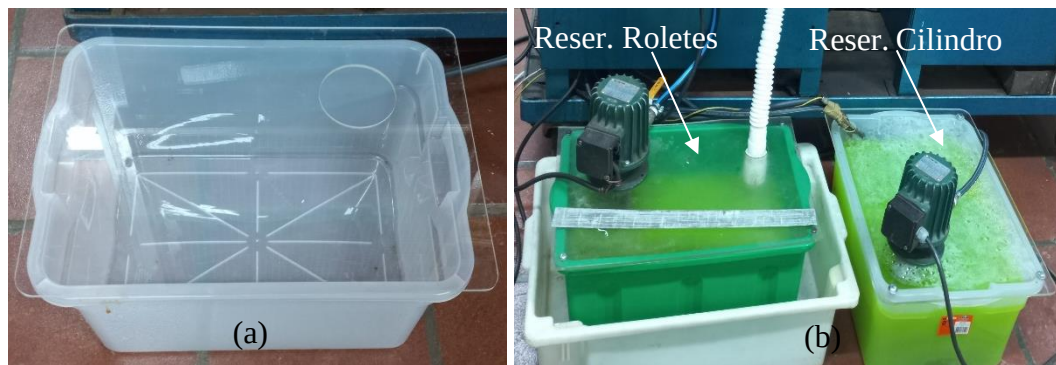


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.3 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DOS CILINDROS E DA ESTEIRA DE ROLETES

O reservatório destinado ao fluido que refrigera a região interna dos cilindros (superior e inferior) do fabricante de tiras, foi instalado ao lado do reservatório destinado ao resfriamento dos roletes como indicado na Figura 13 (a) e (b). Isto facilita a observação da quantidade e qualidade do líquido refrigerante constituído por 1 parte de óleo e 9 partes de água. Este fluido tem a mesma composição do fluido empregado na usinagem de peças.

Figura 13 - Reservatório para o fluido de refrigeração dos cilindros (a);
configuração dos reservatórios dos fluidos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.4 SINCRONIZAÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DOS ROLETES E DOS CILINDROS DO FUNDIDOR DE TIRAS

Para realizar a sincronização das velocidades superficiais dos cilindros dos roletes e dos cilindros do fundidor de tiras, foi utilizado um Tacômetro digital (TDR - 100), que mede as rotações dos cilindros em rpm, a partir de uma dada frequência estabelecida no inversor de frequência. Este processo foi repetido várias vezes até se obter dados suficientes para se levantar uma curva de calibração relacionando a velocidade superficial do cilindro com a frequência emitida pelo inversor. A Figura 14 (a) e (b), mostram o inversor instalado no equipamento e o Tacômetro utilizados no experimento.

Figura 14 - Tacômetro (a); inversor de frequência(b)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Durante a realização da coleta de dados para sincronia das velocidades, notou-se que o primeiro rolete (mais afastado do cilindro do fundidor de tiras) rotacionava em uma velocidade diferente dos demais e não poderia ser tomado como referência para a coleta de dados. O primeiro rolete está posicionado uma maior engrenagem (28 dentes) para transmitir o movimento para as engrenagens menores do sistema de roletes (12 dentes). Sendo assim o rolete tomado como referência foi o segundo rolete da esteira. A Figura 15, indica o rolete utilizado como referência para coleta de dados.

Figura 15 - Medições das rotações dos roletes para sincronização das velocidades

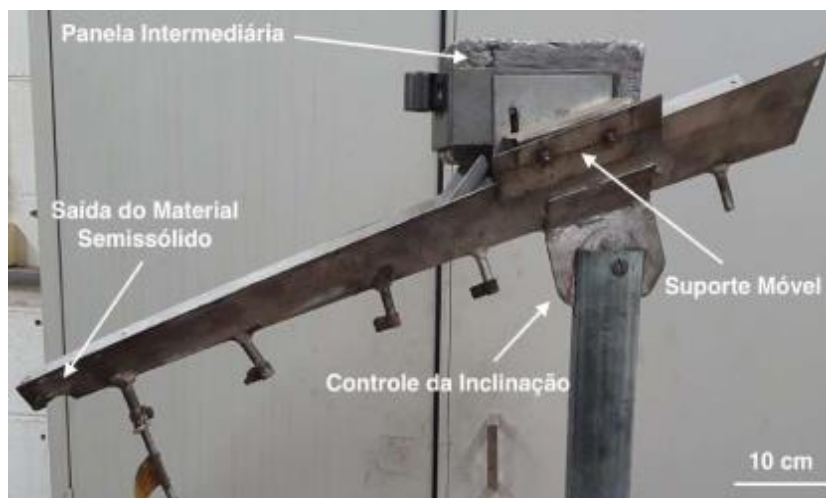


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.5 ARRANJO DO FUNDIDOR DE TIRAS PARA INICIAR A FABRICAÇÃO DE TIRAS METÁLICAS

Finalizado todos os ajustes no equipamento, foi realizado o processo de vazamento do metal líquido para produção de tiras metálicas. Para isso posicionou-se a calha de resfriamento, que tem por função iniciar o processo de solidificação e alimentar o bocal com o material no estado semissólido. As Figuras 16 e 17 mostram os itens mencionados acima.

Figura 16 - Calha de resfriamento



Fonte: Próprio Grupo de Pesquisa.

Figura 17 - Bocal que recebe o metal semissólido



Fonte: Próprio Grupo de Pesquisa.

A fixação do bocal como indicado na Figura 17, foi realizada minutos antes da realização do vazamento. Isso porque este deve estar a uma temperatura de 300 °C para que o contato com o metal semissólido a alta temperatura não o faça trincar e iniciar a solidificação. A Figura 18 ilustra o forno de resistência elétrica (220V, 6600W), utilizado para aquecer o bocal, próximo ao fundidor de tiras.

Figura 18 - Forno utilizado para aquecer o bocal



Fonte: Próprio Grupo de Pesquisa.

Aproximadamente 1505g da liga de alumínio 6061 foi fundida em outro forno de resistência elétrica (EDG10P-S) como indicado na Figura 19. O forno foi acionado para estabilizar a uma temperatura de 900 °C. Com o material fundido na temperatura mencionada, o cadinho foi transportado próximo ao fundidor de tira. A primeira etapa da preparação da liga de Al 6061 fundida foi a retirada de escória. Em seguida foi adicionado o refinador de grão TIBAL (Al-5%Ti-1%B) com massa de 1,505g num sino de imersão dentro da massa fundida da liga de Al 6061 no cadinho. A quantidade do refinador de grão foi de 0,1% da massa total da liga fundida de acordo com a literatura (AMAURO, 2007). Esse material adicionado agirá como refinador de grãos nas tiras metálicas fabricadas para evitar a formação de trincas. Assim o vazamento foi realizado a uma temperatura de 750°C, 100°C acima da temperatura *liquidus* (650 °C). Tanto os roletes como os rolos do fundidor de tiras foram acionados para uma velocidade superficial de 0,2m/s.

Figura 19 - Forno utilizado para aquecer a liga metálica de alumínio



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 SINCRONIZAÇÃO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAIS

Para realizar a sincronia das velocidades superficiais foram coletadas as rotações, em rpm, com o auxílio do tacômetro. Assim coletou-se primeiramente as rotações dos cilindros do fundidor de tiras. Os valores foram obtidos da seguinte forma: fixou-se uma frequência no inversor de frequência WEG CFW 08; aferiu o valor da rotação indicada pelo tacômetro. Esse processo foi repetido 10 (dez) vezes a fim de obter a curva de calibração. A Tabela 1, mostra os valores coletados em laboratório. Um procedimento similar foi realizado para obter as rotações dos roletes e estão descritos na Tabela 2.

Tabela 1. Valores de frequência e rotação coletados para os cilindros do fundidor de tiras

Frequências (Hz)	Rotação (rpm)
30,00	23,00 $\pm 0,1\%$
31,00	23,50 $\pm 0,1\%$
32,00	24,10 $\pm 0,1\%$
33,00	25,20 $\pm 0,1\%$
34,00	26,00 $\pm 0,1\%$
35,00	26,80 $\pm 0,1\%$
36,00	28,20 $\pm 0,1\%$
37,00	29,70 $\pm 0,1\%$
38,00	31,40 $\pm 0,1\%$
39,00	32,90 $\pm 0,1\%$

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 2 - Valores de frequência e rotação coletados para os cilindros dos roletes

Frequências (Hz)	Rotação (rpm)
5,00	91,30 $\pm$ 0,1%
6,00	124,00 $\pm$ 0,1%
7,00	130,60 $\pm$ 0,1%
8,00	151,10 $\pm$ 0,1%
9,00	170,80 $\pm$ 0,1%
10,00	191,10 $\pm$ 0,1%
11,00	211,60 $\pm$ 0,1%
12,00	230,80 $\pm$ 0,1%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A partir dos valores coletados na Tabela 1 e 2, e com auxílio da Equação 1 (HALLIDAY & RESNICK, 2010), pode-se calcular os valores das velocidades superficiais para cada frequência, indicados na Tabela 3.

$$V = \pi D f \quad (1)$$

Em que,

V - Velocidade superficial [m/s];

D - Diâmetro do componente analisado [m];

f - Frequência de rotação em Hz do componente;

π – Constante pi ($\approx$ 3,14).

Para utilizar a Equação 1, é necessário transformar as rotações descritas nas Tabelas 1 e 2 em frequências, ou seja, basta dividi-las por 60. Os valores obtidos tanto para os cilindros do fundidor quanto para os cilindros dos roletes estão indicados nas Tabela 3 e 4.

Tabela 3 - Frequências obtidas a partir das rotações dos cilindros do fundidor de tiras

Frequências (Hz)	Rotação (rpm)
0,38	23,00 $\pm 0,1\%$
0,39	23,50 $\pm 0,1\%$
0,40	24,10 $\pm 0,1\%$
0,42	25,20 $\pm 0,1\%$
0,43	26,00 $\pm 0,1\%$
0,45	26,80 $\pm 0,1\%$
0,47	28,20 $\pm 0,1\%$
0,50	29,70 $\pm 0,1\%$
0,52	31,40 $\pm 0,1\%$
0,55	32,90 $\pm 0,1\%$

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 4 - Frequências obtidas a partir das rotações dos cilindros dos roletes

Frequências (Hz)	Rotação (rpm)
1,52	91,30 $\pm 0,1\%$
2,07	124,00 $\pm 0,1\%$
2,18	130,60 $\pm 0,1\%$
2,52	151,10 $\pm 0,1\%$
2,85	170,80 $\pm 0,1\%$
3,19	191,10 $\pm 0,1\%$
3,53	211,60 $\pm 0,1\%$
3,85	230,80 $\pm 0,1\%$

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Também foram medidos, com o auxílio de um paquímetro de precisão de $\pm 0,05\text{mm}$, os diâmetros dos cilindros do fundidor de tiras e dos roletes como indicados na Tabela 5.

Tabela 5 - Diâmetro do cilindro do fundidor e do rolete

Diâmetro do cilindro do fundidor (mm)	Diâmetro do cilindro do rolete (mm)
117,80 $\pm$ 0,05	24,10 $\pm$ 0,05

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Agora podemos obter as velocidades superficiais dos cilindros (fundidor de tiras e roletes), utilizando a Equação 1. Lembrando que o objetivo é obter uma relação entre as velocidades superficiais dos cilindros com as frequências emitidas pelos inversores. Os valores calculados estão indicados nas Tabelas 6, para o fundidor de tiras e Tabela 7, para os roletes.

Tabela 6 - Velocidades superficiais dos cilindros do fundidor de tiras

Velocidade superficial fundidor (m/s)	Frequência (Hz)
0,14	30,00
0,14	31,00
0,15	32,00
0,16	33,00
0,16	34,00
0,17	35,00
0,17	36,00
0,18	37,00
0,19	38,00
0,20	39,00

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

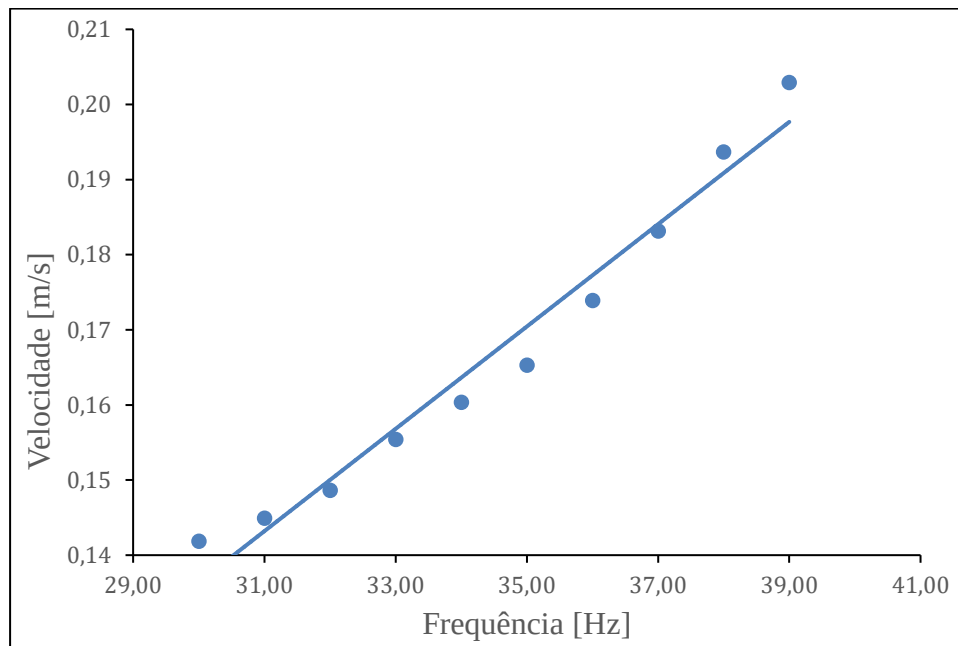
Tabela 7 - Velocidade superficial dos cilindros do rolete

Velocidade superficial roletes (m/s)	Frequência (Hz)
0,12	5,00
0,16	6,00
0,16	7,00
0,19	8,00
0,22	9,00
0,24	10,00
0,27	11,00
0,29	12,00

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

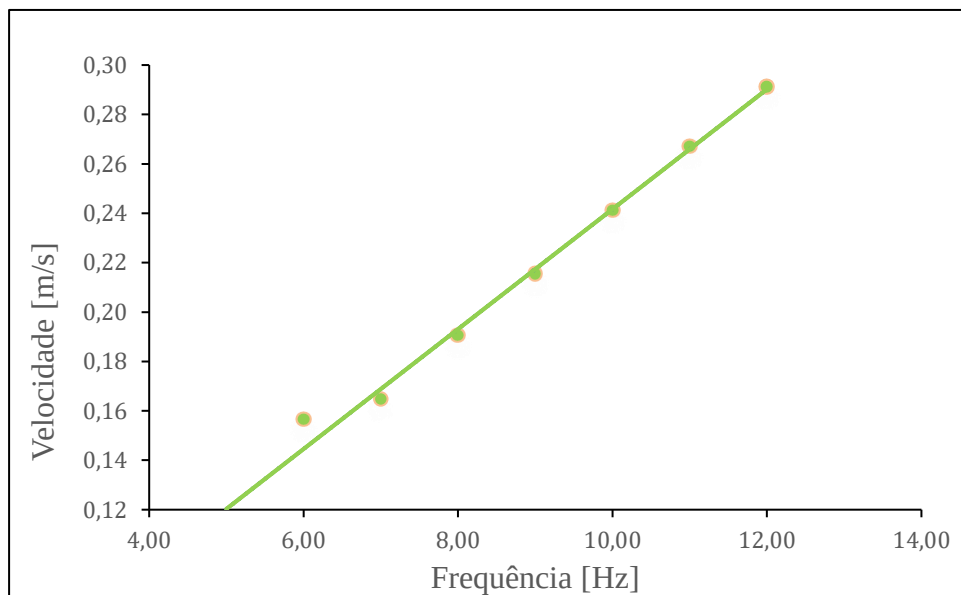
A partir das Tabelas 6 e 7, foi possível construir as curvas de calibração dos inversores, para assim, obter a equação da reta e poder calcular a frequência adequada para a velocidade superficial de 0,2m/s. As curvas foram construídas com a auxílio do software Excel e estão representadas nas Figuras 20 e 21, sendo a primeira referente ao fundidor de tiras e a segunda aos roletes.

Figura 20 - Curva de calibração do inversor de frequência do fundidor de tiras.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 21. Curva de calibração do inversor de frequência dos roletes.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Obtida as curvas de calibração, podemos agora calcular a equação da reta para o fundidor de tiras (Eq.2) e para os roletes (Eq. 3). Essas equações nos permitem sincronizar as velocidades superficiais dos cilindros do fundidor e dos roletes, diminuindo assim as trações no material processado no fundidor de tiras.

$$V_{fund} = 0,0068F_{fund} - 0,0679 \quad (2)$$

Sendo:

V_{fund} – Velocidade superficial no fundidor de tiras.

F_{fund} – Frequência do inversor referente ao fundidor.

$$V_{rol} = 0,0243F_{rol} - 0,001 \quad (3)$$

Sendo:

V_{rol} – Velocidade superficial no rolete.

F_{rol} – Frequência do inversor referente ao rolete.

Obtidas as Equações 2 e 3, pode-se calcular os valores das frequências para cada inversor dado uma velocidade superficial de 0,2m/s. Assim os valores obtidos para o fundidor de tiras e para os roletes foram: 39,39 Hz e 8,27 Hz, respectivamente.

5.2. VAZAMENTO DO METAL METÁLICA NO FUNDIDOR DE TIRAS

Como descrito no procedimento experimental o processo de vazamento foi realizado com o metal a uma temperatura de 750°C, com as velocidades dos cilindros dos roletes e do fundidor de tiras de 0,2m/s.

Ao passar pelo cilindro do fundidor de tiras metálicas, o metal semissólido apresentou dificuldades para ingressar no funil direcionador, localizado entre o fundidor de tiras e os roletes, gerando um congestionamento do metal nesta região, como indicado na Figura 22 (a) e (b). Devido a esta obstrução, o metal não conseguiu fluir pelos roletes o que impossibilitou a formação das tiras metálicas, gerado um acúmulo do material na região entre os rolos do fundidor de tiras e o funil direcionador.

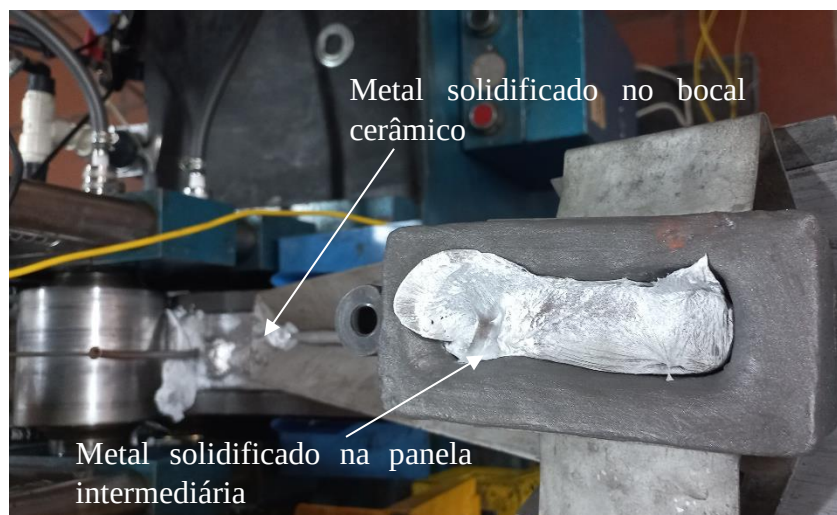
Figura 22 - Acúmulo do metal no funil direcionador: vista lateral
(a) vista frontal (b)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

No decorrer do experimento, devido a obstrução no funil de direcionamento, foi – se acumulando cada vez mais metal sólido na região após os cilindros do fundidor de tiras metálicas. Além disso houve acúmulo de metal sólido no bocal cerâmico e na panela intermediária, devido a falta de fluidez do material, como indicado na Figura 23.

Figura 23 - Vista superior da região de entrada no fundidor de tiras metálicas



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

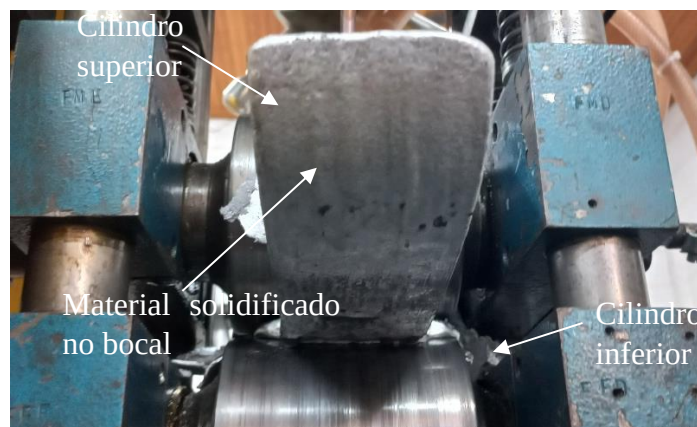
Ao término do processo de vazamento aguardou-se o fundidor de tiras metálicas, principalmente na região dos rolos, atingir a temperatura ambiente para poder retirar o material solidificado e realizar uma inspeção visual no mesmo, assim como no fundidor de tiras metálicas. Analisando o material sólido observou-se que, o metal semissólido era conformado em tiras pelos cilindros do fundidor, sendo direcionada para o funil direcionador onde ficavam congestionadas devido a ineficácia no equipamento em guiá-las para os roletes. As Figuras 24 e 25, mostram como ficou o material após o processo de vazamento.

Figura 24 - Tiras empilhadas no funil de direcionamento



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 25 - Região de ingresso do metal nos cilindros após o vazamento



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5. CONCLUSÃO

Ao término das atividades propostas por esse Trabalho de Conclusão de Curso, observou-se seu aspecto multidisciplinar, pois abrangia todas as disciplinas ministradas no curso de engenharia mecânica, sobretudo na área de matérias. Também é importante ressaltar a aplicação dos conhecimentos práticos empregados pelos técnicos do laboratório, sem os quais, seria muito mais difícil realizar as atividades propostas.

Analisando os resultados obtidos notamos que é possível fabricar tiras metálicas a partir do metal líquido, gerando tiras semiacabadas, de forma mais produtiva do que os métodos convencionais existentes no mercado. Para isso deve-se realizar alguns ajustes no equipamento, sendo o primeiro a elaboração e instalação de um equipamento que possibilite uma melhor transição das tiras entre os cilindros dos fundidores de tiras para os cilindros dos roletes, pois o funil direcionador se apresentou ineficaz durante o processo, gerando acúmulo do metal solidificado na região o que impossibilitou o direcionamento do metal para os roletes. Outro procedimento que deverá ser realizado no equipamento é o seu aterramento, pois durante o experimento o acionamento da máquina e do sistema de arrefecimento gerava interferências nos sistemas de aquisição de temperaturas fazendo com que as temperaturas indicadas não coincidisse com a realidade. Essas sugestões de implementações no fundidor de tiras metálicas podem ser usadas para a melhoria do equipamento, dando continuidade as pesquisas desenvolvidas até o momento, gerando novos trabalhos de iniciação científica, trabalhos de conclusão de curso e pós-graduação.

REFERÊNCIAS

- AMAURI, G. **Solidificação Fundamentos e aplicações**. 2ª. ed. CAMPINAS: UNICAMP, 2007.
- BESSEMER, H. **MANUFACTURE OF IRON AND STEEL**. 49053, 25 julho 1865.
- DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª. ed. Rio de Janeiro : Guanabara Dois, v. II, 1981. 660 p.
- FERREIRA, L. V. G. **FABRICAÇÃO DE TIRAS METÁLICAS DE ALUMÍNIO POR FUNDIÇÃO CONTÍNUA RECICLANDO LATAS DE ALUMÍNIO PARA BEBIDAS**. Unesp. Ilha Solteira, p. 81. 2020.
- HAGA, T. SEMISOLID STRIP CASTING USING A TWIN ROLL CASTER EQUIPPED WITH A COOLING SLOPE. **Journal of Materials Processing Technology**, dezembro 2002. 558-561. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(02\)00765-3](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(02)00765-3)>.
- HALLIDAY & RESNICK. **Fundamentos de Física**. 9ª. ed. Rio de Janeiro: GEN, v. I, 2010.
- HAZELETT, R. W. THE PRESENT STATUS OF CONTINUOUS CASTING BETWEEN TWO MOVING BELTS. [S.l.]: aise year book, v. 43, 1966. p. 105-110.
- SANCHES, G. H. **ESTEIRA DE ROLETES TRANSPORTADORA POSICIONADA NA SAÍDA DO FUNDIDOR DE TIRAS**. Unesp. Ilha Solteira, p. 34. 2020.
- VENEZIANO , B. **INSTRUMENTAÇÃO DA ESTEIRA DUPLA DE ROLETES POSICIONADA NA SAÍDA DO FUNDIDOR DE TIRAS PARA O ARRASTE CONTÍNUO DA TIRA METÁLICA**. Unesp. Ilha Solteira, p. 52. 2021.
- YAMASSAKI, M. I. **FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO METALOGRAFICA E MECÂNICA DE TIRAS DE LIGAS METÁLICAS FUNDIDAS E TIXOLAMINADAS NO ESTADO SEMI-SÓLIDO DE DIFERENTES INTERVALOS DE SOLIDIFICAÇÃO**. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Ilha Solteira, p. 298. 2008.